

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](http://www.laka.org) | [info@laka.org](mailto:info@laka.org) | Ketelhuisplein 43, 1054 RD Amsterdam | 020-6168294

# **Kern ? energie**

- **overzicht van problemen**
- **gevolgen kerncentrale in  
eemsmondgebied**
- **invloed van straling op  
organisme**

ENERGIEGROEP NOORD-NEDERLAND

p/a: Chemische Laboratoria  
Zernikelaan, Paddepoel  
Groningen

P E R S B E R I C H T

De Energiegroep Noord-Nederland, bestaande uit 25 onderzoekers voornamelijk vanuit de Rijks-universiteit Groningen, heeft een rapport uitgebracht over kernenergie.

Zij komen in dit rapport tot de konklusie dat invoering van kernenergie op dit moment zeer zeker nog onaanvaardbaar is.

De opzet van het rapport is een breed publiek te bereiken. De samenstellers hebben met het oog hierop geprobeerd de problemen ook voor niet-ingewijden duidelijk te maken.

Ook beperken zij zich niet tot een deel van het atoomvraagstuk, maar wordt het zeer uitgebreid behandeld.

Uitvoerig wordt ingegaan op de mogelijke konsekwenties die kernenergie met zich meebrengt. Als voorbeeld zijn door de groep de gevolgen van een ongeluk met een 1000 MWe kerncentrale in het Eemshavengebied onderzocht. Deze gevolgen kunnen ronduit desastreus genoemd worden.

Het rapport is verkrijgbaar door overmaking van f2,50 (+ f2,75 verzendkosten) op giro 3602829 t.n.v. J.H. Apotheker te Groningen..

# KERNENERGIE?

EEN OVERZICHT VAN DE PROBLEMEN ROND KERNENERGIE MET EEN STUDIE OVER DE  
GEVOLGEN VAN DE VESTIGING VAN EEN KERNCENTRALE BIJ DE EEMSMOND

Uitgave: ENERGIEGROEP NOORD-NEDERLAND

Korrespondentie-adres:   Energiegroep Noord-Nederland  
Chemisch Laboratoria  
Zernikelaan, Paddepoel  
Groningen

Dit rapport is te bestellen door overmaking van f. 2,50 + f. 2,75  
verzendkosten op giro 3602829 t.n.v. J.H. Apotheker te Groningen.

I N H O U D S O P G A V E

|                                                          | blz. |
|----------------------------------------------------------|------|
| Voorwoord                                                | 4    |
| Hoofdstuk I Inleiding                                    | 7    |
| Hoofdstuk II Energieproblematiek                         | 8    |
| Hoofdstuk III Informatie Eemscentrale                    | 10   |
| Hoofdstuk IV Werking Kerncentrales                       | 14   |
| Hoofdstuk V Thermische Verontreiniging                   | 25   |
| Hoofdstuk VI Radio-actieve Verontreiniging               | 32   |
| Hoofdstuk VII Invloed van Straling op het Organisme      | 37   |
| Hoofdstuk VIII Transport van Radio-actief Afval          | 42   |
| Hoofdstuk IX Opwerking van Radio-actief Afval            | 46   |
| Hoofdstuk X Opslag van Radio-actief Afval                | 53   |
| Hoofdstuk XI Ongelukken met Kerncentrales                | 59   |
| Hoofdstuk XII Polemologische Implikaties van Kernenergie | 71   |
| Hoofdstuk XIII Alternatieve Energiebronnen               | 79   |
| Hoofdstuk XIV Evaluatie                                  | 86   |
| Appendices                                               | 89   |
| Appendix A Invloed van Straling op het Organisme         | 90   |
| Appendix B Literatuur                                    | 139  |
| Appendix C Woorden- en Begrippenlijst                    | 146  |
| Errata                                                   | --   |

## V O O R W O O R D

Medio 1973 kwam aan de Universiteit van Groningen -vnl. aan de subfakulteit Scheikunde- een werkgroep tot stand met het doel de gang van zaken rond de invoering van kernenergie kritisch te bezien. Gezien het feit dat er o.i. weinig voorlichting werd gegeven en dat deze, indien al aanwezig, zeer eenzijdig pro kernenergie was, heeft de werkgroep het als haar taak gezien te pogen de informatiekloof enigzins te verkleinen, anderzijds te trachten nieuwe informatie aan te dragen. Dit rapport is het resultaat van deze poging. De nieuwe informatie wordt voornamelijk aangedragen in een apart gedeelte: "Invloeden van radioactieve straling op het organisme", appendix A. Dit deel staat in zekere zin los van de rest van het rapport, aangezien het hier een erg specialistisch onderwerp betreft dat geschreven werd door de T. Knottnerus en S.J. van Luyk.

De werkgroep is zich er terdege van bewust dat er nog vele onvolkomenheden aan het rapport kleven, desalniettemin hoopt zij met deze uitgave een waardevolle bijdrage te leveren in de discussies rond de invoering van kernenergie.

De samenstellers zijn veel dank verschuldigd aan allen die deze uitgave hebben mogelijk gemaakt. In het bijzondere danken zij de heren P. Boskma en W.A. Smit voor hun waardevolle adviezen en mevrouw B.H. Kuiper-Oosting, de heren J. Helmantel en P. Lako voor hun assistentie bij de technische uitvoering.

Overname uit dit rapport is bij voorbaat toegestaan, mits onder bronvermelding. Wij stellen het echter op prijs een kopie van een dergelijke overname te ontvangen.

Groningen, april 1976

De samenstellers

Aan de tot standkoming van dit rapport werkten mee:

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| J.H. Apotheker  | G. van Dijk          |
| R.E. Egbers     | J.J. Hallers         |
| G.A. Jaeckel    | G. Kingma            |
| T. Knottnerus   | J.G. Koops           |
| G. van der Laan | Y.C.W. van der Leeuw |
| S.J. van Luyk   | D. van der Meyden    |
| D.H. Meijer     | L.A. Meyer           |
| O. Omta         | R. Postma            |
| R.W. Soer       | D.A. Stoppelenburg   |
| G. Tans         | W. Tichelaar         |
| C.T. Uitham     | G. Versteegh         |
| H.J.M. de Vries | M. van der Wijk      |
| J. Woldring     |                      |

## Hoofdstuk I INLEIDING

In onze samenleving blijft de vraag naar energie steeds maar stijgen, terwijl blijkt dat de hoeveelheid aardgas, aardolie en steenkool beperkt zijn. Invoering van kernenergie zou het dreigende tekort aan voldoende en betaalbare energie kunnen opvangen. Bovendien het feit dat die beperktheid vooralsnog meevalt (er is b.v. nog voor ca. 200 jaar steenkool) staat nooit ter discussie of we wel steeds meer energie nodig hebben.

De besluitvorming rond de invoering van kernenergie is beperkt tot een kleine groep. De belanghebbenden drukken sterk hun stempel op de discussie over de voor- en nadelen van kernenergie. Ze beschikken over voldoende middelen om hun standpunt de nodige publiciteit te geven.

Een aantal mensen, waaronder vele wetenschappers, heeft duidelijke twijfels over de wenselijkheid van deze nieuwe technologie (recentelijk bleek dit nog uit de ingezonden advertentie ondertekend door ca. 1200 wetenschapsmensen). Deze groep mensen beschikt in tegenstelling tot degenen, die belang hebben bij de invoering van kernenergie over weinig middelen (tijd en geld) om hun standpunt kenbaar te maken.

De voorlichting over kernenergie blijft maar al te vaak beperkt tot een oppervlakkige opsomming van voor- en nadelen. Wij meenden dan ook dat er behoefte zou zijn aan een hoeveelheid achtergrond informatie en in dit rapport zullen wij proberen de lezer op een begrijpelijke wijze in te lichten over de verschillende aspecten, die de eventuele invoering van kernenergie met zich kenmerken. Ruwweg is het mogelijk deze aspecten in de volgende driedeling onder te brengen:

1. Natuurwetenschappelijk/Technologisch: Is de technologie van de kernenergie voldoende veilig en betrouwbaar. Hiermee hangen samen problemen rondom de kans op een ongeluk, de verwerking en opwerking van afval enz.
2. Medisch/Biologisch: Kerncentrales zijn minder efficiënt dan konventionele (op fossiele brandstoffen gestookte) centrales. Dit betekent dat ze meer afvalwarmte produceren. Wat zijn de gevolgen hiervan en kunnen ze ondervangen worden? Afgezien van eventuele ongelukken brengt de invoering van kernenergie een verhoging van de (reeds van nature aanwezige) achtergrondstraling met zich mee. Wat zijn de effecten van een verhoging van de stralingsbelasting op een levend wezen i.h.b. de mens? Zijn de risico's aanvaardbaar?
3. Maatschappelijk: Invoering van kernenergie vereist een aanpassing van de samenleving. Het brengt o.a. gevaren van sabotage met zich mee. Bovendien zijn uit het gebruikte materiaal betrekkelijk gemakkelijk eenvoudige kernwapens te vervaardigen. Is het ethisch verantwoord onze toekomstige generaties op te scheppen met afval waar duizenden jaren op gelet moet worden?

Mede als gevolg van onze achtergrond zullen in dit rapport de eerste twee punten meer aandacht krijgen dan het laatste.

Afgezien van de vraag hoe de energieproblematiek kon ontstaan welke in hoofdstuk II behandeld wordt, zullen we in dit rapport ons bezig houden met de problematiek welke een vestiging van een kerncentrale aan de Eemsmond met zich mee zal brengen.

Op de problemen rond de beslissingen op bestuurlijk niveau zal in hoofdstuk III ingegaan worden.

In hoofdstuk IV zullen we de werking van kerncentrales verklaren en we zullen de natuurkundige principes die eraan ten grondslag liggen beschrijven. Verder zullen we de verschillende soorten reaktoren met elkaar vergelijken.

Een probleem dat iedere elektriciteitscentrale kenmerkt, maar dat in versterkte mate geldt voor kerncentrales, is het probleem van de afvalwarmte. Er is op het ogenblik in de biologie een discussie gaande omtrent de gevolgen van opwarming van het oppervlaktewater. We zullen hier in hoofdstuk V dieper op ingaan. Aangezien de Eemsmond deel uitmaakt van het over de gehele wereld als uniek erkende Waddengebied hebben wij gemeend extra aandacht hieraan te moeten geven.

Een van de meest in het oog springende kenmerken is dat invoering van kernenergie hoe dan ook tot een verhoging van de achtergrondstraling leidt. Dit als gevolg van de kontinulozingen van in bedrijf zijnde centrales en opwerkingsfabrieken. Hierop wordt in hoofdstuk VI ingegaan. De mogelijke gevaren die ontstaan voor levende wezens i.h.b. de mens bij zo'n verhoging over lange termijn zullen in hoofdstuk VII (en zeer uitgebreid in appendix A) behandeld worden.

Een verder kenmerk is dat het op grote schaal in gebruik nemen van kerncentrales een aantal probleemgebieden levert die niet alleen tot de centrales beperkt blijven. Zo, vallen de gevaren van grootscheepse olietransporten in het niet bij die van splijtstoftransporten (b.v. van centrale naar opwerkingsfabriek). De transportproblemen zullen in hoofdstuk VIII ter sprake komen. De soorten van opwerking en de problemen daarbij in hoofdstuk IX.

De laatste stap in de kernenergiecyclus is het ergens deponeren van produkten welke niet meer nodig zijn: radioactief afval. De zeer belangrijke problemen die dit met zich meebrengt (en welke tot nu toe geenszins als opgelost beschouwd kunnen worden) zullen besproken worden in hoofdstuk X.

Wij hebben als werkgroep gemeend nader in te moeten gaan op de tot nu toe niet te overziene gevolgen van een ongeluk, toegespitst op de Eemsmond. Dit en de risico's welke hiermee samenhangen worden behandeld in hoofdstuk XI.

Kernenergie heeft, wanneer ingevoerd, hoogstwaarschijnlijk verstrekkende gevolgen voor de wereldvrede. Met name de wetenschap van de polemologie houdt zich hiermee bezig, vandaar de titel van hoofdstuk XII.

In hoofdstuk XIII hebben we gepoogd een overzicht te geven van de huidige stand van zaken bij het onderzoek naar alternatieve energiebronnen.

Tot slot zullen we in hoofdstuk XIV (samenvatting en evaluatie) de konklusies die in dit rapport besloten liggen naar voren halen en bespreken.

## Hoofdstuk II ENERGIEPROBLEMATIEK

Het inkomen aan energie van de aarde bestaat uit zonnestraling (99,98 %), warmte uit het inwendige van de aarde en getijdenenergie te danken aan het aantrekkingsstelsel tussen aarde, maan en zon. In de loop van de geschiedenis is een gedeelte van deze energietoevoer opgeslagen in de vorm van fossiele brandstoffen. We noemen dit kapitaal.

De nog winbare hoeveelheden fossiele brandstoffen zijn (1):

|                         |                               |
|-------------------------|-------------------------------|
| kolen                   | 56.000 x 10 <sup>12</sup> kWh |
| aardolie                | 3.250 "                       |
| aardgas                 | 2.940 "                       |
| teerzanden en olieeleen | 830 "                         |

In hoeverre deze getallen juist zijn, willen wij in het midden laten. Ze dienen er alleen maar toe om een beeld te vormen over de omvang van het kapitaal.

Tot op heden hebben wij onze energie alleen betrokken uit het kapitaal. Vooral de laatste eeuw is het energieverbruik sterk toegenomen, enerzijds vanwege de (exponentiële) toename van de bevolking, anderzijds vanwege de hogere ontwikkeling van de samenleving. Dat een hogere ontwikkelde samenleving meer energie verbruikt kan men zien aan onderstaande tabel:

We kunnen het energieverbruik per hoofd per dag stellen op (2):

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| vóór de agrarische revolutie               | 4.000 kcal |
| na de agrarische revolutie                 | 12.000 "   |
| na de industriële revolutie (1875, Europa) | 70.000 "   |
| na de technologische revolutie (1970, VS)  | 230.000 "  |

We kunnen in de energieproblematiek drie verschillende aspecten onderscheiden:

1) De fossiele brandstoffen worden gewonnen in een beperkt aantal landen. Het Westen voorziet voor 70 % in zijn primaire energiebehoefte door deze in de vorm van olie of gas van politiek "onbetrouwbare" landen, voornamelijk het Midden-Oosten, te betrekken.

De verdeling van de fossiele brandstoffen over de verschillende landen is als volgt (3):

| landen                | olie(%) | gas(%) | kolen(%) |
|-----------------------|---------|--------|----------|
| West-Europa           | 1       | 10     | 5        |
| VS                    | 9       | 20     | 51       |
| USSR, O-Europa, China | 12      | 32     | 40       |
| Midden-Oosten         | 62      | 20     | --       |
| Overige               | 16      | 18     | 4        |

2) We betrekken de energie grotendeels uit het kapitaal. Hierop wordt dus sterk ingeteerd.

3) Fossiele brandstoffen tasten het milieu aan zowel bij winning als transport als verbruik. Dit gebeurt d.m.v. landschapsaantasting, watervervuiling, thermische vervuiling, luchtverontreiniging.

Op het ogenblik is het zo dat men economische factoren in het algemeen zwaarder laat wegen dan milieuaspekten. In de toekomst dienen vooral deze laatste aspecten een ruimere aandacht te krijgen.

Naast beperking van het gebruik kan men het energieprobleem oplossen door het aanwenden van nieuwe energiebronnen. Veel onderzoekers zien in het toepassen van kernsplijting de oplossing. Dat dit de crisis slechts zeer ten dele oplost, wordt in de rest van dit rapport aangetoond. Tevens vermelden wij alternatieve energiebronnen, die wellicht een vollediger oplossing kunnen bieden. Punten waarop men nieuwe energiebronnen dient te beoordelen zijn:

1. kapitaal of inkomen
2. materiaalverbruik, mogelijkheden tot recycelen
3. milieuaspekten
4. energie-rendement
5. economisch rendement
6. sociale factoren
7. politieke factoren, militaire implicaties.

#### Referenties:

1. T.T. Hoog, STT publikatie 12.
2. Energie, Wetenschap en Samenleving, jan. 1973.
3. D.G.H. Latzko, Alternatieven voor energie-opwekking en transport, De Ingenieur 85, blz. 604 (1973).
4. T.R. Seldenrath, Het Nederlandse Energiebeleid, De Ingenieur 84, blz. A 551 (1972).
5. A.W. de Ruyter, Energieverbruik en mogelijke knelpunten, De Ingenieur 85, blz. 884 (1973).

### Hoofdstuk III    INFORMATIE EEMSCENTRALE

#### I. Algemeen.

##### A. Inleiding.

Op een aantal ontwikkelingen, die van belang kunnen zijn m.b.t. de vestiging van een kernenergiecentrale in het Eemshavengebied wordt in dit hoofdstuk nader ingegaan. Dat de beschouwing in het algemeen weinig gedetailleerd is, hangt o.a. samen met het feit dat de Energienota nog niet plenair in het parlement is behandeld. In februari 1976 is de definitieve besluitvorming omtrent de verdere uitbouw van het kernenergiepotentieel uitgesteld. Daarop vooruitlopend is in het Structuurschema Electriciteitsvoorziening een waardering van een vijftal mogelijke vestigingsplaatsen van een 1000 MWe kerncentrale gegeven. Ook de Eemshaven is hierbij als mogelijke vestigingsplaats aangenomen.

De volgende overwegingen hebben een rol gespeeld in de plannen voor de vestiging van een kernenergiecentrale aan de Eemsmond:

- 1) De beschikbaar geachte koelwatercapaciteit
- 2) De lage bevolkingsdichtheid in het gebied
- 3) De situatie ten aanzien van het landelijk koppelnet
- 4) De mogelijke vestiging van een energie-intensieve industrie
- 5) De gang van zaken rond het verkrijgen van aardgaskontrakten voor nieuw te installeren vermogen
- 6) De ontwikkeling van de verschillende brandstoffen

Dit alles moet men zien tegen de achtergrond van de prognoses omtrent de groei van het elektriciteitsproductievermogen en het aandeel dat de kernenergie daarin zou moeten hebben.

Voordat we bovenstaande punten behandelen, lijkt het zinvol een vluchtige blik op de Oostelijke oever van de Eems te werpen. In Noord-West Duitsland zijn kernenergiecentrales in bedrijf, in aanbouw of gepland langs de Elbe, de Weser en aan de Duitse zijde van de Eemsmond. De Nord-West-Deutsche Kraftwerke A.G. heeft plannen om in de periode 1980-1990 ongeveer 8000 MWe aan nieuw vermogen te installeren in Noord-West Duitsland (1). Vergeleken met de rest van de Bondsrepubliek zal het aandeel van de kernenergie hierin groter zijn (2).

De mogelijke bouw van een kernenergiecentrale aan de Nederlandse zijde van de Eemsmond is in het verleden een aantal keren ter sprake gekomen. Bij het heien van de eerste paal van de 600 MWe gasgestookte eenheid van de Eemscentrale werd mogelijke introductie van kernenergie door een directeur van de E.G.D. aangeroerd (3). Een tijdstip werd hierbij niet genoemd. Hetzelfde krantenartikel vermeld ook, dat tegen het jaar 2000 de Eemscentrale een vermogen van 5000 MWe zal hebben. Onlangs werden soortgelijke mededelingen gedaan tijdens een pers-

exkursie naar de eerste eenheid van de Eemscentrale, georganiseerd door het havenschap Delfzijl. Technici, werkzaam bij de E.G.D., verwachten dat de tweede eenheid van de Eemscentrale nukleair zal worden (4) en dat rond 1980 de capaciteit 1000 MWe zal bedragen. De uiteindelijke beslissing over de toepassing van kernenergie zal nog wel enige tijd op zich laten wachten.

#### B. De Groei van de Elektriciteitsproductie.

Van 1962 tot 1973 is het landelijk elektriciteitsproductievermogen meer dan verdubbeld. Volgens recente prognoses, zoals ook aangegeven in het Structuurschema Electriciteitsvoorziening wordt met een zekere afremming van de groei van het elektriciteitsverbruik in de toekomst rekening gehouden. Over het aandeel van kernenergie in de toekomstige groei van het productievermogen geeft de Energie-nota aan, dat in de tachtiger jaren een drietal 1000 MWe kerncentrales noodzakelijk zijn. Hoe in de verdere toekomst na 1985 de introductie van kernenergie zal plaatsvinden is onduidelijk.

#### C. Nieuwe Vestigingsplaatsen; Koppelnetten.

De elektriciteitsproductiebedrijven werken nauw samen bij het tot stand komen van nieuwe uitbreidingen; er wordt centraal overleg gepleegd in het kader van de S.E.P., waar en wanneer nieuwe productie-eenheden zullen worden opgesteld. Het Ministerie van Economische Zaken neemt de uiteindelijke beslissing.

Deze nieuwe eenheden zijn meestal groter dan voor regionale behoeften nodig is; soms is dit met het oog op de vestiging van een energie-intensief chemisch of metallurgisch bedrijf. De keuze van vestigingsplaatsen zal in de nabije toekomst voor een belangrijk deel bepaalde gaan worden door de beschikbaarheid van voldoende koelwatercapaciteit (5). Zo lijkt de toepassing van lichtwater-reaktoren bij de nieuw te bouwen eenheid bij Dodewaard i.v.m. de sterke thermische belasting van de Rijn uitgesloten (6).

De energie-uitwisseling tussen de elektriciteitsbedrijven wordt verzorgd door een koppelnet. Een belangrijke koppelfunctie vervult daarbij het landelijke 380 kV koppelnet, dat eind 1972 verbonden is met het regionale 220 kV net. De Eemscentrale zal dan worden aangesloten op het Noordwestelijke landelijke koppelnet via het 220 kV net.

#### II. Het Eemshavengebied.

In 1968 werd een begin gemaakt met voorstudies voor een vestiging van een nieuwe centrale aan de Eemmond; om in de uiteindelijke te verwachten behoefte aan ruimte te voorzien werd besloten een terrein van 100 à 150 ha te reserveren. Rond 1970 werd besloten aan de Eems een centrale te bouwen, waarvan de eerste eenheid een vermogen zal hebben van ongeveer 600 MWe. Volgens de voorschriften van de Samenwerkende Elektriciteitsproducenten moet deze eenheid rond 1977 in bedrijf zijn.

Daarbij zal ongeveer 1 miljard m<sup>3</sup> aardgas per jaar nodig zijn.

De vestiging van de 600 MWe centrale in de Eemsmond hing nauw samen met de landelijke en regionale plannen omtrent een energie-intensieve industrialisatie van het Eemsmondgebied. Na de vrij snel gegroeide chemische industrie rond Delfzijl is vanaf het begin der zeventiger jaren de industrialisatie van het Eemsmondgebied "gestokt". Over de verdere ontwikkeling valt op dit moment niet veel meer te voorspellen dan de geruchten over mogelijke vestiging van industrieën welke zo nu en dan opklinken (7).

In de eerste plaats het DSM-komplex, dat een investering van 3 miljard gulden zou gaan vergen. Hoewel DSM vast van plan lijkt haar projekt in het Noorden door te zetten, zijn de laatste tijd opmerkingen te horen van bedrijfszijde over al te trage vergunningsprocedures.

Verder is er sprake geweest van de NSM, een vestiging van het Amerikaanse Herculeskoncern en een chloorpropeenrubberfabriek van de Japanse Dinkagroep. Veelal speelt de energieprijs een belangrijke rol bij dergelijke vestigingen. Het meest sprekend is in dit opzicht de aluminiumfabriek van Aldel welke een groot deel van het produktievermogen, van het regionale elektriciteitsbedrijf op-eist. Evenzo zou de mogelijke vestiging van een magnesiumfabriek, een projekt waarvoor Shell in 1971 al belangstelling had, een groot elektriciteitsproduktie-vermogen eisen. Deze plannen zijn onlangs weer in het nieuws gekomen o.a. door het voornemen van Billiton Delfstoffen een fabriek van magnesiumoxide te vestigen. De recent verschenen Eemshavennota (8) spreekt zich over geen van deze projecten definitief uit; de voorkeur wordt gegeven aan een petrochemische ontwikkeling met DSM als ruggegraat.

Samenvattend is te vermelden dat op dit moment de elektrische konsekwenties van de toekomstige ontwikkeling van de industrialisatie van het Eemshavengebied nauwelijks is te overzien. Gelet op de op dit moment regionaal aanwezige overkapaciteit (de Eemscentrale) is een tendens tot uitbreiding (aluminiumsilicium-karbide), of vestiging van energie-intensieve industrie (magnesium) niet uit te sluiten.

Tenslotte dient nog enige aandacht te worden geschonken aan de specifieke situatie van de elektriciteitscentrales in Groningen. De inrichting van de Helpmancentrale is sterk verouderd, ook de eerste eenheden van de Hunzecentrale zullen aan het eind van de zeventiger jaren vrijwel afgeschreven zijn. Het E.G.D. heeft problemen met de koelwatervoorziening van de bestaande centrales. Het gebruik van aardgas is de afgelopen jaren voor elektriciteitscentrales sterk gestegen. Er mag niet op worden gerekend dat voor na 1978 te bouwen centrales aardgas beschikbaar is. Gelet op de ontwikkeling van de olieprijsen wordt de toepassing van kernenergie door de elektriciteitsproducenten als een steeds aantrekkelijker alternatief gezien.

### III. Konklusies.

Bekeken in het kader van de door de overheid en elektriciteitsproducenten nood-

zakelijk geachte groei van de elektriciteitsproduktie heeft het Eemsmondgebied een aantal aantrekkelijke eigenschappen.

Ten gevolge van de ligging in een omgeving met een relatief lage bevolkingsdichtheid en een omgeving met een relatief grote beschikbaarheid aan koelwater maakt het Eemsmondgebied in vergelijking met andere mogelijke vestigingsplaatsen aantrekkelijk voor de produktie van elektriciteit d.m.v. kernsplitsing.

De stijging van de olieprijsen en de situatie rond de aardgaskontrakten maakt nukleaire brandstof in de ogen van de elektriciteitsproducenten tot een aantrekkelijk alternatief.

In het Eemshavengebied en het gebied rond Delfzijl is verdere energie-intensieve industrialisatie wellicht mogelijk. De elektrische konsekwenties van de industrialisatie zijn op dit moment niet te overzien.

Bij de verdere uitbreiding van de Eemscentrale is de toepassing van kernenergie niet uit te sluiten.

#### Referenties:

1. Nordwestdeutsche Kraftwerke Aktiengesellschaft, Geschäftsbericht 1973, blz. 17.
2. Landes Entwicklungs Program Niedersachsen (1973).
3. Nieuwsblad van het Noorden 28 sept. 1971.
4. id. 4 april 1974.
5. A.H. Lindhout, De toekomstige bouw van kerncentrales in Nederland, Atoomenergie 14, (2), blz. 33 (1972).
6. P.G.E.M., jaarverslag 1972, Arnhem, blz. 13.
7. Ned. Chem. Ind. 17, blz. 370, 3 sept. 1975.
8. Eemshavennota, nota over de economische, planologische en milieutechnische aspecten van de ontwikkeling van het Eemshavengebied, G.S. van Groningen, 1975.

## Hoofdstuk IV WERKING KERNCENTRALES

### I. Fysische Achtergronden.

#### A. Bouw van het Atoom, Terminologie, Notaties.

Teneinde enig inzicht te krijgen in de fysische processen, die plaats vinden bij kernreacties, lijkt het gewenst te beginnen met een beschrijving van het atoom: Een atoom bestaat uit een zware positief geladen kern met daarom heen een aantal lichte negatief geladen elektronen. De kern bestaat op zijn beurt uit een aantal positief geladen protonen en een aantal neutronen (neutraal).

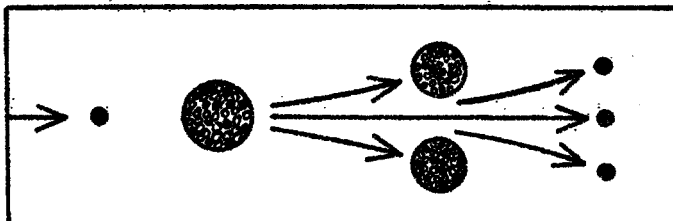


fig. IV-1: Verval van U-235 door beschieting met neutronen.

Protonen en neutronen worden samen nukleonen genoemd. Een proton heeft een lading die even groot is als die van een elektron, maar tegengesteld van teken. Uit het feit dat een atoom als geheel ladingsneutraal is, volgt dat het aantal protonen gelijk is aan het aantal elektronen. Dit aantal bepaalt in hoofdzaak de chemische en fysische eigenschappen van een atoomsoort. Daarom heeft men atomen met hetzelfde aantal protonen dezelfde naam gegeven. Zo werd een atoom met 92 protonen de naam Uranium (U) toegekend, terwijl bijvoorbeeld Plutonium (Pu) 94 protonen bezit. Het bovenstaande houdt niet in dat nu ook alle Uranium-atomen hetzelfde zijn. Zij kunnen onderling namelijk nog verschillen in het aantal neutronen dat ze hebben. Zo bestaan er Uraniumatomen met 141 neutronen, maar bijvoorbeeld ook met 143 en 145 neutronen. Men noemt ze Uranium-isotopen. Ze worden symbolisch onderscheiden door behalve de naam van het atoom (U) en het aantal protonen (92) ook het aantal nukleonen (= protonen + neutronen) te vermelden. Zo krijgt men de volgende Uranium-isotopen:  ${}_{92}^{233}\text{U}$ ,  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . (Het getal 92 wordt ook wel vaak weggelaten, omdat het feit dat het Uranium al impliceert dat het aantal protonen 92 is; men schrijft dan ook wel: U-233 en U-235). Als tweede belangrijke voorbeeld kan waterstof dienen, hierbij treden op de isotopen:  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$  (= deuterium),  ${}^3_1\text{H}$  (= tritium), die allen één proton hebben, maar een aantal neutronen dat achtereenvolgens 0, 1 en 2 is.

#### B. Natuurlijke Radioactiviteit.

In 1896 vond de Franse natuurkundige Becquèreel, dat Uraniumzouten straling uitzenden. Kort daarna vond het echtpaar Curie dat Radium en Polonium deze werking in nog veel sterkere mate vertonen. Elementen die deze straling uitzenden, noemt men radioactief; de uitgezonden straling noemt men radioactieve

straling. Onder de elementen, die in de natuur worden gevonden, treedt radio-activiteit op bij alle elementen met een aantal protonen groter dan 84 en bij enkele elementen met een kleiner aantal bijv. het kalium-isotoop  $^{40}_{19}\text{K}$ .

Het blijkt dat er drie soorten radioactieve straling zijn:

1) alfa-straling

Als voorbeeld kan dienen de reactie  $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + ^4_2\text{He}$ ; hierbij valt met een bepaalde waarschijnlijkheid de Uraniumkern met 92 protonen en 146 neutronen uiteen in een Thorium-atoom met 90 protonen en 144 neutronen en in een lichte Helium-kern bestaande uit 2 protonen en 2 neutronen. Het wordt als het ware met grote snelheid uit de Uranium-kern geslingerd. Door zijn lading (2+) en zijn snelheid heeft het een sterk ioniserende (en daardoor beschadigende) werking op de materie die het passeert of treft.

2) bêta-straling

Voorbeeld:  $^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{234}_{91}\text{Pa} + ^0_{-1}\text{e}$  (= elektron). In de Thorium-kern splitst een neutron zich in een proton en een elektron ( $^1_0\text{n} \rightarrow ^1_1\text{p} + ^0_{-1}\text{e}$ ). Het elektron vliegt hierbij met zeer grote snelheid naar buiten. In de kern van het oorspronkelijke Thorium is een neutron veranderd in een proton, waardoor Protaktinium (Pa) is ontstaan. Het uitgezonden elektron (bêta-straling) heeft in het algemeen een minder sterk ioniserende werking dan een alfa-deeltje, maar kan daarentegen veel dieper in de materie doordringen.

3) gamma-straling

De kern kan in een aangeslagen toestand komen. Dit is een situatie waarin hij meer energie heeft dan normaal. Hij kan deze energie verliezen door elektromagnetische straling uit te zenden. Deze straling noemt men gamma-straling en heeft een zeer groot doordringingsvermogen (gaat bijv. door centimeters dikke loodplaten en meters dik beton). Bij uitzending van deze straling verandert het soort isotoop niet, alleen de energie wordt verlaagd.

Uit de voorbeelden genoemd in 1) en 2) kan men zien dat soms hele reaktieketens optreden. In de gegeven voorbeelden vervalt Uranium via Thorium naar Protaktinium, maar dit vervalt op zijn beurt ook weer enz. Het einde van deze vervalketen van Uranium wordt in dit geval gevormd door  $^{206}_{82}\text{Pb}$  (= lood).

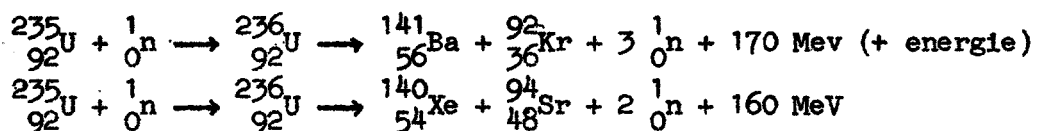
Bovenstaande voorbeelden hebben betrekking op natuurlijke radioactiviteit, dat wil zeggen zo nu en dan valt spontaan een kern uiteen. Het is echter ook mogelijk kunstmatig dit uiteenvallen te bewerkstelligen.

Een belangrijk begrip bij radioactieve straling is de halveringstijd, d.w.z. de tijd nodig om de helft van de kernen die straling uitzenden te laten vervallen tot kernen, die deze straling niet meer uitzenden. Halveringstijden lopen uiteen van miljoenste delen van een seconde tot duizenden jaren. Plutonium bijvoorbeeld heeft een halveringstijd van 24.400 jaar; dit heeft ernstige konsekwenties voor de tijden waarover radioactief afval zal moeten worden opgeslagen, want na ca. 100.000 jaar is nog 1/8 deel van de oorspronkelijke hoeveelheid radioactief materiaal over.

### C. Kernsplijting als Energiebron.

Door kernen te beschieten met alfa-deeltjes, protonen of neutronen kan het gebeuren dat zo'n kern in stukken uiteen valt.

Voorbeelden, die wat de energiewinning betreft belangrijk zijn, zijn de volgende:



Bij beide reacties wordt een neutron in een  ${}_{92}^{235}\text{U}$ -kern geschoten waardoor een zeer kort levende (dus zeer instabiele) isotoop  ${}_{92}^{236}\text{U}$  gevormd wordt, die op twee manieren uiteen kan vallen.

Bij beide reacties komen grote hoeveelheden energie vrij, respectievelijk 170 MeV en 160 MeV ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$ ;  $1 \text{ Joule} = 0,24 \text{ calorie}$ ). Deze hoeveelheden zijn groot gezien het feit dat het hier gaat om het uiteenvallen van slechts één atoom. Als men zich namelijk realiseert dat 235 gram Uranium een hoeveelheid energie kan leveren gelijk aan die van zo'n 2 miljoen kilo steenkool (dit vanwege het feit dat 235 gram Uranium ca.  $6 \times 10^{23}$  atomen bevat).

De energie komt in hoofdzaak vrij in de vorm van kinetische energie van de neutronen, d.w.z. de neutronen hebben een zeer grote snelheid gekregen.

De vraag waar die energie vandaan komt, kan beantwoord worden door eerst de totale massa van de kernen in het linkerlid van de reactievergelijking (= massa  ${}_{92}^{235}\text{U}$  + massa neutron) te vergelijken met de som van de massa's van de eindprodukten (= massa  ${}_{56}^{141}\text{Ba}$  + massa  ${}_{36}^{92}\text{Kr}$  + 3 x massa neutron). Het blijkt dan dat de totale massa in het begin groter is dan de totale massa aan het eind van de reactie. Er is dus blijkbaar massa verdwenen. Einstein heeft aangetoond dat massa en energie gelijkwaardige grootheden zijn en dat "verdwenen" massa omgezet wordt in energie.

Alle soorten kernreacties waarbij het uitgangsgewicht groter is dan de som van de gewichten van de eindprodukten, leveren een energiewinst op.

## II. Kernreactoren, Kerncentrales.

### A. Inleiding.

Een kernreactor is kort gezegd een apparaat waarin kernenergie wordt omgezet in warmte. Deze warmte kan dan weer worden omgezet in elektrische stroom, bijvoorbeeld door middel van een stoomturbine, die een dynamo aandrijft.

Het geheel van een kernreactor, de stoomturbines, de dynamo's en aanverwante apparatuur noemt men een kerncentrale.

De splijtingswarmte wordt door de splijtstof in buisvormige, hermetisch gesloten hulzen van 1 tot 4 meter lengte en een diameter van 1 tot 1,5 cm geproduceerd. Deze warmte wordt afgevoerd door een koelmiddel (gas of vloeistof), dat van beneden naar boven langs de vertikaal opgestelde splijtstofelementen stroomt. Omdat dit koelmiddel door de straling radioactief wordt, is het koelcircuit gesloten. In de zogenaamde warmtewisselaars wordt de warmte van het

primaire koelcircuit afgestaan aan het sekundaire circuit: aan de sekundaire kant van de warmtewisselaars wordt water in stoom omgezet. Deze stoom wordt geleid naar een generator die elektriciteit opwekt. De stoom die zijn arbeid op de turbine verricht heeft, moet worden afgekoeld in een kondensor. Dit gebeurt m.b.v. van buiten aangevoerd koelwater en is de oorzaak van de thermische verontreiniging.

Het rendement, dat bij deze wijze van energieopwekking maximaal kan worden behaald, bedraagt 45%.

Voor de opwekking van kernenergie door splijting heeft men reacties nodig, die aan twee eisen voldoen:

Ten eerste moet de kernreactie een netto energie-resultaat geven. Wat betreft de splijtingsreactie blijken hiervoor voornamelijk zware kernen met een oneven aantal neutronen in aanmerking te komen zoals  ${}_{90}^{231}\text{Th}$ ,  ${}_{92}^{233}\text{U}$ ,  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ,  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  en  ${}_{95}^{242}\text{Am}$ . Hiervan komt alleen  ${}_{92}^{235}\text{U}$  in de natuur voor. De andere genoemde kernen kunnen ontstaan door het invangen van een neutron; bijvoorbeeld:



Ten tweede moeten er bij de splijtingsreactie meerdere neutronen vrijkomen, zoals het geval is bij de al vermelde reactie van  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . Deze neutronen worden gebruikt om weer nieuwe splijtingen te veroorzaken en zo de kettingreactie in stand te houden. Nu veroorzaken echter deze vrijkomende snelle neutronen in Uranium, zoals dit in de natuur voorkomt (dat slechts voor 0,7% uit  ${}_{92}^{235}\text{U}$  bestaat en voor de rest uit  ${}_{92}^{238}\text{U}$ ) geen kettingreactie. Er gaan namelijk te veel neutronen verloren ten gevolge van neveneffecten zoals:

- 1) Een vrijgekomen neutron kan uit het materiaal ontsnappen. Dit gebeurt vooral als de hoeveelheid materiaal te klein is.
- 2) Een vrijgekomen neutron kan door  ${}_{92}^{238}\text{U}$  worden ingevangen, bij dit proces ontstaat dikwijls  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ , vooral als het inkomende snelle neutron zeer bepaalde energien heeft (7 eV, 21 eV, 38 eV).
- 3) Tenslotte kan een neutron in een  ${}_{92}^{235}\text{U}$ -kern dringen zonder splijting te veroorzaken. Dit gebeurt in 16% van de gevallen als de neutronen langzaam (thermisch) zijn, bij snelle neutronen treedt dit proces minder op.

Om bovengenoemde redenen moet het aantal neutronen (n) dat bij elke splijting vrijkomt beduidend groter zijn dan 1.

De nukleaire brandstof bestaat voor een bepaald (klein) percentage uit een direkt splijtbaar isotoop. De rest is niet direkt splijtbaar, maar kan echter door het invangen van een neutron wel splijtbaar worden gemaakt. Men kan dus in één proces zowel energieopwekken als nieuwe brandstof kweken. In principe moeten er dan bij elke splijting twee neutronen vrijkomen: één om een nieuwe splijting te veroorzaken en één om een onsplijtbaar isotoop te veranderen in een splijtbare. Omdat er verliezen optreden moet n groter dan 2,2 zijn, wil er meer splijtstof gekweekt worden dan er verbruikt wordt: de zogenaamde con-

versiefactor C, d.i.  $\frac{\text{aantal gevormde splijtbare kernen}}{\text{aantal gespleten kernen}}$ , is dan groter dan 1.

De energie van de neutronen bepaalt voor verschillende splijfstofsoorten het neutronenrendement ( $\phi n$ ), daarom moet bij het gebruik van  $^{235}_{92}\text{U}$  en  $^{233}_{92}\text{U}$  (deze isotoop kan gekweekt worden door neutronenvangst in  $^{232}_{90}\text{Th}$ ) als splijfstof een remstof of moderator (bijv. grafiet, Beryllium of gewoon of licht water) toegepast worden. Door botsingen met de moderator verliezen de neutronen zoveel energie dat ze "thermisch" zijn geworden, d.w.z. de neutronen zijn dan in warmte-evenwicht of thermisch evenwicht met hun omgeving. Alleen van thermische neutronen is de energie voldoende laag om altijd zonder al te grote neutronenverliezen de isotopen  $^{235}_{92}\text{U}$  en  $^{233}_{92}\text{U}$  te kunnen splijten. Bij de splijtbare isotoop  $^{239}_{94}\text{Pu}$  moeten de neutronen juist een hoge energie hebben om splijtingen te kunnen veroorzaken. Bij de keuze van  $^{239}_{94}\text{Pu}$  als splijfstof wordt dan ook geen moderator gebruikt.

Om de kettingreactie in de hand te kunnen houden, worden regelstaven of absorptieplaten van een neutronenabsorberend materiaal (bijv. Cadmium of Borium) gebruikt. Hierdoor is het gemiddeld aantal neutronen, dat bij het splijttingsproces vrijkomt konstant te houden. Als de regelstaven of -platen geheel of gedeeltelijk uit de kern bewogen worden, komen er meer neutronen beschikbaar voor het splijttingsproces en wordt de effectieve vermenigvuldigingsfactor, die de verhouding aangeeft van de aantallen neutronen van twee elkaar opvolgende generaties in de kettingreactie, groter. Als deze faktor gelijk aan 1 is, dan is het reaktorvermogen konstant in de tijd en wordt de reactie kritisch genoemd.

Om de neutronenverliezen zo klein mogelijk te houden, moet de nukleaire brandstof verrijkt worden, d.w.z. het percentage direkt splijtbaar materiaal wordt verhoogd. Dit gebeurt d.m.v. gasdiffusie- of ultracentrifugetechnieken. Bovendien wordt wanneer de reaktor werkt splijttingsprodukten gevormd, waarvan bijv.  $^{135}_{54}\text{Xe}$  en  $^{149}_{62}\text{Sm}$  in sterke mate neutronen absorberen.

Door verrijking is de kettingreactie gemakkelijker op gang te brengen en te houden, omdat in natuurlijk Uranium slechts 1 op 140 atomen uit de splijtbare isotoop  $^{235}_{92}\text{U}$  bestaat.

In verband met de beperkte hoeveelheid "ekonomisch" winbare  $^{235}_{92}\text{U}$  is bij de keuze van een reaktortype de al eerder genoemde konversiefaktor van groot belang. Op grond van deze faktor kunnen verschillende typen kernreactoren beschouwd worden:

#### B. Konverters of Thermische Reactoren.

De konverters hebben een konversiefaktor C kleiner dan 1. Dit zijn reactoren waarbij een moderator nodig is. Bij het ontwerpen van een thermische reaktorkern is het belangrijk een goede moderator-splijfstofverhouding te kiezen. De afmetingen van de splijstofelementen worden zodanig gekozen dat de reaktor onder bedrijfscondities ondergemodereerd is, d.w.z. dat door de aanwezig-

heid van te weinig moderator relatief te weinig neutronen tot thermische energien worden afgeremd. Dit heeft het voordeel dat bij het wegvallen van de moderator de kernreactie stopt.

Belangrijke soorten konverters zijn:

1) De Kokendwaterreaktor (Boiling Water Reactor, BWR), waarvan de kerncentrale van Dodewaard een voorbeeld is.

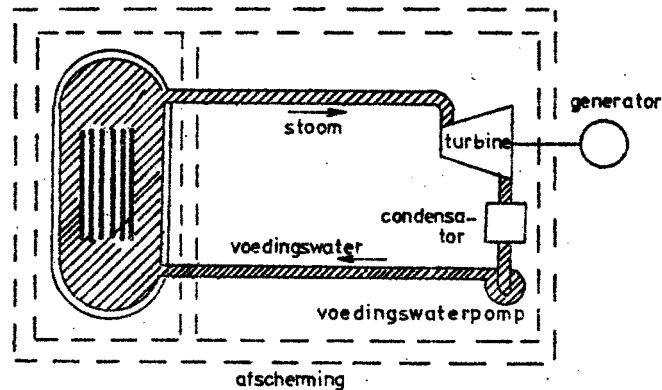


fig. IV-2: Schema Kokendwaterreaktor.

Hierbij is als koelmiddel en moderator licht water gekozen. De reaktorafmetingen zijn vrij bescheiden, waardoor een kompakte bouw mogelijk is: bij een vermogen van 1000 MWe wordt de hoogte van het reaktorvat ongeveer 20 meter en de diameter ca. 6,5 meter. Als splijtstof wordt meestal uraniumoxyde gebruikt. Bij een verrijkingsgraad van 2,7%  $^{235}_{92}\text{U}$  is voor een 600 MWe centrale ongeveer 86500 kg U nodig bij een splijtstofcyclus van 4 jaar: ieder jaar wordt een vierde deel van de splijtstof vervangen. De werkdruk in het vat is 70 atmosfeer; het koelmiddel wordt opgewarmd van ong. 275 tot 285 °C. Hierdoor is het rendement vrij klein: ca. 33%.

Meestal wordt de stoom direkt naar de turbine gevoerd. Boven in het reaktorvat bevindt zich een "stoomdroger", die het water van de stoom scheidt: als het water met de stoom meegaat wordt namelijk het rendement lager. Door de aanwezigheid van de stoomdroger worden bij wijze van uitzondering de regelstaven van onderen de reaktor in bewogen. C is hier gelijk aan 0,6.

2) De Drukwaterreaktor (Pressurized Water Reactor, PWR), waarvan de kerncentrale van Borssele een voorbeeld is.

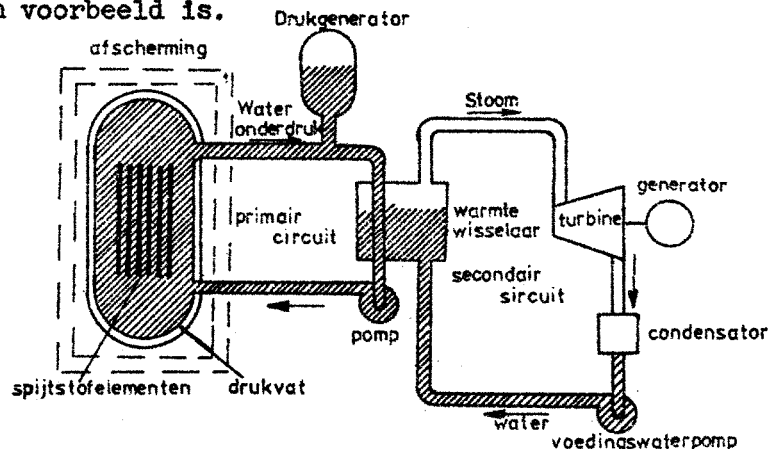


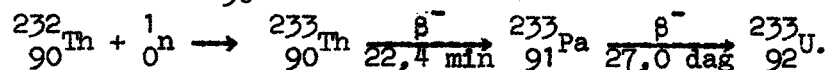
fig. IV-3: Schema Drukwaterreaktor.

Licht water is weer moderator en koelmiddel. De reaktorafmetingen zijn iets kleiner dan bij de BWR: bij een vermogen van 1000 MWe wordt de hoogte van het reaktorvat ca. 12 meter en de diameter ca. 5,5 m. Bij een verrijkingsgraad van 3,3%  $^{235}_{92}\text{U}$  is voor een 600 MWe centrale ong. 47500 kg U nodig bij een splijtstofcyclus van 3 jaar. De werkdruk in het vat is 140 atm.; het water wordt opgewarmd van 280 tot 310 °C. De warmte van het primaire koelcircuit wordt in oppervlakte warmtewisselaars afgestaan door aan de sekundaire kant verzadigde stoom van 40 tot 50 atm. op te wekken. Het rendement is 33%. Druk en radio-activiteit van het primaire koelcircuit stellen hoge eisen aan de lekdichtheid van het systeem. C is iets groter dan bij de BWR.

### 3) De Gasgekoelde Reaktor (High-Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR).

Hierbij dient grafiet als moderator en kunnen  $\text{CO}_2$  en He als koelmiddel dienst doen. De eerste gasgekoelde reaktoren werken met natuurlijk Uranium in metaalvorm om zo een voldoende hoge dichtheid van splijtbaar  $^{235}_{92}\text{U}$  te krijgen. De werkdruk ligt bij 40 tot 50 atmosfeer. Het koelgas wordt opgewarmd van ca. 350 tot 750 °C. Helium biedt als koelmiddel betere perspectieven dan  $\text{CO}_2$ , omdat dit laatste voor koolstoftransport kan zorgen:  $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2 \text{CO}$ . Door de hoge reaktoruitgangstemperatuur zijn hoge thermische rendementen in de buurt van 45% mogelijk.

Tegewoondig wordt licht verrijkt (tot enkele procenten) tot hoog verrijkt uraniumoxyde gebruikt. Zowel  $^{235}_{92}\text{U}$  als  $^{233}_{92}\text{U}$  kunnen als splijtstof dienen. De  $^{233}_{92}\text{U}$  wordt gekweekt uit  $^{232}_{90}\text{Th}$ :



Door van dit kweekproces gebruik te maken kan de huidige  $C = 0,8$  voor  $^{235}_{92}\text{U}$  als splijtstof misschien in de buurt van  $C = 1$  gebracht worden.

4) Zwaarwater Reactoren. Als moderator en koelmiddel wordt zwaar water gebruikt. Zwaar water absorbeert minder neutronen dan licht water, waardoor men in deze reaktoren ook natuurlijk Uranium kan gebruiken. Zwaarwaterdrukvat-reaktoren lijken enigszins op PWR's. Zij hebben een grotere reaktorkern en een groter drukvat voor hetzelfde vermogen en mede hierom zijn de kapitaal-kosten wat hoger dan voor licht water reaktoren. Tegewoondig is de C ong. 0,8. Het gebruik van Thorium in drukvatreaktoren lijkt op den duur aantrekkelijk. Hiermee zouden konversiefactoren in de buurt van 1 mogelijk zijn.

### C. Kweekreaktoren.

Als de konversiefaktor C groter is dan 1 spreekt men van kweekreaktoren. Bij deze reaktoren wordt geen moderator toegepast, omdat dit ten koste gaat van de onversiefaktor. De twee belangrijkste typen kweekreaktoren zijn:

1) De Snelle Natrium-gekoelde Reaktor (SNR). Hiervan wordt een 300 MWe prototype gebouwd bij Kalkar. Als koelmiddel is Na gekozen om de goede warmtegeleiding en de geringe neutronenmoderatie. Water als koelmiddel voor de snelle kweekreaktor is om deze reden uitgesloten. Als splijtstof wordt  $^{239}_{94}\text{PuO}_2$  ge-

bruikt en als kweekstof  $^{238}_{92}\text{UO}_2$ ; de tot 20% verrijkte splijtstof wordt geproduceerd in licht water reaktoren.

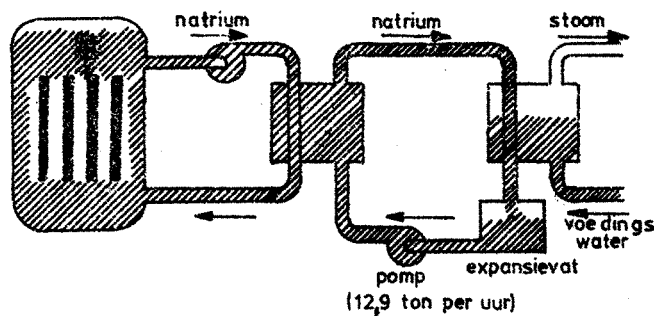
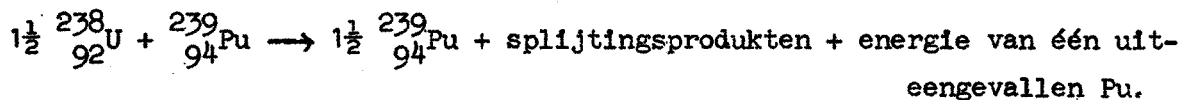
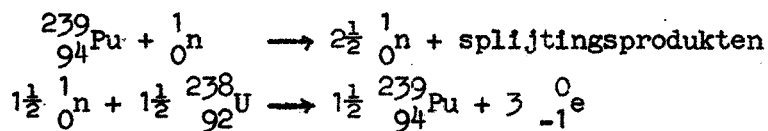


fig. IV-4: Schema Kweekreaktor.

We kunnen de reacties globaal als volgt opschrijven:



We kunnen dit resultaat als volgt samenvatten: behalve het feit dat één Pu-atoom gesplitst wordt en energie levert, komen er bij het uiteenvallen zoveel neutronen vrij, dat tevens  $1\frac{1}{2}$  atoom "onsplijtbaar"  $^{238}_{92}\text{U}$  omgezet wordt in  $1\frac{1}{2}$  atoom splijtbaar  $^{239}_{94}\text{Pu}$ . Dus levert deze reaktor niet alleen energie, maar produceert tegelijkertijd weer geschikte brandstof uit het ongeschikte  $^{238}_{92}\text{U}$ .

Er zijn twee uitvoeringsvormen van de reaktor mogelijk: een "pijp" en een "pot" model, waarbij het pijpmode (v.b. Kalkar) grotere eisen stelt aan de lekdichtheid, maar het potmodel is moeilijker te repareren. Een potmodel van 300 MWe heeft een hoogte van ca. 15 meter en een diameter van 12 m.

De reaktorkern is erg kompakt. Om de splijtstofzone ligt nog een kweekzone om overbodige neutronenverliezen tegen te gaan. De konversiefaktor ligt in de buurt van 1,2 - 1,4. Het natrium in het primaire koelcircuit wordt zeer radio-actief. Omdat het risico bestaat dat bij een breuk in een warmtewisselaar, natrium explosief zou kunnen reageren met de aan de sekundaire zijde opgewekte stoom, wordt een tweede natrium koelcircuit gebruikt. Het voordeel hiervan is dat dit natrium niet zo radioactief is. De druk in de primaire natriumkringloop is ong. 6 atm., hierbij wordt het natrium opgewarmd van ca. 350-400 tot ca. 600°C. Het thermisch rendement is ong. 40%.

## 2) De Gasgekoelde Snelle Kweekreaktor (Gas-cooled Fast Breeder Reactor).

Dit is een verdere ontwikkeling van de gasgekoelde thermische reaktor maar dan zonder moderator. Hierbij wordt als koelmiddel Helium gekozen bij een druk van ong. 100 atm. en een maximum temperatuur van ca. 800 °C. Het rendement zou 45% kunnen worden en de konversiefaktor ca. 1,3 - 1,5. Als splijtstof wordt ook hier verrijkt  $\text{PuO}_2$  gekozen en als kweekstof  $^{238}_{92}\text{UO}_2$ .

### III. Onderlinge Vergelijking Splitsingsreactoren. Toekomstige Ontwikkelingen.

Een voordeel van licht water reactoren tegenover gasgekoelde reactoren is, dat de technologie, die vereist is voor het sekundaire deel van de koelmiddelkringloop, bekend is van de konvensionele, op fossiele brandstoffen gestookte elektriciteitscentrales. De konversiefactoren en rendementen zijn echter laag. Door de grotere konversiefactor en het grotere rendement wordt de gasgekoelde reaktor als er genoeg ervaring met de prototypen opgedaan is waarschijnlijk de vervanger van de licht water reactoren.

Bij de kweekreactoren is het voordeel van de Natriumgekoelde snelle kweekreactoren, dat door het hoge kookpunt van het koelmiddel ( $892^{\circ}\text{C}$ ) de werkdruk laag kan blijven bij een hoge temperatuur. Een zeer groot nadeel is dat door de zeer kompakte bouw de kern een grote vermogensdichtheid heeft. Hierdoor worden de konstruktiematerialen aan veel straling blootgesteld. Verder wordt de vermenigvuldigingsfaktor groter als de dichtheid van het koelmiddel Natrium in de kern afneemt. Dit moet met regelstaven gekorrigeerd worden, omdat de reaktor niet ondergemodereerd zoals bij thermische reactoren. In het algemeen is bij snelle kweekreactoren de regelbaarheid van de reaktor minder goed dan bij de thermische reactoren. Dit komt door het feit dat de generatietijd tussen de prompte neutronen (= de tijd tussen twee opvolgende splitsingen in de kettingreactie) hier ongeveer een faktor honderd kleiner is. De tijd om bij plotselinge vermogensstijgingen in te grijpen is hierdoor kleiner.

De voordelen van de gasgekoelde snelle kweekreaktor t.o.v. de Natrium-gekoelde zijn o.a. het grotere rendement, de kleinere vermogensdichtheid in de kern, het koelmiddel Helium is minder korrosief dan Natrium, minder kans op dichtheidsafname van het koelgas en de verdubbelingstijd van het splijtbaar  $^{239}_{94}\text{PuO}_2$  is kleiner (tijd waarin de hoeveelheid tweemaal zoveel wordt). Nadelen van de gasgekoelde snelle kweekreaktor is de hoge werkdruk, de hoge temperatuur en de slechtere warmtegeleiding van het He-gas.

Uit het oogpunt van splijtstofverbruik kunnen thermische reactoren het best bedreven worden met  $^{233}_{92}\text{U}$  en snelle reactoren met  $^{239}_{94}\text{Pu}$ ; dan zijn de konversiefactoren voor de verschillende typen reactoren maximaal.

Voor een zo volledig mogelijk gebruik van de bekende "ekonomisch" winbare hoeveelheden splijtbaar  $^{235}_{92}\text{U}$  is het van belang dat de beschikbare reactoren gezamenlijk een konversiefaktor hebben, die in de buurt van 1 ligt als het gebruik van kernsplitsing op de lange termijn de enige oplossing voor de opwekking van elektriciteit zou zijn om te voldoen aan de stijgende vraag naar energie. Deze overweging zal op den duur mede de verhouding gaan bepalen in de toepassing van de verschillende kernreaktortypen.

Op grond van efficiëntie zijn kweekreactoren te preferen boven thermische, omdat ze 30 tot 60 keer zoveel van de potentiële energie benutten. Er kleeft echter een zeer groot bezwaar aan de ontwikkeling van kweekreactoren: er worden grote hoeveelheden splijtbaar  $^{239}_{94}\text{Pu}$  geproduceerd. Wat betreft het totale

wereldsplijtstofverbruik is dat natuurlijk gunstig, maar er kunnen ook kernbommen van gemaakt worden.

Om een kweekreaktor van 1000MWe te kunnen starten, moet ongeveer 3000 kg  $^{239}_{94}\text{PuO}_2$  aanwezig zijn. Dit Pu wordt gemaakt in thermische reaktoren: licht water en zwaar water reaktoren leveren netto 200 - 400 g Plutonium per MWe/jaar. Bij een snelle kweekreaktor wordt ong. elke 5 tot 15 jaar een hoeveelheid splijtstof geproduceerd, die ongeveer gelijk is aan de hoeveelheid splijtstof die er eerst in de reaktor gestopt is: kweekreactoren leveren netto 300 - 700 g Plutonium per MWe per jaar.

Bij kernreactoren van elektrische centrales worden de elementen zolang mogelijk in de reaktor gelaten, gewoonlijk langer dan een jaar om redenen van bezuiniging. Na lange tijd is de Plutonium-isotopen-verhouding ongeveer als volgt: 60%  $^{239}_{94}\text{Pu}$ , 30%  $^{240}_{94}\text{Pu}$  en 10%  $^{241}_{94}\text{Pu}$ . Dit komt omdat  $^{239}_{94}\text{Pu}$  een neutron kan invangen en dan  $^{240}_{94}\text{Pu}$  geeft.

Als een land, om wat voor reden dan ook, besluit energie op te gaan wekken met behulp van kerncentrales, dan hoeft de keuze niet automatisch op kweekreactoren te vallen. Daar de splijtstofkosten een zeer klein aandeel in de elektriciteitsprijs vertegenwoordigen (5), is de keuze van een kweekreaktor economisch niet noodzakelijk. Voor de eerste 50 jaar is de invoering van snelle kweekreactoren i.v.m. de bekende reserves uranium niet nodig (5). In die 50 jaar zouden alternatieve energiebronnen ontwikkeld kunnen worden.

Zoals de vooruitzichten nu zijn, kan het wel 40 jaar duren voor kernenergie goedkoper is dan elektriciteit uit konventionele centrales.

Als we uitgaan van het feit dat de groeiende vraag naar energie bevredigd moet worden en men de gebruikte hoeveelheid splijtstof zo klein mogelijk moet houden ( $C_{\text{totaal}} = 1$ ) en bovendien als er genoeg Plutonium is om een kweekreaktor te kunnen starten, worden de vooruitzichten voor bovengenoemde reaktoren ongeveer als volgt:

- 1) De licht water reaktoren blijven, totdat de gasgekoelde reaktor (thermisch) ontwikkeld en goed beproefd is, de meest gebouwde reaktoren: begin 1972 waren er al ca. 75 BWR's en ca. 130 PWR's in aanbouw met een vermogen van gemiddeld 1350 MWe, terwijl al gedacht wordt aan eenheden van 3000 MWe.
- 2) De hoge temperatuur gasgekoelde reaktor wordt belangrijk als in het begin van de jaren '80 dit type gebouwd wordt.
- 3) De SNR (wegens warmte-geleiding Natrium te verkiezen boven gas-gekoelde kweekreaktor) wordt na 1990 de meest gebouwde reaktor. In 1982 zou de helft van het nieuw geïnstalleerd vermogen aan kernenergiecentrales al kweekreactoren kunnen zijn.

#### Referenties:

1. R.G. Schölvink, Vooruitzichten andere reaktortypen, Atoomenergie 14, no.

7/8, blz. 183 (1972).

2. Fast Breeder Reactors; Physics Today, May 1972, blz. 28.
3. Muijsken, De toekomst van de kernreaktor, Natuur en Techniek no. 8, (1971).
4. H. van Dam, Kernreactoren voor elektrische centrales, De Ingenieur 84, blz. E-17 (1972).
5. P.B. Smith, 23e Pugwash conferentie - Rapport van werkgroep 5.

## Hoofdstuk V THERMISCHE VERONTREINIGING

### I. Algemeen.

#### A. Inleiding.

Het Nederlandse oppervlaktewater vervult diverse functies. Het is vooral belangrijk voor de drinkwatervoorziening, de scheepvaart, de recreatie, de biologische waarde, de lozing van afval (industriëel en huishoudelijk) en als koelmiddel: voor de industrie en de opwekking van elektriciteit (resp. 25 en 75%). Vooral deze laatste functie is van toenemend belang gezien de snelle groei van het elektriciteitsverbruik. Alvorens er dieper op in te gaan, wat de gevolgen van opwarming van oppervlaktewater kunnen zijn en hoe de nadelige invloeden beperkt kunnen worden, is het zinvol eerst de noodzaak van koeling voor de elektriciteitsvoorziening nader te bekijken.

In zowel konventionele elektriciteitscentrales als kerncentrales wordt warmte omgezet in elektrische energie. Om fundamentele redenen kan deze omzetting nooit 100% bedragen. Voor fossiel gestookte centrales bedraagt het rendement ca. 40%, voor kerncentrales is dit nog lager, ca. 33%. Dit betekent dat in het eerste geval ongeveer 50% van de energie, opgeslagen in de fossiele brandstof aan het koelwater wordt afgegeven (10% verdwijnt door de schoorsteen); in het tweede geval bedraagt dit circa 70% van de energie, opgeslagen in de nukleaire brandstof. Dit betekent dat bij eenzelfde elektrisch vermogen bij een kerncentrale  $1\frac{1}{2}$  maal zoveel koelwater nodig is.

De koeling gebeurt in de kondensor, waar hete stoom (ong. 540 °C) weer condenseert tot water, door er "koud" water langs te laten stromen (zie tek.).

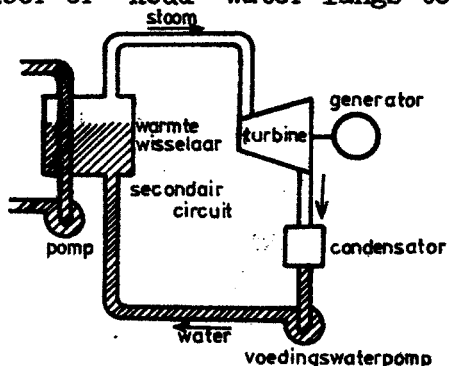


fig. V-1: Schema Koelsysteem Kokendwaterreaktor.

Hierdoor ontstaat er een drukverschil, waardoor stoom gaat stromen, die zodoende de turbine aandrijft. Deze mechanische energie wordt in de generator weer omgezet in elektrische energie. Deze stapsgewijze omzetting van energie veroorzaakt naast de noodzaak van condensatie (koeling) nogal wat andere verliezen aan energie.

Dat men werkt met een gesloten stoomcircuit vindt niet alleen zijn oorzaak in het hogere rendement; naast de klimatologische bezwaren van een open cir-

cuit (mistvorming) zou het ook veel duurder zijn, omdat gigantische hoeveelheden water met een zeer hoge graad van zuiverheid (wegens korosie) nodig zouden zijn.

#### B. Grenzen aan de Temperatuurverhoging van het Oppervlaktewater.

Het is volstrekt duidelijk dat het oppervlaktewater niet onbeperkt kan worden opgewarmd zonder het biologisch leven ernstige schade toe te brengen. De meningen lopen echter sterk uiteen wat betreft de maximaal toelaatbare temperatuur. Het is daarom zo controversiël, omdat onderzoek naar schadelijke invleeden van temperatuurverhoging op waterleven bijzonder lastig en tot nu toe erg onvolledig is. Vele factoren spelen een rol; zo neemt enerzijds bij temperatuurverhoging de oplosbaarheid van zuurstof in water af, terwijl de biochemische processen (bijv. de afbraak van organisch materiaal) juist een faktor 1,5 à 3 per 10 graden  $^{\circ}\text{C}$  sneller gaan en dus meer zuurstof vereisen. Anderzijds neemt ook de snelheid van het oplossen van zuurstof in met  $\text{O}_2$  onverzadigd water met 1 à 2% per graad temperatuurstijging toe (1). Bij het vaststellen van de grenzen aan de maximaal toelaatbare temperatuurverhoging dient als criterium worden aangehouden de minimumwaarde, die het zuurstofgehalte in de tijd doorloopt. Afhankelijk van de organische belasting wordt deze minimumwaarde lager naarmate de temperatuur hoger is (zie tek.).

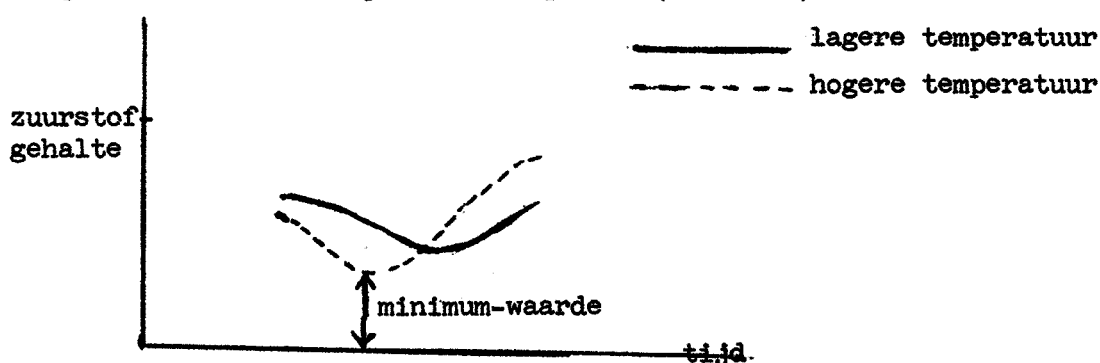


fig. V-2: Verloop  $\text{O}_2$ -gehalte bij afbraak van organisch materiaal als functie van de tijd.

De huidige normen, opgelegd door het Rijkinstituut voor Zuivering van Afvalwater (R.I.Z.A.), houden in dat het Nederlandse oppervlaktewater nooit de  $30^{\circ}\text{C}$  mag overschrijden. Daarnaast mag de temperatuur van de grote rivieren nooit meer dan 3 graden boven de natuurlijke waarde worden gebracht, terwijl plaatselijke temperatuursprongen, bijv. vlak voor en na de koeling in de condensor, beneden de 8 graden dienen te blijven. Uitdrukkelijk moet gesteld worden, dat deze normen geen biologische normen zijn, maar desondanks wel vaak door biologen overgenomen worden.

#### C. Aanvechtbaarheid van de Huidige Normen.

De bioloog dr. J. Verwey, oud-direkteur van het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (N.I.O.Z.), heeft een grondig literatuur-onderzoek verricht

naar de invloed van temperatuurverhoging op zoet- en zoutwaterorganismen, voornamelijk vissen, weekdieren en schaaldieren (2). In zijn rapport konkludeert hij nadrukkelijk dat de 30 °C-norm "een volkomen onbruikbare maatstaf is om te dienen als uitgangspunt van een koelwatergrens". Niet de sterfte-temperatuur van een organisme zou bepalend moeten zijn voor het vaststellen van een koelwatergrens, maar de voorkeurstemperatuur d.i. de temperatuur waarbij een dier zich "lekker" voelt en optimaal funktioneert. Dit valt samen met het beginpunt van konstante stofwisseling. Denk in dit geval aan het onprettige gevoel van koorts bij de mens. Bovendien, zo stelt Verwey, is er geen sprake van één bepaalde sterfte-temperatuur, maar hangt deze af van: uiteraard soort, milieu, vervuilinggraad maar vooral van de vooraf-temperatuur, de temperatuur waaraan een dier gewend is alvorens blootgesteld te worden aan temperatuurverhoging. In het algemeen is de sterfte-temperatuur van een soort lager, naarmate de vooraf-temperatuur lager is.

Op grond van een overstelpend aantal feiten, hieronder samengevat in 5 punten, pleit Verwey voor drastische verlaging van de maximaal toelaatbare koelwatergrens naar 21 °C:

- 1) De voorkeurs-temperatuur voor de meeste vissen ligt rond 23 °C.
- 2) De benedengrens van sterfte ligt ongeveer bij 22 °C.
- 3) De hoogste gemiddelde temperatuur voor warmste maanden bedraagt voor kustwater 21 °C, voor binnenwater 24 °C. Kiest men 21 °C als maximaal toelaatbare bovengrens, dan doet men de natuur niet meer geweld aan dan dat zij zichzelf aandoet - zoetwaterorganismen staan vaak aan zoveel schadelijke invloeden meer bloot dan een reservering van 3 °C gewenst lijkt.
- 4) Ook voor andere landen zijn diverse maximale temperaturen beneden 30 °C genoemd. Zo heeft Zwitserland binnen de Raad van Europa verzocht maximaal een waarde van 28 °C toe te staan.
- 5) Botulisme, een intoxicatie met een vaak epidemisch karakter, treedt op in zuurstofarme omgeving boven 20 °C. Bij 30 °C is de vorming van toxinen door de bacterie *Clostridium Botulinum* maximaal, beneden 10 °C daarentegen geen vorming. Het veroorzaakt sterfte onder watervogels en het kan gevaarlijk zijn voor de volksgezondheid. De relatie tussen thermische verontreiniging en het optreden van botulisme is veel duidelijker aangetoond, toen in januari 1972 in het Helperdiepje (tijdelijk opgenomen in het koelcircuit van de Hunzecentrale) botulisme uitbrak. De temperatuur van het water was op dat moment 20 °C. Zodra de opwarming van het water werd stopgezet, verdween de ziekte (3).

Naast verlaging van de koelwatergrens tot 21 °C, pleit Verwey ervoor dat het temperatuurverschil tussen ingepompt en geloosd koelwater geen 8 maar max. 3 graden (liever nog 2) mag bedragen. Deze maatregel, ook elders voorgesteld (VS (4), Zwitserland (5)), is nodig aangezien het akklimatiseren van organismen aan andere temperaturen zeer lang kan duren (4 tot 20 dagen). Wat de kon-

sekwenties hiervan kunnen zijn, illustreert Verwey aan het volgende voorbeeld:

Als het water vóór koeling een temperatuur van  $20^{\circ}\text{C}$  heeft, dan is dat tevens de vooraf-temperatuur van de organismen. Stel dat de lethale temperatuur onder de gegeven omstandigheden voor een bepaald organisme  $27^{\circ}\text{C}$  bedraagt en stel voorts dat dit water door koeling in de kondensor tot  $28^{\circ}\text{C}$  wordt opgewarmd. Bij  $28^{\circ}\text{C}$  als vooraf-temperatuur kan de lethale temperatuur weliswaar boven  $30^{\circ}\text{C}$  liggen (welke temperatuur niet bereikt wordt), maar dan sterft het organisme toch; vanwege de trage aanpassing aan de nieuwe omstandigheden ( $20 \rightarrow 28^{\circ}\text{C}$ ) heeft het dier nog steeds een lethale temperatuur van  $27^{\circ}\text{C}$  en sterft bij  $28^{\circ}\text{C}$ . Hoe groter de temperatuursprong bij lozing van het koelwater, hoe desastreuzer de gevolgen.

In de kondensor zelf zou een sprong van 8 graden gehandhaafd kunnen blijven. Dan moet dit primaire koelwater eerst gemengd worden met een sekundaire koelstroom, alvorens in het meer, de rivier of de zee teruggepompt te worden. Men krijgt dus te maken met grote koelstromen, waarvoor ook krachtiger pompen nodig zullen zijn. Bij Rijkswaterstaat heeft men van deze kwestie reeds een studie gemaakt, waarvan de resultaten zijn vastgelegd in een nota (6).

In deze nota wordt de kwestie van het verpompen van een extra hoeveelheid koelwater behandeld voor zowel een "open" (zee, rivier), "gesloten" (koelcircuit, meer), als een "half-open" koelsysteem (estuarium). Voor een open koelsysteem blijkt het effect van koelwatermenging met een sekundaire koelstroom maximaal te zijn en het eenvoudigst te berekenen. Verdubbeling van de totale koelstroom betekent in dit geval simpelweg een halvering van de temperatuursprong. In een rivier kan deze extra koelstroom echter moeilijkheden opleveren voor de scheepvaart.

Omdat het het Eemsestuarium moet worden gezien als een half-open koelsysteem, verdient deze methode toch ook hier meer aandacht, te meer daar het energieverbruik nodig voor het verpompen van de extra hoeveelheid koelwater slechts een zeer kleine fraktie (minder dan 1%) is van de door de centrale geproduceerde nuttige energie. De extra kosten per kWh geproduceerde elektrische energie zullen dus ook minimaal zijn.

Voor het lozen van koelwater heeft het E.G.D. een vergunning nodig; dit vereist de wet Verontreiniging Oppervlaktewater. Inzake de vergunning adviseert het R.I.Z.A., de Hoofd-Ingenieur-Direkteur van Rijkswaterstaat. De vergunning wordt verleend door de Minister van Verkeer en Waterstaat.

In de wet is niet geregeld aan welke voorwaarden voldaan moet zijn om de vergunning te verkrijgen; op het ogenblik zijn het R.I.Z.A. en het Rijksinstituut voor Volksgezondheid bezig aan een studie over de normen.

Konkluderend kunnen we zeggen dat er op het terrein van voorkeurstemperaturen van organismen door biologen nog veel studie moet worden verricht; zolang dit niet gedaan is kunnen de nu gehanteerde normen ( $30^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T = 7^{\circ}\text{C}$ ) veel schade aanrichten.

## II. De Eemscentrale in relatie tot de Waddenzee.

Hoewel er van uitgegaan wordt dat er tot het jaar 2000 nog wel voldoende koelwater in ons waterrijke land voorradig is, kan dit in de toekomst wel een beperkende faktor worden voor de elektriciteitsproduktie.

Wemelsfelder (Rijkswaterstaat) heeft een studie gemaakt van de mogelijkheden tot koeling met het Nederlands oppervlaktewater (7). Wanneer absolute prioriteit wordt verleend aan de vestiging van grote centrales (meer dan 1000 MWe i.v.m. te weinig geschikte plaatsen) komt hij tot een totaal van maximaal 113.000 MWe te installeren vermogen in Nederland. De behoefte in het jaar 2000 zal ongeveer 80.000 MWe bedragen. Hij konkludeert, dat reeds na 30 à 40 jaar alle koelmogelijkheden van het Nederlandse oppervlaktewater zullen zijn benut bij voortzetting van de huidige groei van het elektriciteitsverbruik. Bij deze beschouwing is uitgegaan van de 30 °C-norm, hoewel deze grens aanvechtbaar is. Bij een verlaging van deze norm worden de mogelijkheden nog meer beperkt. In de toekomstschets van Wemelsfelder komt o.a. Lauwersoog voor als mogelijke vestigingsplaats van een centrale (5000 MWe) naast uiteraard het Eemshavengebied (max. 5000 MWe), waarvan de eerste eenheid van 600 MWe reeds in aanbouw is.

Om na te gaan hoe de via het koelwater geloosde warmte zich zal verspreiden over de Waddenzee zijn voor de Eemscentrale modelproeven uitgevoerd door o.a. de Bundesanstalt für Wasserbau te Hamburg-Rissen (8).

In deze modelproeven is alleen de getijdenbeweging in het betreffende deel van de Waddenzee gesimuleerd en niet bijv. zeestroming en wind. Verder is men er kennelijk van uitgegaan, dat het maximaal te installeren vermogen van 5000 MWe geheel konventioneel zal worden, gezien de koelstromen van 125 en 75 m<sup>3</sup>/sec (2 lozingspunten) met temperatuursprong van 8,4 °C, die in de proeven zijn gesimuleerd. Zoals al in een vorig hoofdstuk is uiteengezet, zal een gedeelte van het vermogen wel nucleair worden. Het lagere rendement van een kerncentrale houdt in dat voor 5000 MWe de totale koelstroom groter dan 200 m<sup>3</sup>/sec (temp.sprong 8 °C) wordt of het maximaal te installeren vermogen moet al kleiner worden dan 5000 MWe. Uit het rapport blijkt verder dat de situatie aan het Eemsestuarium zodanig is, dat gedeeltelijke recirkulatie van het koelwater onvermijdelijk is (half-open systeem). Bij een temperatuursprong van 8,4 °C in de kondensor kan de temperatuurverhoging in de uitloopkanalen tot 12,3 °C oplopen. In de richting van de Oude Wester Eems is bij ebstroom op 600 meter van het lozingspunt nog een temperatuurverhoging van 8 graden te verwachten, op 1200 meter van het lozingspunt kan dit 4,8 °C bedragen en op 2400 meter nog 2,7 °C. Bij vloedstroom zijn deze verhogingen veel geringer, n.l. 1,2 resp. 1,1 en 1,0 °C. Dan is echter wel een aanzienlijke opwarming te verwachten van de nauwe Bocht van Wattum: nog 1,5 graad op 14,5 km van het lozingspunt. Het is evenwel aan te nemen, zo stelt het

rapport, dat de warmtevlék niet het bereik van eb- en vloedstroom (15 km ten Noord-Westen resp. ten Zuiden van de lozingspunten) zal overschrijden, terwijl de breedte van de vlek niet meer dan 1 km zal bedragen (zie tek.).

In aanmerking genomen dat ook aan Duitse zijde elektriciteitscentrales aan het Eems-Dollardestuarium gevestigd zijn en of nog gevestigd zullen worden, kan men spreken van een aanzienlijke opwarming van dit gedeelte van de Waddenzee.

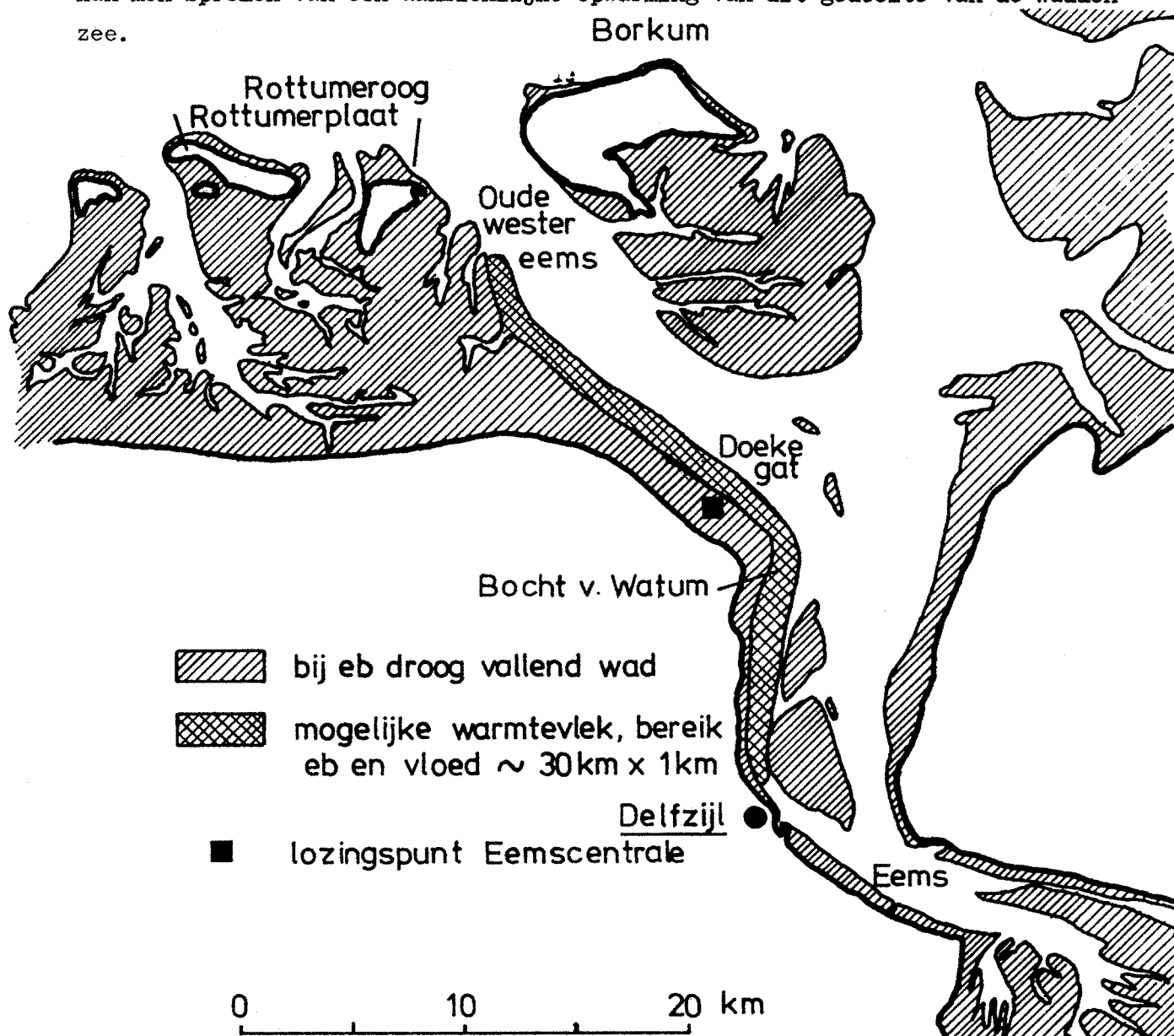


fig. V-3: Overzicht van de mogelijke thermische verontreiniging door een kerncentrale aan de Eemshaven.

Wat de gevolgen zullen zijn voor de wadfauna laat zich niet gemakkelijk raden, omdat onderzoek naar sterfte-temperaturen van wad-organismen nog zeer onvolledig is. Verwey refereert weliswaar in zijn rapport o.a. aan onderzoek van Pearce (9), waaruit blijkt dat de eerste sterfte van mosselen reeds bij 27 °C optreedt en het zich vasthechten reeds nadelig wordt beïnvloed bij 24 °C, maar bij dit onderzoek is geen rekening gehouden met de invloed van de vooraftemperatuur. Voor geen enkel op het Wad voorkomend organisme is een dergelijk onderzoek gedaan. Het is dan ook volledig uit de lucht gegrepen om te veronderstellen dat een temperatuur van 30 graden geen nadelige invloed zal hebben op de wadfauna. De nieuwe normen, die Verwey voorstelt, zijn ge-

baseerd op bevindingen van voornamelijk Canadese onderzoekers. Het lijkt daarom gewenst deze normen aan te houden voor het unieke Waddengebied totdat meer bekend is over mogelijke nadelige invloeden van temperatuurverhoging.

Mede gezien het feit dat de E.G.D. nog geen lozingsvergunning heeft voor de nu in aanbouw zijnde 600 MWe-centrale, lijkt het ons van belang hieraan de nodige ruchtbaarheid te geven, te meer daar in een pas afgesloten onderzoek van de N.I.O.Z. het grote belang van de Waddenzee voor de visstand van de Noordzee is aangetoond.

#### Referenties:

1. J.L. Koolen, Biological effect of cooling water discharge, STT 7, blz. 40 - 49 (1971)
2. J. Verwey, Milieu en koelwater van elektrische centrales, Natuur en Milieu 2 (1973)
3. J. Haagsma, Botulisme bij watervogels, proefschrift diergeneeskunde, Utrecht (1973)
4. J.S. Clark, Thermal pollution and aquatic life, Scientific American 220, March 1969
5. B. Müller, Thermal Pollution. Extract from the Experts report of 19 III 1968, F.A.O., European Inland Fisheries Advisory Commission, Swiss Federal Office for Waterprotection (1970)
6. G.C. van Dam, Enkele aspecten van afvalwarmte in oppervlaktewater, nota FA 7303, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Rijkswaterstaat (1973)
7. P.J. Wemelsfelder, Waterstaatkundige aspecten van de koelwatervoorziening, STT 12 blz. 21 - 46 (1972)
8. Twee rapporten (1969 en 1970) van de Bundesanstalt für Wasserbau - Hamburg-Rissen - betreffende de warmtedissipatie van koelwater van de Eemscentrale
9. J.B. Pearce, Thermal Addition and the Benthos, Cape Cod Canal, Chesapeake Science 10, blz 227 - 233 (1969)

## Hoofdstuk VI RADIO-AKTIEVE VERONTREINIGING

### I. Inleiding.

In de kerncentrales worden radio-actieve afvalstoffen geproduceerd, met halveringstijden variërend van enkele minuten tot vele jaren. In dit hoofdstuk zullen we de lozing op de omgeving nader bekijken.

Als eenheid van radio-aktiviteit kunnen we de Curie (Ci) hanteren: 1 Ci geeft het aantal deeltjes ( $a$  maal  $3,7 \times 10^{10}$ ) van een isotoop aan, dat in één seconde desintegreert. Als we echter het effect van straling bekijken, moeten we een maat hebben voor de schadelijkheid. Dit is de rad, die de afgestane energie per gram weefsel aangeeft; vermenigvuldigt men dit met een kwaliteitsfaktor van de straling (bij  $\beta$ - en  $\gamma$ -deeltjes gelijk aan 1 en bij  $\alpha$ -deeltjes 10), dan krijgt men de rem.

Voor de belasting op de omgeving zijn arbitraire normen vastgesteld, die het aanvaardbare risico moeten aangeven. Dit wordt o.a. gedaan door de I.C.R.P. Deze normen worden tegenwoordig van vele kanten, vnl. door biologen en medici, aangevochten. Zo menen Gofman en Tamplin (1), dat, wanneer er net zoveel geloosd wordt als deze normen toestaan, dit omgerekend voor Nederland 2000 kankergevallen per jaar meer zou betekenen.

Ondanks het feit, dat het mogelijk is de hoeveelheid radio-aktiviteit tot ver onder de normen te beperken, met inachtneming van een speling voor kleine ongelukken, blijkt men ze in Nederland als zijnde "veilig" te hanteren. In Amerika vond men ze echter niet veilig genoeg, want buiten de I.C.R.P. zijn ze daar strenger gemaakt. (9 juni 1971) Maar de reaktor in Borssele is ontworpen op de I.C.R.P. normen. Het kan wel met minder vervuiling, maar dan moet men genoeg nemen met een slechtere concurrentie positie t.o.v. konventionele energieleveranciers, kort gezegd: het wordt te duur.

### II. Kontinu-lozing in het oppervlaktewater.

Door kleine lekken in de splijtstof omhullingen en verontreinigingen aan de buitenkant hiervan t.g.v. de fabricage komen geringe hoeveelheden in het primaire koelsysteem. Ook ontstaan er radio-actieve isotopen door neutronenvangst. Korrosie producten worden bij passage door de kern geactiveerd en geactiveerde elementen van de splijtstof omhulling en konstruktiematerialen komen door corrosie in het koelwater. Dit zijn de radionukliden van metalen als Chroom-51, Mangaan-54, Kobalt-60 en Zink-65.

Tritium maakt zowel deel uit van de waterverontreiniging als van de luchtver-

ontreiniging, maar percentsgewijs meer in de waterverontreiniging. Het ontstaat op drie manieren:

- 1) bij de vangst van snelle neutronen door Borium-10 in het koelmiddel,
- 2) bij neutronenvangst van het van nature aanwezige Deuterium in het water,
- 3) bij een gering percentage (0,01%) van de splijtingen in de splijtstof.

Het diffundeert gemakkelijk door alle wanden (ook intakte) heen en komt aldus in de lucht en het koelmiddel terecht. Het grootste gedeelte van het in de koelvloeistof terechtgekomen tritium wordt met het sekundaire koelwater in het oppervlakte water geloosd.

Algemeen geldt, dat de radio-actieve afvalstoffen in het primaire koelwater na zuivering hiervan in die mate op de omgeving werden geloosd, dat de specifieke activiteit tot de normen is teruggebracht.

Ter illustratie volgen hier enkele getallen:

Koncentraties van langlevende radionukliden in het primaire koelwater van de Dresden-1 reaktor (BWR).(2)

| radio-nuklide | koncentratie<br>$Ci \times 10^{-6}/ml$ | halfwaarde<br>tijd |
|---------------|----------------------------------------|--------------------|
| Sr-89         | $4,4 \times 10^{-5}$                   | 51 dagen           |
| Sr-90         | $1,3 \times 10^{-6}$                   | 29 ,,              |
| Zr-95         | $2,4 \times 10^{-5}$                   | 65 ,,              |
| Ru-106        | $1,3 \times 10^{-6}$                   | 1 jaar             |
| J-131         | $2,2 \times 10^{-3}$                   | 8,1 dagen          |
| Cs-137        | $4,4 \times 10^{-5}$                   | 30 jaar            |
| Ba-140        | $1 \times 10^{-3}$                     | 12,8 dagen         |
| Ce-144        | $8 \times 10^{-5}$                     | 285 dagen          |

Aktiveringsprodukten.

| radio-nuklide | koncentratie<br>$Ci \times 10^{-6}/ml$ | halfwaarde<br>tijd |
|---------------|----------------------------------------|--------------------|
| H-3           | $1,3 \times 10^{-3}$                   | 12,4 jaar          |
| Cr-51         | $5 \times 10^{-4}$                     | 27,8 dagen         |
| Mn-54         | $1,6 \times 10^{-6}$                   | 290 dagen          |
| Fe-55         | $4,0 \times 10^{-5}$                   | 2,7 jaar           |
| Co-58         | $1,7 \times 10^{-3}$                   | 71,3 dagen         |
| Co-60         | $2,6 \times 10^{-4}$                   | 27 jaar            |
| Zn-65         | $4 \times 10^{-6}$                     | 245 dagen          |
| Ag-110        | $1,9 \times 10^{-6}$                   | 24,5 sekonde       |

tabel 1

### III. Kontinu-lozing in de atmosfeer.

Hierover zijn wel enkele getallen van reeds in bedrijf zijnde reaktoren bekend. In tabel 2, die daarop betrekking heeft, komt het begrip man-rem voor. Dit is de totale dosis, die een populatie van mensen ontvangt. Het is dan hetzelfde als 100 mensen 1 m(illi)rem ontvangen of 1000 mensen 0,1 mrem. Dit geeft 100 man-rem, en is een maat voor de totale hoeveelheid somatische aandoeningen, zoals leukemie, wanneer men deze kleine dosis verwerkt in een lineaire dosis-effekt relatie. (Zie appendix)

Man-rem gegevens over bestaande reaktoren (1969).(3)

|                                                                 | Big Rock<br>Point: BWR<br>70 MWe | Humboldt<br>Bay: BWR<br>69 MWe | Dresden-1:<br>BWR<br>200 MWe | San Onofre:<br>PWR<br>430 MWe | Connecticut<br>Yankee: PWR<br>462 MWe |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Max. jaardosis op<br>de terreingrens van<br>het reaktorcentrum: | 3,25 mrem                        | 155 mrem                       | 18 mrem                      | 0,23 mrem                     | 5 mrem                                |
| Bevolking op<br>4 mijl afstand:                                 | 1.430<br>personen                | 18.940<br>personen             | 2.577<br>personen            | 5.470<br>personen             | 5.062<br>personen                     |
| Totale belasting/jr:                                            | 0,457 man-<br>rem                | 68,5 man-<br>rem               | 11 man-rem                   | 0,047 man-<br>rem             | 1,150 man-<br>rem                     |
| Gemiddelde dosis<br>per persoon/jr:                             | 0,4 mrem                         | 3,69 mrem                      | 4,26 mrem                    | 0,0095 mrem                   | 0,227 mrem                            |
| Bevolking op<br>50 mijl afstand:                                | 100.000<br>personen              | 101.000<br>personen            | 5.716.000<br>personen        | 2.696.000<br>personen         | 2.682.000<br>personen                 |
| Totale belasting/jr:                                            | 3,64 man-<br>rem                 | 107 man-<br>rem                | 360 man-<br>rem              | 1,02 man-<br>rem              | 15,56 man-<br>rem                     |
| Gemiddelde dosis<br>per persoon/jr:                             | 0,036 mrem                       | 1,06 mrem                      | 0,063<br>mrem                | 0,00037<br>mrem               | 0,0058<br>mrem                        |

tabel 2

Te verwachten lozingen, berekend voor Borssele en Kalkar.(3)

| radionuklide                                | lozing Ci/jaar     | dosis mrem/jaar               |
|---------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Borssele:                                   |                    |                               |
| edelgassen, vnl Xe                          | 12.000             | 0,9                           |
| jodium-131                                  | 0,15               | 1,5 (schildklier<br>via melk) |
| Kalkar:                                     |                    |                               |
| edelgassen, halfw.<br>tijd minder dan 15 d. | 71.000             |                               |
| krypton-85                                  | 390                |                               |
| halogenen                                   | $4 \times 10^{-3}$ | 3                             |
| koolstof-14                                 | 100                |                               |

tabel 3

Ter vergelijking: Dresden-1 leverde een lozing van 800.000 Ci in 1969. Van deze reaktor zijn ook gedetailleerdere gegevens beschikbaar:

Gemeten lozingen voor Dresden-1 in de atmosfeer.(4)

| radionuklide | µCi/sek. | Ci/jaar                    | radionuklide | µCi/sek.           | Ci/jaar |
|--------------|----------|----------------------------|--------------|--------------------|---------|
| Kr-85        | 500      | samen<br>$1,7 \times 10^5$ | H-3          | $1 \times 10^{-2}$ | 0,3     |
| Kr-87        | 1200     |                            | Co-58        | $3 \times 10^{-5}$ |         |
| Kr-88        | 900      |                            | Co-60        | $3 \times 10^{-5}$ |         |
| Xe-133       | 700      |                            | Sr-89        | $1 \times 10^{-3}$ |         |
| Xe-135       | 2000     |                            | Sr-90        | $5 \times 10^{-6}$ |         |
| N-13         | 7400     | $2,3 \times 10^5$          | Cs-137       | $4 \times 10^{-5}$ |         |
|              |          |                            | Ba-140       | $4 \times 10^{-3}$ |         |
|              |          |                            | J-131        | $1 \times 10^{-3}$ | 0,03    |

tabel 4

Wat betreft de hoeveelheid in de atmosfeer geloosde radio-actieve afvalprodukten, komen de nieuwere centrales gelukkig iets beter voor de dag. Tegenover Dresden steekt de vrij nieuwe centrale in Grundremmingen met 20.000 Ci in 1969 (250 MWe) gunstig af(4). Dit is het gevolg van verbeterde vertragingslijnen voor de afvalgassen. Vertragingslijnen worden aangebracht in een centrale, om de gassen een langere weg te laten doorlopen, voor ze in de atmosfeer worden geloosd. Hierdoor worden de kort levende isotopen niet meer in de atmosfeer geloosd en komen vrijwel alleen Kr-85, Xe-133 en H-3 vrij. Ook een deel van de vaste splijtstoffen komt in de schoorsteen terecht, naast Sr-89 en Sr-90, die in de lijnen ontstaan door verval van Kr-89 en Kr-90. Deze stoffen worden vrijwel geheel geabsorbeerd bij de z.g. absoluutfilters achter in de vertragingslijnen.

De vraag is nu echter welke konklusies aan deze getallen verbonden kunnen worden. Bij berekeningen van de doses op grotere afstanden van de centrales treden grote moeilijkheden op. De verspreiding van de isotopen in de lucht is afhankelijk van een groot aantal variabelen, die niet altijd scherp te bepalen zijn. We noemen temperatuur van de gaswolk, temperatuurverschillen in de verschillende luchtlagen, verschillen tussen dag en nacht. Hierop zal verder worden ingegaan bij het hoofdstuk ongelukken.

Radio-actieve isotopen kunnen akkumulieren in biologische systemen. Terwijl de radio-aktiviteit van de omgeving onder de gehanteerde normen ligt, kan in plankton de concentratie 2000 x zo groot, bij eenden 40.000, in onvolwassen vogels, die zich met insekten voeden, 500.000 en in eigeel van watervogels 1.000.000 keer zo groot worden als in de omgeving, het water zelf(5).

IV. Resumé.

Het valt te verwachten, dat wanneer de elektriciteitsbedrijven hun zin krijgen, er meerdere kerncentrales komen. Dan getuigt het van weinig realiteitszin te veronderstellen, dat wanneer iedere centrale op zich aan de normen voldoet, ze dat allemaal tegelijk doen, temeer daar door de beperkte hoeveelheden koelwater de centrales dicht bij elkaar zullen komen. Wij wachten met angst in het hart af, wat er bijvoorbeeld met de Rijn gebeurt, als daar alle centrales langs komen te staan, die er gepland zijn.

Referenties:

1. Kernenergienota Vereniging Milieu Defensie, 1973.
2. A.W. van Weers, Lozing van zwak radioactief vloeibaar afval in oppervlaktewater, Atoomenergie 14 (1), blz. 18 (1972).
3. RCN/KEMA, Kernenergie en Milieu, RCN-72-112 (1972).
4. Y.v.d. Feer & J.R.D. Stoute, Luchtverontreiniging rondom nucleaire centrales en de consequenties hiervan voor de bevolking, Atoomenergie 13, (7-8), blz. 175 (1971).
5. H. Strohm, Friedlich in die Katastrophe, Verlag Association, Hamburg, Duitsland (1973).

## Hoofdstuk VII INVLOED VAN STRALING OP HET ORGANISME

### I. Inleiding.

Ter inleiding dient vermeld te worden, dat onderstaand gedeelte een korte, en door zijn beperktheid een onvolledige weergave is van datgene wat in appendix A gelezen kan worden. Derhalve zullen hier dan ook geen referenties worden vermeldt, deze staan alle in de appendix. Toch hopen we in dit korte hoofdstuk enkele van de belangrijkste punten weer te geven in relatie tot een verhoging van de stralingsbelasting. Daartoe wordt eerst een kort overzicht van de biologische werkzaamheid van ioniserende straling gegeven. De konsekwenties daarvan zullen besproken worden onder de gedeelten: somatische en genetische risico's.

### II. Biologische Werkzaamheid van Ioniserende Straling.

Voor in dit hoofdstuk belangrijke straling onderscheiden we 3 typen namelijk:

- $\alpha$  - straling ( $\text{He}^{2+}$ -kernen)
- $\beta$  - straling (elektronen of positronen)
- $\gamma$  - straling (elektromagnetische straling)

Voor de biologische werkzaamheid is het doordringend vermogen van de straling in het weefsel van groot belang. Deze is voor  $\alpha$ -,  $\beta$ - en  $\gamma$ -straling respectievelijk 0.1 mm, 1 cm en 10 cm (in weefsel).

Wanneer weefsel blootgesteld is aan ioniserende straling gedurende kortere of langere tijd kan dit een enorme verscheidenheid aan effecten veroorzaken. Deze effecten zijn afhankelijk van fysische, chemische of biologische factoren. M.b.t. de fysische factoren zijn de volgende begrippen van belang, namelijk:

1. de geabsorbeerde dosis, d.w.z. de gemiddelde dosis energie welke in een bepaalde gewichtshoeveelheid materie wordt afgegeven (eenheid: rad)
2. het dosistempo, welke een maat is voor het aantal rads per tijds-eenheid.

Toch hebben kwantitatief gelijke geabsorbeerde doses niet altijd eenzelfde biologische werkzaamheid omdat de verschillende soorten straling verschillen in kwaliteit. Dit verschil wordt weergegeven met de term LET (energie per eenheid van weglengte: KeV/mikron).

$\alpha$ - straling heeft relatief een hoge LET (50 KeV/ $\mu$ ) en  $\beta$ - en  $\gamma$ - straling een relatief lage (3-5 KeV/ $\mu$ ).

Met betrekking tot de chemische factoren die van belang zijn voor het stralings-effect speelt de vorming van radicalen een belangrijke rol. Radicalen zijn zeer reaktieve stoffen, die (in dit geval) ontstaan als water bestraald wordt (80% van ons lichaam bestaat uit water) en aanleiding kunnen geven tot celbeschadiging.

Over de biologische factoren, die van belang zijn voor het stralingseffekt het volgende:

In de eerste plaats speelt de leeftijd van het individu een rol. Individuen jonger dan 18 jaar zijn veel gevoeliger voor straling in bepaalde opzichten dan ouderen. Ook de ongeborenen lopen extra risico's. Over het algemeen geldt dat de sneldelende cellen gevoeliger zijn voor straling.

De mogelijkheid van biologisch herstel na stralingsschade is nog niet voldoende uitgezocht. Dat er mogelijkheden zijn tot biologisch herstel in het menselijk lichaam is duidelijk, maar of deze in dit verband een belangrijke rol spelen is toch op zijn minst twijfelachtig.

Tot slot dient nog vermeld te worden dat de chemische, fysische en biologische factoren alle met elkaar samenhangen, maar hoe de relatie precies ligt is nog verre van duidelijk.

### III. Somatische Risiko's.

Wanneer men risico's vast wil stellen met betrekking tot ioniserende straling moet er met twee aspecten rekening worden gehouden, namelijk of de stralingsbron onder "kontrole" staat (industrie, medische toepassingen) of dat de stralingsbron niet onder controle staat (bijv. ongelukken). Bij deze laatste is het duidelijk dat het concept van de maximaal toelaatbare dosis niet houdbaar is. Bij de onder controle staande stralingsbronnen speelt het probleem dat de stralingsdoses zo beperkt moeten worden, dat deze een risico vormen welke niet onaanvaardbaar is voor een individu of de bevolking. Hierbij komt natuurlijk de vraag naar voren: wie bepaalt wat onaanvaardbaar is en op grond waarvan?

Wat betreft de somatische risico's is het nog niet duidelijk of de kwantitatieve gegevens betrouwbaar zijn. Dit komt voornamelijk omdat lage doses meestal geen direkt waarneembare effecten ten gevolge hebben. Bij somatische risico's is vooral de nadruk gelegd op de inductie van kanker, ontstaan van misvormingen bij het ongeboren kind en de niet specifieke verkorting van de levensduur. Wat betreft de inductie van kanker is eigenlijk alleen het ontstaan van leukemie goed onderzocht. Hierbij is het aannemelijk dat er een lineair dosis-effekt verband bestaat. Dit geldt ook voor de inductie van schildklierkanker (Iodium wordt bij voorkeur in de schildklier opgeslagen, dus ook radioactief jodium). Over de misvormingen bij het embryo kan gezegd worden dat tijdens de aanleg van de organen (2e - 6e week) deze bijzonder gevoelig is voor straling. Echter ook buiten deze periode kunnen aanzienlijke aanlegstoornissen optreden. De meest frekwente afwijkingen betreffen het skelet en het zenuwstelsel. In hoeverre deze afwijkingen voorkomen bij lagere doses is onbekend. Onafhankelijk van het induceren van kanker kunnen hoge doses radioactiviteit de levensverwachting verkorten. Of deze levensverkorting het gevolg is van een frekwentieverhoging van bepaalde ziekten of van een niet specifiek proces zoals versnelling van het ouderdomsproces weet men nog niet.

#### IV. Genetische Risiko's.

In het algemeen wordt de term genetisch gebruikt in tegenstelling tot somatisch. Voor de duidelijkheid van dit betoog laten we dit maar zo. alhoewel men niet moet vergeten dat de grens ertussen niet zuiver te trekken is.

Er bestaat weinig twijfel meer over het feit dat genetische mutaties in vrijwel alle gevallen schadelijk zijn. Welke relatie(s) echter bestaat(n) tussen de stralingsdosis en het aantal mutaties is nog niet geheel duidelijk. Wel duidelijk is dat elke verhoging van de stralingsbelasting in het milieu een toename geeft van de mutatiefrekwentie.

De mutaties kunnen plaatsvinden op het niveau van de chromosomen (breuken e.d.) en op het niveau van de genen. Deze verschillende soorten mutaties kunnen verschillende soorten effecten hebben variërend van stoornissen in de lichamelijke of geestelijke ontwikkeling tot zichtbare afwijkingen. Dit maakt het erg moeilijk om de omvang van de genetische schade te bepalen bij een verhoogde stralingsbelasting. Toch kan, ondanks de beperkingen, hier nog wel iets over gezegd worden. De natuurlijke mutatiefrekwentie, d.w.z. de mutatiefrekwentie die "spontaan" optreedt bedraagt bij de mens 1 tot 2 maal  $10^{-6}$  mutaties per lokus (= plaats van een gen op een chromosoom) bij een genen-aantal van ongeveer 10.000.

Van belang voor de genetische effecten bij de mens is niet alleen het feit hoeveel mutaties er plaatsvinden, maar ook of de mutaties vrijwel altijd tot uiting komen (dominant) of dat de mutaties onder bepaalde voorwaarden tot uiting komen (recessief).

Tegenwoordig staat men nogal sceptisch tegenover deze begrippen dominant en recessief. Er is namelijk aangetoond dat recessieve kenmerken zich ook naast de zogenaamde dominante vorm kunnen manifesteren. Ook in de studie van Muller (zie appendix A) komt dit naar voren.

Bij het bepalen van de genetische schade speelt ook nog een ander probleem. Men weet namelijk niet hoeveel genen gemuteerd zouden moeten worden opdat een bepaalde afwijking optreedt, d.w.z. men weet niet in hoeverre een verhoging van de mutatiefrekwentie een verhoging in frekwentie van bepaalde ziekten veroorzaakt.

Bovenstaande vragen zijn belangrijk om iets te kunnen zeggen over de tijd die nodig is om een mutatie uit te selketeren. Hier zijn wel schattingen over, maar de onzekerheden zijn te groot om ze betrouwbaar te maken.

Samenvattend blijkt uit bovenstaande, dat het niet mogelijk is om duidelijke relatie te leggen tussen de verhoging van de stralingsbelasting en de omvang en de aard van de daarop ontstane afwijkingen. Het vaststellen van normen voor de stralingsbelasting wordt dan ook een vrij arbitraire zaak.

De regels die de ICRP heeft vastgesteld gaan ervan uit dat er een objectieve norm te vinden is met betrekking tot de aanvaardbaarheid. Aanvaardbaar noemt zij

die stralingsbelasting, die zo laag gehouden wordt dat het te verwaarlozen risico voor het individu aanvaardbaar is voor het individu en de gemeenschap in relatie tot de voordelen die de activiteiten leveren welke ook verantwoordelijk zijn voor een verhoogde stralingsbelasting.

Een stelling die zeker voor discussie vatbaar is.

#### V. Konklusies.

Bij het maken van een risico-schatting met betrekking tot somatische en genetische effecten, komt men de volgende problemen tegen:

- een groot aantal factoren waarmee rekening gehouden moet worden, maar waarvan sommige nog niet precies te bepalen zijn
  - gebrek aan kennis betreffende effecten (van lage doses) over langere termijn
- Tevens dient vermeld te worden de vraag wat wel of niet een aanvaardbaar risico is.

Uit de verschillende studies komt het volgende naar voren:

- een drempelwaarde voor stralingsdoses is in het algemeen niet aanwezig
- er zijn onvoorspelbare effecten betreffende het effect van ioniserende straling op het menselijk organisme, met name voor de effecten op genetisch niveau

Op basis van de onzekerheden die in bovenstaande punten naar voren komen, lijkt het het onwenselijk het milieu verder te belasten met een verhoging van de achtergrondstraling.

#### VI. Overzicht.

Beïnvloeding van het organisme door straling kan effecten geven op:

- somatisch niveau, kunnen leiden tot veranderingen in de celstructuur (membranen) celademhaling), die mogelijk (ir)reversibel zijn.
- genetisch niveau, kunnen leiden tot: chromosoomafwijkingen - structureel (breuken)
  - numeriek (in aantal)genmutaties - sex-linked - dominant
  - recessief- niet sex-linked - dominant
  - recessief

De gevolgen van de externe en interne bestraling zijn afhankelijk van:

- dosis
- dosistempo
- welk isotoop (soorten straling, LET)
- celdeling
- enzymconcentratie
- plaats van het primaire contact
- konstitutionele variaties van het individu (geslacht, leeftijd, genetisch)
- mogelijkheid tot biologisch herstel

- beschermende of versterkende chemische factoren (bv. zuurstof)

De gevolgen van interne bestraling zijn verder nog afhankelijk van:

- toxiciteit van de stof
- de resorptiesnelheid (afhankelijk van deeltjesgrootte)
- waar en hoe de stof zich ophoopt
- concentratie van de nukliden in lucht en water
- metabole omzetting in de cel
- de mate waarin een bepaald nuklide wordt verwijderd (biologische halveringstijd)

## Hoofdstuk VIII    TRANSPORT VAN RADIO-AKTIEF AFVAL

### I. Inleiding

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd: eerst worden de wettelijke bepalingen betreffende het vervoer van radioactieve stoffen besproken. Hierop volgen enige kritische aantekeningen bij deze bepalingen. In verband met het feit dat de te vervoeren hoeveelheid radioactief materiaal in de toekomst een sterke groei zal vertonen, wordt apart aandacht besteed aan de problemen die hiermee samenhangen. Tenslotte volgen enkele overwegingen betreffende de veiligheid van het vervoer.

### II. Bepalingen volgens de wet.

#### Radioaktiviteit van de verpakking

Aan het oppervlak van de verpakking mag het dosistempo niet meer bedragen dan 200 mrem/h, op 1 meter van het middelpunt maximaal 10 mrem/h. Is de grootste afmeting van de verpakking 2 meter of meer, dan is ook aan het oppervlak maximaal 10 mrem/h toegestaan. Verder geldt dat de activiteit aan het buitenoppervlak voor  $\beta$ -straling niet meer dan 0,01 microcurie/cm<sup>2</sup> en voor  $\alpha$ -straling hoogstens 0,001  $\mu$ Ci/cm<sup>2</sup> mag bedragen

#### Radioaktiviteit van transportauto's

Voor auto's die radioactief materiaal vervoeren geldt bovendien nog dat aan de buitenkant maximaal 200 mrem/h toegestaan is en dat op 2 m afstand van het oppervlak het dosistempo niet meer dan 10 mrem/h mag bedragen.

#### Uiterlijk van de verpakking

De wet eist dat:

- i. de afmetingen van de verpakking minstens 10 cm zijn,
- ii. het geheel gemakkelijk te hanteren is en dat het goed vastgezet kan worden
- iii. bij een gewicht tussen 10 en 50 kg er handvaten aan de verpakking moeten zitten en
- iv. bij een gewicht van meer dan 50 kg de verpakking met mechanische hulpmiddelen (bijv. vorkheftruck) verplaatst moeten kunnen worden

#### Kwaliteit van de verpakking

De verpakking wordt in twee typen ingedeeld:

- type A blijft heel bij gewone vervoersomstandigheden en in geval van kleine ongelukken
- type B doorstaat zelfs het ergst denkbare ongeluk of serie ongelukken

Om deze vage omschrijvingen wat "harder" te maken, zijn er voorstellen op tafel gekomen betreffende de konkrete eisen waaraan de verpakkingen zouden moeten voldoen (zgn. groep van Wenen). Deze voorstellen zijn hieronder genoemd.

Type A moet kunnen doorstaan:

- i. een stortbad gedurende een half uur
- ii. een val van een hoogte van 1,2 m op een vlakke plaat
- iii. het gedurende 24 uren onder een druk van 5 maal zijn eigen gewicht staan
- iv. een staaf van 6 kg en 3 cm doorsnede die op het zwakste punt van de verpakking valt
- v. (voor vloeistoffen) een val van 9 m op een vlakke plaat

Type B moet behalve i t/m iv ook nog doorstaan:

- vi. een val van een hoogte van 1.2 m op een vertikaal opgestelde staaf van 15 cm doorsnede
- vii een val van een hoogte van 9 m op een vlakke plaat
- viii. het verblijven in een ruimte met temperatuur 800° C gedurende een half uur (vuurproef)
- ix. het gedurende 24 uur onder water staan op een diepte van 1 meter (waterproef)

Verdere eisen zijn:

- i. de inhoud mag het binnenste omhulsel niet aantasten
- ii. vloeibare stoffen moeten zijn omgeven door voldoende absorberend materiaal opdat de inhoud hierdoor geheel opgenomen kan worden
- iii. gassen moeten in de vaten blijven bij een (absolute) buitendruk van een half atmosfeer of meer
- iv. verder moeten gassen en vloeistoffen in metalen houders vervoerd worden
- v. het collo moet bestand zijn tegen herhaaldelijk overladen en tegen lange-afstands-transport

#### Vervoerde hoeveelheden

De colli radioactieve stoffen worden verdeeld in drie groepen:

- I -wit maximale straling aan het buitenoppervlak 0,5 mrem/h
- II -geel maximum 10 mrem/h aan het oppervlak en 0,5 mrem/h op 1 m van het middelpunt
- III-geel maximum 200 mrem/h aan het oppervlak, 10 mrem/h op 1 m van het middelpunt

Bij iedere groep behoort een speciaal etiket. Voor deze groepen gelden de volgende maxima voor de vervoerde hoeveelheden:

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| type A - groep I           | 1 mCi   |
| groep II                   | 50 mCi  |
| groep III                  | 3 Ci    |
| niet-verspreidbare stof    | 20 Ci   |
| type B - groep I           | 20 Ci   |
| groep II                   | 20 Ci   |
| groep III                  | 200 Ci  |
| niet-verspreidbare stoffen | 5000 Ci |

### Betreffende de vervoerders

Transport mag alleen geschieden door zeer bepaalde, gemachtigde firma's. Zo mag via de PTT alleen  $\alpha$ - en  $\beta$ -actief materiaal worden verzonden, per pakketpost. Het verzenden van gamma- en neutronenstralers met de PTT is niet toegestaan. Verder mag radioactief materiaal alleen vervoerd worden in ruimtes welke niet bestemd zijn voor het vervoer van personen.

### Personeel

Werkers die minder dan 15 uur per week blootgesteld zijn, mogen maximaal 2 mrem/h ontvangen. In andere gevallen hoogstens 30 mrem/ week, berekend over 13 weken.

### III Kritiek op de bepalingen.

De bepalingen m.b.t. de radioaktiviteiten van de pakketten, flessen, containers en wat dies meer zij, kunnen we vergelijken met de natuurlijke straling. Deze bedraagt 175 mrem per jaar, hetgeen neerkomt op 0,020 mrem/h. We zien dat een maximum als 10 mrem/h op 1 m afstand van het middelpunt van de verpakking 500 maal zo hoog ligt als het natuurlijke nivo.

Zoals in hoofdstuk 8 uiteen wordt gezet is dit een ongeoorloofd hoge dosis. We kunnen dus zeggen dat de wettelijk toegestane maxima te hoog liggen. Wat de hoeveelheden betreft is ook wel enige kritiek op zijn plaats. Weliswaar wordt voor verpakking van het B-type geëist dat ze alles kan hebben, maar geen mens is in staat een verpakking te maken waarvan je absoluut zeker bent dat er niets mee kan gebeuren. In het ergste geval komen er 200 curie verspreidbare of zelfs 5000 curie niet-verspreidbare stoffen vrij, hetgeen een niet onaardige schade zal kunnen toebrengen aan direkte en verdere omgeving van de plekke des onheils.

Nog een opmerking betreffende de vervoerders: volgens de regels zou men een blokje Pu ( $\alpha$ -straler) met de PTT mogen meegeven. Voor de werkers met radioactief afval geldt dat zij in het geval van langdurig contact 30 mrem/week, dat is ongeveer 85 maal de natuurlijke dosis ontvangen. Mogen wij om redenen van economische aard mensen, aangelokt door hogere lonen en gevaren-gelden, opofferen?

### De hoeveelheden nader beschouwd

Geschat wordt dat in Nederland voor 1990 een kerncentrale-park in bedrijf is met een totaal vermogen van 9100 MWe. De verwachte jaarproduktie is dan:

|                       |                                             |
|-----------------------|---------------------------------------------|
| 2300 m <sup>3</sup>   | niet samengeperst LAVA                      |
| 115 m <sup>3</sup>    | niet samenpersbaar MAVA (exklusief schroot) |
| 72 m <sup>3</sup>     | HAVA (uitgezonderd splijtstofelementen)     |
| 19,5 m <sup>3</sup>   | HLW - kernsplijtstofprodukten               |
| 11,7 m <sup>3</sup>   | HLW - omhulling van splijtprodukten         |
| 2518,2 m <sup>3</sup> | totaal radioactief afval                    |

Stellen we dat alles in vrachtwagens van 20 m<sup>3</sup> wordt vervoerd, dan komt één en ander neer op een 125 vrachtwagens per jaar die langs onze wegen rijden, gevuld met radioactief materiaal. Wegens de onbekendheid met de gevaren valt op grond van deze cijfers weinig zinnigs te zeggen. Wel moeten we bedenken, dat het afval van kern-centrales niet alleen radioactief is, maar ook op grond van chemische eigenschappen gevaarlijk is (denk aan het giftige plutonium).

#### IV Veiligheid van transport.

Vervoer geschiedt per trein, per boot, per vliegtuig of per (eventueel speciale) vrachtauto. Afgezien van verkeersongelukken kan de veiligheid nog bedreigd worden door: diefstal en sabotage. Wat het tweede betreft is het perspectief niet gunstig: tegenwoordig kan vrijwel iedere groepering aan een bom komen (zelf maken of kopen). En het is vrij simpel om op de route van een trein, auto of schip zo'n ding te plaatsen. Wat vliegtuigen betreft is het wat gunstiger: hier is de controle op bommen bij het inladen al vrij safe, al wordt men steeds vindingrijker om ook hier ongezien wat binnen te smokkelen.

Een tweede is diefstal. Auto's en vliegtuigen zijn eenvoudig te kopen, maar ook schepen en treinen zijn niet gevrijwaard van ongewenste bezoekers (zie bv. de beroving van geldtransporten). Het grootste gevaar bevindt zich bij het overbrengen van het ene naar het andere transportmiddel, bv. overladen van auto naar boot.

Voor wat betreft maatregelen tegen ongewenste akties kunnen we verwijzen naar de voorzorgen die getroffen worden bij geldtransporten.

Maar, ondanks voorzorgen die worden getroffen, zal het transport één van de kwetsbare onderdelen in het geheel van de kernenergie blijven.

#### Referenties:

1. Z.M. Nooteboom-Beekman, R.W. Sanderse, J.R.D. Stoute, Straling, radioactiviteit en stralingsbescherming, RCN GBA-memo nr. 100 (1973).
2. Wettelijk teksten.

## Hoofdstuk IX OPWERKING VAN RADIO-AKTIEF AFVAL

### Inleiding.

Onder opwerking van bestraalde splijtstofelementen verstaat men de afscheiding hiervan van opnieuw te gebruiken stoffen als Uranium en Plutonium (verder te noemen U en Pu).

De overblijvende splijtingsprodukten en de huls (dan gescheiden van het element) zijn dan afvalstoffen geworden en moeten vanwege hun aktiviteit en levensduur onder controle gehouden worden.

Algemeen, zeker op kommerciële schaal, wordt het zogenaamde Purexprocédé (of varianten hierop) toegepast. Dit is een waterig proces; men spreekt wel van natte opwerking.

De droge opwerkingsmethoden kunnen we (1) onderscheiden in:

1) Halogenide- vervluchtigingsprocessen:

Deze berusten op het feit dat de hexafluoriden van U en Pu vervluchtigd kunnen worden en zodoende te scheiden zijn van de splijtingsprodukten.

General Electric past een gekombineerd extractie (Purex)-vervluchtigings-systeem toe, het zogenaamde Aquafluorproces.

2) Pyroprocessen (pyrometallurgisch of pyrochemisch). Een toepassing op proef-fabrieksschaal is het smeltproces in de geïntegreerde splijtstofcyklus van de EBR-II (Experimental Breeder Reactor II) (1).

Hoewel deze processen een kostenvoordeel hebben door het geringere aantal procestrappen zijn er dusdanige technische problemen dat ze voorlopig nog niet op kommerciële schaal toegepast zullen worden. In het volgende zal daarom alleen de natte opwerking besproken worden (deel II).

Bij het waterig proces komt het afval vooral in vloeibare (en gas-) vorm te voorschijn. De problemen ten gevolge hiervan zijn nog steeds niet volledig opgelost. In deel III zal hierop ingegaan worden.

Eerst echter is het interessant om de huidige stand van zaken wat betreft opwerking te bekijken.

### I De opwerking in Europa.

In Europa bestaan twee grote en een zevenatal kleinere eenheden voor de opwerking van gebruikte splijtstoffen. De grote fabrieken hebben een capaciteit van 2500 en 900 ton U per jaar; de kleinere hebben capaciteiten die variëren tot zo'n 75 ton U per jaar.

Een al wat oudere prognose (ref 2) geeft voor 1982 1732 ton U per jaar aan metallisch splijtstof en 1863 ton U per jaar oxide. Een schatting voor 2000: zo'n 10 tot 20.000 ton per jaar in West-Europa.

Voor Nederland was de fabriek van Eurochemie te Mol het belangrijkste. Deze werd in 1959 opgericht door wat thans het Agentschap voor Kernenergie heet. Deze

organisatie heeft 13 leden waaronder Nederland. Naast de staat heeft ook Neratoom hierin een (klein) belang. De fabriek in Mol kwam in 1964 in bedrijf en heeft tot 1973 zo'n 175 ton natuurlijk en laag verrijkt U, alsmede een 25 ton uit onderzoeksreaktoren (ongeveer één ton hoog verrijkt U) verwerkt. De fabriek werd echter gesloten, omdat hij wegens te kleine capaciteit niet rendabel meer was.

Voor de toekomst is Nederland aangewezen op de "United Reprocessors" GmbH, een bundeling van Britse, Franse en Duitse belangen op het gebied van de opwerking.

## II Natte opwerking.

Het aanbod van splijtstofelementen is veelzijdig. Ze verschillen ruwweg in:

- 1) verrijkingsgraad;
- 2) materiaal en huls splijtstof (oxide of metaal);
- 3) versplijtingsgraad en gehalte aan Pu.

De volgende tabel (4) hiervan een indruk:

Tabel 1

| oorspr. ver-<br>rijkingsgraad<br>( % U-235) | materiaal van<br>huls | splijtstof      | versplijtings-<br>graad<br>(MWd/ton) | afkoelings-<br>duur<br>(dagen) | gehalte<br>aan Pu<br>(g/kg U) | specifieke<br>aktiviteit<br>(Ci/kg U) |
|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| natuurlijk<br>(d.i. 0.7%)                   | Al                    | U-metaal        | 3 à 1250                             | 300 à 1200                     | 0,2 à 1½                      | 7 à 250                               |
|                                             | Al                    | UO <sub>2</sub> | 3100                                 | 250                            | 1,8                           | 250                                   |
|                                             | Al                    | U-Mo            | 1800                                 | 1800                           | 0,6                           | 540                                   |
|                                             | Mg                    | U-metaal        | 650 à 1200                           | 120 à 700                      | 0,2 à 1                       | 60 à 250                              |
|                                             | Zircaloy              | UO <sub>2</sub> | 300 à 2100                           | 300 à 400                      | 2 à 3                         | 150 à 200                             |
| < 4,5%                                      | roestvrij<br>staal    | UO <sub>2</sub> | 1700 à 21200                         | 200 à 1800                     | 3,8 à 8                       | 500 à 2000                            |
| < 93%                                       | Zircaloy              | UO <sub>2</sub> | 1500 à 16000                         | 150 à 1000                     | 3,2 à 6½                      | 300 à 1900                            |
|                                             | Al                    | U-Al            | 30%                                  | 125 à 2300                     | pm.                           | 450 à 3600                            |

A -- Scheikundig procédé voor natuurlijk of laag verrijkt splijtstof (vermogens-reaktoren).

We kunnen in dit proces vijf stappen onderscheiden:

1. ontmanteling van de elementen (onthulling);
2. oplossen van de splijtstof in salpeterzuur;
3. klaren en aanpassen van de oplossing;
4. afscheiding en zuivering van U en Pu door vloeistof-vloeistof extractie;
5. uiteindelijke zuivering van U over silikagel en van Pu over een anionen-wisselaar.

Hieronder volgen enkele aantekeningen bij de verschillende stappen.

Wat betreft punt 1. kunnen we als illustratie het geval van een aluminiumhuls nemen. Als reagens wordt NaOH gebruikt. De reductieprodukten zijn H<sub>2</sub> (gas) en

$\text{NaAlO}_2 + \text{NaOH}$  (oplossing). De reaktietijd is gemiddeld zo'n 10 à 15 uren. Een ander voorbeeld is roestvrij staal dat met Sulflex wordt behandeld en als reaktieproducten  $\text{H}_2$  (gas) en  $\text{Fe}(\text{Cr}, \text{Ni})\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  geeft. Reaktietijd: 20 à 24 uren (gemiddeld) (4).

Bij 2.. Een voorbeeld is U-metaal of  $\text{UO}_2$ . Reagens:  $\text{HNO}_3$ . Reaktieprodukten: N-oxiden (gas) en  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 + \text{HNO}_3$  (oplossing). Reaktieduur: gemiddeld 12 à 24 uren.

Bij 3.. Klaren met centrifuge omdat anders de voedinsleiding naar de extractie-eenheid door Zr-oxidedeeltjes (losgekomen van de hulzen) verstopt kan raken. Het salpeterzuur en U-koncentraties in de oplossing worden aangepast.

Bij 4.. Als extraktiemiddel voor het chemische scheidingsproces wordt tributylfosfaat (TBP) gebruikt (in kerosine). De apparatuur: zowel gepulseerde kolommen als mixer-settlers.

In de eerste extraktiestap zijn U en Pu overgegaan naar organische fase. In de volgende stap wordt Pu selektief teruggeëxtraheerd (vaak met ferrosulfaat; dit leidt tot toevoeging van vaste stof aan het vloeibare actieve afval). De vloeistof-vloeistof extraktie vindt dus plaats tussen een waterige fase en een organische fase die TBP bevat.

Het probleem (vooral in de eerste stap) vormt de moeilijk te verwijderen splijtingsprodukten als ruthenium, zirkonium en niobium.

Na de omega-dekontaminatiecyklus wordt het afgescheiden U verder gezuiverd in één of twee extraktiecykli, eveneens met TBP. Voor de verdere zuivering van het afgescheiden Pu wordt ofwel TBP ofwel een tertiaire amine als triamylamine (TLA) gebruikt (1).

---

Tabel 2 (3): Hoeveelheden afval uit de opwerking van 1 ton splijtstof met een versplijting van 33000 MWd/ton, bij een specifiek vermogen van 30 MW/ton. Aktiviteiten 30 dagen na het ontladen.

---

|                                       |                          |
|---------------------------------------|--------------------------|
| splijtingsprodukten                   | 35 kg                    |
| Pu en zwaardere aktiniden             | 5,8 kg                   |
| volume hoog-actieve afvalvloeistof    | 1,5 m <sup>3</sup>       |
| volume H.A. als vaste stof            | 0,09 m <sup>3</sup>      |
| laag- en middelactieve vloeistof      | 37,5 m <sup>3</sup>      |
| vaste afval van omhulling             | 0,3 m <sup>3</sup>       |
| totale aktiviteit splijtingsprodukten | 4,4 x 10 <sup>6</sup> Ci |
| <sup>3</sup> H (tritium)              | 400 Ci                   |
| <sup>85</sup> Kr                      | 10.000 Ci                |
| <sup>131</sup> I                      | 2 Ci                     |
| <sup>129</sup> I                      | 0,03 Ci                  |

---

B -- Ontwikkelingen betreffende de natte opwerking.

— Speciaal voor grote fabrieken en van kweekreaktoren en andere afkomstige

splijtstof met een zeer hoge versplijtingsgraad zijn er problemen.

1. de ontmanteling

Grote fabrieken kunnen in feite geen chemisch procédé gebruiken t.g.v.:

- a) zeer groot volume vloeibaar chemisch afval (1 Ci/liter) met hoog zoutgehalte. De uitbalingskosten voor het transporteren van het afval in bitumen zijn f 7000 per m<sup>3</sup>.
- b) te lage snelheid van de chemische reacties
- c) risico verliezen U en Pu tijdens oplossen van huls, vooral bij splijtstof met een zeer hoge versplijtingsgraad (boven 5000 MWd/ton) (0,2 tot 4,5 % bij roestvrij staal tot 1 % bij Zircaloy).

Een oplossing hiervoor is het gebruiken van de "chop and leach" methode: de elementen worden in segmenten van een paar cm gehakt en dan zonder meer aan het oplosvat toegevoegd. Nadeel: men is gebonden aan bepaalde geometrische vormen van de elementen. Deze methode wordt ondermeer toegepast in La Hague en bij de eerste commerciële opwerkingsfabriek in de V.S. (die van Nuclear Fuel Services in West Valley, staat New York, capaciteit 1 ton per dag).

Een variatie hierop (met behoud van de chemische ontmanteling) is de in Mol ontwikkelde methode ("chemical chop").

2. radiolyse in de organische fase

Splijtstof met een hogere versplijtingsgraad geeft een hogere S.A. (specifieke aktiviteit) en dit geeft aanleiding tot een vermeerdering van de radiolyse in de organische fase. Gevolgen:

- a) stijging verliezen aan U en Pu (vorming van niet-extraheerbare U en Pu complexen);
- b) emulsies en vaste stoffen ontstaan die zich ophopen in de extractie-kontractors.

Men kan dit verhinderen door de contacttijd tussen de waterige en organische fase te verkleinen (zogenaamde snelle kontraktors als centrifugaalkontractors en hydroclonen zijn in ontwikkeling).

### III Afvalproduktie en -behandeling .

De grote problemen hierbij ontstaan door het feit dat het meeste afval vloeibaar of gasvormig is. Ook bij het Aquafluorproces is het hoog-actieve deel een waterig proces. Bij droge opwerkingsmethoden zou het afval in vaste vorm tevoorschijn komen en in dat opzicht minder opslagproblemen geven.

A) -- Waar en hoe ontstaat het afval?

De grootste hoeveelheid radioactief afval wordt bij natte opwerking aangetroffen in de raffinaatstroom van de eerste extraktor van de eerste extractiecyclus. Dit vormt het hoogactieve afval (splijtingsprodukten in oplossing).

De gasvormige splijtingsprodukten zijn vooral de radionukliden <sup>3</sup>H (tritium), <sup>85</sup>Kr, <sup>129</sup>I en <sup>131</sup>I.

Een in de toekomst steeds belangrijker wordend probleem is het tritium (halfwaardetijd 12,3 jaar, zwakke bèta-emitter) dat met een opbrengst van 0.01 %

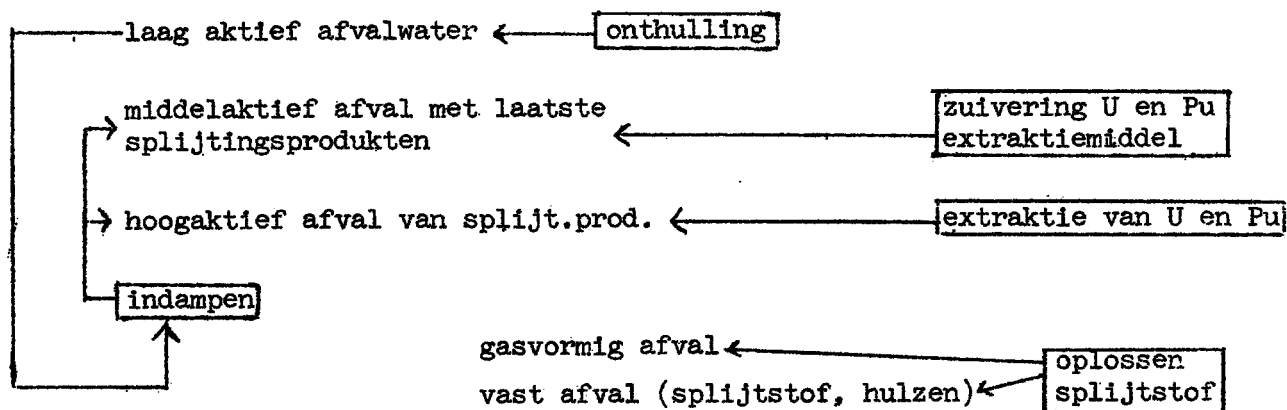


Fig. IX-1 Ontstaan van afval bij opwerking. In de kaders staan de bewerkingen.

wordt gevormd door ternaire splijting: immers als de tendens naar een hogere versplijtingsgraad doorgaat (lichtwaterreactoren) zal ook steeds meer tritium gevormd worden. Een al wat oudere schatting (ref 1) geeft dat de hoeveelheid gevormde tritium in de V.S. zal toenemen van 15000 Ci in 1968 tot  $3 \times 10^7$  Ci in het jaar 2000.

B) — Wat gebeurt er met het afval?

1. zuivering der gassen,
2. lozen van zwak-actieve afvalvloeistoffen naar de omgeving;
3. indampen en opslaan der oplossingen;
4. opslag van de vaste stoffen.

ad 1.. Tabel 3 (3): Gaslozingen door een opwerkingsfabriek van 1500 ton/jaar en de grens van de toelaatbaarheid

| nuklide          | max. toelaatbare konc. in lucht (mikroCi/cm <sup>3</sup> ) | lozings-snelheid Ci/sek. | konc. hierdoor in de omgeving (mikroCi/cm <sup>3</sup> ) | perc. van max. toel. dosis ( % ) |
|------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------|
| <sup>85</sup> Kr | $1,0 \times 10^{-7}$                                       | 0,53                     | $3,0 \times 10^{-8}$                                     | 30                               |
| <sup>3</sup> H   | $0,7 \times 10^{-7}$                                       | 0,019                    | $1,1 \times 10^{-9}$                                     | 1,5                              |
| <sup>131</sup> I | $1,4 \times 10^{-13}$                                      | $1,23 \times 10^{-6}$    | $7 \times 10^{-14}$                                      | 50                               |
| <sup>129</sup> I | $6,7 \times 10^{-12}$                                      | $1,42 \times 10^{-8}$    | $8,1 \times 10^{-16}$                                    | 0,012                            |

Bij deze tabel is een atmosferische verdunningsfactor van  $5,7 \times 10^{-8}$  en een herkoncentrering van <sup>131</sup>I in de voedselketen van 700 aangenomen (dit zou ook voor <sup>129</sup>I moeten).

De halveringstijden zijn resp.:  
<sup>131</sup>I :  $t_{\frac{1}{2}} = 8$  dagen;  
<sup>129</sup>I :  $t_{\frac{1}{2}} = 1,6 \times 10^7$  jaar;  
<sup>85</sup>Kr :  $t_{\frac{1}{2}} = 10,76$  jaar;  
<sup>3</sup>H :  $t_{\frac{1}{2}} = 12,3$  jaar.

Ongeveer 25 % van het gevormde tritium verdwijnt door de schoorsteen naar buiten (in de aflatgassen). Dit is in Oak Ridge aangetoond. De rest komt in het

kondensgas van de indampers. Oplossingen van dit probleem ziet men in het recirkuleren van het kondensaat van de indampers zodat het tritium wordt opgebouwd in de hoogactief-afvalstroom, of in het treffen van voorzieningen zodat het tritium als stoom via de schoorsteen wordt geloosd. Krypton kan voor 99 % worden geabsorbeerd aan freonmengsels. De hoeveelheden  $^3\text{H}$  en  $^{85}\text{Kr}$  zijn vanwege hun lange levensduren onafhankelijk van de leeftijden van de splijtstof. Dit gaat niet op voor  $^{131}\text{I}$ . Bij een leeftijd van 150 dagen (gebruikelijk) blijft de lozing van het jodium ver onder de tolerantiegrenzen.

Bij opwerking van kort gekoelde splijtstof uit snelle reactoren vereist het binnenhouden van het jodium uitgebreide voorzieningen. Akkumulatie-effecten zullen er waarschijnlijk toe leiden dat hoewel de gaslozing nú nog beneden de tolerantiegrenzen is, dit in de toekomst zal veranderen.

ad 2.. Een paar voorbeelden (3).

Windscale: loost naar Ierse Zee; men mag per maand 25000 Ci lozen.

Cape La Hague: loost naar het Kanaal per jaar max. 45000 Ci bèta-actief toegestaan.

Men schijnt in de V.S. bezig te zijn met het treffen van voorzieningen om de aktiviteit van deze afvalstromen tot een absoluut minimum, wat dat ook moge zijn, te beperken.

ad 3.. De hoogactieve afvalstroom wordt tot een zo klein mogelijk volume ingedampt en in bijvoorbeeld stalen tanks opgeslagen. Deze tanks worden gekoeld vanwege de zelfverhitting van de vloeistof. Dit is geen definitieve oplossing (zelfs bij gebruik van de beste korrosie-bestendige materialen). Men probeert nu het hoogactieve afval in vaste vorm te brengen bv. door: droogdampen en kalcineren of het verwerken van de splijtingsprodukten tot een glasmassa (met in de hand gehouden temperatuur!). Echter een interim - periode voor opslag in vloeibare vorm zal er wel moeten zijn om de warmteontwikkeling te kunnen controleren. Ook wordt gedacht aan het verder afscheiden van bepaalde splijtingsprodukten en transuranen, bv. Np, Am, Cm, Rh, Tc .

### Konklusies.

Het opwerkingsproces is nog niet zo geavanceerd dat men het onvermijdelijke afval in dusdanige vorm kan brengen dat het een te verwaarlozen invloed op ons leefmilieu heeft. Vooral de opslagproblemen (hier niet aan de orde) en de methode van opwerking geven tot deze konklusie aanleiding.

Eisen die men aan de opwerkingsfabrieken minstens moet stellen zijn:

- een voorziening om het hoogactieve vloeibare afval in vaste vorm te brengen;
- het sterk verminderen van de aktiviteit van de vloeistoffen die naar de omgeving geloosd worden.

Referenties:

1. W. Kraak, Nieuwe ontwikkelingen in de splijtstofopwerking (I), Atoomenergie 10, blz. 262 (1968).
2. W. Kraak, Nieuwe ontwikkelingen in de splijtstofopwerking (II), Atoomenergie 10, blz. 281 (1968).
3. Van der Feer & Verkerk, Afvallozing en -opslag bij opwerkingsfabrieken, Atoomenergie 13, blz. 334 (1971).
4. E,J; Detilleux, Ervaringen opgedaan tijdens exploitatie van Eurochemie, Atoomenergie 16, blz. 57 (1974).

## Hoofdstuk X OPSLAG VAN RADIO-AKTIEF AFVAL

### I. Inleiding.

Bij het zoeken naar oplossingen van de problemen, die zich bij kerncentrales voordoen, is altijd zeer weinig gedaan aan onderzoek naar de mogelijkheden om het radioactieve afval op te slaan.

Toch ligt het voor de hand, dat een veilige opslag van het afval belangrijk is. Mocht de opwekking van kernenergie in de toekomst grote vormen gaan aannemen, dan moet er alles aan gedaan worden om te voorkomen, dat onze, en vooral de komende generaties blootgesteld worden aan gevaren, die voortvloeien uit een ondoordachte opslag. Over het algemeen echter worden de problemen bij de opslag onderschat. Dit mag blijken uit het feit, dat vrijwel alle artikelen over opslag de prognoses van het (kern)energieverbruik als uitgangspunt nemen.<sup>(1)</sup> Aan de hand daarvan wordt dan bekeken of we het aldus verkregen afval kwijt kunnen, en zo ja, waar. Beter zou natuurlijk zijn de produktiekapaciteit af te stemmen op de opslagkapaciteit.

### II. Enkele gegevens over het afval afkomstig van een kerncentrale.

Wanneer een kerncentrale in bedrijf is, komen er verschillende soorten afval vrij, die we kunnen onderscheiden in:

- a) gasvormig afval (vnl. Tritium, Xenon-133 en -135, Krypton-85, -87 en -88, en Jodium-129 en -131). Dit wordt niet opgeslagen, maar geloosd in de atmosfeer. Dit afval moeten we dus tot radioactieve vervuiling rekenen (zie hoofdstuk V);
- b) vloeibaar afval: dit kan door indampen vast worden gemaakt, zodat het een kleiner volume inneemt (zie dus onder c.). Toch wordt het ook wel in vloeibare vorm opgeslagen;
- c) vast afval. Dit kan worden gesplitst in:
  - 1- LAVA (laag-aktief vast afval) dwz afval dat  $\beta$  resp.  $\gamma$  straling uitzendt met een stralingsdosis, gemeten aan de buitenkant van het verpakkingsmateriaal, van minder dan 0,2 R $\ddot{o}$  per uur; hieronder valt lichtbesmet gereedschap, kleding e.d.;
  - 2- MAVA (matig-aktief vast afval), dit zijn  $\beta$ - en  $\gamma$ -emitters met een stralingsdosis tussen 0,2 en 2 R $\ddot{o}$  per uur op het verpakkingsoppervlak; hieronder vallen o.a. de afgewerkte harsen van de ionenwisselaars, uitgezonderd die van het primaire circuit;
  - 3- HAVA (hoog-aktief vast afval), dit zijn  $\beta$ - en  $\gamma$ -emitters met een stralingsdosis groter dan 2 R $\ddot{o}$  per uur op het verpakkingsoppervlak; hieronder vallen o.a. de harsen uit het primaire koelsysteem, filters, houders van splijtstofelementen, regelstaven;
  - 4- HLW (high level waste), dezelfde normen als bij HAVA, maar nu voor het

afval van de opwerkingsfabriek; hier gaat het om  $\gamma$ -emitters. Hierbij treedt bovendien nog een probleem op doordat t.g.v.  $\gamma$  straling veel warmte vrijkomt.

Er wordt geschat dat de hoeveelheid afval van een lichtwaterreaktor is:

LAVA ongeveer  $200 \text{ m}^3$  per jaar;

MAVA ongeveer  $10 \text{ m}^3$  per jaar;

HAVA ongeveer  $5 \text{ m}^3$  per jaar.

Deze cijfers zijn betrekkelijk onafhankelijk van de grootte van de reaktor(2).

De volgende tabel laat zien hoeveel HLW er vrijkomt wanneer 1 ton splijtstof uit een lichtwaterreaktor (goed voor 792.000 MWh) wordt opgewerkt. De activiteiten van het afval zijn 150 dagen na het opwerken gemeten.

|                                                            |                              |     |
|------------------------------------------------------------|------------------------------|-----|
| splijtingsprodukten                                        | 35 kg                        |     |
| Plutonium en zwaardere actiniden                           | 5,8 kg                       |     |
| volume van de hoogactieve vloeistof                        | $1,5 \text{ m}^3$            |     |
| volume van ditzelfde, nu als vaste stof                    | $0,09 \text{ m}^3$           |     |
| laag- en middel-actieve vloeistof                          | $37,5 \text{ m}^3$           |     |
| vaste afval van de omhulling van het afval                 | $0,3 \text{ m}^3$            |     |
| totale activiteit van de splijtingsprodukten <sup>x)</sup> | $4,4 \times 10^6 \text{ Ci}$ |     |
| x) waaronder                                               |                              |     |
| (Tritium-activiteit                                        | 400 Ci)                      |     |
| (Krypton-85-activiteit                                     | 10000 Ci)                    |     |
| (Jodium-131-activiteit                                     | 2 Ci)                        |     |
| (Jodium-129-activiteit                                     | 0,03Ci)                      | (2) |

splijtingsprodukten, zoals I-131, I-129 ..., hebben in het algemeen direct na de reactie een fors overschot aan neutronen, waarmee de  $\beta$ - en  $\gamma$ -activiteit samenhangt. Na ongeveer 500 jaar opslag is de radio-activiteit in de regel zo ver gedaald, dat het stralingsniveau onder de normen voor normale bovengrondse opslag ligt.

Biologisch veel gevaarlijker zijn Plutonium en de zwaardere actiniden, die ontstaan door het invangen van neutronen door Uranium. De halveringstijden zijn in het algemeen veel groter dan die van de splijtingsprodukten, terwijl ook de gevaarlijke  $\alpha$ -straling voorkomt. Op de volgende pagina zijn enkele  $\alpha$ -stralers met hun halveringstijden en hun activiteiten na 10 resp. 500 jaar getabelleerd. Er blijkt uit, dat de actiniden 50 tot 100 duizend jaar bewaard moeten worden voordat het stralingsniveau onder de normen voor normale bovengrondse opslag ligt(4).

Tenslotte moet worden vermeld, dat het HLW dat ontstaat na opwerking van 1 ton splijtstof in een periode van 5 tot 25 jaar na opwerking een vervalwarmte van rond 27 kW afstaat(5).

Gehalte aan de belangrijkste aktiniden in de hoog-actieve afvalvloeistof van 1 ton opgewerkte splijtstof, 10 resp. 500 jaar na de reaktorontlading.

| isotoop | halveringstijd<br>(in jaren) | radioactiviteit (in Ci) |             |
|---------|------------------------------|-------------------------|-------------|
|         |                              | na 10 jaar              | na 500 jaar |
| Pu-238  | 86                           | 100                     | 1,5         |
| Pu-239  | 24400                        | 1,5                     | 1,5         |
| Pu-240  | 6600                         | 4,5                     | 8           |
| Pu-241  | 14                           | 3                       | -           |
| Am-241  | 433                          | 160                     | 80          |
| Am-242  | 152                          | 4                       | 0,4         |
| Am-243  | 7950                         | 170                     | 170         |
| Cm-243  | 32                           | 3                       | -           |
| Cm-244  | 18                           | $1,3 \times 10^3$       | -           |

(4)

### III. Wat zijn de mogelijkheden voor de opslag?

- a) vloeibaar afval. Laag-actieve, en in mindere mate middel-actieve vloeistof wordt vaak met het koelwater in de rivier of zee geloosd. Hoog-actieve en de meeste middel-actieve vloeistof wordt ingedampd tot vast afval (zie blz. 51) of wordt opgeslagen in reusachtige ondergrondse tanks. Met deze laatste methode van opslag is men in Amerika al lang bezig. Eerst haalt men het U-235 en Pu-239 eruit en slaat het vervolgens op in tanks, die elk gemiddeld ca.  $2500 \text{ m}^3$  hoog-actieve vloeistof kunnen bevatten. In de opslagtanks voor afval van de produktie van "bomb-grade" Plutonium is de radio-activiteit van de vloeistof enkele tientallen Ci/liter. In de toekomst loopt dit waarschijnlijk op tot ca. 600 Ci/liter. De ervaring heeft uitgewezen dat de wanden van deze tanks in ongeveer 20 jaar zijn vergaan. Het is bekend, dat er in Amerika voor 1973 al 9 lekkages zijn opgetreden. Doordat de vloeistof vaak langzaam door de bodem zakt, kan het soms lang duren voordat de lekkage wordt ontdekt. Een van de 9 lekkages werd pas gevonden toen er al 26000 liter vloeistof in de bodem was verdwenen. Het is duidelijk dat de gevolgen voor de drinkwatervoorziening in dergelijke gevallen vaak niet te overzien zijn(10).
- b) vast afval. Tot nu toe zijn er zeven mogelijke manieren in discussie om vast afval op te slaan:
1. het afzinken naar de oceaanbodem;
  2. het begraven onder het maaiveld;
  3. het opslaan in speciaal daarvoor ingerichte silo's;
  4. het opbergen in zoutformaties;
  5. het inrichten van een (radio-actief) afvaleiland in zee;
  6. het wegschieten naar de zon of in een baan om de zon;

7. het laten insmelten in poolijs op Antarctica van het HLW: het HLW zou opgeborgen moeten worden in roestvrij stalen bollen. Deze zouden door hun hoge temperatuur (het afval vervalst nog!) door de ijslaag heenzakken en op de onderliggende rotsen blijven liggen.(5) Nog niet bekend is of het oceaanaan water onder de toplaag dóór met het afval in contact zal kunnen komen.

We stellen eerst een aantal eisen op, waaraan de opslagmogelijkheid minimaal zal moeten voldoen:

1. de voorbereidingen zullen zó moeten gebeuren, dat er geen radio-actieve stof of straling vrijkomt;
2. er moeten garanties zijn, dat het afval niet met de buitenlucht of het grondwater in aanraking komt, zolang het stralingsniveau niet tot onder de normen is gedaald.

Natuurlijk spelen ook de kosten van de opslag een rol bij de keuze. Het is echter de vraag, of de keuze van de opslagmogelijkheid op grond van bovengenoemde eisen beïnvloed mag worden door overwegingen van deze aard.

Welke opslagmogelijkheden kent Nederland, en hoe veilig zijn ze? Een werkgroep van het Reaktor Centrum Nederland (RCN) stelde in 1972 het volgende:

- 1) afzinken naar de oceaانبodem (zoals nú gebeurt) verdient de voorkeur voor de "vrij grote hoeveelheid LAVA";
- 2) begraven onder het maaiveld zonder verpakking is hier niet mogelijk vanwege de hoge grondwaterstand: het afval zou in contact komen met het grondwater;
- 3) opslag in speciaal ingerichte silo's is technisch mogelijk, maar er wordt betwijfeld of deze oplossing op lange termijn verantwoord is;
- 4) opslag in zoutformaties is "reëel en attractief", niet alleen voor LAVA en MAVA, maar ook voor HAVA en HLW;

Aan 5), 6) en 7) wordt in het rapport geen aandacht besteed.(2)

(De rubricering komt overeen met die van de bovenstaande inventarisatie)

We zullen op de mogelijkheden 3) en 4) wat dieper ingaan, omdat:

- 3) technisch vrij gemakkelijk uitvoerbaar is, en
- 4) een mogelijkheid betreft, die erg belangrijk is, omdat in het noorden en oosten van het land veel zoutformaties voorkomen. In dit verband zijn de huidige plannen voor en proeven met (chemische) dieptelozingen een teken aan de wand. Met name Akzo Zout Chemie is actief met proefboringen bezig in de twee zouthorsten bij Winschoten en Veendam om te zoeken naar mogelijkheden "voor opslag van eigen (en eventueel van andere industrieën afkomstig) chemisch afval"(9).

Toelichting bij de mogelijkheden 3) en 4):

3) opslag in speciaal ingerichte silo's.

Hierbij wordt gedacht aan bunkers van beton, of roestvrijstalen cilinders. Ook wordt opslag in het hart van een kerncentrale overwogen. Dit zou dan moeten gebeuren als de reaktor na 20 tot 40 jaar wordt gesloten. Een nadeel is, dat er dan erg veel radio-actieve centra in het land komen.(1) Bovendien is zo'n bunker

nogal kwetsbaar.

#### 4) opslag in zoutformaties.

De gedachte, die ten grondslag ligt aan opslag in zoutlagen, is deze. "Het bestaan van deze lagen is te danken aan het feit, dat er al tienduizenden jaren geen grondwater bij is geweest. Dit betekent, dat het afval niet in het grondwater kan komen." Verschuivingen van de zoutlaag door aardbevingen e.d. of het oplossen van de laag door grondwater blijven natuurlijk desondanks mogelijk in de toekomst.

In Nederland wordt gedacht aan stortholtes, met een diameter van 20 meter en een hoogte van 100 meter, waarvan de top ca. 400 meter onder het aardoppervlak ligt. Hierin zou rond 20000 m<sup>3</sup> LAVA en MAVA gestort kunnen worden(2). Voor storting van HAVA denkt men aan insmelting in een glasmatrix. Dit is voor het HLW echter niet mogelijk. De al eerder genoemde grote hoeveelheid vervalwarmte, die bij de opslag vrijkomt, moet worden afgevoerd, hetgeen zeer hoge temperaturen ten gevolge heeft. In een cilinder van 3 meter lang en 15 cm doorsnee, gevuld met HLW, kan de temperatuur oplopen tot 930 °C (7), met als eventueel gevolg, dat rotslagen breken en zo het afval met het grondwater in contact komt, na het vergaan van de cilinders (na ca. 3 jaar).

In Amerika heeft de Atomic Energy Commission (AEC) sinds 1957 onderzoek gedaan aan de mogelijkheid om HLW in een zout mijn op te slaan. Bij proeven in de Carey Salt Company-zoutmijn bij Lyons (Kansas) bleek, dat de aanvankelijk gunstig geachte kwaliteiten van de zoutlaag toch "niet onverdeeld prettig" waren. Bij de grote warmte-ontwikkeling van het hoog-actieve materiaal traden complicaties op (kruipverschijnselen). De mijn is niet in gebruik genomen, in tegenstelling tot wat was gepland (6,7,8).

Ook in West-Duitsland is men met proeven bezig inzake opslag in zoutmijnen. Te Asse is voor opslag van laag- en middel-actief afval al een mijn in gebruik genomen. Men experimenteert met de opslag van hoog-actief afval.

#### IV. Benodigde opslagcapaciteit.

De Nota inzake Kernenergiebeleid, die in 1972 is aangeboden aan de Tweede Kamer, voorspelt voor het jaar 2000 een nucleair vermogen van 30-40.000 MWe. Het RCN houdt het op 16 tot 19.000 MWe, verdeeld over 21 lichtwater reactoren en 3 snelle kweekreactoren. De op grond van deze laatste voorspelling te verwachten hoeveelheid afval, die tot dan is geproduceerd, is:

|      |                      |                     |
|------|----------------------|---------------------|
| LAVA | 69500 m <sup>3</sup> | (niet samengeperst) |
| MAVA | 3365 m <sup>3</sup>  |                     |
| HAVA | 1647 m <sup>3</sup>  |                     |
| HLW  | 1190 m <sup>3</sup>  |                     |

De vervalwarmte (vooral door het HLW) zal dan globaal 200 MW zijn.<sup>++</sup>) Als de opslag in zoutformaties zou gebeuren, zou er voor het LAVA en MAVA net één

stortholte nodig zijn, als het LAVA met een faktor 5 wordt samengeperst. Voor de opslag van het HAVA en HLW zijn nog geen opslagmogelijkheden uitgewerkt.

#### V. Konklusies.

1. Vóórdat tot de bouw van kerncentrales mag worden overgegaan moeten eerst voldoende en voldoende veilige opslagmogelijkheden worden uitgewerkt. Dit geldt in het bijzonder voor het hoog-actieve afval. ("De technieken voor wat betreft opslag zijn niet zodanig, dat hierop een beleid op lange termijn kan worden afgestemd" (1));
2. Ook de procedures bij het sluiten van reaktoren moeten uitvoerig worden bestudeerd, voordat de kerncentrales mogen verrijzen.

#### Referenties:

1. Advies R120 van de Wetenschappelijke Raad voor de Kernenergie, Vestigingsplaatsen van energiereaktoren en de opslag van radioactief afval, juli 1972.
2. RCN, Verwerking en opslag van radioactief vast afval afkomstig van de kernenergiecentrales in Nederland, Atoomenergie 14, (9), blz. 235 (1972).
3. A. Tolk, Afvalaspecten van Kernenergie, Informatiemap "Voorlichtingsbijeenkomst Kernenergie" (in DE Doelen te R'dam, 28 mei 1973), blz. 7 (1973).
4. J.J. Went, Afvalbehandeling en afvalopslag van splijtprodukten uit kernenergiecentrales, De Ingenieur 85, blz. 602 (1973).
5. B. Verkerk, Poolijs en warme mollen panaceeën voor kernsplijttingsafval?, Chemisch Weekblad 69, no. 14, 13-4-73 (1973).
6. Y.v.d. Veer & B. Verkerk, Afvallozing en -opslag bij opwerkingsfabrieken, Atoomenergie 13, (12), blz. 334 (1971).
7. R.S. Lewis, The Radioactive Saltmine, Bulletin of Atomic Scientists, June 1971
8. J.A.C. Davids, Milieuaspecten van elektriciteitsproductie door kernreactoren, RCN-mededeling no. 33.
9. Akzo wil chemisch afval in zoutformaties opslaan, De Ingenieur 85 (15), blz. 315 (1973).
10. D.R. Inglis, Nuclear Energy - its physics and its social challenge, Reading, Mass., Addison-Wesley, blz. 139-145 (1973).

<sup>++</sup>) noot: de berekening loopt als volgt:

Volgens ref. 5 produceert het hoog-actieve afval, verkregen na opwerking van 1500 ton splijtstof, in een periode van 5 tot 25 jaar na opwerking, een vervalwarmte van 40 MW. Dat is voor 1 ton ca. 27 kW. Eén ton opgewerkte splijtstof levert  $0,09 \text{ m}^3$  vast HLW. (Zie tabel pag. 54) Verder verwacht het RCN in het jaar 2000  $730 \text{ m}^3$  geakkumuleerde vaste splijttingsprodukten en aktiniden. (2) Aangenomen, dat het HLW dan gemiddeld 15 jaar is bewaard, wordt de totale warmteproductie  $\frac{730}{0,09} \times 27 \text{ kW} = 219 \text{ MW}$ .

## Hoofdstuk XI    ONGELUKKEN MET KERNCENTRALES

### I. Ongelukken.

Ongevallen met kerncentrales kan men verdelen in drie kategoriën:

- 1) technisch falen
- 2) menselijk falen
- 3) sabotage e.d.

De kans op volledig falen van een kerncentrale wordt door de makers vrijwel nihil geacht. Men neemt in het algemeen aan dat alle noodsystemen goed zullen werken, althans dat de kans op niet werken klein is. Dat dit niet altijd een terechte aanname is, moge blijken uit het noodkoelsysteem, wat volgens een onderzoek van de AEC in 1972 slechts in 25% van de gevallen funktioneerde. Bij een analyse van de kans op ongelukken gaat men vaak uit van het ergst denkbare ongeluk. Meestal is dit een breuk in de hoofdleiding van het koelsysteem, waarna het noodkoelsysteem niet meer zou werken. Vrij algemeen wordt deze kans op  $10^{-7}$  per reaktorjaar gesteld. Recentere publikaties stellen deze kans op  $10^{-5}$  tot  $10^{-6}$  per reaktorjaar (1). Zoals in ditzelfde (1) rapport wordt vermeld, komen kleinere ongelukken en falen van materiaal veel vaker voor.

De grote onzekerheid bij het maken van dergelijke kansberekeningen is de geringe ervaring, die men tot nu toe heeft met kerncentrales. Deze ervaring is beperkt tot ongeveer 10.000 reaktorjaar. Om nu van een kans van  $10^{-7}$  per reaktorjaar te gaan spreken is zuiver theoretisch en statistisch niet aanvaardbaar. We mogen ons overigens gelukkig prijzen dat nog niet gebleken is, dat de berekening ongegrond en fout is, aangezien de gevolgen van "het ergst denkbare ongeluk" erg groot zijn, hetgeen zal blijken in de in dit hoofdstuk volgende case-study van een dergelijk ongeluk met een centrale aan de Eemsmond.

Menselijk falen is tot nu toe de grootste bron van ongelukken met kerncentrales geweest. De ongelukken hebben plaatsgevonden vanaf het begin van het gebruik van kerncentrales. Ze variëren van het indrukken van een verkeerde knop tot het nemen van een verkeerde beslissing (2).

Eén van deze ongevallen is het ongeluk dat gebeurt is met de reaktor in Windscale, die grafiet als moderator gebruikte, op 10 oktober 1957. Door een aantal verkeerde handelingen ontstond brand in het grafiet. Hierdoor kwam ongeveer 21.000 Curie radio-actief materiaal vrij, voornamelijk in de vorm van I-131. Dit gaf aanleiding de melkproduktie in een gebied van  $500 \text{ km}^2$  gedurende anderhalve maand in te houden, terwijl bovendien een aantal mensen blootgesteld werden aan hoge doses radioaktiviteit.

Een ander recenter ongeval vond plaats bij de konstruktie van een derde centrale bij het Browns Ferry-complex van de Tennessee Valley Authority in Tennessee. Tijdens de bouwwerkzaamheden in de controlekamer van de drie centrales brak brand uit in het kabelsysteem. De brand was ontstaan toen een monteur met een kaars probeerde uit te maken waar een bepaalde luchtstroom van daan kwam. Eén van de twee 1100 MWe

centrales moest met de hand worden uitgeschakeld, terwijl de ander via een noodstelsel automatisch uitschakelde. Later bleek dat op dat moment het noodkoelsysteem van beide centrales niet meer werkte (3).

Menselijk falen zal een faktor zijn, die nooit geheel uitgeschakeld zal kunnen worden. Bovendien zal men behalve met onbewust falen ook rekening moeten houden met sabotage. Het blijkt dat iemand, die kwaad wil en de benodigde technische kennis verwerft, een kerncentrale kan ontregelen met alle gevolgen vandien voor de omgeving. Behalve dit zijn er nog andere mogelijkheden van sabotage, zoals het bezetten van een centrale door terroristen. Bovendien kan een groep een vliegtuig laten neerstorten op een kerncentrale, waarmee in 1972 bedreigd werd (4).

De gevolgen van een ongeluk met een kerncentrale variëren uiteraard met de grootte van het ongeluk. Een case-study van een ongeluk met een 1000 MWe kerncentrale is verderop in dit hoofdstuk uitgewerkt.

## II. Risikobeschouwing.

Aan veel menselijke activiteiten zijn, met name voor diegenen die er direkt bij betrokken zijn, grote risico's verbonden, zoals bedrijfsongevallen waarbij mensen verwond of gedood worden.

De gevaren waaraan de mens blootstaat kunnen we opdelen in twee categorieën nl. gevaren met een natuurlijke oorzaak zoals aardbevingen en andere natuurrampen en de natuurlijke achtergrond straling, gevaren waar men weinig invloed op heeft, en gevaren die veroorzaakt worden door menselijke activiteiten. Deze laatste risico's loopt men soms min of meer vrijwillig (bijv. bij het beoefenen van sporten) maar meestal is men er min of meer onvrijwillig aan blootgesteld, zoals aan de risico's van het beroep of van het verkeer.

Vaak is men zich de grootte van het risico dat men loopt niet bewust of wil men het gevaar niet zien. Een duidelijke afweging van de risico's tegen de voordelen vindt meestal niet plaats, of omdat men de grootte van allerlei risico's niet eens kent of omdat het te moeilijk is alles af te wegen door de verschillende aard van de voor- en nadelen. De laatste jaren is er een ontwikkeling om de risico's te kwantificeren (bijv. in het verzekeringswezen). Van reeds lang bedreven activiteiten kan men inzicht in de grootte van de risico's krijgen door het verzamelen van statistische gegevens over ongevallen in het verleden, zowel wat frequentie als wat omvang betreft. Een andere methode is het opzetten van zgn. foutenbomen.

Bij het invoeren van iets nieuws komt dan het probleem van de aanvaardbaarheid van de ermee verbonden risico's om de hoek kijken. De neiging bestaat nu om te denken dat men uit de grootte van de risico's die men tot nu toe loopt bij allerlei activiteiten een objectieve norm kan halen voor deze aanvaardbaarheid. In de trant van: de risico's van die vroegere activiteiten hebben we geaccepteerd, vinden we aanvaardbaar, dus zijn de nieuwe risico's, als ze ongeveer even groot zijn, ook aanvaardbaar. Waarbij men vergeet dat diegenen die een risico aanvaardbaar vinden en degenen die het risico lopen vaak niet dezelfde zijn en dat deze laatste groep zich de grootte van het risico meestal niet bewust is of dit besef verdringt, zodat bij deze groep

nauwelijks van "aanvaarden" gesproken kan worden.

Zo zijn pogingen gedaan om een relatie te vinden tussen de (financiële) voordelen van een activiteit en het risico dat daarbij gelopen wordt. De gevonden "wetmatigheden" gaan daarna functioneren als objektieve norm voor de veiligheidseisen en aanvaardbaarheid van risico's van nieuwe activiteiten of worden opgevat als een soort natuurwet. In plaats van bestaande risico's terug te dringen, nu men meer inzicht in de grootte ervan krijgt, worden nieuwe risico's ingevoerd waarvan men denkt dat ze evengroot zijn. (Dit goed praten van het ene kwaad met het andere vindt men ook terug in de Memorie van Antwoord bij de kernenergienota, waar het risico van radio-aktieve vervuiling vergoelijkt wordt door te verwijzen naar het mogelijke gevaar van PVC).

Gaat dit nog vaak om de risico's voor direkt betrokkenen, de laatste jaren heeft sluipend een nieuw soort risico ten gevolge van menselijke activiteiten zijn intrede gedaan nl. dat van de milieuverontreiniging. Hierdoor komt immers de gezondheid van grote bevolkingsgroepen in gevaar. Een bijzondere vorm ervan is de vervuiling door radioactieve isotopen, vanwege de onomkeerbaarheid van dit proces op wereld schaal.

### III. Het ergst denkbare ongeluk.

#### A. Inleiding.

Men spreekt over 't algemeen van het ergst denkbare ongeluk als ongeveer 1% van de niet-vluchtige en circa 70% van de meest vluchtige elementen bij een reaktor-ongeluk vrijkomen. Voor nauwkeuriger gegevens zij verwezen naar tabel 1.

| Element                              | vrijkomende hoeveelheid |
|--------------------------------------|-------------------------|
| Y, Zr, Nb, La, Ce, Pr,<br>Nd, Pm, Pu | 1 %                     |
| Sr, Ba                               | 4 %                     |
| Mo, Tc, Ru, Rh                       | 25 %                    |
| Cs                                   | 40 %                    |
| Te                                   | 50 %                    |
| I                                    | 60 %                    |
| Kr, Xe                               | 90 %                    |

Tabel 1. Percentage van een element dat vrijkomt bij het grootste ongeluk

Bij de berekening van de gevolgen van een ongeluk is in grote lijnen uitgegaan van dezelfde rekenmethodiek als ook gevolgd is door de Gezondheidsraad in haar studie (5). Dit wil echter niet betekenen dat wij de uitkomsten van deze studie onderstrepen. Een van de belangrijkste tekortkomingen is het feit dat gebruik gemaakt wordt van gemiddelde bevolkingsdichtheden. Dit heeft tot konsekwentie dat de mogelijke gevolgen onderschat worden. Wij hebben dan ook gemeend onze bere-

keningen toe te moeten passen op een konkreet voorbeeld, in dit geval een kerncentrale aan de Eemsmond. Een andere tekortkoming is het feit dat er slechts een beperkt aantal isotopen zijn meegenomen. Desalniettemin hebben we ons in onze beschouwing tot dezelfde isotopen als de Gezondheidsraad beperkt, aangezien het toepassen op een konkreet scenario een redelijke indikatie geeft omtrent de ernstige gevolgen.

Als scenario is genomen een droge dag, rustig weer, windsnelheid 1,5 m/s (categorie F volgens Pasquill), Noord-oostenwind. De in de beschouwing betrokken isotopen met hun fysische gegevens worden weergegeven in tabel 2. Voor de biologische gegevens werd gebruik gemaakt van ICRP publication 2 (6).

| Isotoop | halfwaardetijd | $E_{\beta}$ in MeV | $E_{\gamma}$ in MeV | reaktorinhoud in Curie |
|---------|----------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Kr-85m  | 4,39 u         | 0,208              | 0,186               | $1,7 \times 10^6$      |
| Kr-85   | 10,76 j        | 0,230              | 0,002               | $6,8 \times 10^5$      |
| Kr-87   | 76 m           | 1,050              | 0,740               | $3,4 \times 10^7$      |
| Kr-88   | 2,80 u         | 0,340              | 1,780               | $5,0 \times 10^7$      |
| Sr-89   | 52 d           | 0,487              | 0                   | $6,4 \times 10^7$      |
| Sr-90   | 28,1 j         | 0,180              | 0                   | $4,6 \times 10^6$      |
| Sr-91   | 9,67 u         | 0,540              | 0,920               | $1,5 \times 10^8$      |
| Y-90    | 64 u           | 0,760              | 0,035               | $4,8 \times 10^6$      |
| Y-91    | 58,8 d         | 0,520              | 0,004               | $8,5 \times 10^7$      |
| Zr-95   | 65 d           | 0,130              | 0,730               | $1,3 \times 10^8$      |
| Zr-97   | 17 u           | 0,610              | 0,150               | $1,6 \times 10^8$      |
| Nb-95   | 35,15 d        | 0,053              | 0,760               | $1,2 \times 10^8$      |
| Mo-99   | 66,69 u        | 0,350              | 0,310               | $1,5 \times 10^8$      |
| Tc-99m  | 6,0 u          | 0                  | 0,140               | $1,4 \times 10^8$      |
| Ru-103  | 39,6 d         | 0,072              | 0,520               | $1,0 \times 10^8$      |
| Ru-105  | 4,44 u         | 0,388              | 0,693               | $2,3 \times 10^7$      |
| Ru-106  | 367 d          | 0,013              | 0                   | $3,6 \times 10^7$      |
| Rh-105  | 35,9 u         | 0,150              | 0,100               | $2,3 \times 10^7$      |
| Te-129m | 34 d           | 0,020              | 0,100               | $5,0 \times 10^6$      |
| Te-129  | 69 m           | 0,460              | 0,100               | $3,0 \times 10^7$      |
| Te-131m | 30 u           | 0,156              | 1,590               | $9,5 \times 10^6$      |
| Te-132  | 78 u           | 0,070              | 0,380               | $1,0 \times 10^8$      |
| I-131   | 8,07 d         | 0,190              | 0,400               | $7,7 \times 10^7$      |
| I-132   | 2,3 u          | 0,450              | 2,220               | $1,0 \times 10^8$      |
| I-133   | 20,9 u         | 0,450              | 0,450               | $1,4 \times 10^8$      |
| I-134   | 52 m           | 0,460              | 2,830               | $1,6 \times 10^8$      |
| I-135   | 6,7 u          | 0,310              | 1,880               | $1,2 \times 10^8$      |

| Isotoop | halfwaardetijd | $E_{\beta}$ in MeV | $E_{\gamma}$ in MeV | reaktorinhoud in Curie |
|---------|----------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Xe-133  | 5,27 d         | 0,115              | 0,082               | $1,4 \times 10^8$      |
| Xe-135  | 9,2 u          | 0,310              | 0,230               | $2,6 \times 10^7$      |
| Cs-134  | 2,05 j         | 0,166              | 1,560               | $1,6 \times 10^7$      |
| Cs-136  | 13 d           | 0,120              | 2,170               | $5,4 \times 10^6$      |
| Cs-137  | 30,23 j        | 0,190              | 0,620               | $6,0 \times 10^6$      |
| Ba-140  | 12,8 d         | 0,270              | 0,250               | $1,4 \times 10^8$      |
| La-140  | 40,22 u        | 0,400              | 2,560               | $1,4 \times 10^8$      |
| Ce-141  | 33 d           | 0,165              | 0,086               | $8,3 \times 10^7$      |
| Ce-143  | 33 d           | 0,354              | 0,377               | $1,5 \times 10^8$      |
| Ce-144  | 284,9 d        | 0,091              | 0,046               | $7,8 \times 10^7$      |
| Pr-143  | 13,7 d         | 0,310              | 0                   | $1,1 \times 10^8$      |
| Nd-147  | 11,1 d         | 0,230              | 0,210               | $5,3 \times 10^7$      |
| Pm-147  | 2,5 j          | 0,075              | 0                   | $6,7 \times 10^6$      |
| Pm-149  | 53,1 u         | 0,340              | 0,047               | $2,4 \times 10^7$      |
| Pu-238  | 86 j           | 0                  | 0,010               | $1,6 \times 10^5$      |
| Pu-239  | 24400 j        | 0                  | 0                   | $1,9 \times 10^4$      |

Tabel 2. Fysische gegevens van de beschouwde isotopen (7,8,9,10,11).

### B. Gevolgen.

Wanneer men de gevolgen bestudeerd, is er onderscheid te maken in een aantal categorieën nl.: - directe gevolgen; hiermee wordt bedoeld het aantal slachtoffers dat optreedt direct na het ongeluk tot een aantal weken.

- lange termijn gevolgen; dit zijn de effecten die jaren na een ongeluk optreden nl. diverse vormen van kanker.
- genetische effecten; deze effecten openbaren zich pas in latere generaties.
- bewoonbaarheid van het land; tengevolge van een ongeluk zal een groot gedeelte van het land zodanig besmet zijn, dat wonen er voor kortere of langere tijd niet meer mogelijk is.

Een directe dosis groter dan 400 rem is dodelijk, terwijl doses kleiner dan 200 rem over 't algemeen niet dodelijk zijn. Tevens is aan te nemen dat het sterftepercentage tussen 200 en 400 rem lineair verloopt (5). Doses groter dan 100 rem geven aanleiding tot medische hulp. In fig. XI-1 is weergegeven de gebieden waarbinnen een persoon een dosis krijgt groter dan 400 resp. 100 rem. Hierbij moet men echter in ogenschouw nemen dat ongeveer 90% van de bevolking niet in de open lucht verkeerd en daardoor een zekere mate van bescherming heeft. Het totale aantal doden

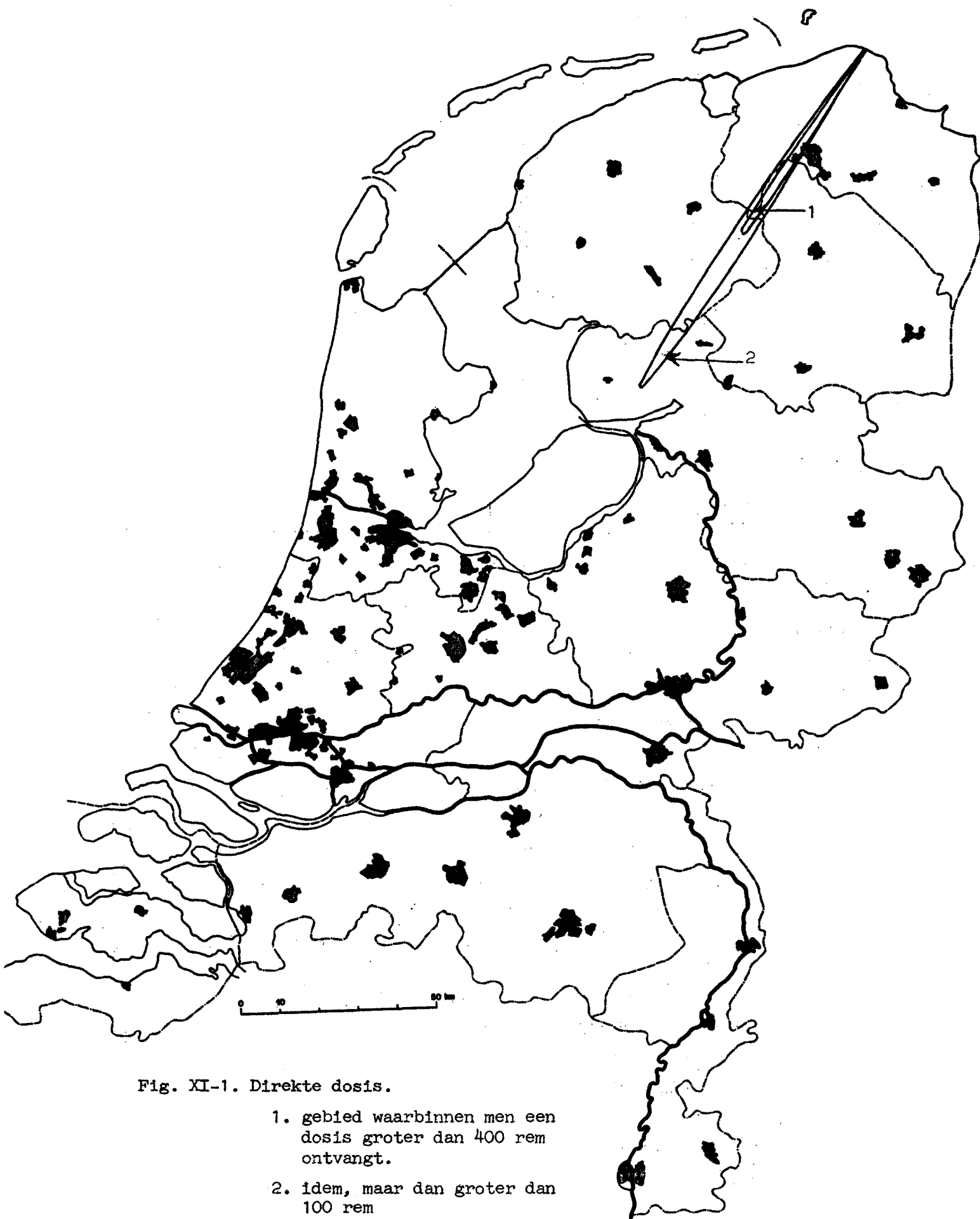


Fig. XI-1. Direkte dosis.

1. gebied waarbinnen men een dosis groter dan 400 rem ontvangt.
2. idem, maar dan groter dan 100 rem

is dan naar schatting 5000 en het aantal personen dat medische hulp nodig heeft ongeveer 15000.

In de werkelijkheid zijn de gevolgen nog veel groter. Het is onmogelijk om 'zo-veel' personen die medische hulp nodig hebben deze ook daadwerkelijk te geven. Onze hulpverlening is niet berekend op zulke grote aantallen in zo'n korte tijd. Het gevolg is dat het sterftepercentage nog verder zal oplopen.

Dan bestaat er nog het probleem dat een groot gedeelte van het land voor langere tijd onbewoonbaar wordt wegens de hoge radio-aktiviteit die daar heerst. In fig. XI-2 zijn twee gebieden aangegeven waarbinnen men tengevolge van het op de grond neergeslagen radioactief materiaal in 90 dagen een dosis van 400 resp. 60 rem krijgt. Hierbij dient vermeld te worden dat de Gezondheidsraad in geval van nood een dosis van 15 rem toelaatbaar acht. Bij het beschouwen van de gebieden dient men de dosis met een faktor 2 - 3 te verminderen als gevolg van afscherming door huizen enz.

Op langere termijn bestaat er nog de kans dat een persoon als gevolg van de blootstelling aan de radio-actieve straling aan kanker overlijdt. Het aantal kankergevallen bedraagt  $200 \times 10^{-6}$  per manrem (= gemiddelde dosis per persoon vermenigvuldigd met het aantal bestraalde personen). Omgerekend levert dit in ons geval 15000 kankergevallen met dodelijke afloop (zie fig. XI-3).

Verder kunnen zich nog genetische afwijkingen voordoen, die pas in volgende generaties te voorschijn komen. Deze worden op identieke wijze berekend als een lange-termijn-dosis, alleen is hier de omrekeningsfaktor  $100 \times 10^{-6}$  per manrem. Het aantal genetische afwijkingen is dus de helft van het aantal kankergevallen met dodelijke afloop, dus 7500 (zie fig. XI-4).

Tenslotte dient nog genoemd te worden de door de Gezondheidsraad (5) opgestelde noodreferentieniveau's (NRN) (zie tabel 3). Een NRN is een waarde waarboven de stralingsdosis zelfs in geval van nood niet boven mag gaan. Ter vergelijking wordt in tabel 4 weergegeven de door ons berekende doses die verschillende organen krijgen op verschillende afstanden, waarbij opgemerkt moet worden dat de breedte van zo'n gebied relatief klein is. Deze vergelijking duidt nogmaals aan hoe groot de gevolgen van een dergelijk ongeluk zijn.

| Kritieke orgaan                                           | Kinderen beneden 16 jaar en zwangere vrouwen | Overige personen |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------|
| Gehele lichaam, bloedvormende organen en geslachtsklieren | 5 rem                                        | 15 rem           |
| Huid                                                      | 30 rem                                       | 90 rem           |
| Andere organen                                            | 10 rem                                       | 30 rem           |

Tabel 3. Noodreferentieniveau's; vrij naar Gezondheidsraad (5)

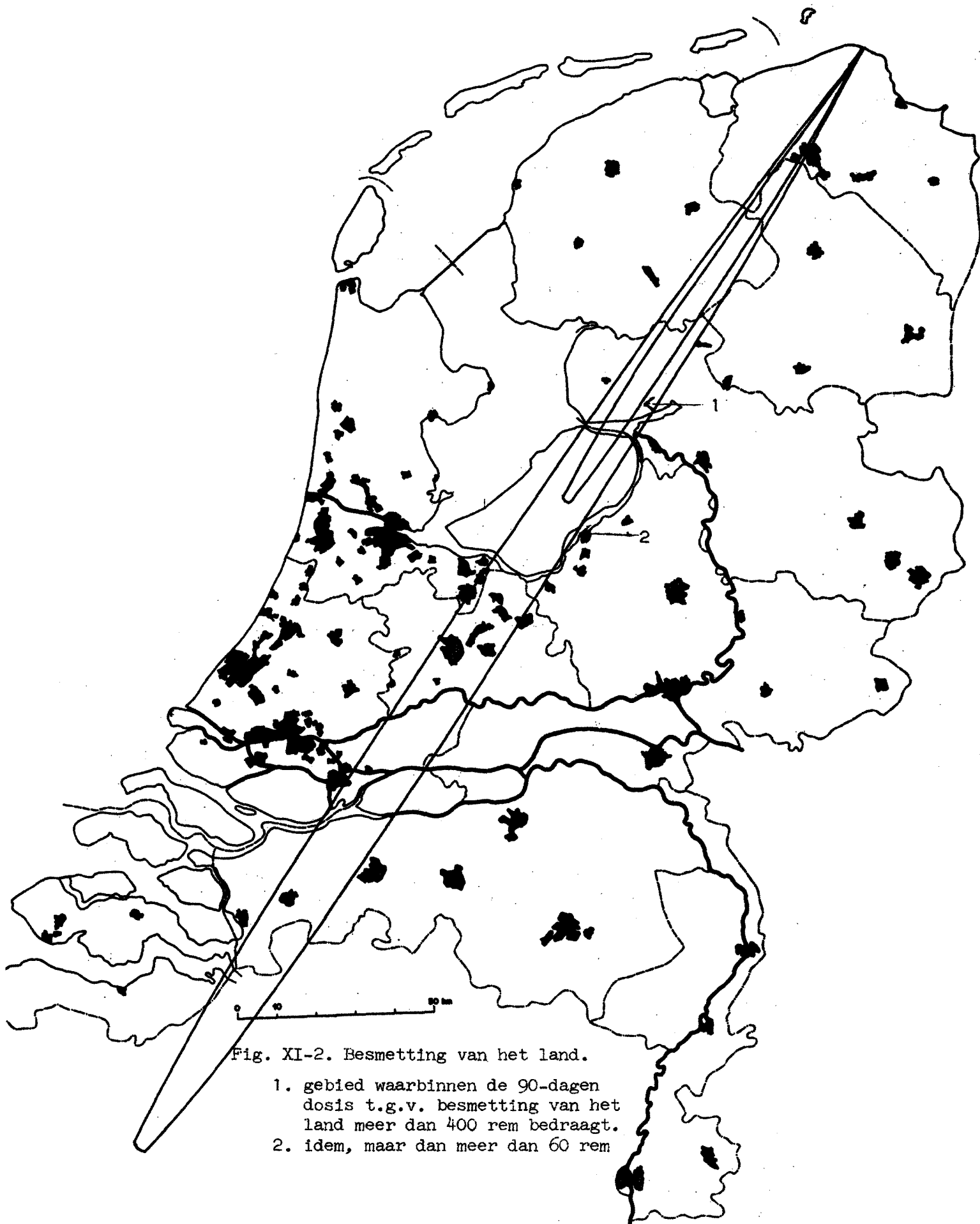
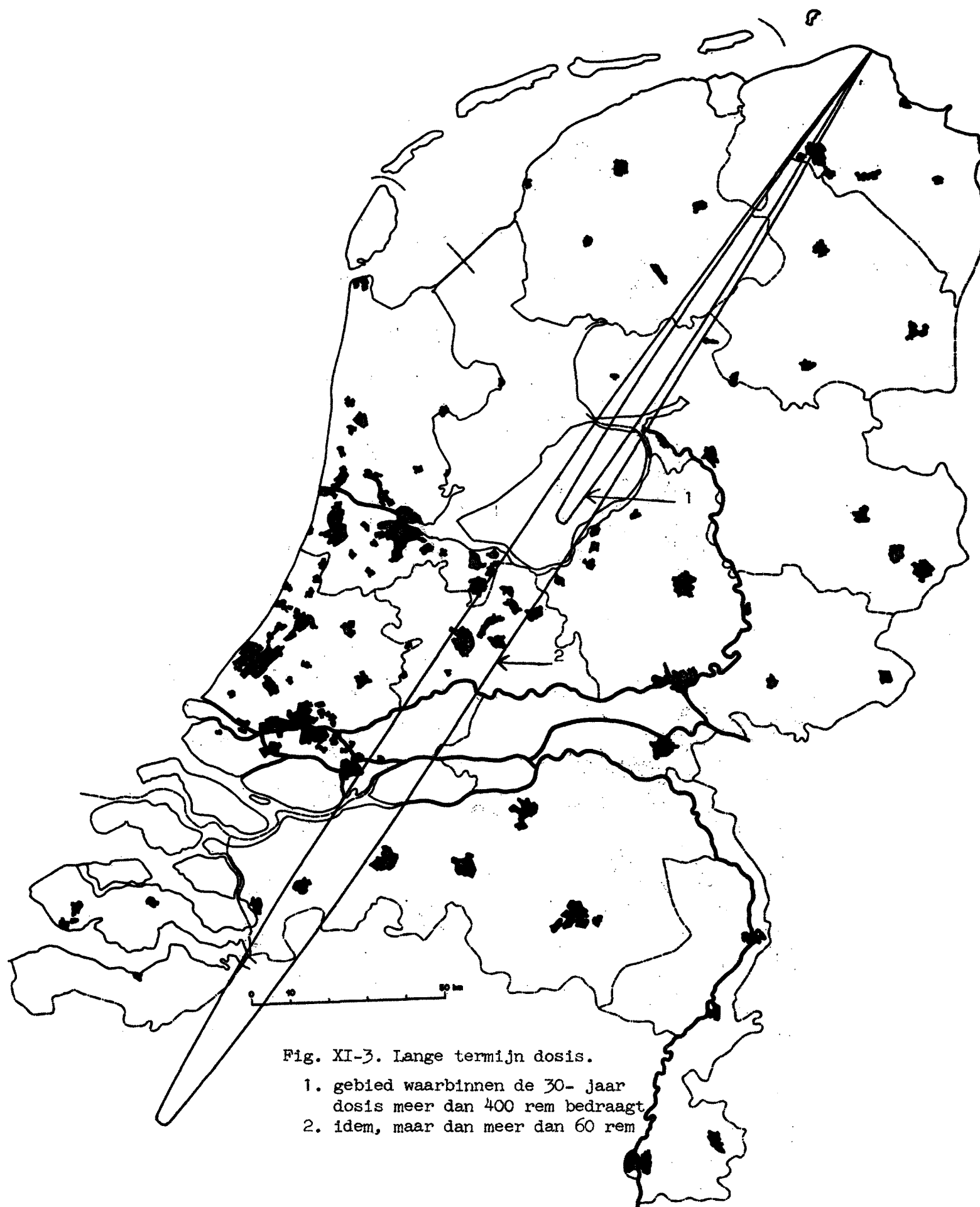
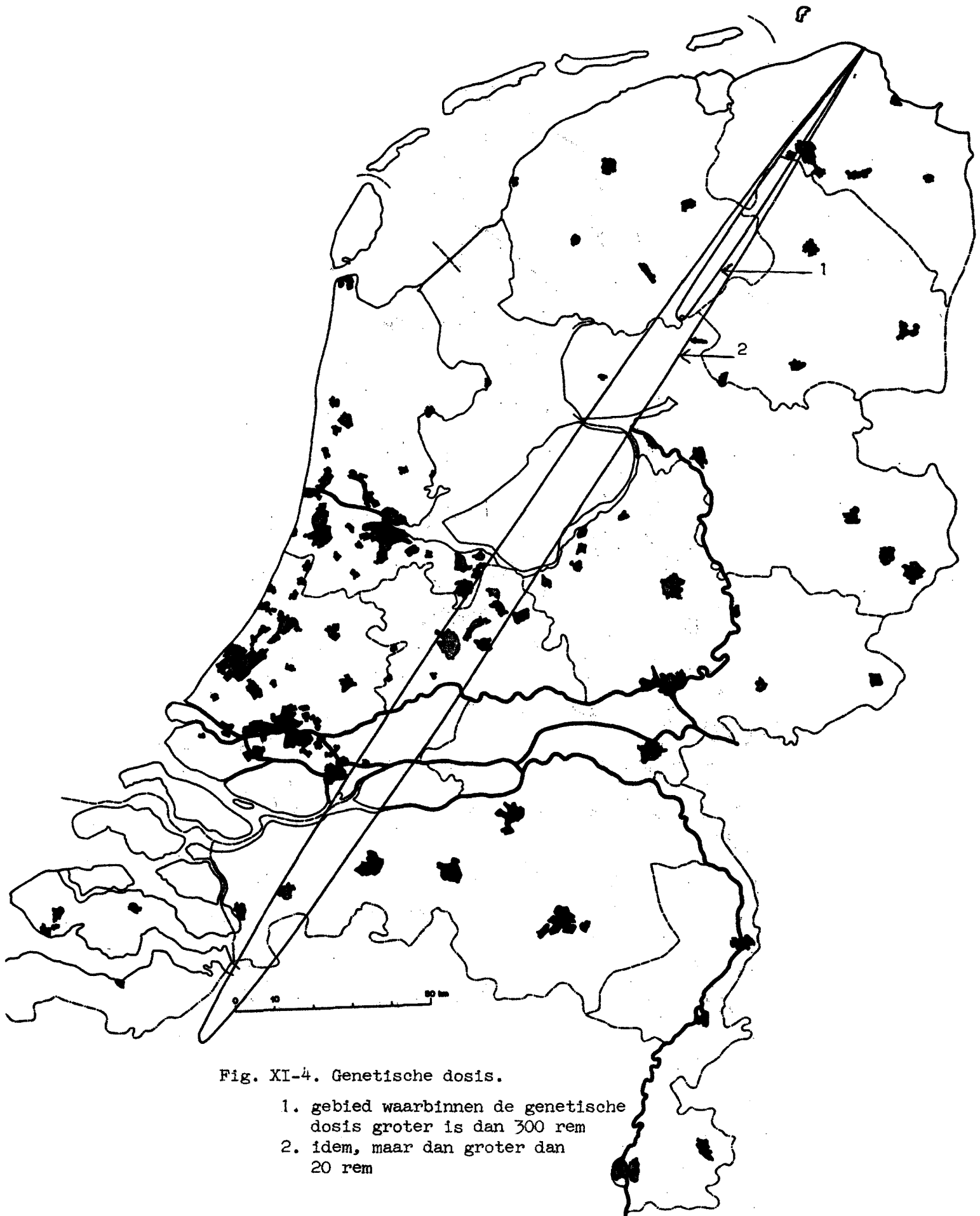


Fig. XI-2. Besmetting van het land.

1. gebied waarbinnen de 90-dagen dosis t.g.v. besmetting van het land meer dan 400 rem bedraagt.
2. idem, maar dan meer dan 60 rem





| Kritieke organen                                         | dosis (in rem) in orgaan op afstand: |        |        |                    |                    |                    |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                                          | 5 km                                 | 25 km  | 50 km  | 100 km             | 200 km             | 300 km             |
| <u>Gehele lichaam, bloedv. organen en gesl. klieren:</u> |                                      |        |        |                    |                    |                    |
| Gehele lichaam                                           | 4500                                 | 500    | 180    | 59                 | 14                 | 5                  |
| Bot                                                      | 12700                                | 1450   | 540    | 175                | 46                 | 17                 |
| Testes                                                   | 2000                                 | 230    | 84     | 26                 | 6                  | 2                  |
| ---                                                      |                                      |        |        |                    |                    |                    |
| <u>Huid</u>                                              | 0,02                                 | 0,0015 | 0,0003 | $3 \times 10^{-5}$ | $1 \times 10^{-6}$ | $5 \times 10^{-8}$ |
| ---                                                      |                                      |        |        |                    |                    |                    |
| <u>Andere organen:</u>                                   |                                      |        |        |                    |                    |                    |
| Milt                                                     | 3800                                 | 430    | 155    | 51                 | 12                 | 4                  |
| Lever                                                    | 4800                                 | 550    | 200    | 65                 | 16                 | 5                  |
| Nieren                                                   | 18000                                | 2000   | 750    | 240                | 58                 | 20                 |
| Spieren                                                  | 1000                                 | 120    | 46     | 15                 | 4                  | 1                  |
| Longen                                                   | 57000                                | 6550   | 2400   | 800                | 200                | 74                 |
| Maag                                                     | 650                                  | 59     | 18     | 5                  | 1                  | 0,3                |
| Dunne darm                                               | 850                                  | 76     | 24     | 6                  | 1                  | 0,4                |
| Dikke darm                                               | 7800                                 | 740    | 240    | 66                 | 13                 | 4                  |
| Endeldarm                                                | 90500                                | 9600   | 3300   | 1000               | 220                | 77                 |
| Schilddklier                                             | 830000                               | 89000  | 31000  | 9400               | 2100               | 715                |

Tabel 4. Doses in verschillende organen op verschillende afstanden.

#### IV Résumé.

De kans dat er een ongeluk met een kerncentrale gebeurt (en dat de windrichting bovendien ongunstig is), is betrekkelijk klein. Toch is de kans groter dan over 't algemeen wordt aangenomen. Dit blijkt onder meer uit het feit dat er zich steeds "ongelukjes" voordoen, die theoretisch eigenlijk niet zouden mogen gebeuren. Verder wordt in een dergelijke kansberekening het menselijk falen niet of nauwelijks meegenomen, om van sabotage e.d. maar te zwijgen.

Doordat de gevolgen zo immens groot zijn - onze samenleving zou jaren nodig hebben om de gevolgen te boven te komen, nog afgezien van al het menselijk leed - dat men zich af moet vragen of men überhaupt zulke risico's mag nemen hoe klein de kans ook is. Hierbij komt dat alles wordt uitgespeeld door een betrekkelijk kleine groep personen over de hoofden van een niets wetende bevolking.

#### Referenties:

1. C.J. van Daatselaar, Kernreactoren voor Elektrische Centrales, Beveiliging tegen Ongevallen, De Ingenieur 84, no. 13, blz. A260-263 (1972).

2. D.R. Inglis, Nuclear Energy - its physics and its Social Challenge, Reading, Mass., Addison-Wesley (1973).
3. Kabelbrand bei Browns Ferry, redactioneel, Atomwirtschaft 20, no. 5, blz. 220 (1975).
4. Bezwaren van de kernenergie, VWO-werkgroep Kernenergie, Wetenschap en Samenleving 27, no. 1, blz. 20-31 (1973).
5. Kerncentrales en Volksgezondheid, Gezondheidsraad, No. 3255/74 (1975).
6. ICRP-Publication 2, Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation, Pergamon Press, London (1959).
7. Handbook of Chemistry and Physics, 49<sup>th</sup> edition, R.C. Weast ed., The Chemical Rubber Co, Cleveland, Ohio (1968).
8. C.M. Lederer, J.M. Hollander & I. Perlman, Table of Isotopes, John Wiley & Sons, New York (1967).
9. J.O. Blomeke, C.W. Kee & J.P. Nichols, Projections of Radio-active Wastes to be Generated by the U.S. Nuclear Power Industry, ORNL-TM-3965 (1974).
10. T.H. Pigford, Protection of the Public from Radioactivity Produced in Nuclear Power Reactors, Transactions on Nuclear Science (1972).
11. A.J. Brook, Calculations on the Gaseous and Volatile Fission Products in Highly Irradiated Nuclear Fuel, U.K.A.E.A. AHSB(S) Report R-140 (1968).

## Hoofdstuk XII POLEMOLOGISCHE IMPLIKATIES VAN KERNENERGIE

### I. De reaktor en de bom.

In dit hoofdstuk zullen we bespreken hoe de invoering van kernenergie op grote schaal in de huidige wereldsituatie onvermijdelijk zal leiden tot een snelle verspreiding van kernwapens over de gehele wereld.

De militaire en civiele toepassing van kernsplijtingsenergie zijn onlosmakelijk verbonden. Het gaat om dezelfde atoomsoorten als brandstof, in het bijzonder  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  en  $^{239}\text{Pu}$ . Het gaat eveneens om dezelfde technologieën voor het beschikbaar maken van het splijtbaar materiaal, vooral het maken en isoleren van zuiver plutonium en het verrijken van uranium in de atoomsoort  $^{235}\text{U}$ .

Het grootste probleem voor wat betreft de tot nu toe gebruikte reaktoren ligt in de produktie van plutonium. Dat gebeurt in iedere reaktor hoe vreedzaam ook bedoeld. Het is geschikt voor bommen met een explosief vermogen van tienduizenden tonnen TNT, als op Hiroshima en Nagasaki. Weliswaar is het plutonium uit een voor energie-opwekking gebruikte reaktor wat minder geschikt voor het maken van wapens dan het plutonium uit een speciaal voor militaire doelen gebruikte reaktor, maar dit verschil is graadueel. Omdat de brandstofstaven in een energiereaktor veel langer achtereen in de reaktor dienst doen, ontstaat naast  $^{239}\text{Pu}$  ook  $^{240}\text{Pu}$  en  $^{241}\text{Pu}$ .  $^{240}\text{Pu}$  vermindert de explosieve kracht van een bom enigszins en de sterkte wordt ook minder goed te schatten. Terwijl slechts 4 kg.  $^{239}\text{Pu}$  in een beryllium omhulsel genoeg is voor een bom als op Nagasaki, is 8 kg. van het plutonium uit een energie-reaktor in een koper of stalen omhulsel ook al genoeg voor een dergelijke bom. Een tegenwoordige kernenergiecentrale van 1000 MWe produceert per jaar zo'n 200 kg. van dit plutonium, genoeg voor zo'n 25 bommen.

Voordat het plutonium dat in de brandstofstaven ontstaat gebruikt kan worden moet het eerst van de splijtingsprodukten gescheiden worden in de zogenaamde splijtstofopwerkingsbedrijven. Hiervan zijn er nu al in de niet-kommunistische landen 17 en vele landen hebben plannen er zelf één te bouwen. De technologie is niet geheim en al op vrij kleine schaal niet erg duur. Kleine en middelgrote landen kunnen een dergelijke fabriek best zelf betalen. Het plutonium uit de opwerkingsfabriek wordt doorgaans ergens opgeslagen en bewaard voor toekomstig gebruik (bv. in snelle kweekreactoren).

Het uranium van de meeste huidige reaktoren is tot 3-5% verrijkt in  $^{235}\text{U}$  en ongeschikt als materiaal voor een splijtingsbom. De huidige verrijkings-

technologieën zijn geheim en moeilijk op kleine schaal uit te voeren. De mede door Nederland ontwikkelde ultracentrifuge technologie is relatief nog het goedkoopst op kleine schaal en voor een middelgroot land aantrekkelijk als verrijkingstechniek. Er dienen zich echter vele nieuwe technologieën aan, waarvan vooral die met de laser erg aantrekkelijk lijkt. Ze wordt, naar kortgeleden bekend is geworden, o.a. in Israël met succes bedreven.

De kritische massa van verrijkt uraan hangt sterk af van de verrijkingsgraad. Van meer dan 90% verrijkt uraan is 11-25 kg. nodig voor een bom, voor 20% en 50% is dit resp. 250 en 50 kg. Een 50% verrijkingsgraad is minstens nodig voor een bom met een enigszins respectabel vermogen.

Hoog verrijkt uraan wordt slechts gebruikt in bijzondere reaktoren (bv. gasgekoelde hoge temperatuur reaktoren, reaktoren met een mengsel van natuurlijk en hoog verrijkt uraan). In kweekreactoren wordt nogal eens een mengsel van  $^{235}\text{U}$  en Pu gebruikt, dat als zodanig geschikt is als explosief materiaal voor een bom. De brandstofstaven van kweekreactoren zijn dan ook doorgaans vrijwel direkt bruikbaar.

Massale toepassing van kernenergie levert enorme hoeveelheden plutonium. De jaarlijkse produktie in 1980 wordt geschat op 27 ton in de VS, 34,5 ton in de rest van de niet-kommunistische wereld en 3,6 ton in de kommunistische wereld. De te verwachten totale hoeveelheid in 1990 en 2000 is resp. 2000 en 11.000 ton. Welke nauwkeurigheid men ook aan deze getallen toekent, duidelijk is dat slechts een te verwaarlozen deel ervan al grote problemen oplevert.

Het verspreid staan van de reaktoren over vele plaatsen op de wereld, de voortdurende transporten (10-60 per reaktor per jaar) en de vele opslagplaatsen van Pu bieden enorme mogelijkheden voor onttrekking uit de civiele sektor, zowel door terroristische groepen, de georganiseerde misdaad als evt. ook regeringen van nationale staten.

De techniek voor het maken van splijtingswapens is niet meer geheim. Alle essentiële gegevens zijn in de open literatuur te vinden. Bommenontwerper Taylor, voor zijn werk onderscheiden met de Lawrence-prijs stelt dat "under conceivable circumstances a few persons, possibly even one person working alone who possessed 10 kg. of plutoniumoxide and a substantial amount of chemical high explosive could, within several weeks, design and build a crude fission bomb. . . . This could be done using materials and equipment that could be purchased at a hardware store and from commercial supplies of scientific equipment for student laboratories. The key persons or person

would have to be reasonably inventive and adept at using laboratory equipment and tools of about the same complexity at those used by students in chemistry and physics laboratories and machine shops" (3)

Kortom, enkele goede kandidaten in de natuur- en scheikunde zouden het als doktoraalopdracht kunnen doen. Zo'n bom zou van de grootte orde van de bommen op Japan kunnen zijn.

Natuurlijk zal een land, dat een kernwapenprogramma wil opzetten, niet zo primitief te werk gaan. Maar het bovenstaande demonstreert wel dat het ook voor vele landen met een vrij laag niveau van technologie niet meer onmogelijk is een voorraad kernwapens zelf te maken, wanneer ze eenmaal het plutonium hebben. Daaraan komen ze min of meer vanzelf door enkele energiereaktoren en een overeenkomst dat het splijtstofopwerkingsbedrijf hun het plutonium teruglevert. Eventueel is het te doen met een eigen wat uitgebreide laboratoriumopstelling voor plutoniumextraktie. Met een grootschalige introductie van kernreactoren is, technologisch gezien, de splijtingsbom binnen ieders bereik gekomen.

Uit het bovenstaande blijkt onmiskenbaar het verband tussen kerncentrales en kernwapens. Verontwaardigde protesten tegen het leggen van dat verband zijn geheel ten onrechte. Het is misleidend te suggereren dat de reaktor de ongevaarlijke kant van de kernenergie is.

## II. Gouvernementeale verspreiding.

Direkt in 1945, als de Amerikanen de splijtingsbom hebben, wordt van de zijde van verschillende fysici aangedrongen op een internationale controle op de kernfysika, teneinde te voorkomen dat vele landen een eigen bom zullen gaan maken. Het Baruch-plan dat uiteindelijk uit de bus komt, betekent in feite een bevestiging van de Amerikaanse monopoliepositie op kernwapengebied en maakt dan ook in het intussen uitgekristalliseerde Koude Oorlogsklimaat geen kans. Dan is deze strijd verloren. In 1949 heeft ook de Sowjet-Unie de bom, 3 jaar eerder dan de CIA-schatting was. Dan volgt de ronde van de waterstofbom: voor de V.S. 1952 voor de U.S.S.R. 1953. Intussen komen allerlei andere nukleaire activiteiten op gang, vooral in West-Europa. Engeland, na 1945 uitgesloten van de Amerikaanse geheimen, is al een flink stuk op weg, ook Frankrijk gaat na 1952 via een programma voor het maken van grootscheepse hoeveelheden plutonium de richting van de bom in. Verder zijn er nog kleinere activiteiten zoals de, Noors-Nederlandse samenwerking. De VS besluiten de ontwikkeling zo goed mogelijk in de hand te houden door samenwerkingsprogramma's op het gebied van de reaktoren. Het Atoms for Peace programma prijst de kernenergie aan als het toekomstige heil voor de mensheid, maar

heeft als politieke doelstelling om greep te houden op de ontwikkeling. Ook het Amerikaanse bedrijfsleven gaat zich intussen voor deze nieuwe markt interesseren. De Sowjet-Unie volgt een vergelijkbare politiek m.b.t. haar invloedssfeer. Het belangrijkste stuulement is voor beide supermachten de geheime nukleaire technologie. Na ongeveer 1954 is de geheimhouding niet meer primair m.b.t. de andere partij, maar voor de eigen bondgenoten. Zo is het Amerikaanse verzoek van 1960 om het ultra-centrifugeproject geheim te verklaren, niet primair bedoeld tegen de Russen. Omstreeks het midden van de vijftiger jaren ontstaat een wederzijdse kompetitie tussen de VS en de USSR op het gebied van internationale samenwerking op kernenergiegebied, waarbij iedere supermacht in zijn eigen invloedssfeer de zaak probeert te beheersen. Die is vergelijkbaar met de eveneens semi-militaire competitie op het gebied van de ruimtevaart in de zestiger jaren. Maar deze politiek faalt: China maakt toch zijn bom, los van de Sowjet-Unie en Frankrijk doet hetzelfde m.b.t. de VS.

In de zestiger jaren wordt het proliferatieprobleem in een meer algemeen kader aan de orde gesteld: beide supermachten komen met het zgn. non-proliferatieverdrag, het verdrag tegen de verspreiding van kernwapens, dat door alle landen zou moeten worden onderschreven. In het verdrag beloven de kernwapenstaten de niet-kernwapenlanden direkt noch indirekt aan kernwapens te zullen helpen. De niet-kernwapenlanden beloven geen kernwapens te zullen maken. Er komt een VN-boekhoudinspektie systeem voor splitbaar materiaal voor de niet-kernwapenlanden. Op het gebied van de civiele nukleaire technologie beloven de kernwapenstaten de niet-kernwapenstaten zoveel mogelijk te zullen helpen, opdat er hier geen diskriminatie zal optreden. Op aandrang van de niet-kernwapenstaten, die vinden dat de kernwapenlanden ook wel enige verplichtingen op zich mogen nemen, beloven de kernwapenlanden te zullen gaan onderhandelen over nukleaire wapenbeheersing en ontwapening. De onderhandelingen over het verdrag, waarbij vooral de evt. Westduitse bom centraal staat, verlopen moeizaam. Uiteindelijk komt er overeenstemming, waarbij een Westeuropese kernmacht mogelijk blijft voor de toekomst en een uiteenvallen van de NAVO volgens Amerikaans inzicht een reden voor West-Duitsland zou zijn om alsnog het verdrag op te zeggen. Twee kernwapenlanden, China en Frankrijk hebben angst voor een USA-USSR dominerend van de wereld en doen om uit het bovenstaande begrijpelijke redenen niet mee. Maar ook belangrijke potentiële kernwapenlanden als Japan, Zuid-Afrika, India, Pakistan, Israel en Egypte treden niet toe.

Intussen zijn we weer wat verder: India heeft zijn eerste kernbom gemaakt

en Pakistan voelt zich bedreigd. Israel ontkent niet meer duidelijk dat het een splijtingsbom heeft en het zou de bom, gegeven de Dimona reaktor en het niveau van zijn fysici, zeer wel kunnen hebben. Kortgeleden heeft Egypte een fors vermogen aan energiereaktoren van de VS toegezegd gekregen, en Libië en Perzië van Frankrijk. Aan Egypte is door de VS, initiator van het NPT, zelfs niet eens de eis gesteld dat dit land het NPT moet ratificeren. De Sjah zegt openlijk dat hij ook wel de bom wil en er is geen reden, waarom dit niet zou gebeuren. Over tien jaar is het zeer wel mogelijk dat het Midden-Oosten vele kernwapenlanden heeft. Ook in Zuid-Afrika en zelfs in Japan gaan stemmen op, die een eigen kernwapen willen.

De treurige konklusie kan slechts zijn dat de toekomst voor het NPT er zeer somber uitziet nu zelfs de VS de indruk wekt dit verdrag niet meer erg serieus te nemen.

De motieven voor deze proliferatie zijn vele. Soms speelt als erg belangrijk de status van een land. Dit geldt bv. voor India, dat na 1945 maar liefst 11 oorlogen heeft gevoerd. Soms gaat het om een laatste redmiddel, bv. wat Israel betreft. Maar alle argumenten hebben direkt of indirekt te maken met het grote probleem, dat we in een wereld leven van soevereine nationale staten, die voor hun eigen veiligheid denken te moeten zorgen met militaire middelen. Het is een systeem zonder echte veiligheid, waaraan het oorlogsverschijnsel inherent is, en waarin alle wapens, dus ook kernwapens als men daarover beschikt, vroeg of laat zullen worden ingezet.

Zolang deze structuur van nationale soevereine staten nog bestaat, is het dan ook redelijk alles te verhinderen, wat bevorderend kan werken voor de proliferatie van kernwapens.

### III. Non-gouvernementele verspreiding.

Door de te verwachten grootscheepse invoering van kernreactoren worden tevens de kondities voor allerlei andere groepen (bv. opstandige bewegingen en internationaal opererend terrorisme) om zich van kernwapens te voorzien. In dit verband moge eraan worden herinnerd dat het oorlogsverschijnsel sinds 1945 aan het veranderen is. Van de 97 oorlogen die in de periode 1945-1969 zijn gevoerd is maar een klein deel de zgn. interstatelijke oorlog. Verreweg het grootste deel (70%) valt in de categorie anti-regime oorlogen. Dit type oorlog zal waarschijnlijk ook voor de komende tijd nog van grote betekenis zijn. Daarnaast begint meer en meer naar voren te komen de buiten het eigenlijke konfliktgebied gevoerde oorlog (bv. de Palestijnse Bevrijdingsbeweging).

Het is vrijwel onmogelijk, gegeven de toekomstige enorme hoeveelheden plutonium, de noodzaak van transport en de opslag van deze stof of van ander nukleair explosief materiaal, te voorkomen dat dit materiaal in handen komt van dergelijke groeperingen. Dat biedt geweldige chantage-mogelijkheden, vooral m.b.t. kwetsbare samenlevingen als de hooggeïndustrialiseerde westerse. Hierbij moet terdege onderscheid worden gemaakt tussen goed georganiseerde guerrilla-activiteiten en min of meer desperate extremistische groeperingen. Juist deze laatste zullen, zeker wanneer ze enigszins geprovoceerd worden, waarschijnlijk tot wanhoopsdaden bereid zijn. Gebieden van de wereld, waar dergelijke gebeurtenissen in de toekomst niet tot de onmogelijkheden behoren, zijn zeker het Midden-Oosten en Zuidelijk-Afrika. De verwachting dat juist vanwege deze mogelijkheden er een voorzichtige politiek gevoerd zal gaan worden, heeft weinig grond in de feitelijke gang van zaken. Problematisch voor ons is ook, dat de rijke westerse wereld vrijwel altijd wel op een of andere manier bij deze konflikten betrokken is.

Ook is het mogelijk dat intern in bepaalde landen sommige groepen zich van geweld tegenover andere groepen zullen gaan bedienen of dat de georganiseerde misdaad in dezen actief zal gaan worden.

Misschien niet direkt in Nederland, maar mogelijk wel in Zuid-Amerika of de VS. Gebruik van kernwapens zal in dergelijke konflikten leiden tot een geweldige eskalatie van geweld en de oplossing van problemen eerder bemoeilijken dan bevorderen. Ook hier geldt dat de huidige sociale situatie in de wereld er een is, die het onverantwoord maakt de mogelijkheid van een dergelijke nieuwe geweldseskalatie te vergemakkelijken. Dat doen we in Nederland, door mede met regeringssteun, ons te verzekeren van een aandeel in de wereldmarkt van de kerntechnologie.

De bovengenoemde hoeveelheden plutonium maken het waarschijnlijk dat in de toekomst een zwarte markt van dit materiaal zal ontstaan. Immers het is bijzonder moeilijk te controleren of niet frakties van procenten plutonium verdwijnen. Er zijn in de VS al voorbeelden dat men op zeker ogenblik tot de ontdekking komt dat de boekhouding van het splijtbaar materiaal niet meer klopt. Bovendien hebben we te maken met veelvuldige transporten van materiaal, die gemakkelijk overvallen kunnen worden. Zo'n zwarte markt zou vergelijkbaar kunnen zijn met die van drugs als opium en herïne. Ondanks alle politionele tegenactiviteiten is het ook daar nooit gelukt de zaak onder controle te houden. Het is dan ook een ongerechtvaardigd optimisme te verwachten dat dit hier wel zal gebeuren.

#### IV. Kernenergie en democratie.

Nieuw massaal toegepaste technologieën beïnvloeden altijd ingrijpend het

waardenpatroon van een samenleving. Voor de reaktoren betekent dat de vraag hoe de ongehoord grote risico's, die we dan invoeren, onze waarden als democratie en politieke vrijheid gaan beïnvloeden.

Over enkele decennia zouden zo'n 30 reaktoren in Nederland in bedrijf moeten zijn. Een groot ongeluk met bv. een reaktor op de Maasvlakte is (4) voor Nederland een ramp, groter dan een grote konventionele oorlog. Gemiddeld vinden dan per dag 3 transporten plaats met grote hoeveelheden radioactief materiaal of plutonium. Bankovervallen en gijzelingen zijn onschuldige gebeurtenissen in vergelijking met een geslaagde overval van bv. een plutoniumtransport. En die eerste zijn al vrijwel niet te voorkomen.

Geen verantwoordelijk bestuur zal voor deze zaken enig risico willen lopen. Enkele incidenten als valse bommeldingen of evt. een aanslag op een transport in het buitenland zullen de publieke opinie doen roepen om meer en betere veiligheidsmaatregelen. Dat betekent zware bewaking bij alle centrales, een uitgebreide politiemacht voor beveiliging van transporten e.d. Maar het betekent tevens een grondige controle op de betrouwbaarheid van alle personeel, wat hier ook maar iets mee te maken heeft: van centrale-directeur tot en met de kinderen van de chauffeurs van de transporten. Daarbij worden personen met afwijkende opvattingen altijd als verdacht gezien. In de huidige situatie zou dit bv. voor sympathisanten met de Palestijnse Bevrijdingsbewegingen kunnen gelden. Nodig worden uitvoerige registraties van veiligheidsdiensten en het meer of minder openlijk bespioneren van de werkers op dit terrein. We kennen de effecten uit de Koude Oorlog. Ze zijn uiterst gevaarlijk voor een levende democratie en voor sociale verandering. Ze zijn onvermijdelijk een tendens tot "law and order", een vermindering van politieke vrijheid en een rem op de vrije meningsuiting. Wanneer één keer de reaktoren er staan is het vrijwel onmogelijk voor een regering om te ontkomen aan deze druk. Bovendien: er zijn ook nog altijd voldoende groepen die om andere redenen wel wat meer "law and order" willen.

Bijzonder kritiek zou de situatie wel eens kunnen worden als een poging tot het opblazen van een centrale enigszins succesrijk zou zijn geweest. Het zou een direct verbod van bepaalde politieke groeperingen ten gevolge kunnen hebben en in ernstige gevallen zelfs een risico voor een diktatuur kunnen inhouden. De introductie van een met zulke potentiële risico's omgeven technologie als die van de reaktor helpt een klimaat te creëren, waar de diktatuur een kans krijgt. Zo'n ontwikkeling moet iedereen, die een levende democratie ter harte gaat, dan ook met grote zorg vervullen.

#### Referenties:

1. SIPRI Yearbook on World Armaments and Disarmament 1972, Almqvist & Wiksell, Uppsala, 1972
2. Nuclear Proliferation Problems, uitgave SIPRI, Almqvist & Wiksell, Uppsala, 1974

3. M. Willrich & Th.B. Taylor, Nuclear Theft, Ballinger Publishing Company, Cambridge, USA, 1974
4. W.A. Smit & G. van Dijk, Kernenergie - een nieuw soort risico, Wetenschap en Samenleving 74/8

### Hoofdstuk XIII ALTERNATIEVE ENERGIEBRONNEN

#### Inleiding.

Naast kernsplijting bestaan er een aantal bronnen, die als alternatief zouden kunnen dienen voor fossiele brandstoffen. Hierbij wordt gedacht aan energie verkregen uit zonnestraling, wind, water, aardwarmte, organische afvalstoffen, getijdenwerking, kernfusie, temperatuurverschillen en stromingen in zee. Kernfusie geeft nog grote problemen op het gebied van de research, de andere bronnen nog slechts op het gebied van development. Ze worden dan ook reeds hier en daar op kleine schaal gebruikt. Een aantal hiervan wordt reeds op kleine schaal benut.

Dat de alternatieve bronnen hieronder apart aan de orde komen, betekent niet dat wij ze los van elkaar gebruikt willen zien. Het ene systeem kan het andere vaak aanvullen, zowel wat betreft hoeveelheid als periode, waarin een energiebron zich voor energieproductie leent. De hiermee gepaard gaande decentralisatie kan ook als een voordeel worden beschouwd.

#### De Energiebronnen.

##### A. Windkracht.

Het opwekken van energie uit windkracht is al heel oud. Aan het begin van deze eeuw moeten er rond de Noordzee zo'n 30.000 windmolens gestaan hebben (1). De laatste tijd is de windmolen weer in belangstelling gekomen vooral door de verbeterde konstruktiemethoden. Metingen in Oklahoma City komen uit op een gemiddeld vermogen van ca. 200 Watt per vierkante meter loodrecht op de windrichting. Dit komt overeen met 3 kW per windwiel (2).

De World Meteorological Organisation heeft berekend dat er uit gebieden met veel wind  $2,0 \times 10^{13}$  W te halen is (3). Dit zou men willen doen door het plaatsen van grote eenheden op zeeën. Er bestaan uitgewerkte plannen voor systemen van 1000 MW.

Ons lijkt de windmolen een zeer geschikte energiebron, vooral vanwege zijn niet vervuillende karakter.

##### B. Waterkracht.

Waterkracht is een energiebron, die reeds op grote schaal wordt toegepast. Het totaal aan te wenden vermogen bedraagt  $3 \times 10^{12}$  W (4). Hiervan is het grootste deel beschikbaar in de derde wereld-landen (vooral Afrika). Er zijn enkele nadelen aan het gebruik van waterkracht verbonden. Naast landschapsaantasting door stuwdammen, ontstaat er door de grote stuwmuren een verstoring van het natuurlijk evenwicht. Bekend is dat het stuwmeer achter de Aswandam (Egypte) een broedplaats

is van allerlei ziekteverwekkende bacteriën (1).

Het voordeel van waterkracht is dat de omzetting van potentiële in elektrische energie direct gebeurt, wat een hoog rendement geeft en dat het meer als buffer goede diensten kan bewijzen. In stille tijden kan een buffermeer eventueel weer volgepompt worden. Het verlies van volpompen en weer leeg laten lopen van een meer bedraagt minder dan 30 % (1).

#### C. Energie uit getijdenwerking.

Uit het verschil tussen eb en vloed kan door plaatsing van waterturbines in een dam ter afsluiting van een baai of zeearm elektriciteit worden gewonnen. De enige plaats waar dit tot nu toe gerealiseerd wordt is in de monding van de Rance in Bretagne, waar het getijdenverschil ruim 8 m. is. De centrale levert 240 MW (2). Voorwaarde voor deze bron van energieproductie is een voldoende groot verschil tussen eb en vloed. Een nadeel is dat het biologisch evenwicht door zo'n centrale enigermate verstoord wordt. Een ander nadeel is dat de energie fluktuuerend ter beschikking staat. Dit is te ondervangen door van meerdere bassins gebruik te maken. In Amerika (Funday Bay) bestaan plannen om m.b.v. getijdencentrales 2000 tot 5000 MW op te wekken. Het totale vermogen dat men over de wereld uit getijdenwerking kan krijgen bedraagt  $3 \times 10^{12}$  W (4).

#### D. Energie uit temperatuursverschillen in zee.

De zonnestraling veroorzaakt verticale temperatuursgradiënten in zee in de orde van 1 à 2.5 graad per 100 meter (2). In warme golfstromen kan dit soms meer dan 20 graden per 100 meter zijn (5). Door de warme bovenlagen als warmtebron en de koude onderlagen als warmteput te gebruiken en door gebruik te maken van een vluchtig arbeidsmedium als propaan kan men zonne-energie kontinu in elektriciteit omzetten. Een centrale is veilig en gemakkelijk te construeren. Nadelen van een dergelijke centrale zijn dat ze alleen in tropische gebieden gebruikt kunnen worden en dat het thermisch evenwicht van de oceaan verstoord wordt door het opwarmen van de onderlagen en het afkoelen van de bovenlagen.

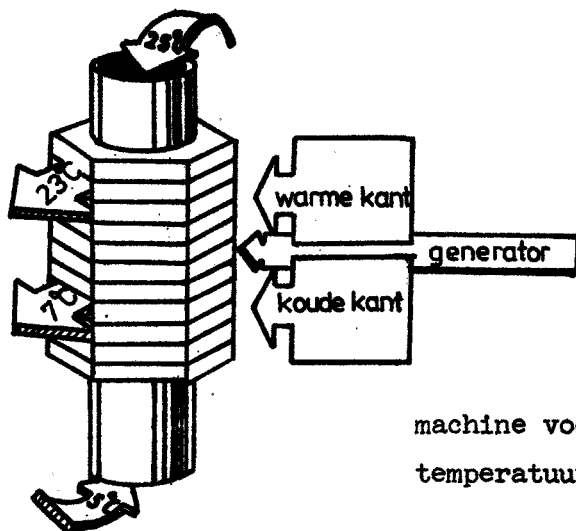


fig. XIII-1 Schema van een machine voor het opwekken van energie uit temperatuurverschillen in de zee.

#### E. Energie uit stromingen in zee.

In de zeebodem bevinden zich op bepaalde plaatsen gleuven, waar grote stroomsnelheden voorkomen. Voor de kust van Florida is dat 2 m/s. (3). De kinetische energie van deze stromingen kan gebruikt worden om energie op te wekken.

De huidige economische benadering, waarbij factoren als werkgelegenheid voorop staan, gaat veelal voorbij aan de gevolgen van één en ander voor het milieu. In de toekomst dienen de milieuaspekten een ruimere aandacht te krijgen.

#### F. Energie uit organische afvalstoffen.

Er zijn de laatste jaren veel processen ontwikkeld om organisch afval om te zetten in olie of methaan. De omzetting kan langs chemische of bacteriologische weg geschieden, waarbij vrijwel alle in het afval aanwezige koolstof kan worden omgezet. Het materiaal kan om elektriciteit op te wekken ook direkt worden verbrand. De chemische omzetting van afval gebeurt door koolmonoxyde en stoom bij een druk van 100 tot 250 atm. en een temperatuur van 240-380 °C door het afval te leiden. Per ton afval wordt ongeveer 200 liter olie<sup>4</sup> verkregen (6).

Ook bestaat er de bacteriologische omzetting waarbij onder anaerobe omstandigheden door bacteriën methaan wordt geproduceerd. Per ton afval kan ongeveer 300 m<sup>3</sup> methaan worden gemaakt. Op Taiwan zijn 7500 boerenfamilies, die aldus in hun energiebehoefte voorzien door ontlasting van mens en dier op te slaan in een luchtdichte container van waaruit het gas wordt afgetapt (7).

Een nadeel is dat er fossiele brandstoffen ontstaan met hun nadelen bv. luchtvervuiling bij verbranding. Ook het verzamelen van het afval en de gevarieerdheid ervan vormen een probleem. Vooral in agrarische gemeenschappen is het gebruik van organisch afval via bacteriologische omzetting als energievoorziening effectief.

#### G. Geothermische energie.

Van deze energiebron wordt sinds het begin van deze eeuw gebruik gemaakt voor het opwekken van elektriciteit. Ook kan de energie direkt gebruikt worden in de vorm van warmte, zoals op IJsland, waar men de warmwatervoorziening (stadsverwarming) direkt uit aardwarmte betreft.

De totale warmtestroom door de aardkorst heeft een vermogen van  $32 \times 10^{12}$  W (4), maar de gemiddelde warmtestroomdichtheid bedraagt slechts 0.06 W/m<sup>2</sup>. De tot nu toe enige te verwezenlijken vorm van energieproduktie uit aardwarmte is dan ook slechts mogelijk op plaatsen, waar deze warmte is opgeslagen in ondergrondse waterlagen. Met behulp van turbines kan de gevormde stoom gebruikt worden voor elektriciteitsopwekking. Deze situatie vereist de volgende geologische omstandigheden: een warmtebron op minder dan 10 km onder het aaroppervlak, poreuze

waterhoudende rotslagen boven de warmtebron en een ondoordringbare rotskap boven de waterhoudende laag. Het aantal gebieden waar deze situatie voorhanden is, is beperkt.

De bron heeft wel enkele nadelen. Een dergelijke beschreven geologische situatie valt dikwijls samen met plaatsen waar de aardkorst breuken vertoont, zodat tengevolge van de mogelijkheid tot aardbevingen de bron kwetsbaar is. Verder verstoort het gebruik van de bron het natuurlijk evenwicht en kunnen uit het opgepompte water gasen als zwavelwaterstof en stikstofoxyden vrijkomen.

Een andere soortgelijke methode is om zelf het water bij de warmtebron te brengen d.m.v. een pijpsysteem. Dit biedt het voordeel dat het op meer plaatsen toepasbaar is.

#### H. Zonne-energie.

De zon is de enige energiebron, die de mensheid blijvend van energie kan voorzien. Het vermogen dat de aarde bereikt is  $6 \times 10^{24}$  W. Dit komt overeen met een gemm. vermogen van  $160 \text{ W/m}^2$ . In zonnige streken is dat  $250 \text{ W/m}^2$  (2). Op kleine schaal wordt reeds in diverse landen van zonne-energie gebruik gemaakt.

Het gebruik van zonne-energie heeft als voordelen dat de bron onuitputtelijk is en dat het natuurlijk evenwicht niet verstoord hoeft te worden. Hiervoor is nodig dat op een bepaalde plaats niet meer zonne-energie wordt opgevangen als de aarde daar 's nachts weer uitstraalt. Grote centrales in de Sahara zullen het plaatselijke natuurlijke evenwicht verstoren.

Als nadelen van zonne-energie willen we vermelden dat het diffuse karakter grote opvangoppervlakken vereist of sterke concentreringsapparatuur.

De opgevangen energie moet zo efficiënt mogelijk omgezet worden. Hierbij kunnen we onderscheid maken tussen directe omzettingen en omzettingen waarbij warmte als tussenstap voorkomt. Direkte omzettingen hebben het voordeel van een hoger rendement.

Er zijn een aantal mogelijkheden:

- 1) Anorganische halfgeleiders (foto-elektrische cellen). Hierbij wordt zonnestraling direkt in elektriciteit omgezet. Door gebruik te maken van deze cellen in de ruimtevaart is veel ervaring opgedaan. Het rendement bedraagt ongeveer 10 %. Problemen bij deze cellen zijn de nog te hoge kostprijs en beperkte levensduur.
- 2) Via fotosynthese. Dit proces vindt in de natuur plaats. Men denkt hierbij aan het stoken van gekweekte algen in een ketel. Nadeel is het lage rendement. Slechts 3 % van het opgevangen zonlicht wordt in elektriciteit omgezet.
- 3) Methoden m.b.v. organische halfgeleiders of m.b.v. antennes verkeren nog in de fase van fundamenteel onderzoek.
- 4) Omzettingen van zonne-energie in warmte gebeurt m.b.v. selectieve oppervlakken,

dit zijn oppervlakken die het zonlicht absorberen zonder zelf straling uit te zenden. Men denkt er ook over om het zonlicht eerst te concentreren met lenzen en spiegels en vervolgens te werpen op selectieve oppervlakken, welke methode minder ruimte in beslag zou nemen.

Meinel heeft in verband hiermee het volgende opvang- en opslagsysteem voorgesteld (8):

D.m.v. lenzen wordt de zonnestraling gekoncentreerd en via een raam in een luchtledige buis naar binnen gestraald. Deze buis heeft een reflekterend binnenoppervlak. Binnen de buis bevindt zich een stalen buis die voorzien is van een uit twee lagen bestaande coating. Deze coating heeft twee eigenschappen: hoge absorptie van zonnestraling en lage emissie van infrarode straling. De warmte wordt afgevoerd m.b.v. vloeibare natrium dat bij het verlaten van de opwarmpijp een temperatuur van 500 graden Celcius bereikt heeft. Het hete natrium wordt nu gebracht naar een opslagsysteem. Meinel stelt voor de energie op te slaan in de vorm van thermische energie, alvorens het om te zetten in elektrische energie. In het opslagsysteem bevindt zich een eutektisch zoutmengsel waarin de warmte wordt opgeslagen als smeltwarmte. De warmte wordt tenslotte via een stoomcircuit naar een turbine gevoerd.

Er bestaan plannen om te komen tot zonne-energiecentrales in de ruimte, die per stuk 10 GW naar de aarde sturen, zoals door Glaser is voorgesteld (9). Wanneer, door wat voor oorzaak dan ook, de bundel op een verkeerde plaats terecht zou komen, zullen de gevolgen niet te overzien zijn. Verder moet er voor gevreesd worden dat de uitlaatgassen van ruimtependels die dergelijke centrales moeten bouwen in staat zouden zijn het klimaat te doen veranderen.

Maar ook het bouwen van grote centrale eenheden op aarde lijkt ons verwerpelijk. Niet alleen vanwege de landschapsaantasting, welke zulke grote eenheden met zich mee zouden brengen (een eenheid van 1000MW heeft een oppervlak van  $70 \text{ km}^2$  nodig), maar ook vanwege de mogelijkheid tot het plaatselijk verstoren van het natuurlijk evenwicht.

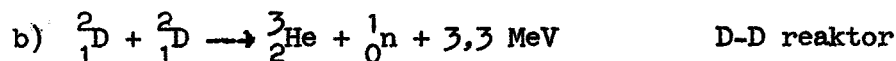
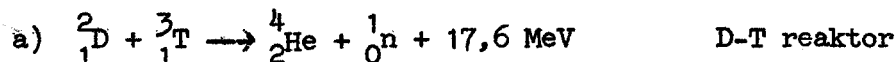
Het beste lijkt ons gedecentraliseerd gebruik van zonne-energie. Dit is te verwezenlijken door het dak van elk huis te voorzien van zonnecellen, zodat elk gezin zo volledig mogelijk in eigen energie-behoefte kan voorzien. Experimenten op dit gebied in Amerika en Frankrijk geven goede resultaten. Ook in Nederland vinden proefnemingen op dit terrein plaats. Zolang de opslag nog een probleem vormt kan zonne-energie gebruikt worden als aanvulling op andere systemen van energieproductie.

### I. Kernfusie.

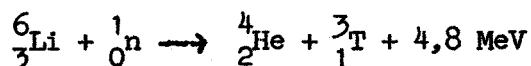
In tegenstelling tot de andere alternatieve energiebronnen verkeert kernfusie nog in het stadium van fundamentele research. Onderzoekers zien toch in kernfusie een belangrijke vorm van energieproductie in de toekomst, ondanks vele tot op dit

moment vrijwel onoplosbare problemen.

Als twee lichte atoomkernen versmelten tot een nieuwe kern kan dit met verlies aan massa gepaard gaan. De verloren massa is omgezet in energie. Deze energie zou kunnen dienen tot het opwekken van elektriciteit. De twee voornaamste reacties zijn:



Tritium moet eerst gekweekt worden door neutroneninvangst van Lithium:



In reactie a komt 80 % in kinetische energie van de neutronen vrij, in reactie b is dit 40 %.

Voor beide reacties gelden de volgende voorwaarden:

1) De temperatuur moet hoog genoeg zijn om de kernen ondanks de onderling afstoten- de krachten te laten versmelten. Voor reactie a zou de temperatuur  $10^8$  °K moeten zijn voor de D-D reactie  $10^9$  °K.

Dergelijke temperaturen zijn aanwezig in sterren, waterstofbommen en plasma's die m.b.v. een laserbundel in een vaste stof zijn gekreërd.

2) De waarschijnlijkheid van een kernbotsing moet hoog genoeg zijn. Deze kan worden uitgedrukt als produkt van plasmadichtheid en de tijd dat deze dichtheid gehandhaafd kan blijven, de zogenaamde opsluitingstijd. Dit produkt moet voor de D-T reactie in de orde van  $10^{15}$  ionen/s/cm<sup>3</sup> zijn, voor de D-D een faktor 10 à 100 hoger. Opsluiting van plasma van  $10^8$  °K is onuitvoerbaar met een materiële wand. Oplossing wordt gezocht in het gebruik van zeer sterke magneetvelden. Ook de beheersing van plasmainstabiliteiten en de injectie van nieuwe brandstof vormen nog grote technische problemen.

Wanneer de technologische problemen opgelost kunnen worden, blijven de veiligheids- en milieuproblemen bestaan. Hoewel er geen sprake is van radioactieve splijtingsprodukten wordt er grootscheeps schadelijk tritium gevormd. Bovendien zijn er aanwijzingen dat er door interactie van neutronen met omhullend materiaal grote hoeveelheden radioactieve isotopen worden gevormd. D-T reaktoren produceren ca. 10 maal zoveel neutronen per kWh als kernsplijtingsreactoren.

De energie die in de spoelen, welke het magnetische veld opwekken, ligt opgeslagen is zeer groot en kan bij doorbranden explosies veroorzaken, waarbij gigantische hoeveelheden curies vrij kunnen komen.

Ook het probleem van thermische vervuiling blijft bestaan.

#### J. Opslag van energie.

Een van de grootste problemen bij het toepassen van de alternatieve energiebronnen is de opslag van energie.

Het opslagprobleem kan grotendeels ondervangen worden door gebruik te maken van meerdere energiebronnen naast elkaar: de systemen kunnen elkaar aanvullen.

Er zijn verscheidene mogelijkheden om energie op te slaan. Wij vermelden:

- 1) Akku's: hierbij is de moeilijkheid dat er geen batterijen zijn met voldoende capaciteit, en dat ze niet gedurende vele jaren tegen telkens laden en ontladen kunnen worden.
- 2) Vliegwielen.
- 3) Waterstof: men kan water elektrolyseren en de aldus ontstane waterstof weer verbranden.

Ook kan men waterstof in een brandstofcel met zuurstof laten reageren, waardoor men direkt elektrische energie verkrijgt. Er zijn echter nog geen goedkope en langlevende brandstofcellen ontwikkeld.

Waterstof kan onder druk in flessen of gebonden aan metalen worden opgeslagen.

- 4) Eutektische zoutmengsels.

#### Referenties:

1. Energie, Syllabus van Studium Generale TH Eindhoven.
2. Redactioneel artikel over windmolens, New Scientist 57, blz. 24 (1973).
3. D.G.H. Latzko, Alternatieven voor energieopwekking en transport, De Ingenieur 85, blz. 604 (1973).
4. A national network of pollution free energy resources, W.E. Heronemus, April 1971, Univ. of Massachusetts.
5. K. Hubbert, Energy and Power, The energy resources on the earth, blz. 31.
6. Solar energy as a national energy resource, NSF/NASA Solar Energy Panel.

## Hoofdstuk XIV EVALUATIE

Dit hoofdstuk splitsen we op in een samenvatting van de inhoud van het rapport en de eigenlijke evaluatie waarin we ons standpunt naar voren zullen brengen.

### I. Samenvatting.

We zullen aan de hand van de in de inleiding gegeven driedeling proberen de konklusies samen te vatten:

1. Natuurwetenschappelijk/Technologisch: We hebben gezien dat reactoren kunnen worden ingedeeld in thermische- (Borssele, Dodewaard) en kweekreactoren (Kalkar). Weliswaar levert het tweede type meer energie uit de splijtstof maar de technologische moeilijkheden zijn veel groter dan bij die van het eerste type. Bovendien levert het grote hoeveelheden splijtbaar plutonium (wat ook de bedoeling is), maar deze hoeveelheden zijn moeilijk controleerbaar. Dit is van belang als we beseffen dat het een gemakkelijk uitgangsmateriaal voor bommen is.

De afvalwarmte van kerncentrales is  $1\frac{1}{2}$  keer zo groot als die van een konventionele centrale bij een gelijke elektriciteitsproduktie.

Onvermijdelijk is de voortdurende lozing van radioactief materiaal in atmosfeer en oppervlaktewater.

Verschillende radioactieve isotopen in het afval moeten voor 50 tot 100.000 jaar opgeslagen worden. Buiten problemen met o.a. duurzaamheid van verpakking treedt het extra probleem van warmteontwikkeling op.

Het opwerkingsproces is nog niet zover ontwikkeld dat men het onvermijdelijke afval in een dusdanige vorm kan brengen dat het een te verwaarlozen invloed op het leefmilieu heeft, nog afgezien van het feit dat men zich af moet vragen of een verhoging van de stralingsbelasting überhaupt te verwaarlozen is.

De gevolgen van een ongeluk met een centrale in de Eemsmond geeft tienduizenden slachtoffers door directe stralingsgevolgen. Het uiteindelijke totale aantal slachtoffers zal veel groter zijn.

Het energieprobleem kan, op zijn minst ten dele, ondervangen worden door beperking van het verbruik en aanwending van nieuwe energiebronnen. Veelbelovend lijkt het gedecentraliseerd verbruik van zonne-energie en in Nederland windenergie. Voordeel is dat er dan een energiebeleid op "inkomen" in plaats van op "kapitaal" ontstaat.

2. Medisch/Biologisch: De biologen vechten de huidige normen voor lozing van afvalwarmte aan. Doordat kerncentrales minder efficiënt zijn dan konventionele centrales, zijn op dit gebied nog veel grotere moeilijkheden te verwachten.

Ophoping van radioactieve isotopen in voedselketens is zeer wel mogelijk en in sommige gevallen ook al aangetoond. Door deze ophoping kunnen geringe continue, geloosde hoeveelheden radioactief materiaal toch grote gevaren gaan opleveren

voor levende wezens, met name voor de mens.

Voorstanders van kernenergie bedienen zich bij risico-beschouwingen over verhoging van de achtergrondstraling van twijfelachtige argumenten. De beoordeling van de effecten op de eigen gezondheid en op het nageslacht (genetisch) levert problemen op omdat een groot aantal factoren onvoldoende (of zelfs helemaal niet) bekend zijn; dit geldt evenzeer voor de gevolgen van hoge doses over langere termijn. Uit verschillende studies komt naar voren dat er géén drempelwaarde voor de stralingseffecten aanwezig is en dat de gevolgen op genetisch niveau van verschillende soorten straling ernstiger lijker dan die op somatisch niveau.

3. Maatschappelijk: Zoals in de inleiding gesteld, heeft het maatschappelijk aspect niet die aandacht gekregen welke het verdiend. Wel kunnen we stellen dat ook hier de problemen niet gering zijn. Het feit dat de technologische kennis binnen "ieders" bereik ligt, brengt aanzienlijke veiligheidsproblemen met zich mee. Landen kunnen met een vrij geringe inspanning een kernwapenprogramma opstellen.

Een zeer kwetsbare schakel in de kernenergiecyclus blijkt het ransport te zijn, zodat niet alleen landen maar ook kleinere groepen de atoombom binnen bereik krijgen. Een afdoende beveiliging tegen het in verkeerde handen vallen van radio-actief materiaal is vrijwel onmogelijk.

Wat de politionele gevolgen en die voor de democratie zullen zijn, is zeer moeilijk te beoordelen. Het kan bijvoorbeeld nodig worden om te beschikken over informatie omtrent "verdachte" personen of groeperingen; het kan dus leiden tot een politiestaat.

Wat de gevolgen van een ongeluk betreft; het is zelfs de vraag of niet in het ergste geval een groot deel van de Nederlandse samenleving ontwricht zal worden. Men kan zich zelfs afvragen of Nederland na een dergelijk ongeluk nog als hooggeïndustrialiseerde samenleving kan blijven bestaan.

## II. Evaluatie; standpunt van de werkgroep.

Ook al wordt in het rapport slechts gedeeltelijk informatie over de kernenergieproblematiek aangedragen en komen de vragen, of we wel een steeds meer energieverblindende maatschappij willen, of we de noodzakelijk geachte centralisatie wel willen, of de vestiging van meer energie vergende industrien wel de oplossing voor de werkgelegenheid is, niet of nauwelijks ter sprake, toch kunnen we op grond van de wel behandelde aspecten van kernenergie een standpunt ten aanzien van de invoering ervan innemen.

In de huidige discussies ligt de situatie nu zo, dat de voorstanders van kernenergie niet meer kunnen stellen dat kernenergie een veilige zaak is. Daarvoor zijn er te veel wetenschappelijk gefundeerde bezwaren aan te voeren. Zij blijven nu dan ook op het standpunt staan, dat kernenergie op dit moment economisch noodzakelijk geworden is. De werkgelegenheid gaat voor.

Afgezien van het feit of dit wel zo is, draaien ze door het gebruik van deze argumentatie, die in de jaren '60 nooit ter diskussie heeft gestaan, naar onze mening de zaken op onjuiste wijze om.

Stellen we dat kernenergie goed is voor de ekonomie en dat we dan de gevolgen op de koop toe nemen, dan nog lijkt het ons onverantwoord voorbij te gaan aan de verantwoordelijkheid die de energiebedrijven t.o.v. de samenleving hebben.

Als we nogmaals terugblikken op hoofdstuk XI (ongelukken) en de konklusies die daaraan verbonden zijn bekijken, dan wekt het zelfs onze verbazing, dat men al over de invoering van kernenergie praat alsof de zaken beslist zijn.

In hoofdstuk XI kwamen de gevolgen van een ongeluk naar voren. Deze waren van een dusdanige omvang en aard dat ze niet te vergelijken zijn met tot nu toe bekende gevaren. Hoe gering de kans ook is, de immense gevolgen dwingen ons tot de uiterste terughoudendheid. Het is dan ook zeer de vraag of we de risico's kunnen accepteren. Vooral als daarbij gevoegd worden de mogelijke gevolgen van kontinulozingen, afvalwarmte, het onopgeloste afvalprobleem, de niet funktionerende opwerking, de gevaren van transport en de beveiliging daarvan, het beschikbaar komen (zijn) van technologische kennis om bommen te vervaardigen.

Dit lijken ons voldoende redenen afwijzend te staan tegenover de invoering van kernenergie.

*A P P E N D I C E S*

---

Appendix A INVLOED VAN STRALING OP HET ORGANISME

Inhoudsopgave

blz.

|     |   |                                                                             |     |
|-----|---|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1   | - | <u>Inleiding</u>                                                            | 92  |
| 2   | - | <u>Ioniserende straling</u>                                                 | 93  |
| 3   | - | <u>Biologische werkzaamheid van ioniserende straling</u>                    | 95  |
| 3.1 | - | Dosis begrip                                                                | 95  |
| 3.2 | - | LET en andere stralingsfactoren                                             | 95  |
| 3.3 | - | Radikalen                                                                   | 96  |
| 3.4 | - | Leeftijd, sexe                                                              | 97  |
| 3.5 | - | Aard van de bestraalde cellen                                               | 97  |
| 3.6 | - | Mogelijkheid van biologisch herstel (reparatiemechanismen)                  | 97  |
| 3.7 | - | Het biologisch effect                                                       | 99  |
| 4   | - | <u>Stralingsbeschermende maatregelen</u>                                    | 101 |
| 5   | - | <u>Inleiding bij somatische en genetische risico's van straling</u>         | 104 |
| 5.1 | - | Nut van het vaststellen van risico's voor beschermingsdoeleinden            | 104 |
| 5.2 | - | Soorten risico's                                                            | 105 |
| 6   | - | <u>Somatische risico's</u>                                                  | 106 |
| 6.1 | - | Inleiding                                                                   | 106 |
| 6.2 | - | Kanker                                                                      | 106 |
| 6.3 | - | Leukemie                                                                    | 106 |
| 6.4 | - | Andere nieuwvormingen (schildklierca en botsarcoom)                         | 107 |
| 6.5 | - | Dosis-effekt relaties m.b.t. het voorkomen van kanker                       | 109 |
| 6.6 | - | Misvormingen in de ontwikkeling van het embryo en het foetus                | 110 |
| 6.7 | - | Niet specifieke verkorting van de levensduur                                | 111 |
| 7   | - | <u>Genetische risico's</u>                                                  | 112 |
| 7.1 | - | Inleiding                                                                   | 112 |
| 7.2 | - | Soorten genetische schade                                                   | 112 |
| 7.3 | - | De totale mutatiefrekwentie                                                 | 114 |
| 7.4 | - | Basisgegevens m.b.t. het voorspellen van de genetische effecten bij de mens | 115 |
| 7.5 | - | Voorspellen van schade voor het nageslacht                                  | 115 |
| 7.6 | - | Vergelijken van risico's                                                    | 116 |
| 7.7 | - | Slotopmerkingen                                                             | 118 |
| 8   | - | <u>Experimentele modellen en dosis-effekt relaties</u>                      | 119 |

|     |   |                                                                                    |     |
|-----|---|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9   | - | <u>Normen en effecten van inwendige bestraling</u>                                 | 122 |
| 9.1 | - | Ingestie                                                                           | 123 |
| 9.2 | - | Inhalatie                                                                          | 124 |
| 9.3 | - | Hot particles                                                                      | 128 |
| 9.4 | - | Lichaamsbelasting gebaseerd op een vergelijk met Ra-226                            | 129 |
| 9.5 | - | Bepaling MPBB                                                                      | 129 |
| 9.6 | - | Bepaling van maximaal toelaatbare concentratie van radionukliden in lucht en water | 130 |
| 0   | - | <u>Samenvatting</u>                                                                | 132 |
| 1   | - | <u>Konklusie</u>                                                                   | 133 |
|     | - | Verklarende woordenlijst                                                           | 134 |
|     | - | Referenties                                                                        | 136 |

## 1. Inleiding.

We zullen dit artikel beginnen met de beperking aan te geven, die we ons opgelegd hebben. We zullen het in dit artikel niet hebben over de ongelukken met kerncentrales, aangezien we vinden dat dit een evident gevaar oplevert voor de volksgezondheid. Het gaat ons in dit artikel veel meer om de effecten te beschrijven, die het gevolg zijn van een geringe toename van de stralingsbelasting in de tijd voor het milieu.

Eerst zal ingegaan worden op de factoren, welke van belang zijn voor een stralingseffekt. Hierbij zal een bespreking plaatsvinden van factoren zoals: dosis, dosistempo, LET en de mogelijkheid van biologisch herstel.

Daarna zal, steunend op vnl. ICRP publikatie 8 en vele recente artikelen, ingegaan worden op de somatische en genetische effecten van ioniserende straling. Besproken wordt o.a.: dosis-effekt relaties (zowel experimentele als theoretische modellen), evenals de voorspelbaarheid van effecten voor latere generaties. Ook aan inwendige bestraling zal ruime aandacht geschonken worden, zoals aan het probleem van de hot-particles. Vervolgens zal een beschrijving van de ICRP modellen gegeven worden, zoals de bepaling van concentratie van radio-activiteit in lucht en water.

Besloten wordt met een samenvatting en konklusie. Bij het artikel is een verklarende woordelijst gevoegd. Het lezen van de artikelen, waarin de gebruikelijke terminologie die op dit terrein bestaat gehandhaafd is, zal hiermee vergemakkelijkt worden. Een lijst met de geraadpleegde literatuur, waaraan in het artikel gerefereerd wordt, is als laatste opgenomen. In sommige gevallen was het niet mogelijk de oorspronkelijke stukken te lezen.

Tenslotte hopen we dat juist degenen, die een geringe biologische kennis bezitten, door dit artikel enig inzicht kunnen krijgen in de stralingsproblematiek - binnen de grenzen die we ons gesteld hebben - want dit was een belangrijke reden voor het schrijven hiervan.

Wij willen prof. dr. H.B. Lamberts, dr. A.W. Konings, mej. drs. M.W. Aarnoudse en mevr. drs. F.J. Braaksma danken voor de waardevolle suggesties en korrekties bij het tot stand komen van dit gedeelte. De auteurs blijven echter verantwoordelijkheid dragen voor de tekst.

## 2. Ioniserende straling.

Bij sommige kernen is de configuratie tussen protonen en neutronen niet stabiel. Deze kernen trachten, door o.m. uitzenden van deeltjes, tot een stabiele configuratie te komen. Dit uitzenden van deeltjes noemen we straling welke zich hoofdzakelijk door haar ioniserende werking kenbaar maakt. We kunnen vier soorten straling onderscheiden:

$\alpha$ -straling: de uitgezonden deeltjes ( $\alpha$ -deeltjes) zijn heliumkernen, bestaande uit 2 protonen en 2 neutronen ( ${}^4_2\text{He}$ ). Indien een radio-actieve kern een  $\alpha$ -deeltje uitzendt, wordt zijn massagetal dus met 4 verminderd en zijn atoomnummer met 2 (b.v.  ${}^{238}_{90}\text{U} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{234}_{88}\text{Th}$ ). De nieuwe kern ( ${}^{234}_{88}\text{Th}$ ) staat in een andere kolom van het periodiek systeem - twee plaatsen naar links - dan de oorspronkelijke kern ( ${}^{238}_{90}\text{U}$ ).

$\beta$ -straling: de uitgezonden deeltjes zijn elektronen ( $e^-$ ) of positronen ( $e^+$ ). De straling wordt aangeduid met resp.  $\beta^-$ -straling en  $\beta^+$ -straling. Bij uitzenden van een  $\beta^-$ -deeltje wordt het atoomnummer van de uitzendende kern met 1 vermeerderd, bij een  $\beta^+$ -deeltje met 1 verminderd. (b.v.  ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow e^- + {}^{14}_7\text{N}$  en  ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow e^+ + {}^{11}_5\text{B}$ ). De nieuwe kernen hebben dezelfde massa als de oorspronkelijke. Het atoomnummer is resp. 1 groter en 1 kleiner (dus ook andere plaats in het periodiek systeem). In sommige gevallen is waargenomen, dat de moederkern i.p.v. een positron uit te zenden, een elektron invangt uit een van de binnenste atoomschillen. Dit proces wordt elektronenvangst genoemd. In principe kan het als volgt worden weergegeven:  ${}_Z^AX + e^- \rightarrow {}_{Z-1}^AY$ . Elektronenvangst wordt gevolgd door uitzending van röntgenstraling door de dochterkern. Deze heeft dezelfde frekwentie als die van de karakteristieke röntgenstraling van de dochterkern.

$\gamma$ -straling: dit is elektromagnetische straling. De golflengte is in de orde van  $10^{-5}$  van die van het zichtbare licht. De golflengte van röntgenstraling ligt tussen die van  $\gamma$ -straling en het zichtbare licht. Na  $\alpha$ -verval of  $\beta$ -verval kan de dochterkern in aangeslagen toestand verkeren. Indien dit het geval is, wordt het proces gevolgd door  $\gamma$ -emissie.

neutronen-straling: het uitzenden van (ongeladen) neutronen. Aangezien dit verval bij verspreiding van radioactiviteit weinig voorkomt i.t.t.  $\alpha$ -,  $\beta$ - en  $\gamma$ -straling, is deze straling verder buiten beschouwing gelaten.

Het uitzenden van een deeltje of elektromagnetische straling houdt een energie-overdracht in. Deze energie wordt gemeten in elektron-volts (eV).  $\alpha$ -deeltjes hebben energieën van enkele MeV;  $\beta$ -deeltjes van enkele KeV tot een paar MeV;  $\gamma$ -stralen hebben energieën van enkele MeV.

De dracht van  $\alpha$ - en  $\beta$ -deeltjes en  $\gamma$ -stralen is afhankelijk van hun energie en van de materie waardoor ze bewegen. De dracht van  $\alpha$ -deeltjes, in lucht van normale druk en temperatuur, is enkele centimeters;  $\beta$ -deeltjes hebben bij bovengenoemde kondities een dracht van enkele decimeters; evenzo hebben  $\gamma$ -stralen een dracht van enkele honderden meters. In weefsel is het doordringend vermogen resp.: 0,1 mm, 1 cm en 10 cm (dit zijn globale maten).

### 3. Biologische werkzaamheid van ioniserende straling.

Het blootgesteld zijn aan ioniserende straling, gedurende kort of lange tijd, kan in een enorme verscheidenheid aan effecten sorteren. Het effect op een biologische eenheid wordt beïnvloed door fysische, chemische en biologische factoren.

Fysische factoren : - grootte van de dosis (zie 3.1)  
- dosistempo\*, dosissnelheid\*\* (zie 3.1)  
- L.E.T. (zie 3.2)

Chemische factoren : - beschermende en versterkende factoren bij vorming van radikalen (zie 3.3)

Biologische factoren: - aard van de bestraalde cellen (zie 3.5)  
- sexe, leeftijd (zie 3.4)  
- mogelijkheid van biologisch herstel (zie 3.6)

#### 3.1 Het dosisbegrip.

Ioniserende straling geeft energie af in materie door middel van ionisaties en excitaties van atomen en molekulen. De gemiddelde dosis energie welke in een bepaalde gewichtshoeveelheid materie afgegeven wordt, wordt geabsorbeerde dosis genoemd. De eenheid van de geabsorbeerde dosis is de rad (1 rad = 100 erg/gram). Afgezien van het feit of de verkregen dosis hoog of laag is, is het van belang het dosistempo te weten (rad per tijdseenheid). Het is n.l. waargenomen dat lagere dosistempo's minder schadelijk zijn voor een biologische eenheid dan hogere dosistempo's.

In de volgende paragraaf zullen we ook nog het begrip dosisequivalent tegenkomen.

#### 3.2 L.E.T. en andere stralingsfactoren.

Kwantitatief gelijke geabsorbeerde doses hebben niet altijd eenzelfde biologische werkzaamheid. Deze wordt namelijk ook beïnvloed door de soort van straling en de bestralingskondities. De verschillende stralensoorten verschillen in kwaliteit. Om dit verschil aan te duiden gebruikt men bij radiobiologische doeleinden de term L.E.T. (Linear Energy Transfer), welke gedefinieerd wordt als de hoeveelheid energie die door straling per eenheid van weglengte aan de materie wordt afgegeven (KeV per micron).

Voor stralingsbeschermingsdoeleinden gebruikt men i.p.v. de L.E.T. een kwali-

\* rads per tijdseenheid

\*\* tijd nodig om 1 rad toe te dienen

teitsfaktor voor een stralensoort (QF). Het verband tussen QF en de L.E.T. \* wordt door het volgende schema weergegeven:

| L.E.T. in water<br>(KeV / $\mu$ ) | QF | 1) |
|-----------------------------------|----|----|
| 3-5 of minder                     | 1  |    |
| 7                                 | 2  |    |
| 23                                | 5  |    |
| 53                                | 10 |    |
| 175                               | 20 |    |

$\alpha$ -deeltjes hebben een kwaliteitsfaktor (QF) van 10;  $\beta$ -deeltjes en  $\gamma$ -straling hebben er één van 1. De kwaliteitsfaktor van neutronen is afhankelijk van hun energie (2 voor thermische neutronen en 10 voor snelle neutronen met een energie van 1 MeV). Voor stralingsbeschermingsdoeleinden gebruikt men het begrip dosis-equivalent (H), hetwelk gedefinieerd wordt door het volgende produkt:

$$H = D \cdot (QF) \cdot (DF) \text{ rem}$$

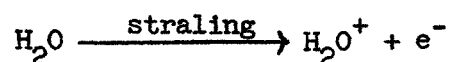
hierbij is: D : geabsorbeerde dosis in rad

QF : kwaliteitsfaktor van stralensoort

DF : het produkt van eventuele andere factoren, die het biologisch effect beïnvloeden, zoals verdeling van dosis in ruimte en tijd.

### 3.3 Radikalen.

Vrije radicalen zijn elektrisch neutraal geladen atomen of molekulen die een ongepaard elektron hebben in hun buitenste baan. De vrije radicalen zijn zeer reaktief; ze hebben de neiging om een elektron op te nemen (oxidatie) of één af te staan (reduktie). Het is logisch dat veel van de stralingsenergie in ons lichaam wordt opgenomen door watermolekulen, aangezien ons lichaam daar voor 70 à 90 % uit bestaat. Wanneer water wordt bestraald, wordt door deze ioniserende straling een elektron vrijgemaakt uit een watermolekuul:

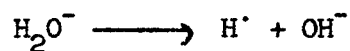
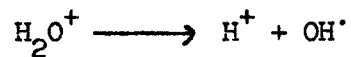


Dit elektron wordt ingevangen door een ander watermolekuul:



\* In radiobiologische literatuur wordt deze faktor ook nog wel aangeduid met RBE (relatieve biologische werkzaamheid). Zowel voor radiologisch gebruik als bij radiobeschermingsdoeleinden wordt nu veelal de LET gehanteerd. Zie hiervoor: Health Physics, Vol. 9, no. 4, pp 357-384 (1963).

Noch  $\text{H}_2\text{O}^-$ , noch  $\text{H}_2\text{O}^+$  is stabiel en beide dissociëren in minder dan  $10^{-16}$  sec. in een ion en een vrij radikaal:



De minimale energie die nodig is om deze reactie te doen plaatsvinden, is in dit geval  $100 \text{ eV}^*$ .

Bij aanwezigheid van  $\text{O}_2$  en/of gehalegoneerde pyrimidinen zal het volgproces bevorderd worden. Door sulfhydryl bevattende groepen zal dit worden geremd. De manier waarop dit gebeurt is echter nog niet geheel duidelijk.

### 3.4 Leeftijd.

De gevoeligheid voor ioniserende straling is groter naarmate het organisme jonger is. Zij is met name groot in de periode waarin een organisme geslachtsrijp wordt (zie ook pag.112 e.v.). Embryo's zijn erg gevoelig voor straling, ook als de kritieke stadia van de organogenese achter de rug zijn. In studies is aangetoond, dat blootstelling van de foetus aan ioniserende straling (enkele rads Röntgenstraling) de kans op het voorkomen van maligne ziekten, in de eerste 10 jaar na de geboorte, doet toenemen. Verder kan het ook aanleiding geven tot andere waarneembare somatische en genetische mutaties.<sup>2)</sup>

### 3.5 Aard van de bestraalde cellen.

Over het algemeen zijn sneltelende cellen zoals die gevonden worden in het beenmerg, geslachtscellen en het maagdarmkanaal het meest gevoelig voor straling. Verondersteld werd, dat de gevoeligheid voor straling van de cellen afhangt van de delingsfase waarin ze zich bevinden. Deze bewering is nog niet voldoende gestaafd door empirisch bewijsmateriaal<sup>3)</sup>, bij experimenten echter wel aangetoond.

### 3.6 Mogelijkheid van biologisch herstel. Reparatiemechanismen.

Tot voor kort werd aangenomen, dat als er veranderingen in de DNA samenstelling van de cel - b.v. als gevolg van ioniserende straling - uit deze cel óf een mutant, óf helemaal geen dochtercel zou ontstaan. Gebleken is nu, dat veel cellen in staat zijn om schadelijke prikkels uit de omgeving geheel of gedeeltelijk te verwerken. De mogelijkheid van de cel om defekten te repareren, is een significante faktor in de biologische evolutie. Het zou voor een genetische stabiliteit zorgen. Aangezien reparatie-mechanismen, voor zover bekend, zeer zeker niet feilloos werken, is er wel degelijk sprake van evolutie.

Onderzoek naar reparatie-mechanismen in de cel laten zien, dat het repareren van DNA een actief proces is, waarbij  $\text{O}_2$  en ATP een belangrijke rol speelt. Een aantal reparatie-mechanismen is nu bekend zowel bij bacteriën alsook bij zoogdier-

\* dit noemen we de G-waarde. Voor zuiver water is deze gelijk aan 1.

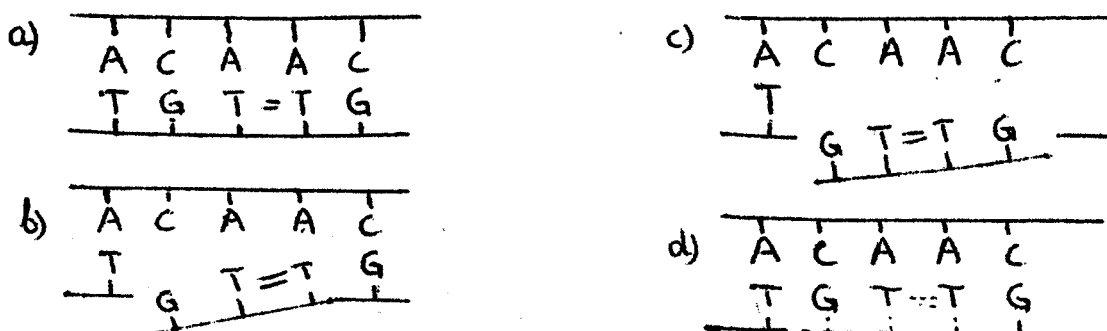
ren. Bij de korte beschrijving die nu volgt van de verschillende reparatiemechanismen, dient niet uit het oog verloren te worden, dat de gegevens afkomstig zijn van experimenten bij bacteriën (E-coli en micrococcus), tenzij anders vermeld.<sup>4)</sup>

### 1. fotoreaktivatie

Normaal DNA <sup>hoofdzakelijk</sup> bevat <sup>chemisch</sup> 4 verschillende basen, twee purines (adenine en guanine) en twee pyrimidine basen (thymine en cytosine). De twee ketens die het DNA-molekuul vormen zijn komplementair; d.w.z. dat adenine in de éne keten altijd is verbonden met thymine in de andere keten. Kunstmatige U.V.-bestraling waaraan bacteriën blootgesteld zijn, leidt tot vorming van een onnatuurlijke chemische binding tussen 2 pyrimidine-basen (dimeren); meestal thymine. Deze dimeren blokkeren de DNA-replikatie, zodat er geen dochtercellen gevormd kunnen worden. Bij fotoreaktivatie komt er echter een enzym in werking dat de kovalente binding tussen de dimeren splitst en het DNA-molekuul zijn normale aanzien geeft. Dit gebeurt echter alleen als het enzym gestimuleerd wordt door zichtbaar licht. De fotoreaktivatie komt zowel voor bij enkel- als bij dubbelstrengbreuken en is tot nu toe alleen bij lagere levensvormen ontdekt.

### 2. reparatiemechanismen die afhankelijk zijn van de komplementaire DNA-keten

Dit reparatiemechanisme vereist de samenwerking van een aantal enzymen, maar heeft geen licht nodig. De pyrimidine dimeren die hier gevormd zijn na bestraling, worden als het ware uit de DNA-keten geknipt, waarna er weer komplementaire basen gevormd worden, die het er-uit-geknipte deel vervangen en weer samenvloeien tot een gehele DNA-keten. Dit reparatiemechanisme werkt ook na blootstelling van de cellen aan bepaalde chemische stoffen (o.a. afgeleiden van mosterdgas).<sup>5)</sup>



Uit de tekening blijkt dat ook de voor- en achterliggende stikstofbase wordt betrokken bij het reparatieproces. Deze reparatie vindt dus plaats bij enkelstreng-DNA-beschadiging. Bij Röntgen- en  $\gamma$ -straling werkt het reparatiemechanisme niet principiëel anders dan bovenvermeld.

### 3. Reparatie bij beschadiging van 2 ketens DNA

Zowel Röntgen- en  $\gamma$ -straling als bepaalde chemische stoffen kunnen beschadiging geven van de beide ketens van het DNA-molekuul. Wanneer de ketens precies op dezelfde plaats beschadigd raken, dan is er een grote kans op verlies van

genetische informatie. Wanneer de breuken echter op verschillende plaatsen optreden of de dimeren kunnen niet door fotoreaktivatie of anderszins uit het DNA verwijderd worden, dan bestaat wel de mogelijkheid - door samenwerking van vele enzymen - de schade te herstellen. Er zijn theorieën opgesteld hoe dit zou verlopen <sup>7)</sup>; deze gelden waarschijnlijk ook voor dierlijke cellen.

Er zijn bij de mens ziekten beschreven (o.a. xerodema pigmentosum \*) die waarschijnlijk berusten op defekte reparatiemechanismen in het menselijk DNA. Het DNA van de normale menselijke cel beschikt, door de reparatiemechanismen, over een zekere bescherming tegen stoffen die eventueel mutaties kunnen veroorzaken. Deze reparatiemechanismen zullen waarschijnlijk grotendeels op dezelfde processen berusten als die, welke zich afspelen bij bacteriën en sommige dierlijke cellen. Deze konklusie laat nog zeer veel vragen open, zodat nader onderzoek op dit punt nog gedaan zal moeten worden.

### 3.7 Het biologisch effect.

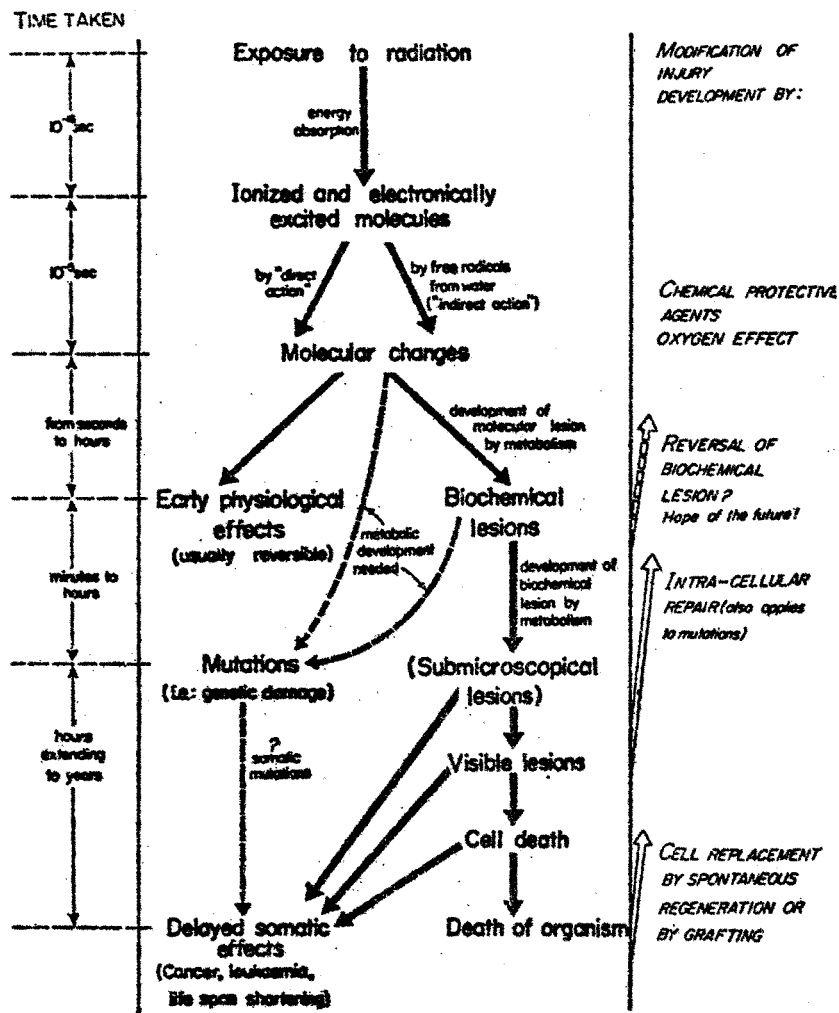
Het biologisch effect kan ontstaan door: 1) het direkt fysisch effect en  
2) chemisch vrije radicalen (zie 3.3)  
bijv. die van  $H_2O$ ;  
deze zorgen voor een chemisch effect.

De keten van gebeurtenissen welke leiden tot een biologisch effect kunnen we onderverdelen in 4 nivo's, n.l.: (zie ook de figuur op de volgende bladzijde)

- |                                                                                                                   |                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. <u>direkte interakties</u><br>ionisaties, tijdsduur: $10^{-17}$ - $10^{-15}$ sec.                              | 2. <u>chemische schade</u><br>vrije radicalen, duur: $10^{-14}$ - $10^{-3}$ sec.   |
| 3. <u>schade aan biologisch makromolekulen;</u><br><u>eiwitten, nucleïnezuren</u><br>tijdsduur: sekonden tot uren | 4. <u>biologische schade</u><br>celdood, dood van individu<br>duur: uren tot jaren |

Er is relatief veel bekend over de fysische absorptie van energie. <sup>8)</sup> Minder is echter bekend over de chemische veranderingen en de moleculaire effecten en nog minder over de relatie tussen 2, 3 en 4.

\* xerodermapigmentosum: zeldzaam, overgeërfde lethaal verlopende ziekte met multiple maligne huidtumoren, overgevoeligheid voor zonlicht, slinken van spieren



Biologisch effect van ioniserende straling 59)

4. Stralingsbeschermende maatregelen.<sup>10),11)</sup>

In de 20-er jaren werd het aantal slachtoffers dat huidaandoeningen en gezwellen kreeg, als gevolg van ioniserende straling zo groot dat het noodzakelijk werd om adequate veiligheidsnormen op te stellen. Op het 2<sup>e</sup> radiologencongres in 1928 werd de ICRP (International Committee on Radiological Protection) als commissie ingesteld om voor groepen aanbevelingen te doen over toelaatbare stralingsdoses en, hiervan afgeleid, toelaatbare hoeveelheid radioactiviteit in het menselijk lichaam en toelaatbare concentraties van radioactieve stoffen in lucht en drinkwater. De door de ICRP opgestelde normen worden i.h.a. internationaal overgenomen. In 1929 werd in de V.S. een commissie opgericht welke zich op nationaal nivo bezig ging houden met stralingsbescherming. Sinds 1946 is deze bekend als de NCRP (National Committee on Radiation Protection).

In de 50-er jaren ontstond in de V.S. ongerustheid over de gevolgen van de "fall-out" van de nukleaire wapens\*. Omdat onzekerheid bestond over de overheidsinvloed m.b.t. normen voor stralingsbescherming, richtte de regering van de V.S. in 1959 de FRC (Federal Radiation Council) op. Zij kreeg als taak de president van de V.S. te adviseren m.b.t. stralingsbescherming. Verder moest zij richtlijnen opstellen voor federale stralingsbeschermingscommissies. De AEC (Atomic Energy Commission) welke zich o.a. bezighoudt met de veiligheid van reactoren (ook opwerking en afvalbehandeling) stelt veiligheidsnormen op welke afgeleid zijn van die van de F.R.C..

De filosofie van de F.R.C. was ongeveer als volgt:

"Er heerst onzekerheid m.b.t. de biologische effecten van zeer lage doses en dosis-gemiddelden ioniserende straling. Het is daarom niet juist te veronderstellen, dat er een nivo van ioniserende straling is waarbeneden met absolute zekerheid geen schadelijk effect optreedt.

Deze beschouwing, toegevoegd aan de konservatieve hypothese dat er een lineair verband is tussen de grootte van de dosis en het biologisch effect, zal ons uitgangspunt bij de formulering van richtlijnen op het gebied van stralingsbescherming zijn. De bevolking zal het opstellen van richtlijnen aksepteren wanneer ze zich de bekende voordelen van straling realiseert (b.v. medisch gebruik): Er mag geen enkele blootstelling aan ioniserende straling zijn zonder de verwachting dat het een positief resultaat zal afwerpen".<sup>12)</sup>

\* zie hiervoor met name de UN-SCEAR rapporten van 1958, 1962 en 1972 (United Nations; New York).

De meeste van de aanbevelingen van de ICRP en de NCRP werden door de FRC\* en de AEC overgenomen.

Tabel 1 geeft een overzicht van deze aanbevelingen (ICRP 1966). Deze zijn tot nu toe niet ingrijpend gewijzigd. Deze richtlijnen omvatten o.a. dat bij blootstelling van een radiologisch medewerker aan ioniserende straling de kumulatieve dosis niet groter mag zijn dan 5 maal de leeftijd, verminderd met 18 jaar (in rem). Zo mag iemand van b.v. 28 jaar hoogstens een dosis van  $5 \cdot (28-18) = 50$  rem ontvangen. Een iets grotere dosis wordt toegestaan bij bestraling van een kleiner deel van het lichaam, zoals schildklieren en huid. Voor leden van de bevolking zijn de richtlijnen strenger. De geslachtsklieren en het roodbeenmerg wordt als het meest kritisch gezien.

tabel 1

| orgaan of weefsel                                                                 | MPD's volwassenen<br>bij radiologisch werk                                      | MPD's voor leden<br>van de bevolking              |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| geslachtsklieren,<br>roodbeenmerg en<br>gehele lichaam bij<br>uniforme bestraling | 3 rem/kwartaal<br>5 rem/jaar of<br>$5 \cdot (N-18)$<br>(N is leeftijd in jaren) | 0,5 rem/jaar                                      |
| huid, botweefsel                                                                  | 15 rem/kwartaal<br>30 rem/jaar                                                  | 3 rem/jaar                                        |
| schildklier                                                                       | 15 rem/kwartaal<br>30 rem/jaar                                                  | 3 rem/jaar<br>kinderen < 16 jaar:<br>1,5 rem/jaar |
| handen, onderarmen,<br>voeten, enkels                                             | 38 rem/kwartaal<br>75 rem/jaar                                                  | 7,5 rem/jaar                                      |
| alle andere organen                                                               | 8 rem/kwartaal<br>15 rem/jaar                                                   | 1,5 rem/jaar                                      |

(basisnormen voor individuen (ICRP 1966))

Tabel 2 geeft de toegevoegde hoeveelheid kunstmatige straling weer t.o.v. de natuurlijke achtergrondstraling. Door deze toevoeging wordt het "subtotaal" verdubbeld. Men denkt dat t.g.v deze verdubbeling de mutatiesnelheid slechts weinig zal toenemen en niet leidt tot ernstige genetische risico's.<sup>13)</sup> M.b.t. de onzekerheid over de effecten van lage stralingsdoses neemt men nog steeds de lineaire dosis-effekt kurve aan. Hier zal verder nog veel research aan gewijd

\* In 1970 is de FRC opgeheven en haar taken zijn overgedragen aan de EPA (Environmental Protection Agency).

moeten worden, zowel m.b.t. inwendige als m.b.t. uitwendige bestraling.<sup>14)</sup>  
In hoofdstuk 9 zal iets verder ingegaan worden op de normen en effecten van inwendige bestraling.

tabel 2

Bijdrage van natuurlijke en kunstmatige stralingsbronnen aan de over de gehele bevolking gemiddelde dosis.

(geschatte waarden voor de VS in 1970)

| stralingsbron                        | dosis in mrem per jaar      |                                           |
|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|
|                                      | gemiddelde over het lichaam | bijdrage aan genetisch significante dosis |
| Natuurlijke straling:                |                             |                                           |
| - kosmische straling                 | 44                          |                                           |
| - radionukliden in het lichaam       | 18                          |                                           |
| - uitwendige gamma-straling          | 40                          |                                           |
| totaal                               | 102                         | 90                                        |
| Kunstmatige bronnen:                 |                             |                                           |
| - röntgendiagnostiek                 | 72 <sup>*</sup>             | 30 - 60                                   |
| - nukleaire geneeskunde              | 1                           |                                           |
| - fall-out                           | 4                           |                                           |
| - radiologische werkzaamheden        | 0,8                         |                                           |
| - diversen                           | 3                           |                                           |
| - kernenergie (1970 <sup>***</sup> ) | 0,003                       |                                           |
| - kernenergie (2000)                 | 1                           |                                           |

\* gebaseerd op buikdosis

~~\*\*\*~~ geïnstalleerd vermogen in de VS in 1970 6000 MWe, prognose voor 2000 gebaseerd op 800.000 MWe

~~\*\*\*~~ enige reserve ten aanzien van deze 1 mrem lijkt op zijn plaats o.a. omdat hierbij opwerking en afvalverwerking van splijtstof niet zijn meegerekend.

## 5. Inleiding bij somatische en genetische risico's van straling.

Informatie over de grootte van het risico bij straling is van grote praktische betekenis als het ook beschermingsrisiko's aanlegt voor de zeer lage doses, die nu gelden als "toegestane niveau's" voor individuen, radiologische werkers of de gehele bevolking.

De grote moeilijkheid is het vaststellen van de effecten van die lage doses. De enige praktische benadering is de indirecte, n.l. de veronderstelling, dat het relatieve risico per eenheid dosis bij zeer lage dosis hetzelfde is als dat bij hoge dosis. Bij hoge dosis bestaan n.l. wel kwantitatieve gegevens over effecten.

Maar het op deze manier vaststellen van grenzen geeft slechts de bovenste limiet aan van het risico, omdat het niet onwaarschijnlijk is dat het risico per dosiseenheid bij lage dosis groter zal zijn dan bij hoge dosis (waarschijnlijk veel minder volgens de UNSCEAR<sup>15</sup>). Een andere onzekere faktor is het feit dat bij het vaststellen van genetische risico's het onderzoek vrijwel alleen steunt op dierproeven.

### 5.1 Nut van het vaststellen van risico's voor beschermingsdoeleinden.

Bij een algemene beschouwing over ioniserende straling moeten we met 2 aspecten rekening houden, n.l.:

#### 1. De stralingsbron staat niet onder controle.

In het geval van ongelukken en besmetting is het konsept van de maximaal toelaatbare dosis niet realistisch genoeg. Andere overwegingen, b.v. het vergelijken van de risico's van straling met de risico's van tegenmaatregelen gaan dan meer een rol spelen. Deze benadering is erg afhankelijk van de lokale omstandigheden.

De radioactieve besmetting van de omgeving zou evacuatie van de getroffen bevolking ten gevolge kunnen hebben en reorganisatie van voedselvoorraden. In sommige omstandigheden zouden zulke acties weer nieuwe problemen scheppen die vaak verstrekkende gevolgen hebben en nieuwe risico's voor de bevolking betekenen. Dat wil zeggen, dat zelfs al zouden de risico's van lage stralingsdoses nauwkeurig kunnen worden vastgesteld, het nog onmogelijk zou zijn deze af te wegen tegen de mogelijke implicaties van ongelukken voor de bevolking. Het vaststellen van de grenzen van de mogelijke "grootste risico's" vormt daarom een steviger basis om bij ongelukken en besmetting te handelen dan de betrouwbaarheid van welke maximaal toelaatbare dosis dan ook.

2. De stralingsbron is wel onder controle.

Ook in dit geval, dat b.v. voorkomt bij industriële installaties, is informatie over de grootte van de risico's belangrijk voor de beoordeling van de criteria.

Het praktische probleem hierbij is, dat de stralingsdosis zo beperkt moet worden, dat het een risico vormt, dat niet onaanvaardbaar is voor het individu of de gehele bevolking. Maar wat is een onaanvaardbaar risico? Informatie over de grootte van de risico's die andere bedrijfstakken opleveren voor de bevolking, zou je kunnen vergelijken met de risico's voor de bevolking bij toepassing van kernenergie.

Er zijn wel statistische gegevens over de kans op ongelukken bij werkers in de niet-nukleaire industrie, maar er zijn geen vergelijkbare statistische gegevens m.b.t. de kans op ongelukken in de nukleaire industrie, dit maakt relatieve risikoschattingen wel erg moeilijk!

5.2 Soorten risico's.

Voor het evalueren van alle risico's van straling moeten we zowel de somatische als ook de genetische konsekwenties in onze beschouwing opnemen.

Deze risico's zijn echter niet voor beide soorten schade eenvoudig te vergelijken of beperken zich niet tot het optellen van effecten, zodat een grondige basis voor een totale evaluatie ontbreekt door 2 principiële moeilijkheden:

1. Bij somatische schade door lage stralingsdosis speelt ook de konditie van het organisme een grote rol, terwijl genetische schade niet alleen een groot aantal bekende erfelijke defekten omvat, maar ook een onbekend aantal functionele stoornissen met een genetische komponent.
2. Terwijl somatische schade alleen in individuen kan optreden die zelf bestraald zijn, kan genetische schade ook doorwerken bij het nageslacht.

Onze kennis over de genetica is niet volledig genoeg om de effecten van mutaties over vele generaties betrouwbaar te voorspellen.

Bij de schatting van stralingsrisiko's gaan we uit van de drie volgende typen:

- somatische risico's bij de bestraalde bevolking
- genetische risico's voor de 1<sup>e</sup> generatie van de bestraalde personen
- genetische risico's voor latere generaties.

We moeten de genetische risico's scheiden in korte- en langetermijn risico's.

De totale genetische schade komt n.l. pas na enkele generaties tot uiting.

Echter, vooral wanneer kleine gedeelten van de bevolking straling ontvangen die aanzienlijk hoger is dan die van andere groepen, is het verklaarbaar dat deze individuen zich zorgen maken over hun nakomelingen. Deze bezorgdheid wordt nog versterkt door recent bewijsmateriaal, dat bepaalde soorten defekten, behorend tot de chromosomale veranderingen, v.n.l. in de 1<sup>e</sup> generatie tot uiting komen. Het genetische risico voor de 1<sup>e</sup> generatie zal dan dat van alle andere generaties overtreffen (zie ook blz. 117).

## 6. Somatische risico's.

### 6.1 Inleiding

Bij blootstelling aan lage stralingsdosis is het nog niet mogelijk, ondanks alle pogingen die gedaan zijn, effecten uit te drukken in betrouwbare kwantitatieve gegevens. De variaties komen ten dele door verschillen in de energie, de soort straling, de dosis, de dosissnelheid en misschien ook omdat de menselijke gevoeligheid verschilt. Maar de betrouwbare gegevens ontbreken voornamelijk, omdat lage dosis meestal geen direct waarneembaar effect ten gevolge heeft.

Onder deze omstandigheden kunnen waardevolle bewijzen alleen worden verwacht, als we beschikken over exakte medische en fysische gegevens en een volledige biologische kennis over de bevolking.

Onder lage dosis straling verstaat de ICRP dosis kleiner dan 50 rad, eenmalig toegediend met hoge intensiteit, of recidiverende dosis kleiner dan 10 rad per jaar, onafhankelijk van het dositempo. Bij het bekijken van somatische risico's letten we vooral op:

- inductie van kanker
- ontwikkeling van misvormingen bij het foetus
- een niet specifieke verkorting van de levensduur.

### 6.2 Kanker.

Een groot aantal experimenten toont aan, dat ioniserende straling kanker kan veroorzaken (zie H 8 ). Vrijwel alle weefsels kunnen getroffen worden. Volgens de ICRP is er echter nog weinig bewijsmateriaal, dat bescheiden stralingsniveau's het voorkomen van tumoren significant kunnen verhogen in weefsels bij de mens, waarbij het voorkomen van kanker een "vrij normale" zaak is. Het meest gedetailleerde bewijsmateriaal is ontleend aan de leukemie.

In dit verband is het uiteraard niet zinnig de inductie van kanker te behandelen, die pas ontstaat na zware plaatselijke bestraling, b.v. huidkanker.

### 6.3 Leukemie.

Alleen akute leukemie en chronisch myeloïde leukemie schijnen door straling geïnduceerd te worden. De kwantitatieve gegevens hiervoor komen uit drie bronnen, n.l. van:

1. de overlevenden van Hiroshima en Nagasaki <sup>15)</sup>
2. patiënten met spondylitis ankylopoetika \* die bestraald werden <sup>16)</sup>
3. diagnostische bestraling, wanneer de kinderen nog in utero zijn. <sup>17)</sup>

\* spondylitis ankylopoetika: verbening van de banden van de wervelkolom en gewrichtsverstijving van de buitenste wervelgewrichten.

- Ad 1. Er werd in beide steden een lineaire relatie gevonden tussen dosis en voorkomen, hoewel andere relaties dan de lineaire niet uitgesloten konden worden. Onder bepaalde voorwaarden luidde de konklusie, dat 1 rad lichaamsbestraling zorgde voor 1-2 ziektebeelden per  $10^6$  mensen per jaar, gemiddeld genomen over de eerste 13 jaar na blootstelling.
- Ad 2. Vergelijkbare gegevens werden gevonden door Court Brown en Doll.<sup>16)</sup> Deze kwamen, de beperkingen van hun onderzoek in aanmerking genomen, tot 1,3 ziektegevallen per rad per miljoen mensen gemiddeld over 7 jaar.
- Ad 3. Een rechtvaardiging van de stelling, dat een lage dosis in de orde van 1-5 rad leukemie kan veroorzaken, blijkt uit het voorkomen van leukemie onder deze omstandigheden bij kinderen beneden 10 jaar. Bewijzen geven aan dat het effect per rad bij het foetus 2-10 x groter is dan bij een volwassene. Wanneer we van een lineaire relatie uitgaan, zou het totale leukemierisico ongeveer 20 miljoen mensen per rad bedragen. Als de dosis-effekt relatie niet lineair is, kan het werkelijke effect beduidend lager zijn.
- Omdat het sterftecijfer bij leukemie zo hoog is, is de kans om de ziekte te krijgen en er ook aan te sterven vrijwel gelijk.

#### 6.4 Andere nieuwvormingen.

Wanneer het gehele lichaam wordt bestraald, is de noodzaak om het risico op kanker voor elk orgaan apart te berekenen vrijwel vervallen en voor beschermingsdoeleinden is het genoeg om rekening te houden met het totale risico van alle soorten kanker bij elkaar.

Ook hier zijn onderzoekingen over gedaan in Japan,<sup>18)</sup> bij patiënten met spondylitis ankylopoetica<sup>19)</sup> en bij kinderen die in utero bestraald werden.<sup>20)</sup>

Op basis van deze gegevens is het niet mogelijk een exakte berekening te maken over het voorkomen van kanker, maar enkele algemene regels kunnen wel worden opgesteld:

- alle weefsels die "normaal" kanker kunnen ontwikkelen, zowel bij kind als bij volwassene, zijn in staat ook kanker te ontwikkelen a.g.v. ioniserende straling, wanneer ze maar voldoende lange tijd zijn blootgesteld
- het ontwikkelen van kanker varieert in de tijd. Bij volwassene duurt het manifest worden van andere soorten kanker dan leukemie langer dan dat van leukemie zelf. De maximale relatieve mortaliteit van leukemie bereikt zijn top 3-8 jaar na de eerste bestraling
- de dosis van 1-5 rad kan kankerverwekkend zijn voor het foetus en het is aanmerkelijk te veronderstellen, dat het effect op de volwassenen proportioneel toeneemt met de dosis van 1-100 rad
- de totale toename van de kanker-sterfte binnen 20 jaar na totale lichaamsbestraling is bijna 2 maal zo groot als de toename, te wijten aan leukemie alleen.

Uit recentere gegevens blijkt, dat na een periode van 27 jaar na blootstelling

aan ioniserende straling, de frekwentie van kanker ongeveer 5 maal zo hoog ligt als voor leukemie. Hoewel bij dit onderzoek het aantal mensen klein was, mag je over het algemeen wel zeggen, dat het voorkomen van andere soorten kanker dat leukemie veel belangrijker wordt na een lange periode (zie onderstaande tabel).

tabel 3

frekwentieverdeling van kwaadaardige ziekten als functie van de tijd bij bestraalde spondylitis patiënten <sup>21)</sup>

| aantal jaren<br>na bestraling | leukemie en aplastische<br>anaemie (risiko per<br>100.000 mensen per jaar) | kanker bij zwaar<br>bestraalde weefsels<br>(risiko 10 <sup>5</sup> mensen<br>per jaar) |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 0 - 2                         | 2,5                                                                        | 3,0                                                                                    |
| 3 - 5                         | 6,0                                                                        | 0,7                                                                                    |
| 6 - 8                         | 5,2                                                                        | 3,6                                                                                    |
| 9 -11                         | 3,6                                                                        | 13                                                                                     |
| 12 -14                        | 4,0                                                                        | 17                                                                                     |
| 15 -27                        | 0,4                                                                        | 20                                                                                     |

#### Schildklierkanker

De beste berekening van het totale risico hiervan is dat 1 röntgen\* ongeveer 10 - 20 gevallen per 10<sup>6</sup> personen induceert. Bij schildklierkanker hebben we genoeg gegevens om uit te gaan van een lineaire dosis respons curve.<sup>22)\*\*</sup> Uit de gegevens bleek ook dat het risico om schildklierkanker te krijgen in Japan aanzienlijk lager ligt dan in de Verenigde Staten.

Er is tot nu toe nog geen bevredigende verklaring voor gevonden, maar als er een kwantitatief verschil is tussen de bewoners van verschillende landen m.b.t. de dosis-effekt relatie, voor welke soort kanker dan ook, dan zou dit aanzienlijke implicaties hebben voor de stralingsbescherming. Bij schildklierkanker moet nog bedacht worden, dat het voorkomen van deze ziekte niet gelijk staat aan het sterven aan deze ziekte. I.t.t. leukemie is hier het sterftecijfer relatief laag.

#### Eotsarcoom

Ook hier kan geen enkele zekere lineaire relatie worden aangetoond tussen de dosis en het voorkomen van kanker. Op dit moment kan alleen maar gezegd worden, dat tumoren zijn verschenen bij een lichaamsbelasting tussen 0,5 - 1,0 µCi Ra en dat ze i.h.a. voorkomen boven de 5 µCi Ra van 10 tot 30 jaar.

\* 1 röntgen = ± 0,95 rad

\*\* >20 jaar

Mogelijk wordt het voorkomen van botsarkomen in de komende tijd duidelijk beïnvloed door Pu 239 welke een structuur heeft, die veel op calcium lijkt en zich o.a. ook graag aan het botoppervlak nestelt.

#### 6.5 Dosis effect relaties m.b.t. voorkomen van kanker.

De ICRP gaat i.h.a. uit van een lineaire relatie tussen dosis en effect, hoewel die in vele gevallen nog niet aangetoond is en er zelfs waarnemingen zijn die op het tegendeel wijzen.<sup>23,24)</sup> Toch beweren ook Gofman en Tamplin<sup>25)</sup> dat het effect van straling proportioneel toeneemt met de dosis. Er zijn twee beweringen die deze veronderstelling steunen:

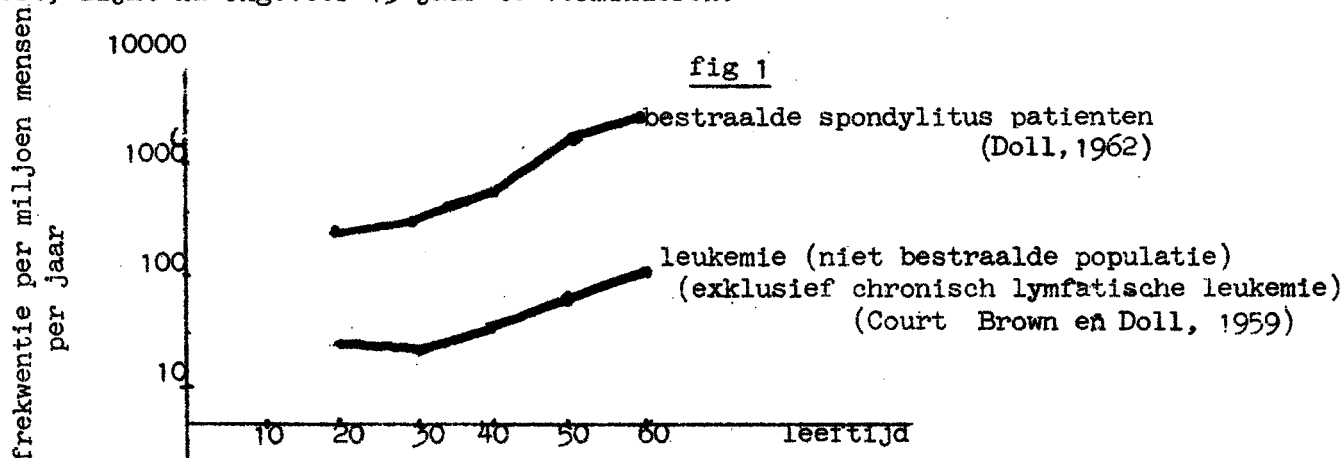
- In het Beir rapport<sup>23)</sup> vond Doll dat de leeftijdsverdeling van de leukemiekans bij bestraalde spondylitis patiënten (op een veel hoger niyo) parallel liep aan de leeftijdsverdeling van de spontane leukemiekans in Engeland<sup>26,27)</sup> (zie fig. 1).
- Ook gegevens uit Japan zowel voor leukemie als ook voor de totale kankerfrequentie suggereren een proportionele toename van de tumorfrekwentie in vergelijking met de spontane frekwentie (zie fig. 2).

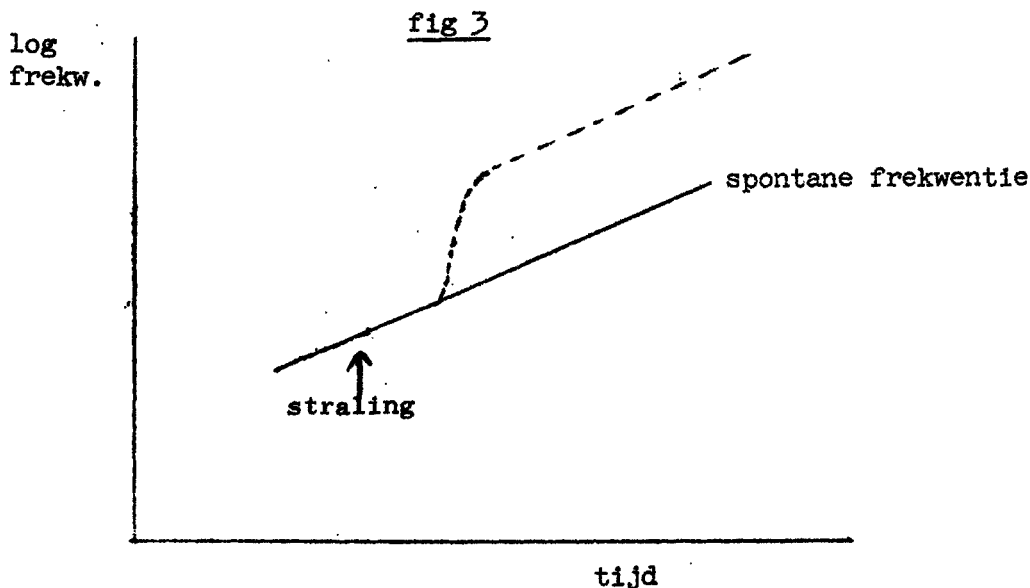
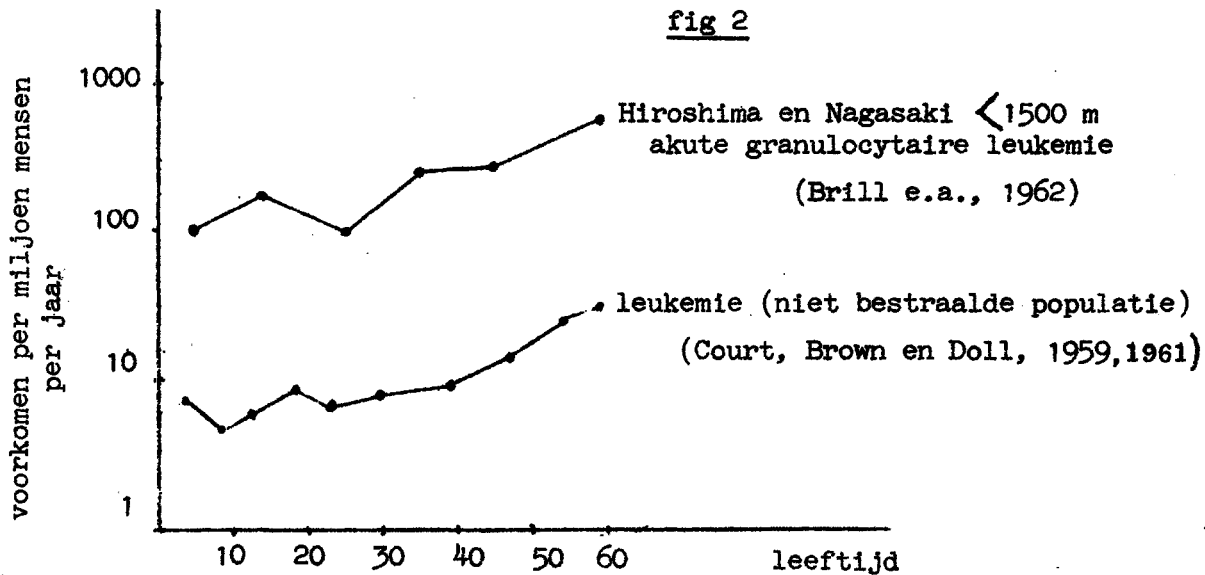
Volgens Upton<sup>28)</sup> suggereren deze gegevens dat het effect van straling op de mens het verouderingsproces eerder op gang brengt en derhalve meer tumoren voorkomen op welke leeftijd dan ook in vergelijking met niet bestraalde mensen. R.H. Mole<sup>21)</sup> vindt tenslotte dat uit deze gegevens blijkt dat het effect van ioniserende straling beschouwd kan worden als een vermenigvuldiging van de spontane frekwentie. Een dergelijke synergetische relatie is ook gevonden bij uranium-mijnwerkers.<sup>29)</sup>

Voor vele vormen van kanker geldt dat de spontane frekwentie logaritmisch toeneemt met de leeftijd als  $e^{at}$ . Vaak wordt gesteld dat het effect van een korte bestraling de exponentiële functie zo verandert, dat deze dan wordt weergegeven door de volgende vergelijking:  $e^{a(t+b)}$ , waarbij  $b$  de variabele is, die afhangt van de stralingsdosis (zie fig. 3).

Het moet benadrukt worden, dat nog niemand weet hoe lang de mate waarin de frekwentie verhoogd wordt van de maligne (=kwaadaardige) ziekten, blijft bestaan. Het is een zuiver theoretische aanname, dat de frekwentieverhoging levenslang aanblijft, na een korte bestraling.

Het effect van straling op leukemie, welke een relatief korte latente periode heeft, lijkt na ongeveer 15 jaar te verminderen.<sup>19)</sup>





Theoretische mogelijkheid van stralingskarcinogeen in menselijke populaties.

De continue lijn stelt de logaritmische toename van de kans dat iemand kanker krijgt, afhankelijk van de leeftijd, Na een korte blootstelling aan straling is er na een latente periode een frequente toename, ook weer afhankelijk van de leeftijd (gestippelde lijn). Het effect van straling is de integraal van de oppervlakte tussen de twee lijnen.

## 6.6 Misvormingen in de ontwikkeling van het embryo en foetus.

Experimenten met dieren hebben aangetoond dat het stadium waarin embryo's zich bevinden op het moment van bestraling erg belangrijk is voor de op te lopen schade. Bestraling voor de implantatie van het embryo veroorzaakt eerder de dood van het embryo dan dat het tot misvormingen leidt. Bestraling gedurende de periode dat de organen van het embryo worden aangelegd, leidt eerder tot misvormingen en tot neonatale<sup>+</sup> dood dan tot prenatale<sup>++</sup> dood. Bij de mens is deze periode ongeveer de 2<sup>e</sup> t/m 6<sup>e</sup> week. Maar ook buiten deze periode kunnen aanzien-

+ neonataal = vanaf de geboorte tot de eerste weken na de geboorte

++ prenataal = voorafgaand aan de geboorte

lijke aanlegstoornissen optreden. In het laatste trimester van de zwangerschap is er een zodanige weerstand opgebouwd tegen ioniserende straling dat een dosis die het foetus doodt, meestal ook de moeder doodt.

Bij de mens zijn verschillende afwijkingen het gevolg van bestraling geweest. De meest frekwente zag men in de hersenen, het oog en groeiachterstand. Er zijn vele rapporten gepubliceerd over het voorkomen van congenitale misvormingen in relatie tot de achtergrondstraling, maar hierop is zoveel kritiek mogelijk, dat ze volgens de ICRP weinig wezenlijke bijdragen leveren. De meeste misvormingen zullen voorkomen bij dosis groter dan 100 rad hoewel ook bij lagere dosis misvormingen kunnen voorkomen.

In de praktijk mogen zwangere vrouwen slechts bij hoge uitzondering geröntgend worden, vanwege de eventuele schade voor het kind.

#### 6.7 Niet specifieke verkorting van de levensduur.

Onafhankelijk van het induceren van kanker kunnen hoge doses radioactiviteit ook de levensverwachting verkorten. In hoeverre dit geldt voor lage doses, weet men nog niet. Het is dus onzeker of de levensverkorting het gevolg is van een frekwentieverhoging van bepaalde ziekten of van een niet specifiek proces zoals een versnelling van de ouderdom. Hier zijn uitgebreide dierexperimentele studies voor nodig, die nog niet beschikbaar zijn.

Ondersteunende bewijzen zijn er nog niet zoveel. Twee studies zijn hier van belang:

1. het feit dat radiologen een kortere levensverwachting hebben dan hun kollega's<sup>30)</sup> (zie tabel 4)
2. het feit dat atoombomoverlevenden het dichtst bij het hypocentrum een relatief hoger sterftecijfer hebben dan mensen die er het meest vanaf wonen.<sup>30)</sup>

tabel 4

| Periode   | Leeftijd | Sterftecijfer van radiologen (per 1000 man per jaar) |            | Sterftecijfer van specialisten (per 1000 man per jaar) |            | Sterftecijfer van oogartsen (per 1000 man per jaar) |            |
|-----------|----------|------------------------------------------------------|------------|--------------------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------|------------|
|           |          |                                                      | <u>rel</u> |                                                        | <u>rel</u> |                                                     | <u>rel</u> |
| 1945-1954 | 35-49    | 28                                                   | 3,5        | 78                                                     | 3,8        | 67                                                  | 3,5        |
|           | 50-64    | 153                                                  | 17,8       | 307                                                    | 14,9       | 189                                                 | 12,9       |
|           | 65-79    | 224                                                  | 57,9       | 340                                                    | 45,6       | 130                                                 | 39,0       |
| 1955-1958 | 35-49    | 10                                                   | 2,1        | 18                                                     | 2,1        | 26                                                  | 2,7        |
|           | 50-64    | 43                                                   | 12,1       | 120                                                    | 11,6       | 79                                                  | 9,4        |
|           | 65-79    | 116                                                  | 59,3       | 191                                                    | 44,0       | 110                                                 | 42,8       |

## 7. Genetische risico's.

### 7.1 Inleiding.

Er bestaat geen twijfel, dat elke toename van mutaties t.g.v. ioniserende straling schadelijk is. Wel is het moeilijk om hieromtrent tot algemene regels te komen. Er is te weinig bekend over de genetische structuur van individuen en bevolkingen om de volledige konsekwenties te overzien van een toename van de mutatiefrekwentie.

Als er betrouwbare bewijzen zijn m.b.t. het dosis-mutatie effect in loci<sup>+</sup>, dan bestaat er een zekere basis van waaruit je voorspellingen kunt doen. De resultaten van zulke voorspellingen geven echter noch de soort noch de hoeveelheid schade bij een "overall" toename van de mutatiefrekwentie.

De ICRP gaat uit van de volgende vooronderstellingen:

1. dat de gemiddelde leeftijd van de ouders bij de geboorte van de kinderen  $\pm 30$  jaar is
2. dat genmutaties in de tijd akkumuleren in spermacellen
3. dat de blootstelling aan straling van de bevolking "at random" in tijd geschiedt
4. dat het grootste deel van alle mutaties plaatsvindt in de spermacel voor de reductiedeling
5. dat theoretische kennis over mutaties bij de mens zo schaars is dat je de effecten moeilijk kunt voorspellen op basis van vergelijking met dieren
6. dat de muis dan nog het best bestudeerde zoogdier is m.b.t. genmutaties, maar dat we erg op moeten passen bij extrapolatie van muis op mens en
7. dat de mutaties die "spontaan" ontstaan en die welke geïnduceerd zijn door straling volkomen identiek zijn.

### 7.2 Soorten genetische schade.

De genetische schade die in deze kontekst van belang is, zijn chromosoom-afwijkingen en genmutaties.<sup>31)</sup> De chromosoomafwijkingen vallen uiteen in twee categorieën: a. structurele afwijkingen a.g.v. breuken en reorganisatie van een chromosoom

- b. numerieke afwijkingen, d.w.z. afwijkingen in het aantal chromosomen.

Deze laatste zijn vooral verantwoordelijk voor congenitale<sup>++</sup> misvormingen en

+ locus = plaats van een gen op een chromosoom

++ congenitaal = 1) aangeboren, door overerving verkregen

2) bij de geboorte verworven

geestelijke en lichamelijke achterstand. De aanwezigheid van zuurstof doet de frequentie in chromosoomafwijkingen twee- tot drievoudig toenemen (zie ook radikalen). De genmutaties kunnen worden onderverdeeld in dominant, recessief en sex-linked.<sup>3)</sup> Een dominante mutatie komt altijd tot uiting. Een recessieve mutatie komt o.a. tot uiting als beide ouders dezelfde mutatie hebben. Dit kan direkt, maar ook na een paar generaties.

Mutaties van het 3<sup>e</sup> type verschijnen in de zgn sex-chromosomen (X en Y). De vrouw heeft twee X-chromosomen (XX), de man één X en één Y (XY). De X draagt vrijwel alle genetische informatie, de Y de fertiliteitsfactoren. Een verandering in de X zal dan bij de man ook bijna altijd naar voren komen. De oorzaken van een mutatie worden i.h.a. nog niet begrepen. De mutaties kunnen de expressie <sup>+</sup> van een gen doen toenemen.

De ICRP gaat uit van 2 grote categorieën genetische schade n.l.:

1. specifiek waarneembare afwijkingen die te constateren zijn m.b.v. de nu aanwezige klinische methoden
2. schade die niet vast te leggen is en die de gezondheid van het individu in verschillende mate kan beïnvloeden.

Deze laatste vorm komt waarschijnlijk vaker voor dan de eerste.

Er zal getracht worden hier een buitenste grens aan te geven van het type en de frequentie van de nu bekende genetische variatie bij de mens. De frequentie hiervan schijnt direkt afhankelijk te zijn van het voorkomen van mutaties. Met betrekking tot het relatief of absoluut voorkomen van mutaties, kunnen alleen vrij waardevolle frequentieverdelingen bij de mens worden gemaakt als het gaat om specifiek herkenbare afwijkingen.

Uit empirische gegevens blijkt dat bepaalde afwijkingen berusten op genetische componenten, te weten:

- verlies van het kind voor de 23<sup>e</sup> week. Uit gegevens over abortus bleek dat zo'n 20-25 % van de abortussen veroorzaakt werden door chromosomale defekten
- doodgeborenen; enkele doodgeborenen, een zeer klein gedeelte van het totaal, zijn gestorven, omdat bepaalde recessieve genen homozygoot zijn. Uit studies<sup>32)</sup> zou je mogen konkluderen dat ieder individu in een bevolking heterozygoot is voor 2-4 lethale factoren die hun invloed kunnen uitoefenen tussen de 28<sup>e</sup> week van de zwangerschap en het 15<sup>e</sup> levensjaar
- congenitale misvormingen; ongeveer 2,5 % van de levend- en doodgeborenen hebben een misvorming die niet is bepaald door één genmutatie of een herkenbare chromosoomafwijking. Misschien bestaat er een genetische predispositie voor deze afwijking
- schade t.g.v. chromosoomafwijkingen ná de 28<sup>e</sup> week; een groot aantal van deze afwijkingen van het chromosomenaantal, trisomie<sup>++</sup> van chromosoom 21 (mongolisme)

+ expressie van een gen is de mate waarin een gen tot uiting komt

++ trisomie is het drievoudig voorkomen

en veranderingen in het aantal geslachtschromosomen.

### 7.3 De totale mutatiefrekwentie.

De mutatiefrekwentie<sup>e</sup> werd bij dierexperimenten met drosophila's als volgt vastgesteld<sup>33)</sup>:

1. gebaseerd op de relatieve frekwentie van de zichtbare schade
2. door de gemiddelde mutatiefrekwentie per locus te nemen en te vermenigvuldigen met een geschat aantal gen-loci.

Muller vond een mutatiefrekwentie bij de mens van 1/50.000 per locus. Het aantal gen loci varieert van 5000 tot 20.000. Muller konkludeerde dat alle genmutaties schadelijk waren, d.w.z. dat ze enige dominantie vertonen en voor schadelijke effecten kunnen zorgen zelfs in heterozygoten!

Het aantal heterozygoten overtreft verre het aantal homozygoten voor een bepaald kenmerk. Dus mutaties komen bij heterozygoten ook veel vaker voor. Daarom, zelfs als de selectie bij heterozygoten veel minder is dan bij homozygoten, zal de schade v.n.l. tot uiting komen bij heterozygoten en zal selectie ook v.n.l. tegen deze heterozygoten plaats vinden.

Dit zou betekenen dat berekende effecten m.b.t. homozygoten niet van toepassing zijn en alle mutaties als dominant kunnen worden beschouwd!

Een andere belangrijke vooronderstelling was dat, alhoewel de schadelijke effecten bij mutaties kunnen veranderen (verminderd of vermeerderd), afhankelijk van de situatie bij andere gen loci, gemiddeld de wijzigingen elkaar opheffen. Dit betekent dat de schade door mutaties veroorzaakt ongeveer gelijk is aan de som van de effecten die iedere mutatie afzonderlijk zou uitoefenen. De mening van Muller wordt slechts tot op zekere hoogte gedeeld door vele genetici. De meesten geloven n.l. dat deze beweringen wel opgaan voor een deel van de mutaties, doch niet voor alle. Belangrijke kwantitatieve gegevens bij het bepalen van de mutatiefrekwentie bij de mens zijn:

1. de gemiddelde mutatiefrekwentie ( $1-2 \cdot 10^{-6}$  per locus, 20 maal lager dan Muller vond)
2. het aantal gen loci bij de mens (schatting van  $\pm 10.000$ )
3. het gemiddelde aantal generaties dat een mutatie bij de mens aanwezig blijft.

Bij discussies over de mogelijke effecten van straling is het belangrijk om te weten, dat elke bijdrage van het genotype<sup>+</sup> aan mogelijke afwijkingen bepaald wordt door meerdere, zo niet vele loci, zodat men niet weet in hoeverre een verhoging van de mutatiefrekwentie van invloed is op de vitaliteit van de cellen<sup>58)</sup> en een verhoging in frekwentie van een bepaalde ziekte veroorzaakt.

+ genotype is de fundamentele erfelijke konstruktie i.t.t.fenotype

#### 7.4 Basisgegevens m.b.t. het voorspellen van de genetische effecten bij de mens.

Voor het voorspellen van genetische effecten bij de mens gelden de volgende voorwaarden:

1. dat de schade geheel of m.b.t. een bekend gedeelte meetbaar is.
2. dat er gegevens bestaan omtrent de relatie tussen de stralingsdosis die premeiotische cellen krijgen en de mutatiefrekwentie die daardoor geïnduceerd en overgedragen wordt aan de zygote<sup>++</sup>.

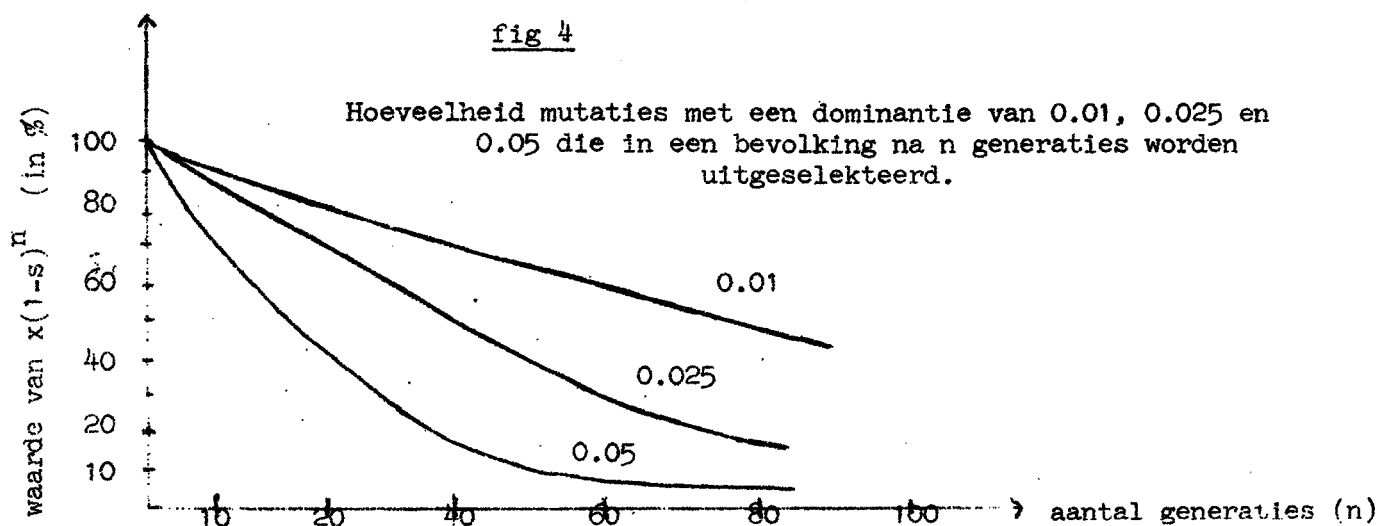
Bij gebrek aan betere informatie wordt ook van de volgende vooronderstellingen uitgegaan:

- dat voor de relaties onder 2 genoemd, die van de muis het meest betrouwbaar zijn.
- dat om onderschatting te voorkomen, beweringen over genetische risico's gebaseerd moeten zijn op alle door de ouders tijdens het leven opgelopen straling.
- dat de mutatiefrekwentie van enkele loci, waarover iets bekend is, vergelijkbaar is met alle loci in het genoom<sup>+++</sup>.
- dat er een lineaire relatie bestaat tussen de som van de stralingsdoses die de geslachtsklieren krijgen en het aantal mutaties.

#### 7.5 Voorspellen van schade voor het nageslacht.

Hierbij gaan we uit van de berekeningen van Muller<sup>34)</sup> en van zijn theorie over de mutatiefrekwentie. Wanneer we de effecten bekijken voor latere generaties, dan kan de relatie als volgt worden weergegeven:

Als  $x$  mutaties worden geïnduceerd in een bevolking en bij elke generatie wordt een gedeelte  $s$  geëlimineerd door selectie, dan zal na de 1<sup>e</sup> generatie  $x(1-s)$  overblijven. In de 2<sup>e</sup> generatie zal  $s(x(1-s))$  worden geëlimineerd en  $x(1-s)^2$  overblijven.



+ meiose = deling bij vorming van geslachtscellen, waarbij cellen ontstaan met de helft van het aantal chromosomen van de oorspronkelijke cel

++ zygote = bevruchte eicel

+++ genoom = het gehele kompleks erfelijke factoren aanwezig in een haploïd stel chromosomen

Dus na selectie in  $n$  generaties zal  $x(1-s)^n$  overblijven. De helft van de mutaties is verdwenen bij die waarde van  $n$  waarvoor geldt  $x/2 = x(1-s)^n$ .

Bij elke waarde van  $s > 0$  zullen alle mutaties vroeger of later worden geëlimineerd. Onderstaande tabel toont de eliminatiesnelheid van de mutaties welke "een weinig" dominant zijn op basis van verschillende waarden voor  $s$ .

tabel 5

Percentage van het aantal mutaties wat geëlimineerd is bij de verschillende waarden van  $s$ .

| Generaties                                            | $x(1-s)^n$     | $s = 0,01$      | $s = 0,025$     | $s = 0,05$      |
|-------------------------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1                                                     | $x - xs$       | 1 %             | 2,5 %           | 5 %             |
| 1 - 10                                                | $x(1-s)^{10}$  | 10 %            | 22 %            | 40 %            |
| 1 - 50                                                | $x(1-s)^{50}$  | 39 %            | 72 %            | 92 %            |
| 1 - 100                                               | $x(1-s)^{100}$ | 63 %            | 92 %            | 99 %            |
| 1 - ∞                                                 | 0              | 100 %           | 100 %           | 100 %           |
| aantal generaties waarbij<br>de helft is geëlimineerd |                | 69 <sup>e</sup> | 28 <sup>e</sup> | 14 <sup>e</sup> |

Hierbij is uitgegaan van 8460 mutaties die op zouden treden bij 1.175.000 zygoten wanneer de ouderlijke generatie aan 1 rad ioniserende straling zou zijn blootgesteld.

Als de ouderlijke generatie 1 rad per jaar ontvangt, dan zou de genetisch effectieve dosis 30 rad zijn geweest en dan zou het aantal mutaties wat verdwijnt ook 30 maal toenemen, wanneer je uitgaat van een lineaire dosis-mutatie kurve. Uiteraard is het totaal aantal mutaties dan ook 30 maal groter. In die gevallen waarbij geen selectie plaatsvindt tegen heterozygoten (wanneer het gen recessief is) vindt er dus relatief geen selectie plaats tegen het gen. Dit leidt tot een stijging van het aantal mutante genen. Op haar beurt kan dit leiden tot een toename in ziekten.

Toch blijkt, hoe je het ook bekijkt, het voorspellen van genetische risico's voor de 1<sup>e</sup> generatie, laat staan voor latere generaties van zoveel (onzekere) factoren af te hangen, dat iedere voorspelling onzeker blijft. De enige empirische gegevens met betrekking tot de gevolgen voor het nageslacht door ioniserende straling bestaan uit een klaarblijkelijke verstoring van de sex ratio bij bestraalde moeders. Het lijkt n.l. alsof er minder mannen geboren worden. Een verstoring van de sex ratio door dat de vader bestraald is, is niet evident.

#### 7.6 Vergelijken van risico's.

Bij het vergelijken van risico's ga je ervan uit, dat je de grootte van de risico's in een bepaalde maat of getal kunt uitdrukken. Dit leidt tot schattingen in absolute en relatieve termen.

In het eerste geval kunnen risico's worden uitgedrukt als het aantal afwij-

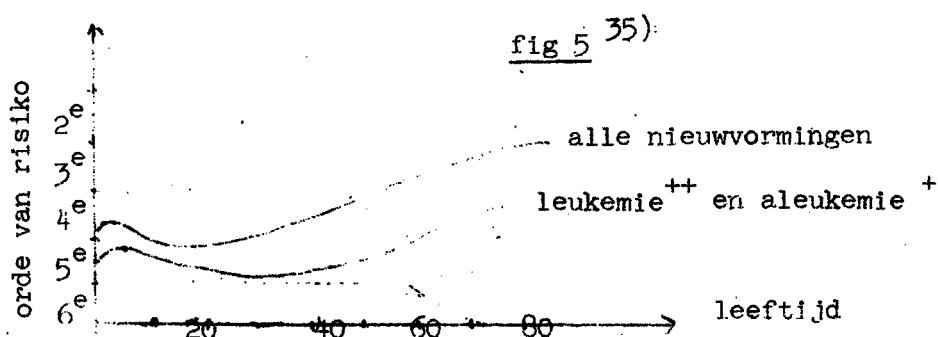
kingen die optreden per eenheid van dosis straling per miljoen mensen (b.v. 2 per jaar per miljoen mensen per rad). Dit veronderstelt echter een grotere nauwkeurigheid dan de feiten toelaten.

Een andere manier om de omvang aan te geven van een risico is het z.g. "orde risico". Een 5<sup>e</sup> orde risico is dan een risico van de grootte  $1 \cdot 10^{-5}$  tot  $10 \cdot 10^{-5}$ , d.w.z. 10 tot 100 verwachte gewonden per  $10^6$  inwoners. Deze manier blijkt nauwkeurig genoeg voor de praktijk. Ook andere risico's dan die welke door straling worden veroorzaakt kun je uitdrukken in een bepaalde orde.

Dit leidt dan gemakkelijk tot vergelijkingen in de zin van de maatschappij heeft een bepaald orde risico aanvaardbaar geacht, dus het introduceren van risico's van dezelfde orde van grootte is ook aanvaardbaar. M.b.t. deze uitspraak zijn twee opmerkingen te maken:

- Ten eerste het probleem van de aanvaardbaarheid. De ICRP zegt er het volgende over: "Er is een risico bij blootstelling aan ioniserende straling. De stralingsbelasting moet zodanig laag gehouden worden dat het verwachte risico acceptabel is voor het individu en de gemeenschap in relatie tot de voordelen die de activiteiten leveren welke ook verantwoordelijk zijn voor een verhoogde stralingsbelasting. Zulk een dosis zou je aanvaardbaar kunnen noemen". Toch kom je er met deze uitspraak lang niet uit, want deze bewering veronderstelt dat er een objectieve norm kan worden vastgesteld voor de aanvaardbaarheid. Dit is volstrekt onmogelijk omdat de nadelen van kernenergie (d.w.z. somatische en genetische risico's) én de voordelen niet goed meetbaar zijn. Toch stelt de ICRP normen en waarden vast, die dan in de loop der tijd de nodige veranderingen hebben ondergaan doordat men niet goed op de hoogte was met de effecten van straling.
- Ten tweede betekent het vergelijken van orde risico's dat als het éne risico geaccepteerd wordt, het andere risico wat van dezelfde grootte orde is, ook geaccepteerd kan worden. Dit klinkt redelijk, maar is bij nadere beschouwing volstrekt onlogisch, omdat men met deze manier van redeneren alle 5<sup>e</sup> orde risico's in de samenleving kan toelaten, wat zorgt voor een grote "overall" toename voor de totale belasting van de mens i.p.v. het streven naar een "overall" afname van belastende factoren voor de mens.

Echter rekening houdend met bovenstaande punten én met het feit dat somatische schade slechts een deel van de totale schade bedraagt, kun je nog wel iets statistisch vastleggen. Onderstaande figuur geeft b.v. de toename van leukemie bij een stralingsbelasting van 1 rad. Verondersteld wordt een lineaire curve.



Gesloten lijnen: jaarlijkse sterfterisiko aan nieuwvormingen bij mannen in Engeland en Wales in 1961

Gestippelde lijn: het berekende extra risico op leukemie bij blootstelling aan 1 rad/jaar bij 18-60 jarigen

Maar gezien de bovenstaande beperkingen die je in acht moet nemen, is het de vraag of deze vorm van statistisch onderzoek nog wel zo nuttig is.

#### 7.7 Slotopmerkingen.

Over het algemeen wordt de term genetisch gebruikt als een antithese voor somatisch. Recente onderzoeken hebben echter aangetoond dat somatische schade het gevolg kan zijn van een verstoring van genetische mechanismen in "somatische cellen".

Bij risico berekeningen echter kontrasteren de somatische en effecten zodanig in aard en tijdsduur, dat er geen poging is gedaan om genetische en somatische effecten te combineren om tot een "overall" schade te komen. Het zal echter duidelijk zijn dat het aantal genetische effecten van straling dat van de somatische verre zal overtreffen, uitgaand van dezelfde groep mensen.

- + aleukemie = een vorm van leukemie met typische veranderingen in het beenmerg, met een normaal aantal witte bloedcellen in het bloed i.t.t.
- ++ leukemie = vaak dodelijk verloopende bloedziekte met overproductie van witte bloedcellen soms zeer hevig en kortdurend verlopen (akute leukemie), soms langzamer (chronische leukemie)

## 8. Experimentele modellen en dosis-effekt relaties.

Bij het bestuderen van literatuur over dosis-effekt relaties lijkt het alsof een lineaire relatie niet zo'n conservatieve vooronderstelling is als vroeger werd gedacht. Het nu volgende mathematische model zal dit illustreren.<sup>36)</sup>

Karkinogenese valt uiteen in twee stadia n.l. inductie en ontwikkeling. Inductie behelst de konversie van één of meer cellen in latente tumorcellen. Dit wordt gevolgd door de ontwikkelingsfase, waarbij de latente tumorcellen zich ontwikkelen, zich delen, en weer uitgroeien tot zichtbare tumoren. In het volgende model wordt verondersteld, dat straling v.n.l. werkt als induktor. Verondersteld dat de dosis effect relatie voor kanker inductie in een ideaal homogene populatie van individuen bij lage dosis in eerste benadering kan worden weergegeven door de volgende relatie:

$$I = (1 - e^{-D/D_0})^n$$

I = dat deel van de bevolking dat kanker krijgt

D = dosis in rad

$D_0$  = gemiddelde dosis om effect te krijgen in een bepaald doel

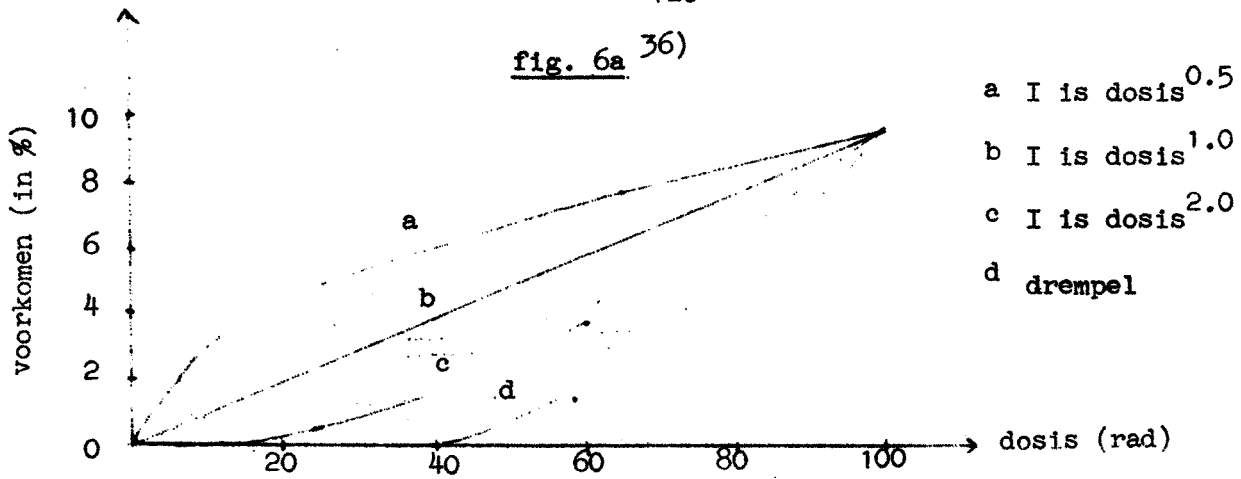
n = het aantal referentie organen

Homogeen in dit verband betekent dat alle leden van de bevolking identiek zijn in ieder opzicht. In een "normale" bevolking echter zijn sommige individuen gevoeliger voor bepaalde exogene factoren. De bevolking is dan heterogeen en kan worden opgedeeld in i subdivisies met verschillende  $D_0$  waarden. De  $D_0$  waarden hangen af van de soort kanker. Het is duidelijk dat vele subdivisies nodig zijn om de menselijke populatie te standaardiseren. In het voorbeeld stellen we  $n=1$  aangezien we er meestal vanuit mogen gaan dat er één referentieorgaan is, dat v.n.l. bijdraagt tot de vorm van de dosis effect curve. Het voorkomen van kanker in een bepaalde subpopulatie wordt dan weergegeven door:

$$I_i = 1 - e^{-D/(D_0)_i}$$

De totale kankerfrequentie bij i subpopulaties wordt dan

$$I = \sum I_i \quad (\text{kurve a fig. 6a})$$

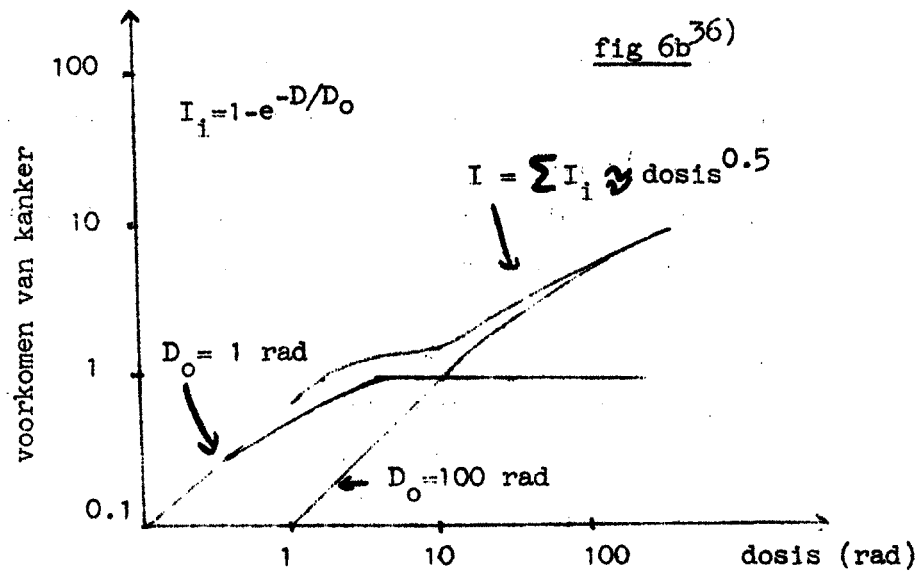


Deze kurve loopt aanvankelijk steil, terwijl de kurve wat vervlakt bij hogere doses. In het begin wordt n.l. de meest gevoelige subdivisie getroffen van de bevolking, bij hogere doses is deze groep verzadigd wat betreft de kans op kanker en dan dragen de wat minder gevoelige groepen bij tot een toename van de kanker inductie. De minder gevoelige groep heeft een minder steile dosis respons kurve. Het verschil in verloop tussen deze kurve a en de lineaire relatie b, kwadratische relatie c en relaties waarvoor een drempelwaarde geldt, d, is duidelijk te zien in fig. 6a.

Het grote verschil van kurve a met de andere is, dat deze kurve bij lage stralingsdoses boven de andere ligt en zelfs grotere effecten voorspelt dan de lineaire dosis-effekt relatie! Het bovenstaande wordt nog geïllustreerd door een zuiver theoretisch voorbeeld. We beschouwen één type kanker in een bevolking met drie subdivisies. Veronderstel dat 1 % van de populatie erg gevoelig is en een  $D_0$  heeft van 1 rad; veronderstel verder dat 10 % van de bevolking matig gevoelig is en een  $D_0$  van 100 rad heeft; stel tenslotte dat de overblijvende 89 % van de bevolking relatief ongevoelig is en in niet significante mate bijdraagt tot de dosis effect relatie. De bijdrage die iedere groep levert aan de kanker frekwentie is weergegeven in fig. 6b. Merk op dat bij lage doses (< 1 rad) het effect bij benadering lineair is met de dosis, omdat hier slechts één subdivisie bij betrokken is. Boven de 1 rad is de functie echter bijna een rechte lijn (bij een grafiek met twee logaritmische assen) en volgt een dosis <sup>0,5</sup> relatie.

Zowel menselijke als dierlijke gegevens ondersteunen de hypothese dat de meest gevoelige organen of diersoorten de neiging hebben tot een lineaire dosis effect kurve bij lagere doses. We noemen de onderzoeken bij drosophila embryo's <sup>37)</sup>, leukemie bij muizen <sup>38,39)</sup>, mammakarcinomen bij ratten <sup>18,24)</sup> en waarschijnlijk het voorkomen van kanker bij kinderen die als foetus aan straling hebben blootgestaan <sup>40)</sup>.

Misschien spelen bij deze voorbeelden genetische factoren ook een rol, terwijl recente literatuur de rol van een virus niet uitsluit bij stralingsziekten.<sup>41)</sup>



Samengestelde dosis-effekt-kurve uit twee  
andere exponentiële kurve's

## 9. Normen en effecten van inwendige bestraling.

De maximaal toelaatbare doses (MPD's) voor inwendige bestraling (ingestie, inhalatie) zijn afgeleid van de basishnormen zoals weergegeven in tabel 4. Voor het bepalen van de normen voor inwendige besmetting wordt gebruik gemaakt van diverse modellen. Hierbij zijn de toegestane doses (inw.) gebaseerd op de veronderstelling dat er geen blootstelling is aan uitwendige bestraling. Waar dat wel het geval is, dient de toegestane concentratie van radionukliden in lucht, voedsel of water gereduceerd te worden, zodat de MPD van een orgaan niet wordt overschreden. Modellen: a. besmettingswegen: ingestie

inhalatie

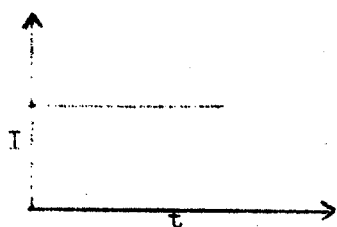
huid

b. besmettingpatronen

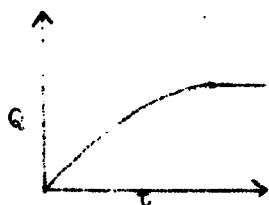
c. retentie en exkretie

De normen, gehanteerd in ICRP-publikatie 2,<sup>42)</sup> zijn gebaseerd op een continue en konstante opname (voor radiologische werkers 40 uur/week, 50 weken/jaar en gedurende 50 jaar, zie fig. 7). Gebruik wordt gemaakt van een kompartimentenmodel (zie fig. 8) met een biologische eliminatie volgens een functie met één exponentiële term. De normen gelden voor een situatie waarbij evenwicht is tussen opname en uitscheiding in een kompartiment. Bij langlevende isotopen zoals Ra-226 en Pu-239 wordt dit evenwichtspunt niet binnen 50 jaar bereikt.

fig 7



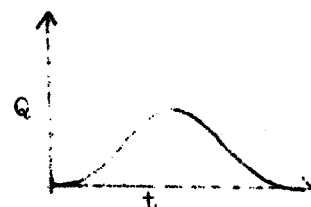
1. continue opname



2. enkelvoudige opname



3. afnemende opname na besmetting  
longen of wond



4. verschillende opname-patronen  
in een beperkte tijd

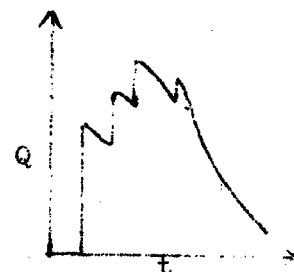
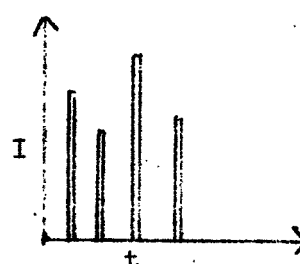
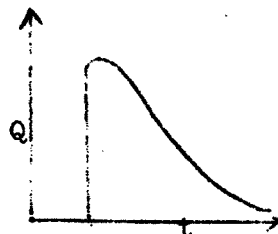
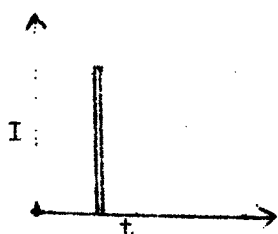
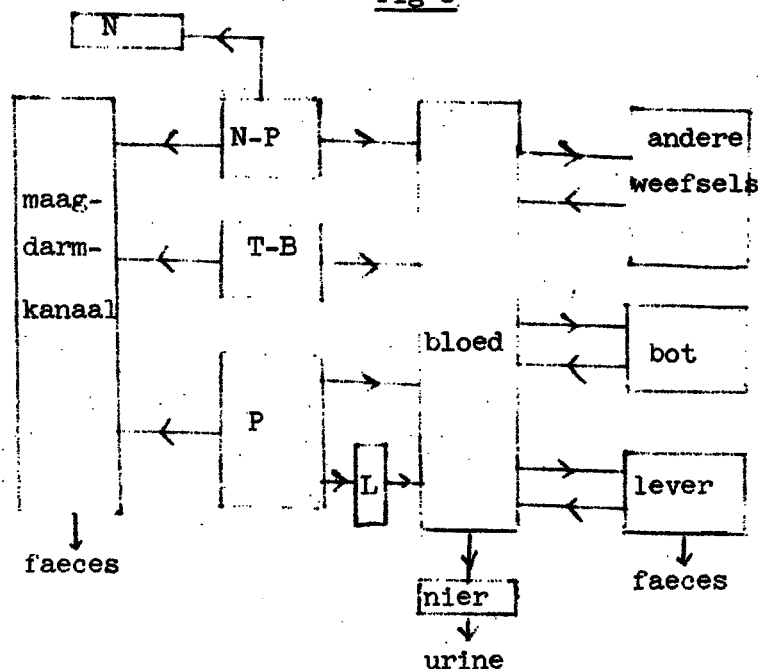


fig 8



N: uitademing via neus

L: lymfeklieren rond ademhalingsorganen

NP: naso-pharynx

TB: trachea-bronchiaalboom

P : pulmonary (longen)

Onderzoekingen hebben uitgewezen dat dit een te simpele weergave is. In latere ICRP-publikaties wordt dan ook gebruik gemaakt van retentie- en exkretiefuncties met één of meerdere exponentiële termen, machtsfuncties en incomplete gammafuncties.<sup>43,44)</sup>

$$\text{v.b.: voor Sr}^* \text{ geldt: } Y_u(t) = 0,14 \cdot e^{-0,37t} + 0,14 \cdot e^{-0,087t} + 0,00015 \cdot e^{-0,0012t} \quad (3 \text{ kompartimenten})$$

hierin is  $Y_u(t)$ : de in een etmaal uitgescheiden fraktie.

Bij de revisie van publikatie-2 welke in de zomer van '74 moest verschijnen,<sup>45)</sup> is hier gebruik van gemaakt. In de ICRP-publikatie 10<sup>43)</sup> en 10A<sup>44)</sup> worden ook andere dan continue opnamepatronen gegeven (afnemende opname, enkelvoudige opname, zie fig. 7).

### 9.1 Ingestie.

De toegestane doses worden berekend met behulp van een aantal parameters (zoals inhoud maag, gemiddelde verblijfstijden, zie tabel 6). De fraktie van de nukliden die via de wand van het maagdarmkanaal worden opgenomen, wordt aangeduid met  $f_1$ . Voor niet-transportabele verbindingen is  $f_1 = 0$ ; de wand van het maagdarmkanaal wordt echter wel bestraald. Via het bloed worden de nukliden naar de verschillende organen getransporteerd. Het orgaan waar een bepaald nuklide zich ophoopt, wordt kritisch orgaan genoemd.  $f_2'$ -waarden geven aan in welke mate depositie plaatsvindt in een kritisch orgaan (zie tabel 7 voor enkele  $f_1$ - en  $f_2'$ -waarden).  $f_1 \cdot f_2'$  levert de fraktie van de geïngesteerde hoeveelheid die in een bepaald orgaan wordt gedeponneerd en welke bepalend is voor de berekening van de orgaan-dosis.

\* Sr = Strontium

tabel 6

maagdarmkanaal ICRP-standaardmens (overgenomen uit "Toelaatbare doses ioniserende straling", Atoomenergie juli aug. '73)

| deel van maagdarmkanaal | gewicht van inhoud (gr.) | gemiddelde pas-sagetijd (uur) | effektieve straal |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------|
| maag                    | 250                      | 1                             | 10                |
| dunne darm              | 400                      | 4                             | 10                |
| dikke darm              | 200                      | 13                            | 5                 |
| endeldarm               | 135                      | 24                            | 5                 |

tabel 7

enkele f1 en f2' waarden (overgenomen uit: "Toelaatbare doses ioniserende straling" Atoomenergie juli/aug. '73)

| element/nuklide | f1                | kritisch orgaan | f2'  |
|-----------------|-------------------|-----------------|------|
| Na              | 1,0               | gehele lichaam  | 1,0  |
| Sr-89           | 0,3               | bot             | 0,7  |
| Sr-90           | 0,3               | bot             | 0,3  |
| J               | 1,0               | schildklier     | 0,3  |
| Cs              | 1,0               | hele lichaam    | 1,0  |
| Ra              | 0,3               | bot             | 0,1  |
| U               | $< 10^{-2}$       | bot             | 0,11 |
| Pu-239          | $3 \cdot 10^{-5}$ | bot             | 0,8  |

Zoals eerder vermeld, wordt de hoeveelheid radionukliden in het kritische orgaan bepaald door: hoeveelheid nukliden aanwezig in voedsel en water, de mate van metabole omzetting (f1- en f2'-waarden) en de mate waarin een bepaald nuklide wordt verwijderd. Opgemerkt dient te worden, dat niet altijd zeker is, wat het kritische orgaan is. Het kritische orgaan, afgeleid van mathematische modellen is n.l. niet altijd hetzelfde als hetgene dat gevonden wordt bij dierexperimenten.<sup>46)</sup>

## 9.2 Inhalatie.

Inhalatie van radioactieve stoffen of gassen zal blootstelling van luchtwegen aan ioniserende straling tot gevolg hebben. De onmogelijkheid van de long om partikels in voldoende mate en snel te verwijderen, verhoogt relatief het risico radioactieve stoffen in de vorm van aerosolen<sup>+</sup> in te ademen in vergelijking met radioactieve gassen.

Als de ingeademde stof goed oplosbaar is, zal deze snel geresorbeerd worden door de bloedbaan. Dit betekent dat oplosbare deeltjes niet noodzakelijkerwijs een ziekte in de longen behoeven te veroorzaken. De deeltjes kunnen via het bloed ook andere organen bereiken.

Onoplosbare stofdeeltjes kunnen verwijderd worden door fagocyten; deze hebben de mogelijkheid partikels op te nemen en uit de longblaasjes te transporteren. De fagocyt in het longepitheel kan via bloed- of lymfebanen worden verwijderd. Het lymfeweefsel rondom de longen is onderdeel van het lymfesysteem dat

+ aerosol = dispersie van kleine vloeistofdeeltjes ( $10^{-4}$ - $10^{-7}$  cm) in een gas

over het hele lichaam verspreid is. Men vermoedt dat de lymfecellen met inbegrip van de stamcellen (cellen waaruit zich o.a. lymfecellen ontwikkelen) zich door het hele lichaam bewegen. Indien dit het geval is, dan is de massa van het weefsel, waarin de desintegratie-energie van het nuklide afgegeven wordt, eerder de massa van het totale lymfesysteem (+ 800 gr.) dan de massa van het lymfe-weefsel rondom de longen (+ 16 gr.).<sup>47)</sup>

Dit is met name belangrijk bij de vraag of het lymfesysteem gekenmerkt kan worden als kritisch orgaan. Datgene wat aan radioactieve stof in de longen aanwezig is, hangt af van:

koncentratie van element X in de lucht (zie berekening MPC-a ); fysische/chemische eigenschappen van X; mate waarin de stof wordt geïnhaled; mate waarin het deeltje in de long wordt opgeslagen en in welke mate het wordt verwijderd.

Beide laatste factoren zijn afhankelijk van de partikel-grootte.<sup>48,49)</sup> Om de door de organen verkregen doses ioniserende straling, als gevolg van inhalatie, te berekenen, wordt gebruik gemaakt van mathematische modellen om de verplaatsing van de nukliden naar de organen weer te geven. De ICRP gebruikt 3 aparte modellen, te weten: 1. voor de longen; 2. verplaatsing van nukliden in bloed naar organen en 3. voor retentie in organen.<sup>46)</sup>

Tabel 8 geeft een overzicht van het longmodel zoals gegeven in ICRP-publicatie 2. Hierin wordt alleen onderscheid gemaakt tussen oplosbare en niet-oplosbare deeltjes. De depositie in de verschillende onderdelen van het ademhalingsorgaan, is ook sterk afhankelijk van de deeltjesgrootte (zie tabel 9). De ICRP-Task Group on Lung Dynamics heeft modellen opgesteld welke de depositie, verwijdering en retentie van deeltjes in longen weergeven. Drie klassen van deeltjes worden onderscheiden: D (eliminatie in orde van dagen)

W (eliminatie in orde van weken)

Y (eliminatie in orde van jaren) (zie fig.9 en tabel 10)

Tabel 9<sup>50)</sup> geeft voor de verschillende deeltjesgrootten de depositie weer in de 3 delen van de ademhalingswegen. Verondersteld wordt, alhoewel er weinig experimenteel bewijsmateriaal voorhanden is, met name voor lange tijd na inademing, dat de retentie een exponentiële verloop heeft.

|                 |                                                                                       |        |                                                                                          |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ex              | uitgeademd                                                                            | 25 %   |                                                                                          |
| NP + TB         | in nasopharynx of<br>tracheobronchiaal<br>gedeponeerd en ver-<br>volgens ingeslikt    | 50 %   | NP = naso-pharynx<br>(neuskeelholte)<br>TB = trachea-bron-<br>chiaalboom<br>(luchtwegen) |
| P (oplosbaar)   | in de longblaasjes<br>gedeponeerd en ver-<br>volgens opgenomen                        | 25 %   | P = pulmonary<br>(longen)                                                                |
| P (onoplosbaar) | na depositie omhoog<br>gewerkt en vervolgens<br>ingeslikt (1 <sup>e</sup> dag)        | 12,5 % |                                                                                          |
|                 | na depositie opgenomen<br>met $T_{\frac{1}{2}} = 120$ dagen<br>(Pu 1 jaar, Th 4 jaar) | 12,5 % |                                                                                          |

Tabel 8 ICRP longmodel (publ. 2) overgenomen uit Atoomenergie, juli/aug. '73

| Onderdelen<br>luchtweg | AMAD <sup>+</sup> (mμ) |      |      |
|------------------------|------------------------|------|------|
|                        | 0,1                    | 1,0  | 10   |
| NP                     | 1 %                    | 30 % | 85 % |
| TB                     | 8 %                    | 8 %  | 8 %  |
| P                      | 50 %                   | 25 % | 7 %  |

50)

Tabel 9 Effect van partikelgrootte op het percentage van depositie in de verschillende onderdelen van de luchtweg

| plaats | eliminatie-<br>wegen | deeltjesklasse |             |              |
|--------|----------------------|----------------|-------------|--------------|
|        |                      | dag            | week        | jaar         |
| NP     | (a)                  | 0,01 d/0,5*    | 0,01 d/0,1* | 0,01 d/0,01* |
|        | (b)                  | 0,01 d/0,5     | 0,4 d/0,9   | 0,4 d/0,99   |
| TB     | (c)                  | 0,01 d/0,95    | 0,01 d/0,9  | 0,01 d/0,01  |
|        | (d)                  | 0,2 d/0,05     | 0,2 d/0,5   | 0,2 d/0,99   |
| P      | (e)                  | 0,5 d/0,8      | 50 d/0,15   | 500 d/0,05   |
|        | (f)                  | -              | 1 d/0,4     | 1 d/0,4      |
|        | (g)                  | -              | 50 d/0,4    | 500 d/0,4    |
|        | (h)                  | 0,5 d/0,4      | 50 d/0,05   | 500 d/0,15   |
| L      | (i)                  | 0,5 d/1,0      | 50 d/1,0    | 1000 d/0,9   |

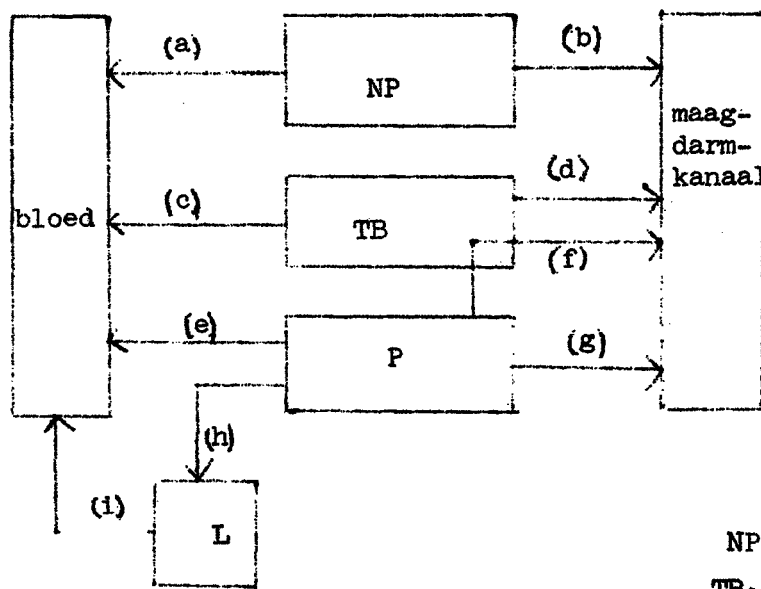
57)

Tabel 10

+ AMAD: activity median aerodynamic diameter

\* het eerste getal geeft de biologische halfwaardetijd weer in dagen, het tweede de regionaal gedeponeerde fraktie

fig 9<sup>57)</sup>



NP: nasopharynx (neuskeelholte)

TB: trachea-bronchiaal

P: pulmonary (longen)

L: lymfeklieren

### 9.3 Hot-particles

In februari 1974 verscheen bij de NRDC (National Resources Defence Council) een rapport van A.T. Tamplin en T.B. Cochran <sup>51)</sup>. Hierin wordt het probleem van de "hot-particles" behandeld. Een hot-particle wordt gedefinieerd als een deeltje dat voldoende aktiviteit bezit om tenminste 1000 rem/jaar aan het weefsel, dat het deeltje omringt, af te geven. Het betreft hier  $\alpha$ -straling uitzendende deeltjes van Pu ( $\text{PuO}_2$  b.v.) en andere aktiniden, welke in klasse Y van het nieuwe ICRP longmodel vallen. (zie tabel 10).

Zoals eerder vermeld, zijn de huidige, door de ICRP opgestelde, normen voor blootstelling aan ioniserende straling gebaseerd op gemiddelde doses, genomen over het hele lichaam of over een orgaan. Zo mogen radiologische werkers 5 rem/jaar over het hele lichaam en 15 rem/jaar over de longen ontvangen. De vraag nu is, of het effect van een ingeademd "deeltje" beschouwd mag worden als ware de totale hoeveelheid afgegeven straling uniform over de long verspreid.

Als b.v.  $\text{Pu}^{239}$  verval, zendt het  $\alpha$ -deeltjes uit. Deze hebben een energie van 5,1 MeV. Een dergelijk deeltje kan in menselijk weefsel biologische schade veroorzaken binnen een straal van 40-45  $\mu$  (0,004 cm). Hierbij komt, dat de intensiteit van de straling evenredig afneemt met de afstand. Ongeveer de helft van de energie wordt dan afgegeven binnen een straal van 20  $\mu$ . De gemiddelde dosis binnen een straal van 20  $\mu$  is 8 maal die welke gemeten wordt bij een straal van 20 - 40  $\mu$ .

Kolom 1 van tabel 11 geeft de ontvangen doses weer als de gehele long als referentie orgaan wordt genomen. Kolom 2 en 3 geven de ontvangen doses weer volgens het longmodel van D. Geesaman.

---

Stralingsdosis als gevolg van een deeltje  $\text{Pu}^{239}$   
(1  $\mu$  in diameter, 0,28 pCi)

---

|                                | long                |                   |                                         |
|--------------------------------|---------------------|-------------------|-----------------------------------------|
|                                | gehele lichaam      | bestraald weefsel | dichtsbij-<br>zijnde 20<br>longblaasjes |
| massa van weefsel              | 1000 g <sup>+</sup> | 65 $\mu$ g        | 19 $\mu$ g                              |
| dosis gemiddelde<br>(rem/jaar) | 0,0003              | 4000              | 11000                                   |

<sup>52)</sup>  
Tabel 11

Uitgaande van kolom 1 zouden  $53 \cdot 10^3$  deeltjes nodig zijn om de MPLB<sup>++</sup> van 0,016  $\mu$  Ci te bereiken welke zou resulteren in een dosis van 15 rem/jaar. Aangenomen dat de stralingsgebieden van de deeltjes elkaar niet overlappen, bestralen deze deeltjes volgens D. Geesaman slechts 3,4 gram weefsel van de long

+ ICRP: "standaard-mens"

++ Maximum Permissible Lung Burden (ICRP)

maar met een dosis van 4000 rem/jaar.

Uitgaande hiervan en verrichte dierexperimenten <sup>53)</sup>, onderzoeken bij voorgekomen ongelukken <sup>54)</sup> en risikoschattingen voor kankerinductie <sup>55)</sup>, komen Tamplin en Cochran tot de volgende aanbevelingen m.b.t. hot-particles <sup>56)</sup> (met  $\alpha$ -aktiviteit 0,007  $\mu\text{Ci}$ ):

1) blootstelling (beroepsmatig)

MPLPB\* = 2 hot-particles

MPCa\*\* voor  $\text{Pu}^{239} = 3,5 \cdot 10^{-16} \mu\text{Ci/ml}$

2) blootstelling (niet beroepsmatig)

MPLPB = 0,2 hot-particles

MPCa++ voor  $\text{Pu}^{239} = 9 \cdot 10^{-18} \mu\text{Ci/ml}$

3) blootstelling (bij ongeluk)

MPLPB (2 uur blootstelling = 10 hot-particles)

Uitgaande van 1) zou inhouden, dat de MPD m.b.t. deze deeltjes met een faktor 115000 verlaagd zou moeten worden.

#### 9.4 Lichaamsbelasting gebaseerd op een vergelijking met $\text{Ra}^{226}$

De maximaal toelaatbare concentratie (MPC) van radionukliden in lucht, water en voedsel moet eraan voldoen, dat de bijdrage tot het kritieke orgaan, na 50 jaar blootstelling niet de MPD van dat orgaan overschrijdt.

Voor langlevende isotopen, zoals  $\text{Pu}^{239}$ ,  $\text{Sr}^{90}$  wordt het evenwichtspunt, zoals eerder genoemd, niet na 50 jaar blootstelling bereikt. De waarden voor deze elementen worden berekend door een vergelijking met  $\text{Ra}^{226}$ . De maximaal toegestane lichaamsbelasting (MPBB) van  $\text{Ra}^{226}$  en haar dochterprodukten komt overeen met een gemiddelde dosisgrootte van 0,56 rem/week of ongeveer 0,06 rad/week. De MPBB's van andere botzoekende nukliden worden vanuit deze basiswaarde berekend.

#### 9.5 Bepaling MPBB

Als de MPD is R rem/week, dan kan de maximale lichaamsbelasting q als volgt berekend worden:

$$q = \frac{100\text{mR}}{(3,7 \cdot 10^4)(1,6 \cdot 10^{-6})(6,05 \cdot 10^5)f(E)(QF)} = \frac{2,8 \cdot 10^{-3} \text{ mR}}{f(E)(QF)} \mu\text{Ci}$$

Hierbij is:  $3,7 \cdot 10^4$  = desintegraties/sec/ $\mu\text{Ci}$  ( $1 \mu\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^4$  desintegr./sec)  
 $1,6 \cdot 10^{-6}$  = erg/MeV  
 $6,05 \cdot 10^5$  = sec/week  
 100 = rad.gr/erg

\* Maximum Permissible Lung Particle Burden (aantal deeltjes dat noodzakelijk is om een kanker risico te krijgen dat gelijk is aan die bij uniforme bestraling).

\*\* Voor een deeltje met 0,07 pCi  $\text{Pu}^{239}$ . Voor deeltjes met meer dan 0,07 pCi neemt de MPCa proportioneel toe.

m = Massa van referentieorgaan

f = fraktie van isotoop in het orgaan, relatief ten opzichte van bijdrage aan hele lichaam

E = door orgaan geabsorbeerde energie (MeV)

QF = kwaliteitsfaktor van stralensoort ( $\alpha$ -straling: 10,  $\beta$ - en  $\gamma$ -straling: 1 en neutronenstraling: 2-10)

## 9.6 Bepaling van maximaal toelaatbare concentratie van radionukliden in lucht en water

Verondersteld wordt, dat de dagelijkse opname door het kritieke orgaan als volgt weergegeven kan worden.

$$\frac{d(qf)}{dt} = P - \lambda qf$$

Hierbij is P = mate van opname van radionuklide door kritieke orgaan ( $\mu\text{Ci}/\text{dag}$ )

$$\lambda = \frac{0,693}{T}$$

$$T = \text{effektieve halfwaardetijd} = \frac{T_o \cdot T_b}{T_o + T_b}$$

$T_o$  = fysische halfwaardetijd

$T_b$  = biologische halfwaardetijd

t = periode van blootstelling

Oplossen van de differentiaalvergelijking geeft:

$$qf = \frac{P(1 - e^{-\lambda t})}{\lambda} \quad (1)$$

Als P gelijk is aan de MPD, dan is P de maximaal toelaatbare opname. Per dag wordt 2500 ml water gekonsumeerd en  $2 \cdot 10^7 \text{ cm}^3$  lucht geïnhaald (ICRP-standaardmens). Bij een 8 urige werkdag wordt de helft van deze waarden bereikt, dit vanwege de grotere activiteit van het individu gedurende deze periode. Er vanuit gaande dat het werkschema van de standaardmens 8 uur/dag, 5 dagen/week, 50 weken/jaar is, dan krijgen we:

$$P = 1100 \cdot \frac{5}{7} \cdot \frac{50}{52} (\text{MPC})_w f_w = 750 (\text{MPC})_w f_w$$

$$\text{evenzo: } P = 6,9 \cdot 10^6 (\text{MPC})_a f_a$$

$f_a$ : fraktie van geïnhaalde dat kritieke orgaan bereikt

$f_w$ : fraktie van geïngesteerde dat kritieke orgaan bereikt

Substitueren we de verkregen waarden van P in (1), dan is

$$(\text{MPC})_a = \frac{10^{-7} qf}{T \cdot f_w (1 - e^{-0,693/T})} \quad \mu\text{Ci}/\text{cm}^3 \text{ en}$$

$$(\text{MPC})_w = \frac{9,2 \cdot 10^{-4} qf}{T \cdot f_w (1 - e^{-0,693/T})} \quad \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$$

Als het radionuklide vervalst naar een aantal dochternukliden, dan zullen wiskundig meer gekompliceerde methoden gebruikt moeten worden.

Als meerdere nukliden in een mengsel aanwezig zijn (A,B,C...), dan moet de  
koncentratie ( $C_A, C_B, C_C \dots$ ) zodanig beperkt worden, opdat de volgende relatie  
bestaat:

$$\frac{C_A}{MPC_A} + \frac{C_B}{MPC_B} + \frac{C_C}{MPC_C} \leq 1$$

#### 10. Samenvatting.

Gezien de omvang van het stuk is het moeilijk om de belangrijkste punten beknopt weer te geven, aangezien dit altijd aanleiding zal geven tot onvolledigheid. Wanneer we toch proberen de belangrijkste dingen op een rijtje te zetten, komen we tot het volgende:

Wanneer we de effecten van straling bekijken, moeten we rekening houden met drie dingen, n.l. fysische, chemische en biologische effecten. Die werken allen verschillend in op het menselijk organisme en hebben ook hun eigen bijdrage aan de schade die het menselijk organisme op kan lopen. Wat betreft de schade die opgelopen kan worden, kan onderscheid gemaakt worden tussen somatische en genetische schade. De laatste zal zich veelal manifesteren in latere generaties. Bij een verhoging van de stralingsbelasting, speelt -afgezien van ongelukken, die buiten de kader van dit stuk vallen- de somatische schade waarschijnlijk een veel minder belangrijke rol dan de genetische schade. Van deze genetische schade kunnen we aannemen dat deze relatief groot is t.o.v. de somatische schade. Het probleem echter ligt hier, dat het bepalen van deze schade vrijwel onmogelijk is door gebrek aan kennis van de genetika. Als je iets van schade zou kunnen vaststellen, dan is het nog erg moeilijk om uit te maken of de schade aanvaardbaar is of niet. Ook met betrekking tot de effecten van inwendige bestraling zijn er verschillende opvattingen over de kwantifikatie van risico's. Het duidelijkst komt dit wel naar voren bij "hot-particles" (zoals  $\text{PuO}_2$ ), waarvoor een verlaging van de ICRP-norm van 115.000 wordt voorgesteld.

Tot slot moet nog gezegd worden dat het verband tussen dosis en effect in alle stukken min of meer naar voren komt en lineair is in vrijwel alle gevallen.

## 11. Konklusies.

Het is bij het stralingsprobleem bijzonder moeilijk om schattingen te maken van risico's, hetzij m.b.t. ongelukken, hetzij m.b.t. somatische of genetische schade. Dit komt met name door het grote aantal factoren waarmee rekening gehouden moet worden enerzijds en lakunen in kennis anderzijds. Hierbij komt de vraag wat een aanvaardbaar risico genoemd mag worden.

Toch springen er bij dit artikel drie dingen uit:

1. het in vrijwel alle gevallen afwezig zijn van een drempelwaarde. De ICRP neemt het konservatieve verband tussen dosis en effect aan, n.l.: lineair; dit slaat met name op het somatische effect.
2. de onvoorspelbare effecten welke ioniserende straling heeft op het menselijk organisme. Men mag aannemen dat de effecten op genetisch niveau belangrijkere konsekwenties zullen hebben dan die op somatisch niveau.
3. de onzekerheid die heerst m.b.t. de effecten van inwendige bestraling. Dit ook in verband met de planning van snelle kweekreactoren.

Deze punten lijken ons zo essentieel, dat we ons afvragen of het verstandig is, zelfs gezien de beperkingen die we ons in dit artikel opgelegd hebben (zie inleiding) door te gaan het milieu verder te belasten met een verhoging van de achtergrondstraling (zoals door de bouw van kerncentrales), zonder dat er een grondige evaluatie heeft plaatsgevonden van al de tot nu toe beschikbare hoeveelheid kennis op het gebied van de door ioniserende straling optredende schade in het menselijk lichaam. Ook lijkt ons verdere uitbouw van onderzoek op dit terrein zeer wenselijk.

Verklarende woordenlijst

- aerosol = dispersie van kleine vloeistofdeeltjes ( $10^{-4}$  -  $10^{-7}$  cm) in een gas
- aleukemie = een vorm van leukemie met typische veranderingen in het beenmerg, met een normaal aantal witte bloedcellen in het bloed i.t.t. leukemie
- bronchusboom = het geheel van de vertakkingen van de luchtpijp
- carcinogeen = 1) kankerverwekkend  
2) stof die kanker verwekt
- carcinoom = kwaadaardig gezwel van epitheel met neiging tot infiltrerende groei en uitzaaiingen (metastasen)
- chromatide = in een kerndeling (profase) splitsen de chromosomen zich overlangs in twee (dochter-)chromatiden waarvan elk naar de tegen-gestelde pool van de kern gaat
- chromosomen = kernlissen, staafvormige structuren in de cellen die zich bij de mitose uit de chromatine vormen. Ze bestaan uit RNA en DNA, histon en een complexe proteïne. Op de chromosomen bevinden zich genen. De mens bezit 46 chromosomen (44 autosomen en 2 geslachtschromosomen)
- gen = biologische eenheid van overerving, erfeenheid met vermogen zichzelf te reproduceren, gelokaliseerd op een bepaalde plaats (locus) op een bepaald chromosoom
- nasopharynx = neuskeelholte
- nukleoside = verbinding van een purine of pyrimidine base met een pentose; samen met een fosforzuur vormt het nukleoside een nukleotide eenheid in nukleïnezuur
- nukleotide = algemene naam voor fosforzure esters van nukleosiden. Één nukleotide is samengesteld uit een suiker, een fosfaat en één van de vier heterocyklische basen (A,T,G,C)
- rad = afkorting van radiation absorbed dose, een eenheid voor de meting van de geabsorbeerde hoeveelheid ioniserende straling overeenkomend met een energie-overdracht van 100 erg/gram absorberend materiaal
- R.B.E. = Relative Biological Effectiveness, een uitdrukking voor de werkzaamheid van straling in vergelijking met die van 1 Röntgen
- rem = röntgen equivalent man, dat is de hoeveelheid straling die hetzelfde biologisch effect heeft als 1 rad röntgenstraling  
1 rem = 1 rad . R.B.E.

- sarcoma = kwaadaardig gezwel van atypische mesenchymale cellen (embryonale cellen waaruit later bindweefsel, bloed- of lymfevaten ontstaan)
- trachea = luchtpijp
- genoom = het gehele complex van erfelijke factoren aanwezig in een haploïd stel chromosomen
- gonaden = geslachtsklieren
- kritisch
- orgaan = referentieorgaan
- lymfomen = Amerikaanse term voor een kwaadaardige tumor van het lymfatisch systeem
- locus = plaats van een gen op een chromosoom
- leukemie = vaak dodelijk-verlopende bloedziekte met overproductie van witte bloedcellen, soms zeer hevig en kortdurend verlopend (akute leukemie), soms langzamer (chronische leukemie)
- MPBB = Maximal Permissible Body Burden
- MPC = Maximal Permissible Concentration
- MPD = Maximal Permissible Dose
- MPLPB = Maximal Permissible Lung Particle Burden
- meiose = deling bij vorming van geslachtscellen waarbij cellen (gameten) ontstaan met de helft van het aantal chromosomen van de oorspronkelijke cel
- trisomie = in plaats van een normaal chromosomenpaar zijn er drie enkelvoudige chromosomen aanwezig
- verdubbelingsdosis = die dosis waarbij de spontane mutatiefrequentie een factor twee wordt verhoogd
- zygote = bevruchte eicel

## Referenties

1. ICRP publikatie 9, p 3 (Recommendations of the International Commission on Radiological Protection; adopted 17 sept. 1965, Pergamon Press)<sup>+</sup>
2. ICRP publikatie 9, p 11
3. Croggle, Biological Effects of Radiation, Wykehan publ. Ltd, 1971
4. British Medical Journal, vol. 29, no. 3, pp 226-235, 1973
5. Scientific American, febr. 1967, pp 248-255
6. Bresch-Hausman, Klassische und Molekulare Genetik, hfds 7/1, Springer Verlag 1972
7. ICRP publikatie 9
8. zie 3
9. Hueper W.C., Conway W.D., Chemical Carcinogenesis and cancers, p 744, C.C. Thomas Springfield ILL 1965
10. Upton C., Radiation Injury, pp 85-90, Univ. of Chic. Press, 1969
11. Tamplin A.R., Cochran T.B., Standards for Hot Particles, febr. 1974, NRDW 1710 N Street NW, Washinton DC 20036
12. zie 10
13. The evaluation of Risks from Radiation, Health Physics 12, pp 239-302, Pergamon Press London, 1966
14. zie 10
15. A.B. Brill, M. Tomonaya and R.M. Heysel, Leukemia in man following exposure to ionizing radiation, Ann. Intern. Med., 56, p 590, 1962
16. W.M. Court Brown and R. Doll, Leukemia and aplastic anaemia in patients irradiated for ankylosing spondylitis, Spec. Rap. Ser., Med. Res. Council No. 295 (1957) in ICRP publikatie 8
17. UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Gen. Assemb. Cff Rec, 19 th Sess; Suppl. no 14 (A/5814), UN, New York, 1964 in ICRP publikatie 8
18. L.J. Zeldis, S. Jablon and M. Ishida, Carcinogenesis in Hiroshima and Nagasaki, Atomic Bomb Casualty Commission, Techn. Rep. pp 16-63, Hiroshima (1963) in ICRP publikatie 8
19. W.M. Court Brown and Doll, British Medical Journal 2, 1327, 1965.
20. B. Mc Mahow, Pre Natal X-ray exposure and childhood cancer, J. Natn. Cancer Inst. 28, 1173 (1962) in ICRP publikatie 8
21. Mole R.H., Radiation Effects in man, current views and prospects, Health Physics vol. 20, pp 485-490, 1971
22. ICRP publikatie 14, Radiosensitivity and spatial distribution of dose, Pergamon Press, 1969
23. National Academy of Sciences, NRC Report of the advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing radiation; the effects on populations of exposure to low levels of ionising radiation, Washington 1972

<sup>+</sup>volgende referenties m.b.t. ICRP-rapporten worden vermeld als ICRP met publikatie-en pagina nummer.

24. Upton A.C., Radiation Injury, pp 74-79, University of Chicago Press, 1969
25. Goffman J.W., Tamplin A.R. e.a., Voordracht op het internationale symposium over fundamenteel kankeronderzoek, M.D. Anderson, Hospital and Tumor Institute, Houston, Texas, 1971
26. Doll R., Cancer Research 23, pp 1613-1623, 1963
27. Upton A.C., Comparative aspects of carcinogenesis by ionising radiation, National Cancer Institute, Monograph no.14, pp 221-234, Washington 1964
28. Upton A.C., Radiation Injury, pp 74-79, Univ. of Chic. Press, 1969
29. Lundin F.E., Lloyd J.W., Smith E.M., Archer V.E., Holaday. Health Physics 16, pp 571-578, Pergamon Press 1969
30. ICRP publikatie 8, p 13
31. Sankaranarayanan, K, Ionising radiation and genetic risks; Atoomenergie juli/aug. 1973, pp 183-188
32. Newcombe H.B., Genetic effects in populations, Radiat. Res. 16, p 531 (1962) in ICRP publikatie 8
33. Muller, Our Load of Mutations, Am. Journ. Hum. Gen. 2, p 111 (1950), in ICRP publikatie 8
34. Am. J. Hlth 54, p 42 (1964); Muller H.J., Radiation and Heredity, ICRP publikatie 8
35. ICRP publikatie 8, p 59
36. Baum J.W., Population Heterogeneity hypothesis on Radiation induced cancers, Health Physics 25, pp 97-104, Pergamon Press 1973
37. Burnet B., and Sany J.H., Genetics 49, 223, 1964
38. Upton A.C., Cancer Research, 21, pp 717-729, 1961
39. Upton A.C. e.a. in Proceedings of a symposium on Radiation Induced Cancers, pp 427-437, IAEA Wenen 1969
40. Stewart A., Kneale G.W., Lancet 1185, 1970
41. Anderson, Evolutionary Signs of Virus Infection; Nature 1970, vol. 227, sept. 26
42. ICRP publikatie 2; Permissible Dose for Internal Radiation, Pergamon Press, Oxford 1959
43. ICRP publikatie 10, Evaluation of radiation dose to body tissues from internal contamination due to occupational exposure (1968)
44. ICRP publikatie 10 A, The assessment of internal contamination resulting from recurrent or prolonged uptakes (1971)
45. Radiation Protection Trends in the United States; Lauriston S. Tayler, Health Physics vol 20, pp 499-504, Pergamon Press 1971
46. Dolphin G.W., Problems Associated with setting safe levels for working with plutonium, Health Physics, vol. 22, pp 937-942, Pergamon Press 1972
47. zie 46 p 938
48. Task Group on Lung Dynamics, Deposition and Retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract, Health Physics, dec. 1966, pp 173-207, Pergamon Press 1966

49. Parsont M.A., Holley W.L. and Burnett W.D., The effect of particle size on organ distribution of radioactive material deposited in the lungs, Health Physics vol 22 feb., Pergamon Press 1972
50. zie 46, p 939
51. Tamplin A.R., Cochran T.B., Radiation Standards for Hot Particles (A report on the inadequacy of existing radiation protection standards, related to internal exposure of man to insoluble particles of plutonium and other alpha-emitting hot particles), febr. 14, 1974. Natural Resources Defence Council, 1710 N. Street N.W., Washington D.C. 20036
52. zie 51, p 16
53. Morrow P.E., Gibb F.R., Davies H. Milola J., Wood D., Wraight N. and Campbell. The retention and fute of inhaled plutonium dioxide in dogs, Health Physics, vol 13, pp 113-133, Pergamon Press 1967. Zie ook ref. 46, pp 937-938
54. Mann J.R. and Kircher R.A., Evaluation of Lung Burden following acute inhalation exposure to highly insoluble  $\text{PuO}_2$ , Health Physics vol 13, pp 877-882, Pergamon Press
55. zie 51
56. zie 51, pp 51,52
57. ICRP publikatie 19, The metabolism of compounds of plutonium and other actinides, mei 1972
58. Mukai T., Genetics 50, 1-19 july 1964
59. Bacq Z.M., Pure and applied biology, Modern trends in physiological sciences, Perg. Press, London, 1961
60. Pinkhof, Hilfman, Geneeskundig Woordenboek, Amsterdam, 1973

Appendix B LITERATUUR

Onder ieder boek van deze lijst is in het kort de inhoud aangegeven.

Energy and Power (145 blz)

A Scientific American Book

W.H. Freeman and Company, 1971

San Francisco (USA)

Reading (Berkshire, England)

- de rol van de energie in het leven van de mens: verleden, heden en toekomst
- energie in het heelal
- energiebronnen van de aarde
- de stroming van energie in de biosfeer
- de stroming van energie in een jagerssamenleving
- de stroming van energie in een boerensamenleving
- de stroming van energie in een industriële samenleving
- de omzetting van energie
- de economische geografie betreffende energie
- energie en informatie
- de besluitvorming t.a.v. energieproductie

D.R. Inglis

Nuclear energy: its physics and its social challenge (395 blz.)

Addison- Wesley Publishing Company

Reading (Massachusetts) 1973

- uitleg van de natuurkunde, nodig om de werking te kunnen begrijpen van een kernreaktor en van een fusie- en splijtingsbom
- biologische stralingsschade
- controle op splijtbaar materiaal
- verwachtingen t.a.v. toekomstig energieverbruik
- alternatieve energiebronnen
- de bewapeningswedloop

S.H. Schurr ed.

Energy, economic growth and environment (230 blz)

John Hopkins University Press

Baltimore, London, 1972

- de economische groei en het milieu
- effecten van energieverbruik op het milieu en effecten van beperkingen t.b.v. het milieu op de kosten en de beschikbaarheid van energie
- om het konflikt energieverbruik-milieu op te lossen: op te richten instituten en technologische veranderingen

S.L. Kwee, J.S.R. Mullender ed.

Growing against ourselves (250 blz)

Sijthoff

Leiden, 1972

- identifikatie van problemen van het verbruik van elektrische energie voor het milieu
- technische informatie o.a. over milieuproblemen specifiek voor de produktie van kernenergie
- energiepolitiek in: USA, UK, Frankrijk en Polen
- toekomstige strategieën en benaderingen: een mogelijke politiek voor Amerika; systematische analyse van energie-milieu planning

J.W. Gofman, A.R. Tamplin

Poisoned power (370 blz)

The New American Library, Inc.

New York, 1971

- werking van een kerncentrale
- biologische stralingsschade
- alternatieven voor kernenergie
- wat kunnen de burgers doen?
- naar een systeem van "tegenovergestelde" wetenschappelijke informatie

Nuclear Proliferation problems (310 blz)

Stockholm International Peace Research Institute

Almquist & Wiksell

Stockholm, 1974

Vijf jaar na het tot stand komen van het verdrag tegen de verspreiding van kernwapens (Non Proliferation Treaty: NPT) wordt in maart 1975 in Geneve een zgn. Review Conference gehouden om de ontwikkelingen van de afgelopen vijf jaar te eva-

lueren en om, zo mogelijk, afspraken te maken voor de toekomst. In dit boek: problemen die waarschijnlijk aan de orde komen, en voorstellen voor die konferentie.

- nukleaire technologie
- NPT voorzorgsmaatregelen
- samenwerking bij vreedzame toepassing van kernenergie
- veiligheidsproblemen voor staten die geen kernwapens bezitten

M. Willrich, T.B. Taylor

Nuclear theft: risks and safeguards (250 blz)

Ballinger Publishing Company

Cambridge, Massachusset , 1974

Kernenergie wordt steeds meer toegepast zodat steeds meer splijtbaar materiaal in gebruik komt dat gestolen kan worden. Er is niet veel materiaal nodig om een bom te maken of om wijdverspreide vervuiling te veroorzaken. Bovendien is het niet moeilijk een wapen te maken; nog gemakkelijker is het een stralingswapen te maken. Deze wapens zouden door een kleine groep mensen gebruikt kunnen worden om een grote groep onder druk te zetten. Veiligheidsmaatregelen zijn dan ook nodig. De schrijvers hebben de bestaande veiligheidsmaatregelen bestudeerd en gekonstateerd dat die niet voldoende zijn. Politici op het gebied van energiebeleid zijn zich vaag bewust van het probleem. Willrich & Taylor stellen methoden voor om dit probleem te hanteren, inclusief een overheidsinstantie met alleenverantwoordelijkheid voor de beveiliging van splijtbaar materiaal en een specifiek beveiligingssysteem voor elk van de cycli die het splijtbare materiaal doorloopt; van de kosten van deze beveiliging geven zij een evaluatie.

D.S. Halacy jr.

The coming age of solar energy (Revised Edition) (230 blz)

Harper & Row Publishers

New York, Evanston, San Francisco, London, 1973

- vervuiling; uitputting van energiebronnen
- de zon
- pioniers in de toepassing van zonneenergie
- toepassing van zonneenergie, nu en in de toekomst
- toepassing van zonneenergie voor ruimtevaartuigen
- fotochemie
- elektrische energie van de zon
- zonnekrachtcentrale in een baan om de aarde
- thermische energie uit de zee

C.W.J. van Koppen

Toepassingsmogelijkheden van zonneënergie voor huisverwarming en warmtevoorziening onder Nederlandse omstandigheden (30 blz)

Technische Hogeschool Eindhoven, Afdeling Werktuigbouwkunde, Vakgroep warmte-, proces- en stromingstechniek, Groep warmtetechniek, Rapport WPS3-73.08.R183, 1973

- zonnestraling in Nederland
- de kollektoren
- de warmtebehoefte van een doorsnee eensgezinswoning
- zonneënergie voor huisverwarming
- enkele technische aspecten van de installatie
- eerste inventarisatie van punten van nader onderzoek

Windkrachtcentrales op de Noordzee (25 blz)

Rapport van de werkgroep Windenergie van de Industriële Raad voor de Oceanologie. Sekretriaat: Florapark 11, Haalem (023-315050), 1974

Na een kort historisch overzicht van wat zich aan toepassingen en ontwikkelingen van windturbines heeft voltrokken, wordt ingegaan op de mogelijkheden die het benutten van windenergie in de toekomst zou kunnen bieden, in het bijzonder bij windkrachtcentrales op de Noordzee. Gekonkludeerd wordt, dat dit zodanige perspectieven biedt, dat uitvoering van een onderzoek- en ontwikkelingsprogramma gerechtvaardigd is. Met de bouw van de centrales op zee wordt verwacht in 1983 begonnen te kunnen worden.

E. Gaul

Atomenergie oder ein Weg aus der Krise? (125 blz)

Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH

Reinbek bei Hamburg, 1974

- de kernsplijting
- de psychologie van de kernfysici
- ioniserende straling en de menselijke gezondheid
- wie hebben het meeste belang bij het gebruik van kernenergie en hoe bereiken zij hun doel?
- milieuschade
- ongelukken in geval van oorlog en sabotage
- de wetgeving m.b.t. kernenergie
- risico's en aansprakelijkheid

H. Stroh

Friedlich in die Katastrophe (475 blz)

Association GmbH

Hamburg, 1973

- werking van de verschillende kerncentrales
- risico's van het gebruik van kernenergie (komputersimulaties)
- alternatieven
- de bouw van kerncentrales, gezien in het kader van de economische groei
- is kernenergie economisch
- wie beslist er welk beleid er wordt gevoerd en wat is daarbij de (on-)macht van de burger?

Olie op de golven (120 blz)

Rapport van de werkgroep van de Studiestichting voor Radicale Politieke Vernieuwing bestaande uit:

B. Edel, F. Goudzwaard, J. van der Heide, L. Jansen, W. Riedijk.

Een Wereldvenster Publikatie, 1974

- de huidige situatie
  - de voorraden
  - elektriciteit
  - energieverbruik
- toekomstverwachtingen en - mogelijkheden
- de noodzaak tot beheersing
  - wat zijn de problemen?
  - een raamoplossing
- naar een radikaal energiebeleid
  - aangrijpingspunten en instrumenten
  - konkrete voorstellen
- haalbaarheid, gesprekken met politici

H. Ramaer

De dans om het nukleaire kalf (135 blz)

Uitgeverij Ram

Rotterdam, 1974

Beschrijft het Nederlandse kernenergiebeleid sinds 1939. Daarbij staat centraal de relatie tussen de overheid en de toegepast- wetenschappelijke onderzoeksinstituten, de elektriciteitsmaatschappijen en het bedrijfsleven

R. van Duyn

Energieboekje (110 blz)

Uitgeverij Bert Bakker

's Gravenhage, 1972

- de energiekrisis en de oplossing daarvan door een alternatieve technologie
- gesprek met kernfysici van het Reactorcentrum Nederland in Petten
- explosie van de atoomreactor te Borsele
- de snelle natriumgekoelde kweekreactor bij Kalkar
- wanneer wordt "Dodewaard" definitief gesloten?
- gesprek met de directeur van Gulf
- gesprek met Ir. Daey Ouwens en Prof. J.D. Fast van de TH te Eindhoven
- het witte molenplan
- interview met G.A. Sanders, directeur van het elektriciteitsbedrijf te Dongen

Kernvragen over de Snelle Kweekreactor

Symposium T.H. Delft, november 1975

(symposiumbureau, Kanaalweg 2<sup>b</sup>, Delft)

In deze symposiummap komen zowel voor- als tegenstanders van de Snelle Kweekreactor aan het woord.

De volgende aspecten komen aan de orde:

- techniek van de snelle kweekreactor
- gezondheid en milieu
- economie
- maatschappij en politiek

P. Boskma e.a.

Kernenergie in discussie (200 blz)

Boerderijcahier 7502

T.H. Twenthe, De Boerderij, Postbus 217, Enschede.

Het rapport is primair een reactie op de risico-evaluaties van de Samenwerkende Elektriciteitsbedrijven, van de Gezondheidsraad en van de Kommissie Reactorveiligheid. Deze zijn uitgebracht in september '75 op verzoek van de regering. De opzet van dit rapport is echter breder.

In het eerste gedeelte komen algemene aspecten aan de orde als:

- energiebeleid
- volksgezondheid en milieu
- verspreiding van kernwapens

Het tweede gedeelte bespreekt de omvang, de lange termijn gevolgen, de maatschappelijke ontreddeering en de mogelijke oorzaken van ongelukken met kerncentrales.

Dosisresponskurve: lijn die aangeeft wat het effect van een bepaalde stof is bij bepaalde concentraties

Dosistempo: regelmaat waarmee men met een bepaalde hoeveelheid stof besmet wordt

Drosophila: fruitvliegje

Elektriciteitsproduktievermogen: maat voor de hoeveelheid elektrische energie die geproduceerd kan worden

Elektromagnetische straling: golfverschijnsel van elektriciteit en magnetisme, hiertoe behoren het licht, radiogolven enz.

Embryogenese: het ontstaan van een ongeboren vrucht

Empirisch bewijsmateriaal: bewijs dat berust op feiten

Emulsie: kleine vaste deeltjes in een vloeistof

Energie-intensieve industrie: industrie die in verhouding veel energie verbruikt

Epidemisch karakter: wanneer het grote groepen betreft

Erg/gram: maat voor de hoeveelheid energie die een voorwerp opneemt

Eskalatie: snelle opeenstapeling

Estuarium: mondingsgebied van een rivier

Eutektisch mengsel: mengsel van twee (of meer) stoffen, die niet meer door verhitten te scheiden is in de afzonderlijke stoffen

Exitatie: aanslaan

Exkretie: uitscheiding van afvalstoofen

Exogene faktor: beïnvloeding van buitenaf

Expressie van een gen: hoe het erfelijk materiaal bepaalt hoe het levend organisme is

Extremistische groeeping: groep die door buitengewone methoden haar zin probeert te krijgen

Extraktie: zuiveren van een stof in oplossing door het te laten overgaan in een andere vloeistof, zodat verontreinigingen achterblijven

Extraktie-kontraktors: apparaat dat een stof d.m.v. extraktie ophoopt

Fagocyt: blaasje waarin een door een cel opgenomen deeltje wordt verpakt

Fall-out: radio-actieve neerslag t.g.v. een radio-actieve bron (Eng.)

Fenotype: verschijningsvorm van een organisme

Fluktueren: wisselen

Foetus: ongeboren vrucht

Fossiele brandstoffen: brandstoffen die lang geleden zijn ontstaan door verkoling van organismen, bijv. steenkool, gas

Fotosynthese: het maken van brandstoffen door gebruik van licht (in planten)

Frekwentie: snelheid waarmee iets wisselt

Fysische processen: het natuurkundig verloop van iets

Geavanceerd: zeer modern

Dit gebeurt deels aan de hand van een voorbeeld: een ongeluk met een 1000 MWe centrale op de Maasvlakte.

Verder wordt nog het probleem van radioactief afval besproken.

D.E. Earl

Forest energy and economic development (128 blz)

Clarendon Press

Oxford, 1975

De schrijver bepleit het gebruik van energiebronnen, die steeds opnieuw kunnen worden gebruikt. In het boek gaat het dan over het gebruik van de energie die opgeslagen ligt in bossen en wouden.

Handbook of homemade power (395 blz)

The staff of The Mother Earth News

Bantam Books Inc.

New York, 1974

Een handboek met praktische informatie over hoe men zelfvoorzienend kan worden wat betreft energie.

Interimrapport van de Landelijke Stuurgroep Energie Onderzoek (58 blz)

Staatsuitgeverij

's-Gravenhage, 1975

In dit rapport komt aan de orde:

- energieverbruik en -productie in de toekomst
- energieonderzoek
- uitgangspunten, doelstellingen, criteria en stand van zaken van het Nederlandse onderzoeksprogramma
- voorstellen voor onderzoek en evaluatie
- financieringsstructuur en voorstellen voor de organisatie van het energieonderzoek

I. Illich

Energieverbruik en maatschappelijke tegenstellingen (80 blz)

Het Wereldvenster

Baarn, 1973

In het boek gaat het over het verband tussen energieverbruik enerzijds en de sociale relaties en rechtvaardigheid anderzijds.

Appendix C    WOORDEN- EN BEGRIPPENLIJST

- Aangeslagen toestand:    toestand van hogere energie waarin een molecuul of atoom door absorptie van energie is gekomen
- Absolute prioriteit:    van het allergrootste belang, heeft voorrang
- Absorberen:    opnemen
- Aerosol:    kleine vloeistofdruppeltjes in een gas
- Akkumuleren:    ophopen
- Aktiniden:    bepaalde groep chemische elementen, waarvan aktinium de eerste is
- Aleukemie:    leukemie waarbij het beenmerg verandert en het aantal witte bloedlichaampjes gelijk blijft
- Anaeroob:    zonder zuurstof
- Anionenwisselaar:    stof waarmee men verschillende geladen deeltjes van elkaar kan scheiden
- Anti-regiem oorlog:    oorlog, gevoerd tegen de aan de macht zijnde groep binnen een staat
- Anti-these:    tegenstelling
- Biologische eliminatie:    verwijdering uit levende systemen
- Bombe-grade Plutonium:    Plutonium geschikt om atoombommen van te maken
- Botulisme:    watervergiftiging veroorzaakt door een bacterie
- Bronchusboom:    luchtpijp en zijn vertakkingen
- Chromatide:    deel van een chromosoom
- Chromosoom:    dat deel van de celkern wat het erfelijke materiaal bevat (DNA)
- Civiel:    niet militair
- CO:    koolmonoxide
- CO<sub>2</sub>:    koolzuurgas
- Curie:    maat voor de hoeveelheid radioactiviteit, 1 Curie =  $3,7 \times 10^{10}$  desintegraties per seconde
- Cysteïne:    aminozuur, bouwsteen van eiwitten
- Decennium:    periode van 10 jaar
- Decentralisatie:    het verdelen in kleine groepjes her en der verspreid
- Depositie:    opslag
- Desintegratie:    uiteenvallen
- Deuterium:    zwaar waterstof
- Development:    ontwikkeling (Eng.)
- Diffunderen:    door een ruimte verspreiden
- Dimeer:    stof opgebouwd uit twee eenheden
- Dissociëren:    splitsen
- DNA:    het erfelijk materiaal
- DNA-replikatie:    kopiëren van het erfelijk materiaal in de cel

Gedifferentieerde cellen: verschillende cellen van één organisme met verschillende functies bijv. lever- en hersencellen

Geïntegreerd: één geheel

Gehalogeneerde pyrimidines: organische stoffen die veel lijken op door organismen gebruikte stoffen

Gen: dat deel van een chromosoom wat de structuur van een eiwit bepaalt

Genetisch: op de erfelijkheid betrekking hebbend

Genetische mutatie: verandering van erfelijk materiaal

Genoom: geheel van erfelijke factoren in een haploïde cel

Geometrisch: meetkundig

Gepulseerde kolom: kolom die niet konstant doorstroomt maar in golven

Getijdenenergie: Energie opgewekt door de beweging van eb en vloed

Glasmatrix: hoeveelheid glas waarin iets wordt ingesmolten

Glutathion: belangrijke katalysator bij biologische processen

Gonaden: geslachtsklieren

Gradueel: erg weinig

Halogenen: bepaalde groep chemische elementen, fluor, chloor, broom, jood

Halveringstijd: tijd waarin de hoeveelheid radioactiviteit tot de helft is afgenomen

Haploïd: cel waarin het genetisch materiaal in enkelvoud voorkomt

Hermetisch gesloten: luchtdicht gesloten

Heterozygoot: wat betreft bepaalde eigenschappen niet raszuiver

HLW: hoogactief vloeibaar afval

HNO<sub>3</sub>: salpeterzuur

Homozygoot: wat betreft bepaalde eigenschappen wel raszuiver

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: zwavelzuur

Hypothese: veronderstelling

ICRP: International Commission on Radiation Protection, internationale kommissie die grenzen vaststelt m.b.t. op te lopen radioactieve besmetting

Infrarode straling: elektromagnetische straling die net na het zichtbare gebied komt, vnl. hitte ontwikkeling tot gevolg hebbend

Inherent: er aan gekoppeld, onlosmakelijk verbonden

Intensiteit van het verzet tegen een vestiging: in welke mate actiegroepen e.d. geprobeerd hebben de vestiging te voorkomen

Interstatelijke oorlog: oorlog tussen twee naties

Intoxikatie: vergiftiging

In utero: als ongeboren vrucht

Invangen van een neutron: atoomkern neemt een neutron in zijn kern op

Isotopen: atomen met gelijk aantal protonen (en elektronen) maar verschillend aantal neutronen

Joule: eenheid van energie

Kalcineren: omzetten in een kalkverbinding

Karcinogeen: kankerverwekkend of een kankerverwekker

Karcinogenese: ontstaan van kanker

Karcinoom: kankergezwel

Kcal: eenheid van energie

Klimatologische bezwaren: bezwaren wat betreft ongewilde verandering in het  
klimaat

Koating: een op een voorwerp aangebracht laag

Kollo: te vervoeren voorwerp

Koncentreringsapparatuur: machines om grote hoeveelheden afval in kompak-  
tere vorm af te scheiden

Kondensaat: uit gasvormig vloeibaar of vast geworden

Konfiguratie: toestand waarin een molekuul zich bevindt

Kongenitaal: aangeboren

Konventionele oorlog: oorlog zonder kernwapens

Konversie: omzetting

Kritische massa: massa radioactief materiaal die tenminste nodig is om een  
kernexplosie te krijgen

Kritisch orgaan: orgaan dat de grootste schade ondervindt

Kumulatieve dosis: totaal van de ontvangen straling na een bepaalde tijd

KW: eenheid van energie

Kwalitatief: op de inhoud betrekking hebbend

Kwantitatief: op de hoeveelheid betrekking hebbend

KWh: eenheid van vermogen

Landelijk koppelnet: landelijk doorverbonden elektriciteitsnet van de verschil-  
lende centrales

Latente periode: tijd die ligt tussen de besmetting en het uitbreken van de  
ziekte

Latente tumorcel: kankercel die nog niet woekert, maar die nog beginnen moet

Lethaal: dodelijk

Lethale temperatuur: temperatuur waarbij 50% van een soort overlijdt

Leukemie: kankerziekte van witte bloedcellen

Limiet: grens

Licht water: water waarvan het waterstofatoom geen neutronen bevat (= gewoon  
water)

Lineaire dosis-effekt relatie: als het effect altijd evenredig is met de dosis

Lokus: plaats van het gen op het chromosoom

Logaritmisch: afhankelijk van de logaritme

Longepitheel: weefsel waaruit de long is opgebouwd

Lymfomen: kwaadaardige lymfestelseltumor

Maligne ziekten: kwaadaardige ziekten

Maximale relatieve mortaliteit: stadium van een ziekte waarin de meeste slachtoffers vallen

Meiose: celdeling waarbij 4 haploïde cellen ontstaan

Metabolisme: geheel van stoffen en reacties die de spijsvertering vormen

Metallurgisch bedrijf: metaalverwerkend bedrijf

Methaan: belangrijkste deel van aardgas

MeV: eenheid van atomaire energie

Mikron: één miljoenste millimeter

Mixer-settler: scheidingsapparaat, dat werkt via het bezinken laten van het te scheiden materiaal

MPBB: Maximal Permissible Body Burden: Maximaal toegestane lichaamsbelasting

MPC: Maximal Permissible Concentration: Maximaal toegestane concentratie

MPD: Maximal Permissible Dose: Maximaal toegestane dosis

MPLPB: Maximal Permissible Lung Particle Burden: Maximaal toegestane belasting van de long met deeltjes

Mutant: genetisch veranderde nakomeling

MWe: eenheid van elektrische energie

NaOH: natriumhydroxide

Nasopharynx: neusholte

Neutron: ongeladen bouwsteen van een atoomkern

NPT: non-proliferatie verdrag, verdrag tegen de verspreiding van kernwapens

Nukleair: kernfysisch

Nuklinezuren: polymeren van nukleotiden, verbinding van meerdere afzonderlijke nukleotiden

Nukleotide: bouwsteen van het genetisch materiaal, bestaande uit een organische base (adenine(A), Guanine (G), Cytosine (C) of Thymine (T)) en een suiker (ribose) verestert met een fosfaatgroep

Nukleoside: nukleotide zonder fosfaatgroep

OESO: Organisatie voor Europese Samenwerking en Ontwikkeling

Ongepaard elektron: In een elektronenbaan passen altijd twee elektronen, waarvan de één "linksom tolt" en de ander "rechtsom", wat elkaar opheft. Als er niet genoeg elektronen zijn, blijft er ergens één over, d.i. het ongepaarde elektron

Organische fase: bij het extraheren gebruikte organisch oplosmiddel, waarin de te scheiden stof gemakkelijk oplost

Plasma: massa totaal geïoniseerde atomen

Plasma dichtheid: hoeveel atomen van het plasma per volume-eenheid

- Plasma instabiliteit: maat voor hoe snel de geïoniseerde atomen terugvallen tot gewone atomen
- Polemologie: wetenschap van oorlog en vrede
- Politionele tegenaktiviteiten: het met geweld tegenhouden van akties
- Potentiele energie: energie die als het ware in een voorwerp opgeslagen ligt
- Predispositie: aanleg
- Proliferatie problemen: problemen betreffende de verspreiding van kernwapens
- Proportioneel: evenredig
- Provoceren: uitdagen
- Rad: Radiation Absorbed Dose: eenheid voor de absorptie van ioniserende straling
- Radiologisch werker: werkers, die met ioniserende straling gevende voorwerpen e.d. werken (b.v. Röntgenstraling)
- Raffinaatstroom: het afscheiden en verder te verwerken ruwe produkt in oplossing
- Ratificeren: goedkeuren
- RBE: Relatief Biologisch Effekt, d.w.z. wat de straling doet bij het organisme
- Recidiverend: terughoudend
- Recirkulatie: opnieuw doorspoelen met gebruikt spoeloplossing
- Recyclen: het opnieuw gebruiken van afvalstoffen
- Rem: Röntgen Equivalent Man: hoeveelheid straling die hetzelfde effect heeft als 1 rad Röntgenstraling
- Resorberen: opname van stoffen door het lichaam
- Retentie: vertraging
- Risiko: gevaarlijke kans
- RIZA: Rijks-Instituut voor de Zuivering van Afvalwater
- Sarkoma: kwaadaardig gezwel
- Silikagel: droogmiddel
- Souvereine nationale staten: landen die niet in één of andere militaire of sociaal economisch verdrag zitten
- Somatisch: verschijning van een ziektebeeld
- Somatische aandoeningen: ziektes
- Sulfhidryolgroep: biologisch actieve zwavelgroep
- Sympatisanten: mensen die welwillend tegenover een bepaald iets staan
- Synergetische relatie: eenduidige realtie, elkaar versterkend
- Technologie: door de wetenschap ontwikkelde en beheerste techniek en kennis over één of ander proces
- Temperatuurgradient: een geleidelijke temperatuursovergang in een stof bijv. water
- Ternaire splijting: splijting waarbij de kern uiteenvalt in drie stukken
- Thermisch evenwicht: toestand waarbij de temperaturen met elkaar in evenwicht zijn

Thermisch neutron: neutron met een bepaalde energie

Thermische reaktors: kernreaktor die geen brandstof maakt

Thermische vervuiling: verstoring van het natuurlijk evenwicht door warmte toe te voegen (of te onttrekken)

Toxinen: vergiften

Tracheon: luchtpijp

Transuranen: elementen zwaarder dan uranium

Trisomie: toestand waarbij i.p.v. het normale geval van twee chromosomen per cel er nu drie voorkomen

Tritium: watersof, waarvan de kern 2 neutronen bevat

Variaties: genetische verschillen tussen nakomelingen van één stel ouders

Verdubbelingsdosis: dosis waarbij de spontane mutatiefrekwentie twee keer zo groot wordt

Vermenigvuldigingsfaktor: faktor die het verband geeft tussen verbruikte en nieuw gevormde brandstof

Vermogensdichtheid: maat voor de hoeveelheid energie die er per vierkante meter vrijkomt

Verrijkingsgraad: maat voor de verhoging van het aandeel splijtbaar materiaal, uitgedrukt in %

Versplijtingsgraad: maat voor de afname van het splijtbaar materiaal in de nukleaire brandstof, uitgedrukt in MWd/ton

Vluchtig-arbeidsmedium: gebruikt oplosmiddel dat snel verdampt

Waardepatroon van een samenleving: algemeen aanvaarde regels waarop een maatschappij is gebaseerd

Warmtestroomdichtheid: maat voor de hoeveelheid warmte die ergens doorstroomt

Waterig proces: proces dat in water plaatsvindt

Zwaar water: water dat i.p.v. waterstof zonder neutronen deuterium bevat

Zwakke- $\beta$ -emitter: stof die  $\beta$ -straling met lage energie uitzendt

Zygote: bevruchte eicel

## E R R A T A

- pag. 12, r. 14 v.b.: "Heruiles" moet zijn "Hercules"
- pag. 15, r. 2 v.o.: "1/8" moet zijn "1/16"
- pag. 23, r. 4 v.o.: "als" wordt "al"
- pag. 33, in tabel 1: halfwaardetijd van Sr-90 moet zijn 29 jaar en van Co-60  
5,3 jaar
- pag. 37, r. 15 v.b.: "releatie" moet zijn "relatie"
- pag. 39, r. 15 v.o.: "maifesteren" moet zijn "manifesteren"
- pag. 39, r. 8 v.o.: "selketeren" moet zijn "selekteren"
- pag. 40, r. 9 v.b.: "waarmeen" moet zijn "waarmee"
- pag. 40, r. 21 v.o.: "het het" moet zijn "het"
- pag. 40, r. 18 v.o.: "beïnvloeoding" moet zijn "beïnvloeding"
- pag. 44, r. 17 v.b.: "hoofdstuk 8" wordt "hoofdstuk 7"
- pag. 48, r. 11 v.b.: "extrktiemiddel" moet zijn "extraktiemiddel"
- pag. 48, in tabel 2: "Aktiviteiten 30 dagen na" wordt "Aktiviteiten 150 dagen na"
- pag. 76, r. 6 v.o.: "herïne" moet zijn "heroïne"
- pag. 143, r. 3 v.o.: "kernenrgiebeleid" moet zijn "kernenergiebeleid"
- pag. 152, r. 3 v.b.: "watersof" moet zijn "waterstof"



# Kern-energie?

me over op kernenergie

hopsmensen

AFVALWATER

overzicht van problemen  
gevolgen kerncentrale in  
eemsmondgebied  
invloed van straling op  
organisme

stidit

glonings 1976