

1EC  
B120

# **STRALING**

---

## **en radioactiviteit**

---

### **TSJERNOBYL 1986**



**Vragen en antwoorden**

---

**op een rij gezet door TNO**

---

# **STRALING**

## **en radioactiviteit**

eerste druk mei 1986  
tweede bijgewerkte druk mei 1986

© 1986 Radiobiologisch Instituut T.N.O., Rijswijk  
ISBN 90 330 1502 1/CIP  
UGI 200

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

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

Zetwerk en lithografie: Migg bv, Sneek  
Omslag: Wim de Vries, Leeuwarden  
Druk: Tulp bv, Zwolle  
Bindwerk: Sikkens bv, Deventer

# **STRALING**

---

## **en radioactiviteit**

---

### **TSJERNOBYL 1986**

Vragen en antwoorden  
op een rij gezet  
door TNO.

auteurs:

Prof. dr. D.W. van Bekkum  
Prof. dr. G.W. Barendsen  
Dr. J.J. Broerse  
Dr. A.F. Hermens  
Dr. ir. H.B. Kal

**Friese Pers Boekerij bv**  
Drachten/Leeuwarden

# Inhoud

Pagina

<i>Voorwoord</i>	8
1 <i>Tsjernobyl van dag tot dag</i>	10
2 <i>Kernenergiecentrales</i>	15
Wat is kernsplijting?	
Welke typen kerncentrales zijn er?	
Wat is een melt-down?	
Welke ernstige ongelukken zijn er met en in kerncentrales gebeurd?	
3 <i>Radioactiviteit en stralingssoorten</i>	28
Wanneer werd straling ontdekt?	
Welke deeltjes zijn aanwezig in een atoom?	
Wat bepaalt de stabiliteit van een atoomkern?	
Wat is radioactiviteit en hoe verdwijnt het?	
Wat is straling eigenlijk?	
Waarvoor wordt straling gebruikt?	
Krijgen alle delen van het lichaam dezelfde hoeveelheid straling?	
4 <i>Stralingsgrootheden en eenheden</i>	34
Hoe wordt straling gemeten?	
Hoeveel energie wordt in het weefsel afgegeven?	
Zijn alle stralingssoorten even gevaarlijk?	
Wat is het risico als slechts één orgaan wordt bestraald?	
5 <i>Stralingsbelasting van de mens</i>	38
Wat zijn de dosislimieten voor stralingswerkers en individuele leden van de bevolking?	
Is de leeftijd belangrijk voor berekening van het dosisequivalent?	
Wat is het dosisequivalent bij opname van radioactiviteit?	
6 <i>Het ontstaan van stralings schade bij de mens</i>	44

Hoe kunnen levende wezens blijven voortbestaan als het DNA in hun cellen zo gemakkelijk en vaak schade oploopt?

- 7 *Directe gevolgen van zeer grote doses straling* 47
- Wat is stralingsziekte?
  - Wat zijn de gevolgen van nog hogere doses straling?
  - Is behandeling van stralingsziekte mogelijk?
  - Wat gebeurt er als men zo'n grote dosis straling niet ineens oploopt, maar in de loop van een paar dagen of langer?
  - Zijn er behalve stralingsziekte nog andere vormen van acute stralingsschade van belang?
  - Wanneer wordt het noodzakelijk mensen te evacueren?
  - Zijn er in ons land voorzieningen getroffen voor de behandeling van stralingsslachtoffers?
  - Kan straling steriliteit veroorzaken?
- 8 *Zwangere vrouwen en het ongeboren kind* 58
- Bij alle discussies over stralingsgevaaren en maatregelen ter bescherming van de bevolking wordt bijzondere aandacht gegeven aan de risico's voor het ongeboren kind (de vrucht). Wat zijn daarvoor de redenen?
  - Is er reden voor zwangere vrouwen om te vrezen dat de straling van de afgelopen weken in Nederland abortus veroorzaakt?
- 9 *Straling en kanker* 62
- Op lange termijn kan straling kanker veroorzaken. Hoe komt men aan dit gegeven?
  - Wat is kanker?
  - Veroorzaakt straling een bepaald type kanker?
  - Hoe groot is het risico dat er door bestraling kanker ontstaat?
  - Hoe kan men dan spreken van het risico voor kanker bij zulke kleine doses straling?
- 10 *Wat zijn de gevolgen voor het nageslacht van ouders die zijn blootgesteld aan lage doses straling?* 65

11	<i>Natuurlijke straling en radioactiviteit</i>	67
	Is natuurlijke straling overal?	
	Hoe groot zijn de doses van natuurlijke stralingsbronnen?	
	Hoe komt natuurlijke radioactiviteit in het lichaam?	
	Hoe groot is de totale dosis ontvangen door de Nederlandse bevolking?	
	Is de natuurlijke straling gevaarlijk?	
	Welke gevolgen zouden door natuurlijke straling kunnen optreden?	
	Hoeveel risico brengt een tijdelijke verhoging van de stralingsdosis door onnatuurlijke oorzaken mee?	
	Kan een schatting worden gemaakt van de mogelijke wereldwijde effecten van het ongeluk met de kerncentrale in Tsjernobyl?	
	Wat betekent een verhoging van de kans op kanker voor de aantallen gevallen van kanker?	
12	<i>Stralingsbescherming en dosislimieten</i>	75
	Hoe komen maatregelen tot stand ten behoeve van de stralingsbescherming?	
	Op welke gegevens zijn de risicoberekeningen gebaseerd?	
	Hoe komen dosislimieten tot stand?	
	Wat zijn de algemene uitgangspunten voor de stralingsbescherming?	
	Gelden de dosislimieten ook voor ongevallen?	
	Bij welke hoeveelheden radioactiviteit in drinkwater en voedsel worden maatregelen genomen?	
	Is straling gevaarlijker dan alle andere schadelijke stoffen?	
	Kan straling de effecten van schadelijke chemische stoffen vergroten?	
13	<i>Overheidsmaatregelen en voorlichting</i>	83
	<i>Index</i>	87

# Voorwoord

Straling en radioactiviteit vragen sterk de aandacht door de ramp in Tsjernobyl, waar in de vroege morgen van zaterdag 26 april 1986 een kernenergiecentrale defect raakte, in brand vloog en een grote hoeveelheid radioactiviteit in de omgeving verspreidde. De radioactieve wolken bleven niet hangen in de directe omgeving, ze werden met wisselende windrichtingen tot ver over de grenzen gevoerd. In Oost-Europese landen, Scandinavië en vervolgens ook in West-Europa werden verhoogde hoeveelheden radioactiviteit in de lucht gemeten. In de daarop volgende dagen nam de radioactiviteit ook toe op het land, in het oppervlaktewater, in melk en in diverse groenten.

De nationale overheden, ook de Nederlandse, kondigden allerlei maatregelen af, die ten doel hadden te voorkomen dat de inwoners schade zouden oplopen. Die maatregelen verschilden van land tot land, ondermeer omdat de radioactiviteit in ieder land anders was. Tevens bleek dat niet alle landen dezelfde normen hanteren. Daar kwam nog bij dat de gemeten activiteiten in de diverse landen in verschillende grootheden worden uitgedrukt, zodat het vaak ondoenlijk was om de gegevens te vergelijken. Tenslotte had men de handicap dat de uitwisseling van gegevens tussen de landen onderling, en de informatie die vanuit de Sowjet Unie beschikbaar kwam in de eerste weken zeer gebrekkig was. Al die factoren hebben de burgers in verwarring gebracht en veel onrust veroorzaakt. Dat bleek uit de vele vragen die niet alleen tot het informatiecentrum van de overheid werden gericht, maar ook tot TNO, de kankerinstututen en huisartsen.

Redenen genoeg om een aantal feiten en gegevens over straling en de gevolgen daarvan samen te vatten. Wij hebben geprobeerd deze informatie voor een breed publiek toegankelijk te maken. Met dat doel voor ogen is bijvoorbeeld de stralingskwantiteit in rem en becquerel uitgedrukt, omdat die eenheden ook door de media en de overheidsinstanties het meest werden gebruikt.



Het Radiobiologisch Instituut TNO te Rijswijk werd opgericht in 1956, een tijd waarin er onrust heerste over de dreigende gevaren van radioactieve fall-out veroorzaakt door de toenemende bovengrondse proefexplosies van atoomwapens. Het instituut heeft sindsdien ten behoeve van de overheid en de Nederlandse bevolking onderzoek verricht en gegevens verzameld over straling. Nu, ruim 25 jaar later is er over de werking en de gevolgen van straling veel bekend. Ook is het mogelijk geworden zeer kleine hoeveelheden straling nauwkeurig te meten. Met de informatie die voorhanden is kan veel onzekerheid worden weggenomen. Wij hebben geprobeerd om met de presentatie van feiten en getallen daaraan een bijdrage te leveren.

Rijswijk, 12 mei 1986

De samenstellers

# 1. Tsjernobyl van dag tot dag

*Vrijdag 25 april 23.23 uur Nederlandse tijd.* In de kerncentrale in Tsjernobyl, 85 km van Kiev, gebeurt een ongeluk waarbij radioactiviteit in de atmosfeer terecht komt. Het tijdstip wordt pas op 6 mei bekend gemaakt door vice-premier Sjtsjerbina.

*Maandag 28 april.* In Zweden wordt een radioactiviteit in de lucht gemeten die 2 tot 5 maal zo hoog is als normaal. De aanwezigheid van de radioactieve isotopen jodium-131 en cesium-137 duidt er op dat de verhoging te wijten is aan een ongeval in een kernenergiecentrale. Eerst werd gedacht aan een lek in een Zweedse centrale. Pas na uren, en een aanvankelijke Russische ontkenning, werd duidelijk dat de oorzaak in Rusland gezocht moest worden en wel in Tsjernobyl. Het persbureau Tass meldt dat er slachtoffers zijn gevallen en dat een staatscommissie voor onderzoek wordt gevormd.

*Dinsdag 29 april.* Tass meldt dat er twee doden zijn en dat er straling is vrijgekomen. In het Russische tv-journaal wordt in een communiqué gezegd dat de straling afkomstig van de reactor nummer 4 is 'gestabiliseerd' en scherp in de gaten wordt gehouden. De drie andere centrales zijn op non-actief gesteld en verkeren in goede staat. De straling in de buurt van de centrale bedraagt gemiddeld 15mrem per uur, aldus een hoge functionaris op een persconferentie op 6 mei. Veertigduizend mensen uit drie nabijgelegen woonoorden worden geëvacueerd. Een regeringscommissie onder leiding van vice-premier B. Sjtsjerbina functioneert ter plekke. In Polen beperkt de regering de verkoop van melk en men stelt jodiumtabletten beschikbaar.

*Woensdag 30 april.* Een aantal Westeuropese landen biedt Rusland humanitaire en technische hulp aan. In veel landen wordt geprotesteerd tegen het zwijgen van Moskou over details van het ongeluk. Moskou meldt dat er twee doden zijn en dat er 197 mensen in het ziekenhuis zijn opgenomen, van wie er 49 weer

zijn ontslagen. In Hongarije, Joegoslavië, Italië, Zwitserland, België en Frankrijk wordt een verhoging van de radioactiviteit in de atmosfeer geconstateerd. In Scandinavië en Polen neemt de activiteit af. In Zweden is een invoerverbod ingesteld op voedsel uit Rusland. In Kiev houden Sovjet-wielrenners een extra selectiewedstrijd voor de Vredeskoers, de belangrijkste Oost-Europese etappewedstrijd voor wieleramateurs. In Nederland wordt een bestuurlijk coördinatiecentrum van de overheid in Leidschendam ingesteld.

*Donderdag 1 mei.* De viering van de eerste mei in plaatsen in de Oekraïne wordt uitgebreid op de Russische tv getoond. Moskou laat het IAEA (Internationaal Bureau voor Atoomenergie) in Wenen weten dat de brand is gedoofd, dat er geen radioactiviteit meer wordt uitgestoten en dat het stralingsniveau anderhalf tot tweemaal is gedaald (zonder overigens te zeggen hoe hoog het is geweest). Westerse diplomatieke bronnen in Rusland melden dat alle kernreactoren van het type in Tsjernobyl buiten bedrijf zijn gesteld (dit blijkt later onjuist te zijn). Een Russisch communiqué meldt dat er 18 ernstig gewonde slachtoffers zijn. Op het vliegveld in Moskou worden alle het land verlatende reizigers met geigertellers op radioactieve besmetting gecontroleerd. In West-Duitsland worden reizigers uit Rusland en binnenkomende treinen en vrachtwagens op besmetting gecontroleerd. Kinderen in Roemenië krijgen jodiumtabletten uitgereikt. De Britse regering besluit jonge kinderen en zwangere vrouwen van Britse diplomaten in Moskou en Warschau te evacueren. Denemarken kondigt een invoerverbod af op voedselproducten en kleding uit Oost-Europa.

*Vrijdag 2 mei.* In Nederland is de eerste verhoogde radioactiviteit in de lucht gemeten. De hoeveelheid radioactiviteit geeft geen aanleiding tot het nemen van maatregelen. In Tsjernobyl wordt vanuit helicopters lood, zand en het neutronen-absorberende element borium op de centrale neergelaten. Foto's van een Amerikaanse satelliet bevestigen dat er geen brand meer woedt in de reactor. Bij het centrum in het Ministerie komen achtduizend telefoontjes binnen met vragen over reizen naar het Oostblok, het slikken van jodiumtabletten en het buiten mogen spe-

len van kinderen. In Duitsland mag melk niet worden verkocht wanneer daarin per liter een activiteit van 500 becquerel of meer wordt aangetroffen. In sommige gedeelten van Beieren is 600 tot 900 becquerel per liter aangetroffen. De boeren wordt aangeraden de koeien binnen te houden.

*Zaterdag 3 mei.* Tass deelt mee dat de straling in het gebied rond de centrale aanzienlijk is afgenomen. Er zijn 49.000 mensen geëvacueerd en 25 mensen zijn er ernstig aan toe. In Nederland wordt een graasverbod voor melkvee ingevoerd. In watermonsters uit het IJsselmeer en de rivieren wordt alfa-straling waargenomen die twee tot driemaal en bèta-straling die vijf tot tien keer zo hoog is als normaal.

*Zondag 4 mei.* De Pravda berispt de westerse pers wegens sensationele berichtgeving en spreekt over sprookjes. Bij Eijsden aan de Maas wordt in het water een activiteit van 13.300 becquerel per m<sup>3</sup> gemeten, een verhoging van 80 maal.

*Maandag 5 mei.* Het graasverbod wordt goed nageleefd. Tegen enkele veehouders die hun koeien nog niet op stal hebben gezet, is proces-verbaal opgemaakt. In Moskou zijn twee deskundigen voor consultatie aangekomen, de directeur van het Internationale Atoombureau IAEA uit Wenen en een Amerikaanse specialist op het gebied van beenmergtransplantaties. Minister Braks gebiedt de vernietiging van schildklieren van geslachte dieren. (Meestal wordt de schildklier verwerkt in voer voor honden en katten en soms in gehakt voor menselijke consumptie).

*Dinsdag 6 mei.* Uit Rusland wordt gemeld dat de brand nog steeds niet is geblust en de uitstoot van radioactief materiaal in de atmosfeer nog doorgaat. In de Pravda wordt voor het eerst een verslag gegeven van de gebeurtenissen in en om de kerncentrale. Er wordt toegegeven dat de autoriteiten de ramp hebben onderschat. In Nederland is de lucht inmiddels praktisch vrij van extra radioactiviteit. Voor melk is een maximaal aanvaardbare grens van radioactiviteit vastgesteld van 500 becquerel per liter. In een advies van de Wereld Gezondheids Organi-

satie (WHO) uitgebracht in Kopenhagen, wordt gesteld dat de bevolking niet binnen hoeft te blijven, drinkwater gewoon gebruikt kan worden en inname van jodiumtabletten niet nodig is.

*Woensdag 7 mei.* De consumptie van verse spinazie wordt ontraden. Alle verse spinazie die op veilingen wordt aangevoerd, moet worden vernietigd. Dit is de derde maatregel die minister Braks invoert. Er wordt 225 ton spinazie doorgedraaid. Het graasverbod wordt 's avonds opgeheven.

*Donderdag 8 mei.* In de Pravda wordt meegedeeld dat extra treinen en vliegtuigen zijn ingezet om ongeruste inwoners van Kiev buiten de stad te brengen. In Salzburg worden alle sportevenementen in de open lucht verboden. Een groot aantal stadions en open-lucht zwembaden in West-Duitsland is tot nader order gesloten. De Vredeskoers gaat gewoon door, zij het dat nogal wat Westeuropese ploegen niet komen opdagen. Russische kranten melden dat de situatie in de kerncentrale nog steeds 'gecompliceerd en verontrustend' is. De Oekraïense premier Ljasko verklaart tegenover westerse journalisten dat de temperatuur binnen de centrale is gedaald tot 300 graden Celsius.

*Vrijdag 9 mei.* In een gezamenlijk communiqué van het Internationale Atoombureau en het Russische onderzoekscomité wordt meegedeeld dat de brand in de kerncentrale is gedoofd. Een melt-down van de reactor door de betonnen bodem is niet waarschijnlijk meer. Bij het blussen van de brand op 26 april hebben 204 brandweerlieden en personeelsleden van de kerncentrale een hoge stralingsdosis opgelopen. Achttien mensen zijn er slecht aan toe en sommigen zijn inmiddels behandeld met beenmerg van donoren. Er worden jodiumtabletten aan de bevolking verstrekt. De radioactiviteit is aan het afnemen. Er worden pogingen gedaan om de kernreactor in beton te gieten. Via tunnels wordt getracht een extra betonlaag onder de centrale aan te brengen. Volgens de verklaringen zijn er tot nu toe twee doden te betreuren. Het ministerie van Landbouw geeft het dringend advies melkvee niet op de uiterwaarden te laten grazen.

*Zaterdag 10 mei.* Er wordt bekend gemaakt dat in Rusland een derde slachtoffer is gevallen als gevolg van blootstelling aan een hoge dosis straling. De Sovjet-autoriteiten hebben laten weten bereid te zijn informatie over het ongeluk te verschaffen zodra die beschikbaar is. Zij zullen voortaan dagelijks cijfers geven over de radioactiviteit. Deze wordt gemeten op zeven plaatsen langs de westelijke grens van de Sovjet-Unie en een punt op 60 km van Tsjernobyl. Het kabinet heft het spinazieverbod op. Het informatiecentrum in Leidschendam wordt opgeheven.

*Zondag 11 mei.* De leden van de Europese Gemeenschap stellen een invoerverbod in op levensmiddelen uit de Oostbloklanden. In de loop van de dag wordt het verbod weer ingetrokken wegens onenigheid tussen de lidstaten onderling over de te hantieren normen.

*Maandag 12 mei.* Volgens Russische autoriteiten is het gevaar voor een melt-down van de reactor door de bodem geweken. De drie andere kerncentrales in Tsjernobyl zullen zo spoedig mogelijk weer in bedrijf worden gesteld als de veiligheidstoestand dit toelaat. In de Amerikaanse staat Oregon zijn sporen van jodium-131 en cesium-137 in melk aangetroffen. In Vancouver, Canada, is een lichte besmetting van een waterbekken geconstateerd. Uit Rusland wordt gemeld dat acht personen aan de gevolgen van het ongeluk in de centrale zijn overleden en dat er nog 35 in slechte conditie verkeren.

*Dinsdag 13 mei.* De Europese Gemeenschap is er in geslaagd te komen tot een invoerverbod van bepaalde levensmiddelen uit Oost-Europa. De maatregelen gelden tot het eind van mei. De EG heeft een lijst met adviezen opgesteld voor mensen die naar de Sovjet-Unie en Polen willen reizen. Uit Rusland wordt bericht dat 92.000 mensen zijn geëvacueerd.

## 2. Kernenergiecentrales

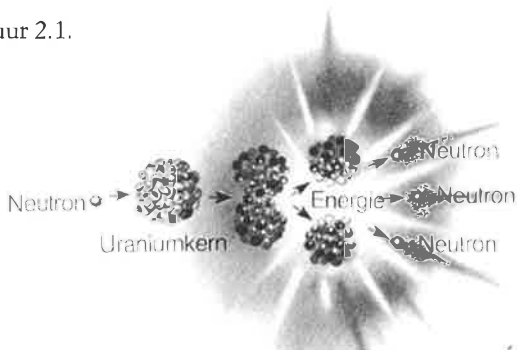
In dit hoofdstuk zal het proces van kernsplijting nader worden toegelicht en een aantal typen kernenergiecentrales (kerncentrales) worden beschreven. Er zal ook worden ingegaan op veiligheidsaspecten van kerncentrales, radioactieve neerslag (fall-out) na een ongeval in een centrale en het probleem hoe radioactief kernafval moet worden opgeslagen.

### WAT IS KERNSPLIJTING?

Het proces van kernsplijting wordt in kerncentrales gebruikt om elektriciteit op te wekken. Als brandstof wordt in de meeste kerncentrales uraan-235 gebruikt. Uraan komt als uraan-235 (0,7%) en uraan-238 (99,3%) in erts voor. Daarvan is uraan-238 niet splijtbaar en het uraan-235 wel.

Het uraan-235 heeft in zijn kern 92 protonen en 143 neutronen. Door nog één neutron aan de kern toe te voegen ontstaat een

Figuur 2.1.



*Door toevoegen van een neutron aan een uraankern ontstaat een nieuwe kern die in twee brokstukken en 3 neutronen uiteenvalt.*

*Overgenomen uit: 'Energie voor morgen'.*

nieuwe kern die zeer heftig gaat trillen en in twee brokstukken uiteenvalt (figuur 2.1). Deze brokstukken zijn in het algemeen niet stabiel en zullen via uitstoting van electronen een stabiel isotoop worden. Als tussenprodukten (splijtingsprodukten) ontstaan zo enkele honderden soorten radioactieve isotopen met verschillende halveringstijden, die kunnen uiteenlopen van minder dan een seconde tot tientallen jaren.

Bij de kernsplijting worden twee of drie neutronen gevormd. Deze neutronen hebben een zeer grote snelheid. Elk gevormd neutron kan op zijn beurt weer een uraankern splijten. Op deze wijze ontstaat een kettingreactie. Bij de kernsplijting komt energie vrij die benut wordt om water te verhitten en om te zetten in stoom. Deze stoom wordt net als in electriciteitscentrales die met kolen, gas of olie als brandstof worden gestookt, gebruikt om een turbine aan te drijven. Deze drijft een generator aan waarmee electriciteit wordt geproduceerd.

### *Energie*

De energie die bij splijting van één kilo uraan-235 vrijkomt is ongeveer 2,5 miljoen maal groter dan bij verbranding van 1 kilo kolen. Een kleine hoeveelheid uraan vertegenwoordigt dus een grote hoeveelheid energie. Voor electriciteitsopwekking is maar weinig uraan nodig. Er kan gemakkelijk een voorraad voor enkele jaren worden aangehouden; met steenkool is dit praktisch onmogelijk.

### *Regelstaven*

Omdat voor het in stand houden van de kettingreactie niet alle gevormde neutronen nodig zijn, wordt het benodigde aantal neutronen onder controle gehouden door middel van regelstaven. Deze staven zijn gemaakt van een materiaal, bijvoorbeeld cadmium of borium, dat gemakkelijk neutronen absorbeert.

### *Moderator*

Verder maakt men gebruik van een moderator om de snelheid van de gevormde neutronen te verkleinen. Dit is nodig omdat snelle neutronen weinig effectief zijn voor het teweeg brengen van kernsplijtingen. Door de moderator worden de snelle neutronen afgeremd; de langzame neutronen kunnen voor de vol-



Figuur 2.2



Uraanoxidepoeder



tablet  
20 mm lang



*Uraanoxidepoeder wordt tot een tablet geperst. Vele tabletten worden op elkaar gestapeld tot een staaf. Vele brandstofstaven worden tot een brandstofelement samengevoegd. Het totale aantal staven in een reactor bedraagt verscheidene tienduizenden.*

*Overgenomen uit: 'Energie voor morgen'.*

gende splijting van uraan-235 zorgen. De moderator kan bestaan uit gewoon water ( $H_2O$  is licht water), uit zwaar water (deuteriumoxyde,  $D_2O$ ) of uit grafiet.

### *Brandstofstaven*

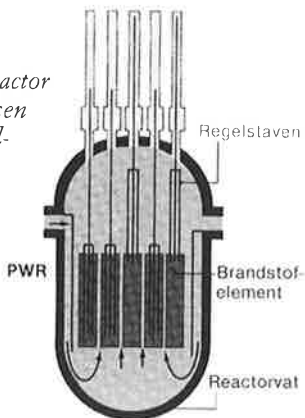
Het uraan wordt als uraanoxidepoeder in tabletten geperst van ca. 1 cm diameter en 1 à 2 cm hoog. Deze worden op elkaar gestapeld tot brandstofstaven, die weer worden samengevoegd tot een brandstofelement van ongeveer 4 meter lengte (figuur 2.2). Het totale aantal staven in een kernreactor bedraagt verscheidene tienduizenden. De brandstofelementen, moderator en regelstaven vormen de zogenaamde kernreactor (figuur 2.3). De combinatie van kernreactor en turbogenerator, met bijbehorende apparatuur en gebouwen, wordt een kernenergiecentrale of kerncentrale genoemd.

### *Verrijking.*

In een kerncentrale kan uraan met de natuurlijke isotopenverhouding (0,7% U-235, 99,3% U-238) of verrijkt uraan worden gebruikt. Verrijking wil zeggen dat het natuurlijk gehalte van

Figuur 2.3.

Het reactorvat van een drukwaterreactor bevat vele brandstofelementen. Tussen de brandstofstaven kunnen zich regelstaven bewegen. De brandstofelementen worden omgeven door de moderator, in dit geval water.



Overgenomen uit:  
'Energie uit atoomkernen'.

uraan-235 van 0,7% tot ongeveer 3% wordt verhoogd. Dit gebeurt in verrijkingfabrieken zoals in de Urenco-fabriek in Almelo.

## WELKE TYPEN KERNCENTRALES ZIJN ER?

Er zijn momenteel over de gehele wereld 374 kerncentrales in bedrijf voor electriciteitsproductie (zie tabel 2.1). Kerncentrales waarin de snelheid van de neutronen door de moderator wordt verlaagd kunnen op een groot aantal verschillende wijzen zijn samengesteld. Als uraan als brandstof wordt gebruikt (plutonium zou ook kunnen) kan men uraan met de natuurlijke isotopenverhouding nemen of uraan dat verrijkt is. Als moderator komen gewoon water, zwaar water, grafiet en beryllium in aanmerking. Als koelmiddel en transportmiddel voor de opgewekte warmte kan gewoon of zwaar water, maar ook gas of een andere vloeistof worden gebruikt.

### *Lichtwaterreactor.*

De vijf grote producenten van kerncentrales, Westinghouse, General Electric, Framatome, KWU en ASEA, propageren het type lichtwaterreactor. Dit zijn reactoren waarin de neutronen die ontstaan bij de kernsplijting gemodereerd worden door gewoon water (licht water). De centrales in Dodewaard en Borssele beho-

Tabel 2.1.

Aantal kerncentrales voor electriciteitsopwekking en het percentage van de totale geproduceerde electriciteit per land in 1985.\*

land	aantal centrales	%geleverde electriciteit
Argentinië	2	23
België	8	60
Brazilië	1	1
Bulgarije	4	32
Canada	16	12
Finland	4	38
Frankrijk	40	65
Groot Britannië	33	19
Hongarije	2	5
India	6	2
Italië	3	4
Japan	33	27
Joegoslavië	1	5
Nederland	2	6
Oost-Duitsland	5	12
Pakistan	1	2
Spanje	8	24
Rusland	50	11
Taiwan	6	59
Tsjechoslowakije	5	15
Verenigde Staten**	101	17
West-Duitsland	18	30
Zuid-Afrika	4	18
Zuid-Korea	4	18
Zweden	12	42
Zwitserland	5	34

\* bron: Newsweek, 12 May 1986.

\*\* per 28 april 1986.

ren tot dit type. De centrale in Tsjernobyl is een grafiet-gemodereerde reactor. In Canada is een type reactor ontwikkeld waarin natuurlijk uraan als brandstof en zwaar water als moderator wordt gebruikt. Het zwaar water is zowel koelmiddel als warmte-transportmiddel. Deze reactor wordt aangeduid met de naam Candu (*Canada, deuterium, uraan*).

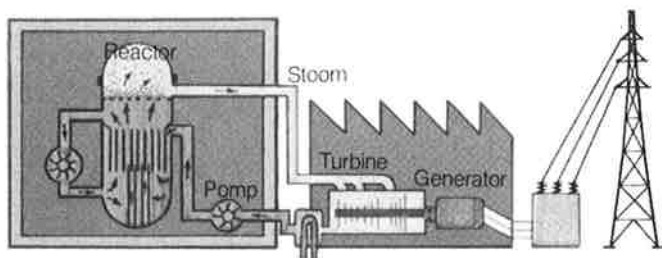
### *Kokend-waterreactor*

Van de lichtwaterreactoren bestaan er twee types, namelijk de reactor met kokend water zoals in Dodewaard, en de reactor met water onder druk, zoals in Borssele. Bij de kokend-waterreactor ontstaat stoom in het reactorvat, de reactor zelf is de stoomgenerator. Een pomp perst het water langs de staven waarin zich de brandstof bevindt. De gevormde stoom van hoge druk en temperatuur drijft een turbine aan. De stoom wordt daarna afgekoeld in een condensor en als water teruggepompt naar de reactor (figuur 2.4). Een kwart van de Westerse kerncentrales wordt gevormd door kokend-waterreactoren.

### *Drukwaterreactor*

In een drukwaterreactor staat het water onder zo grote druk (ca. 140 atmosfeer) dat koken niet kan optreden. Het hete water

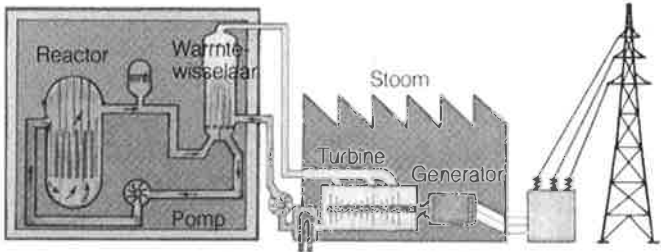
Figuur 2.4.



*Schema van een kokend-waterreactor. Bij de kokend-waterreactor ontstaat stoom in het reactorvat. De stoom drijft een turbine aan. De stoom wordt afgekoeld en als water teruggepompt naar de reactor.*

*Overgenomen uit: 'Energie voor morgen'.*

Figuur 2.5.



*Schema van een drukwaterreactor. De drukwaterreactor heeft twee verschillende warmtekringlopen. De reactor is met water gevuld. De druk is zo hoog dat het water niet kan koken. Het hete water draagt zijn warmte over aan de tweede kringloop waarin de stoomturbine is opgenomen.*

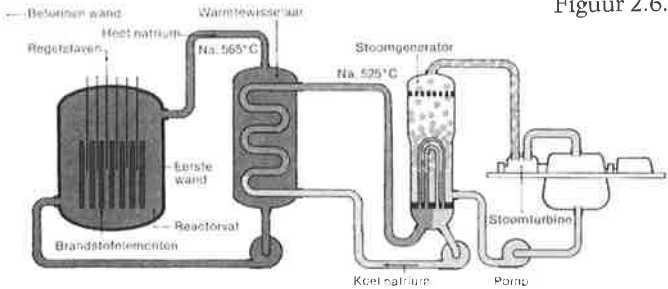
*Overgenomen uit: 'Energie voor morgen'.*

wordt van de reactorkern naar een warmtewisselaar geleid waar het water zijn warmte overdraagt aan water van een tweede kringloop. Daarin wordt de stoom gevormd die de turbine aandrijft. Het merendeel van de westerse kerncentrales bestaat uit dit type (figuur 2.5).

### *Kweekreactor*

In principe kan men een reactorkern zo construeren dat de neutronen die door splijting van de brandstof ontstaan een ander splijtbaar materiaal laten ontstaan, er wordt splijtstof gekweekt. Enige typen van deze kweekreactoren worden momenteel ontwikkeld en getest, zoals de West-Duitse kweekreactor in Kalkar (niet ver van de Nederlands-Duitse grens) en de Franse kweekreactor Phénix, die deel uitmaakt van het nucleaire centrum Marcoule aan de Rhône. In deze experimentele kweekreactoren wordt plutonium-239 als splijtstof gebruikt. De neutronen die bij splijting van plutonium-239 vrijkomen, worden door uraan-238 opgenomen waardoor nieuw plutonium-239 ontstaat. Uraan-238 is als een mantel rondom de reactorkern opgesteld. Voor elk plutoniumatoom dat in de reactorkern door splijting verdwijnt, ontstaat meer dan één nieuw plutoniumatoom in de reactormantel. Als koelmiddel wordt vloeibaar natrium gebruikt dat een uit-

Figuur 2.6.



*Schema van een natriumgekoelde kweekreactor. Het hete, radioactieve natrium uit de reactor staat warmte af aan natrium van een tweede kringloop. Dit niet-radioactieve natrium wordt gebruikt om water om te zetten in stoom.*

*Overgenomen uit: 'Energie uit atoomkernen'.*

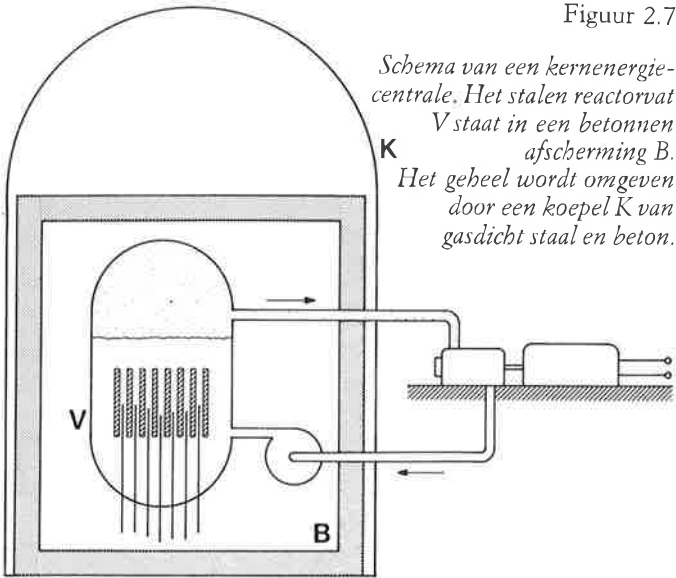
stekende warmtegeleider is. Een nadeel van natrium is dat het sterk radioactief wordt. Daarom hebben de reeds werkende prototypes twee natriumkringlopen. Het hete, radioactieve natrium staat via een warmtewisselaar warmte af aan natrium van een tweede kringloop. Dit laatste, niet radioactieve natrium, wordt gebruikt om water om te zetten in stoom (zie figuur 2.6).

In Engeland, Frankrijk en Rusland leveren kweekreactoren reeds electriciteit. Of zij werkelijk kweken, dus meer uraan-238 in plutonium omzetten dan zij aan splijtstof verbruiken, is nog niet bekend.

### *Veiligheid*

Bij het ontwerpen en bouwen van kerncentrales wordt veel aandacht besteed aan de veiligheid. In principe zijn in een kerncentrale de brandstof, regelstaven en moderator in een stalen reactorvat opgesloten en dit reactorvat staat weer in een betonnen afscherming. Het geheel wordt omsloten door een koepel van gasdicht staal en beton (zie figuur 2.7). Dankzij die voorzorg is bij het ongeluk in de kerncentrale van Three Mile Island bij Harrisburg in Amerika in 1979 de lozing van radioactiviteit beperkt gebleven. De kerncentrale in Harrisburg had een koepel van gasdicht staal en beton als extra omhulling om de kernreac-

Figuur 2.7



*Schema van een kernenergiecentrale. Het stalen reactorvat V staat in een betonnen afscherming B. Het geheel wordt omgeven door een koepel K van gasdicht staal en beton.*

tor, die in Tsjernobyl niet. Niet alle kerncentrales beschikken over een extra koepel. De 50-Mega Watt centrale in Dodewaard bijvoorbeeld heeft een dergelijke koepel niet. Er zijn echter voorzieningen aanwezig waardoor deze centrale aan dezelfde strenge veiligheidseisen voldoet als de 450-Mega Watt centrale in Borssele die wel een koepel heeft.\* In West-Europa ontbreekt bij meer dan 30 centrales de tweede beschermende omhulling.

#### WAT IS EEN MELT-DOWN?

De constructie van de huidige lichtwaterreactoren is zeer gecompliceerd. De belangrijkste oorzaak hiervan is dat de splijtstofstaven in de reactorkern zeer dicht bij elkaar zitten. Als het koelsysteem op een of andere wijze uitvalt zullen de splijtstofstaven binnen enkele minuten smelten (in het Engels: melt-down).

\* Deze passage wijkt af van die in de eerste druk, om niet de suggestie te wekken dat de centrale in Dodewaard minder veilig zou zijn.

Om deze melt-down te voorkomen, zijn talloze veiligheidsmaatregelen aangebracht, zoals noodkoelkringlopen, noodgeneratoren om eigen stroom op te wekken en sproeiwaterinstallaties.

Het hart van de Russische grafietreactor in Tsjernobyl was vrij eenvoudig uitgevoerd. Het bestond uit een cirkelvormig blok grafiet van 8 meter hoog en een doorsnede van 13 meter met een gewicht van 1700 ton, met ongeveer 1600 gaten voor de splijstofelementen van uraanoxide. Door diezelfde gaten lopen de buizen voor het koelwater. In deze reactor is waarschijnlijk grafiet in aanraking gekomen met water, waardoor waterstofgas is ontstaan. Dat waterstofgas is geëxplodeerd, heeft koelwaterbuizen beschadigd waardoor nog meer waterstofgas is ontstaan en ontploft. Het dak van het reactorgebouw is er vervolgens afgevlogen waardoor lucht bij de hete grafietmassa kon komen. Het grafiet is vervolgens gaan branden waardoor de temperatuur wel tot 3000°C kon oplopen. Door deze hitte-ontwikkeling zijn brandstofstaven gesmolten waardoor de splijtingsprodukten die normaal in de uraanoxidetabletten zouden blijven, vrijkwamen en zodoende in de atmosfeer terecht kwamen. In Tsjernobyl is dus zowel een grafietbrand als een melt-down geweest.

Als een groot gedeelte van de reactorkern smelt, kan de hoeveelheid ontwikkelde warmte wel zo groot worden dat de betonnen vloer waarop de reactorkern staat eveneens kan gaan smelten. Het gevolg is dan dat de reactorkern door zijn gewicht door de vloer in de grond zakt. Als de gloeiende reactorkern dan in aanraking komt met het grondwater kan een aanzienlijke besmetting van een groot oppervlak met radioactieve splijtingsprodukten optreden doordat via het grondwater ook rivieren besmet kunnen raken. Ook zal door verdamping van het grondwater en grond nog meer besmet materiaal de lucht in worden geblazen door voortdurende geysers-achtige uitbarstingen. Een groot gedeelte van de splijtingsprodukten kan zo in fijnverdeelde toestand in lucht en water terecht komen. De omvang van zo'n nucleaire ramp kan nog niet goed worden geschat. Deze vorm van melt-down wordt wel eens beschreven als het 'China-syndroom'. Als een reactorkern in de Verenigde Staten in de grond zou zakken zou hij, dwars door de aarde heen, in China terecht komen. Dit is natuurlijk niet letterlijk waar: de reactorkern zal bij zo'n melt-down hooguit 10 tot 20 meter in de grond zakken.



### *Fall-out*

Van de vele splijtingsprodukten die in de reactorkern worden gevormd, neemt jodium een bijzondere plaats in. Dit komt omdat jodium tot de groep vluchtige splijtingsprodukten behoort. Bij een smeltende reactorkern ontsnapt het in dampvorm en zal zoals bij de ramp in Tsjernobyl via luchtstromingen over een groot gebied worden verspreid. Door neerslag kan het als fall-out op de aarde terecht komen. Het jodium concentreert zich bij inademing of bij voedselopname in de schildklier. Het jodium geeft daar dan een hoge dosis straling af waardoor de kans op een schildkliertumor kan toenemen. Bij de fall-out produkten van Tsjernobyl was ook jodium aangetroffen. Dit radioactieve jodium-131 heeft een halveringstijd van 8 dagen; het was uit voorzorg dat de overheid een (korte tijd durend) graasverbod voor melkvee instelde. Men voorkwam daarmee dat de bevolking via de melk jodium-131 binnen zou krijgen. Het jodium dat door de regen uit de lucht op het gras terecht was gekomen, verdween na enkele dagen voor een deel door natuurlijk verval en door wegwassen door volgende regenbuien die geen radioactief jodium meer bevatten. Zolang de activiteit in melk minder dan 500 becquerel per liter bedraagt, wordt in ons land de melk als toelaatbaar voor de consumptie beschouwd (zie hoofdstuk 5).

Andere splijtstoffen in de fall-out van Tsjernobyl zijn o.a. het radioactieve cesium en strontium die ook via voedsel en drinkwater in het lichaam kunnen komen. Er is nogal discussie geweest over het besluit van de overheid spinazie te laten vernietigen en aan te bevelen deze groente niet te eten, terwijl voor andere groenten geen maatregelen werden getroffen. Uit metingen bleek dat de radioactiviteit in spinazie hoger was dan in andere groentesoorten. Dit komt waarschijnlijk omdat het blad van spinazie een poreuze structuur heeft en daardoor meer activiteit kan opnemen: sla en andijvie zijn veel harder. Bovendien is er voor een maaltijd spinazie meer nodig dan van andere groenten en wordt spinazie veel door jonge kinderen, een risicogroep, gegeten. Het verbod van de overheid om spinazie voor consumptie toe te laten was als voorzorgsmaatregel alleszins gerechtvaardigd.

### *Radioactief afval*

Jaarlijks moet een gedeelte van de gebruikte splijtstofstaven worden vervangen door nieuwe. De gebruikte staven bevatten de splijtingsprodukten en zijn dus zeer radioactief. Ze worden gedurende enige tijd geplaatst in een opslagbassin dat met water is gevuld. Daarna gaat de afgekoelde brandstof naar een zogenaamde opwerkingsfabriek waar langs scheikundige weg uraan en het gevormde plutonium worden gescheiden van de radioactieve splijtingsprodukten. Het uraan wordt weer tot nieuwe brandstoftabletten verwerkt en het plutonium wordt bewaard voor eventueel toekomstig gebruik in kweekreactoren. Het radioactief afval wordt voorlopig, voordat het definitief wordt opgeborgen, in roestvrijstalen tanks opgeslagen. Er is steeds discussie of het materiaal dat nog vele tienduizenden jaren radioactief blijft, in de zeebodem of diep onder de grond in zoutlagen begraven mag worden.

### WELKE ERNSTIGE ONGELUKKEN ZIJN ER MET EN IN KERNCENTRALES GEBEURD?

- 7 oktober 1957. In Windscale in Engeland leidt een brand in een kernreactor tot het ontsnappen van radioactieve deeltjes. In 1983 geeft de Britse regering toe dat ten gevolge hiervan 39 mensen aan kanker kunnen zijn gestorven.
- 1957. In de Oeral gaat een wapenfabriek met een opslagplaats voor radioactief afval de lucht in. Een gebied met een oppervlakte van bijna 3000 km<sup>2</sup> wordt besmet.
- 24 juli 1959. In een experimentele kerncentrale in Santa Susana, Californië, smelten 12 van de 43 brandstofelementen. De radioactiviteit blijft binnen de centrale.
- 3 januari 1961. In een militaire experimentele reactor in Idaho Falls, Idaho, veroorzaakt een stoomexplosie de dood van drie technici.
- 5 oktober 1966. Het koelsysteem van een met natrium gekoelde kweekreactor bij Detroit faalt en veroorzaakt smelten van een gedeelte van de reactorkern. Er ontsnapt geen radioactiviteit.
- 19 november 1971. Bij een reactor in Monticells, Minnesota loopt ruim 200.000 liter radioactief afvalwater de Mississippi-

rivier in, omdat de bestaande opslagcapaciteit van afvalwater al volledig benut was.

- 1974. Een ontploffing in een snelle-kweekreactor in Sjevtsjenko aan de noordkust van de Kaspische Zee heeft onbekende gevolgen.
- 22 maart 1975. Een technicus zoekt met een brandende kaars naar mogelijke niet luchtdichte plekken in een reactor in Decatur, Alabama. De brand die daardoor ontstaat, beschadigt het koelsysteem. Radioactief materiaal is hierbij niet ontsnapt.
- 28 maart 1979. Technische mankementen en menselijke fouten leiden in Three Mile Island tot het smelten van een groot deel van de reactorkern. Er ontsnapt enige radioactiviteit in de atmosfeer, maar zo weinig dat het risico voor de volksgezondheid minimaal is.
- 7 augustus 1979. Ongeveer 1000 mensen worden blootgesteld aan een dosis van drie tot vijf maal de jaarlimietdosis door het vrijkomen van verrijkt uraan uit een geheime reactor in Erwin, Tennessee.
- 11 februari 1981. Acht werknemers worden besmet met radioactief koelmiddel dat uit een reactor in Tennessee lekte.
- 25 januari 1982. Een breuk in een pijpleiding van een stoomgenerator in een centrale in Rochester geeft aanleiding tot besmetting van de centrale. Enige radioactiviteit ontsnapt in de lucht.
- 9 juni 1985. Technische mankementen en menselijke fouten veroorzaken in een centrale in Ohio bijna een vergelijkbaar ongeluk als in Three Mile Island. De schade blijft echter beperkt.
- 4 januari 1986. Een oververhitte cilinder met uraanhexafluoride barst in de centrale in Gore, Oklahoma. Een werknemer wordt gedood en 100 mensen raken gewond. Een geringe besmetting van de omgeving wordt geconstateerd.
- 26 april 1986. In een grafietgemodereerde reactor in Tsjernobyl gebeurt een ongeluk waarbij een grote hoeveelheid radioactiviteit in de atmosfeer terecht komt. Tenminste acht mensen worden gedood en ongeveer tweehonderd gewond. Er treedt een melt-down van de reactorkern op.

### 3. Radioactiviteit en stralingssoorten

#### WANNEER WERD STRALING ONTDEKT?

In proefnemingen met gasontladingsbuizen werd in 1895 door Röntgen waargenomen dat de door de buis uitgezonden straling een zwarting veroorzaakte op fotografisch papier. In 1896 ontdekte Becquerel dat uraniumzouten spontaan straling uitzenden die door zwart papier en dunne metaallagen dringt, de lucht ioniseert en in een fluorescerend scherm lichtflitsjes veroorzaakt. Twee jaar later gelukte het aan het echtpaar Curie om uit uraniumerts een radiumzout te isoleren dat nog veel radioactiever bleek te zijn dan de door Becquerel onderzochte uraniummonsters.

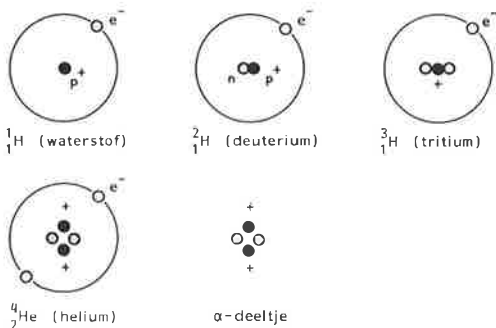
De aanwezigheid van radioactiviteit en straling onttrekt zich aan het normale waarnemingsvermogen van de mens. Straling heeft immers geen kleur, geen reuk, brengt geen geluid voort en de warmteontwikkeling ten gevolge van de stralingsblootstelling is ook nauwelijks merkbaar. Sinds de ontdekking van straling is veel aandacht besteed aan de meting van straling en de hoeveelheid radioactiviteit. De grootheden afstand, tijd en energie kunnen worden uitgedrukt in de eenheden meter, seconde en joule of calori. Ook voor straling werden zulke grootheden en eenheden ingevoerd, en vaak dragen zij de namen van de pioniers op het gebied van het stralingsonderzoek. In diverse hoofdstukken worden dan ook de namen van Röntgen, Becquerel, Curie, Gray en Sievert aangetroffen. Bepaalde meetinstrumenten zijn ook genoemd naar de uitvinder ervan, zoals de Geiger-telbuis. In de achterliggende dertig jaar is ingewikkelde meetapparatuur ontwikkeld om de straling te meten. Deze apparatuur is nu zodanig verbeterd, dat ook de aanwezigheid van zeer geringe hoeveelheden straling kan worden vastgesteld. Omdat straling voortkomt uit het atoom, zullen in dit hoofdstuk een aantal termen worden uitgelegd.

## WELKE DEELTJES ZIJN AANWEZIG IN EEN ATOOM?

De kleinste massa van een stof die nog de scheikundige en natuurkundige eigenschappen van deze stof bezit wordt een molecuul genoemd. Moleculen blijken te zijn opgebouwd uit bouwstenen van verschillende elementen: de atomen. Als voorbeeld kan worden vermeld de stof water,  $H_2O$ , waarbij een molecuul bestaat uit twee atomen waterstof met het symbool H, en één atoom zuurstof met het symbool O. Alhoewel het Griekse woord atomos 'ondeelbaar' betekent, werd door Rutherford al in 1911 verondersteld dat het atoom bestaat uit een kern omgeven door elektronen. Deze elektronen zouden zich in banen rondom de kern bewegen zoals planeten rondom een zon en die veronderstelling is in principe uitgekomen. De kern van het atoom blijkt te bestaan uit een aantal protonen en uit neutronen. Het aantal elektronen in de banen rondom de kern is gelijk aan het aantal protonen. Als een voldoende hoeveelheid energie aan een atoom wordt toegevoegd kunnen één of meerdere elektronen uit hun baan worden losgemaakt en spreekt men over ionisatie van het atoom.

De scheikundige eigenschappen van een atoom worden bepaald door het aantal elektronen om de kern en dus ook door het aantal protonen in de kern: dit aantal is het atoomnummer van het element. De som van het aantal protonen en neutronen in de kern is het massagetal. Elke kernsoort, ook wel nuclide genoemd, is gekarakteriseerd door vermelding van het atoomnummer en het massagetal. Het aantal neutronen in de kern behoeft niet voor alle atomen van een bepaald element gelijk te zijn.

Atoomsoorten met een gelijk atoomnummer maar verschillend massagetal worden isotopen genoemd. Als voorbeeld kan worden genoemd het element waterstof, dat in 99,99% van alle gevonden atomen een kern heeft die bestaat uit een proton. Bij deuterium, een stabiel isotoop van waterstof, wordt de kern gevormd door een proton en een neutron en bij het niet stabiele isotoop door een proton en twee neutronen. De opbouw van het waterstofatoom en zijn isotopen is schematisch weergegeven in figuur 3.1.



Figuur 3.1

*Schematische voorstelling van de opbouw van het waterstofatoom en zijn isotopen deuterium en tritium en van helium.*

## WAT BEPAALT DE STABILITEIT VAN EEN ATOOMKERN?

De stabiliteit van een atoomkern is afhankelijk van de verhouding tussen het aantal neutronen en protonen in de kern. Dit kan bijvoorbeeld worden uitgelegd voor het element jodium. Het stabiele isotoop jodium-127 (I-127) heeft 53 protonen en 74 neutronen in de kern. Bij een dergelijke notatie duidt het getal achter het symbool van het element op het totale aantal kerndeeltjes in de kern. Jodiumisotopen met een veel lagere of hogere atoommassa zoals bijvoorbeeld I-125 of I-131 zijn instabiel, en zenden straling uit. Bij radioactieve nucliden kan dat gebeuren door uitzending van alfa-straling, bèta-straling en/of elektromagnetische straling die gammastraling wordt genoemd als zij afkomstig is uit de atoomkern. Alfa-deeltjes zijn naakte heliumkernen die bestaan uit twee protonen en twee neutronen (zie figuur 3.1) en bèta-deeltjes zijn snelle elektronen.

## WAT IS RADIOACTIVITEIT EN HOE VERDWIJNT HET?

Onder de radioactiviteit van een niet-stabiel nuclide wordt verstaan het aantal spontane kernveranderingen per seconde. In het internationale systeem van eenheden wordt één kernveran-

dering per seconde als eenheid van activiteit gebruikt met daarvoor de speciale naam becquerel (Bq). Een activiteit opgegeven in de oude eenheid curie (Ci) kan worden omgerekend naar de nieuwe eenheid als:  $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ . De kans dat een kernverandering optreedt in een aantal kernen van een radioactief nuclide blijft constant in de loop van de tijd. Daarom neemt de activiteit per tijdseenheid met eenzelfde fractie af. De fysische halveringstijd van een radioactief nuclide is de tijd waarin de helft van het oorspronkelijke aantal nucliden is vervallen. In tabel 3.1 zijn de eigenschappen samengevat van een aantal radioactieve nucliden die uit een reactor kunnen ontsnappen bij een ongeluk.

Na het reactorongeval in Tsjernobyl zijn binnen een week in Nederland verhoogde activiteiten aangetroffen van een aantal nucliden zoals ruthenium-103, jodium-131 en cesium-137. In het algemeen geldt voor de aanwezige hoeveelheden jodium-131 in water en op gras en groenten dat de activiteit tot 50 procent zal zijn afgenomen na 8 dagen, tot 25 procent na 16 dagen, tot 12,5

Tabel 3.1

Eigenschappen van een aantal radionucliden, die bij een reactorongeval kunnen vrijkomen in de omgeving.

Nuclide	Symbool	Halveringstijd in dagen	Soort uitgezonden straling
Strontium	Sr-90	10636 (~ 29 jaar)	bèta-straling
Ruthenium	Ru-103	39,3	bèta- en gammastraling
Jodium	I-131	8,04	bèta- en gammastraling
Cesium	Cs-137	10958 (~ 30 jaar)	bèta- en gammastraling
Neptunium	Np-239	2,36	bèta- en gammastraling
Plutonium	Pu-238	32047 (~ 87 jaar)	alfa-straling

procent na 24 dagen en tot 0,024 procent na 96 dagen. Voor stralingssoorten met een langere halveringstijd zoals cesium-137 is dit verval uiteraard veel langzamer. Radioactiviteit verdwijnt nooit helemaal maar de hoeveelheid zal vroeger of later beneden een niveau komen dat als verwaarloosbaar mag worden beschouwd.

## WAT IS STRALING EIGENLIJK?

Straling is één van de vormen waarop energie vanuit een bron naar de omgeving kan worden overgedragen. Een aantal stralingssoorten is bekend uit het dagelijks leven, zoals zichtbaar licht, warmtestraling en radiogolven. Deze zijn onder normale omstandigheden niet gevaarlijk voor de gezondheid van de mens. De elektromagnetische straling kan worden opgevat als een golfverschijnsel of als deeltjes die fotonen worden genoemd. Deze elektromagnetische straling beweegt zich met de snelheid van het licht. Straling met een hogere energie dan ultraviolet licht en daarbij behorende kortere golflengte kan in biologische materialen ionisaties veroorzaken. Hierdoor zullen biologische effecten worden veroorzaakt die in de volgende hoofdstukken zullen worden besproken. Röntgenstraling kan worden geproduceerd door in een röntgenbuis elektronen te versnellen en daarmee een koperen of wolfram-trefplaat (de anode) te bombarderen. Röntgenstraling (X-straling) is evenals gammastraling een vorm van elektromagnetische straling. De eerste stralingssoort is het gevolg van energieovergangen van elektronen tussen de verschillende banen rondom de kern, terwijl de tweede soort berust op veranderingen in de kern.

## WAARVOOR WORDT STRALING GEBRUIKT?

Verschillende soorten straling worden gebruikt voor medische en technologische doeleinden. Röntgenstraling met betrekkelijk lage energie wordt toegepast voor de radiodiagnostiek: röntgenstraling met hogere energie en gammastraling wordt toegepast in de radiotherapie; de straling van radioactieve stoffen wordt in de nucleaire geneeskunde gebruikt. De technologische toepassingen omvatten het gebruik van elektromagnetische stra-



ling voor sterilisatie van voedsel en medische instrumenten, van elektronen voor polymerisatie van kunststoffen en van neutronen voor activeringsanalyse en sporenelementen. Verder komt er straling vrij bij de processen van kernsplijting in reactoren die worden gebruikt voor elektriciteitsproductie. Onder normale omstandigheden vinden deze reacties plaats binnen de afgesloten reactorkern en komen er slechts kleine hoeveelheden radioactiviteit in de omgeving terecht. Als een röntgenapparaat of een Van de Graaff versneller wordt uitgeschakeld, verdwijnt de directe straling ook onmiddellijk. Dit geldt niet voor radioactieve nucliden die geleidelijk in sterkte afnemen. Hierbij dient verder te worden vermeld, dat de mens sinds zijn ontstaan is blootgesteld aan natuurlijke straling die afkomstig is uit het heelal en van radioactiviteit die voorkomt in de aardkorst en in bouwmaterialen. De stralingsbelasting van de mens ten gevolge van deze natuurlijke straling wordt in één van de volgende hoofdstukken behandeld.

## KRIJGEN ALLE DELEN VAN HET LICHAAM DEZELFDE HOEVEELHEID STRALING?

Bij blootstelling van de mens aan ioniserende straling en radioactieve stoffen moet een onderscheid worden gemaakt tussen uitwendige en inwendige bestraling. Röntgen- of gammastraling en neutronen hebben een groot doordringingsvermogen en kunnen bij uitwendige bestraling ook in het lichaam doses afgeven. Hierbij dient er wel rekening mee te worden gehouden dat de dosis gemeten op het oppervlak van het menselijk lichaam dan hoger is dan de dosis ontvangen door bepaalde organen of door het ongeboren kind. De alfa- en bèta-straling met een veel kortere reikwijdte (dracht) in weefsel zijn niet van groot belang bij uitwendige bestraling. Als de radioactiviteit door inslikken (ingestie) of inademen (inhalatie) echter in het menselijk lichaam komt is er een grote bijdrage in de dosis te verwachten van de alfa- en bèta-straling. Voor de bepaling van de geabsorbeerde dosis in organen zijn uitgebreide gegevens beschikbaar, onder andere in de ICRP-rapporten. Bij alle blootstelling aan ioniserende straling zullen verschillende delen van het lichaam verschillende stralingsdoses kunnen ontvangen.

## 4. Stralingsgrootheden en eenheden

### HOE WORDT STRALING GEMETEN?

De wisselwerking van straling met materie maakt het mogelijk om straling te detecteren. De oudste methode om de hoeveelheid straling te meten berust op het principe van het verzamelen en meten van het aantal ionisaties gevormd in een gasvolume. Voorbeelden hiervan zijn de elektroscop en de ionisatiekamer. Andere methoden maken gebruik van zwarting van een fotografisch filmpje of een thermoluminescentiedosimeter (een materiaal dat bij verwarming licht uitzendt). De meting van de hoeveelheid lading in een luchtmassa is oorspronkelijk gebruikt om de stralingsdosis te karakteriseren. Men heeft deze ladingshoeveelheid per kilogram lucht de exposie genoemd, waarvoor in het verleden de eenheid röntgen (R) werd gebruikt. Zoals aangegeven in figuur 4.1 kan de exposie in röntgen worden omgerekend naar de ladingshoeveelheid in coulomb per kilogram lucht. De exposie is alleen geschikt om een röntgen-(X) of gamma-stralingsveld te karakteriseren.

### HOEVEEL ENERGIE WORDT IN HET WEEFSEL AF- GEGEVEN?

In een aantal wetenschappelijke publikaties wordt nog steeds melding gemaakt van de exposie op de plaats waar een bestraling zal plaatsvinden. Het is voor de schatting van biologische effecten echter veel belangrijker om informatie te verkrijgen over de energie geabsorbeerd in het biologisch materiaal. Voor dit doel is het begrip geabsorbeerde dosis ingevoerd. Dit is de gemiddelde energie, overgedragen per eenheid van massa. In het momenteel gebruikte eenhedensysteem (het internationale SI-systeem) wordt de geabsorbeerde dosis uitgedrukt in gray (Gy). Een dosis van 1 Gy is gelijk aan 1 joule (J) per kilogram weefsel. De oude eenheid van geabsorbeerde dosis, de rad, is gelijk aan

Figuur 4.1

	<u>oude eenheid</u>	<u>SI eenheid</u>
 <p>ionisatie in lucht: exposie</p>	röntgen, R	coulomb/kg, C/kg 1 C/kg = 3876 R
 <p>energie absorptie in biologisch weefsel: dosis</p>	rad, 1 rad = 100 erg/gram	gray, 1 Gy = 1 J/kg = 100 rad
 <p>ontvangen stralings- dosis vermenigvuldigd met kwaliteits factor: dosisequivalent</p>	rem, X straling: 1 rad → 1x1 rem neutronen: 1 rad → 5x1 rem α-straling: 1 rad → 20 x 1 rem	sievert, 1 Sv = 100 rem
 <p>voor grotere bevolkingsgroepen: totaal ontvangen dosisequivalent</p>	man x rem, totale dosis equiva- lent gedeeld door aantal blootgestelden → gemiddelde dosis equivalent	man x sievert

### Stralingsgrootheden en eenheden.

een honderdste gray (1 rad = 0,01 gray). In het dagelijks leven ontvangt de mens geabsorbeerde doses die veel lager zijn dan 1 Gy. Daarom wordt een aantal voorvoegsels gebruikt zoals milli, micro en nano. Een dosis van éénuizendste Gy is één milligray (1 mGy), een dosis van éénmiljoenste Gy, één microgray (1 μGy) en een dosis van éénmiljardste Gy, één nanogray (1 nGy). Voor röntgenstraling en gammastraling van cesium-137 en cobalt-60 kan bij benadering worden aangenomen dat een exposie van 1 R overeenkomt met een geabsorbeerde dosis van 1 rad (10 mGy).

### ZIJN ALLE STRALINGSSOORTEN EVEN GEVAARLIJK?

Uit radiobiologisch onderzoek is gebleken dat sommige stralingssoorten per eenheid van dosis een grotere effectiviteit hebben in het produceren van biologische schade dan röntgenstraling. Indien de mens aan verschillende soorten straling tegelijk wordt blootgesteld, dienen voor risicoschattingen deze verschil-

len in rekening te worden gebracht. Voor stralingsbeschermings-toepassingen is daarom de kwaliteitsfactor,  $Q$ , ingevoerd die afhankelijk is van de ionisatiedichtheid van de straling. De geabsorbeerde dosis vermenigvuldigd met de kwaliteitsfactor resulteert in het dosisequivalent,  $H$ , dit wordt uitgedrukt in sievert (Sv) (waarbij de oude eenheid 1 rem gelijk is aan een honderdste sievert). Voor röntgen- en gammastraling is de kwaliteitsfactor  $Q=1$  en voor deze stralingssoort geldt derhalve  $1 R = 1 \text{ rad} (10 \text{ mGy}) = 1 \text{ rem} (10 \text{ mSv})$ .

Voor bèta-straling wordt in het algemeen ook een  $Q=1$  aangenomen. Voor alfa-deeltjes die van belang zijn voor berekeningen van inwendige besmetting geldt in het algemeen een  $Q=20$ . Een geabsorbeerde dosis van 1 rad (10 mGy) komt daarom overeen met een dosisequivalent van  $20 \times 1 = 20 \text{ rem} (20 \times 10 = 200 \text{ mSv} = 0,2 \text{ Sv})$ .

Voor risicoberekeningen bij grotere bevolkingsgroepen is het van belang een schatting te krijgen van het collectieve dosisequivalent, de som van de dosisequivalentwaarden ontvangen door alle individuele leden van de groep. Een samenvatting van de stralingsgrootheden en eenheden is vermeld in figuur 4.1. De gegevens in deze figuur zijn in overeenstemming met internationale aanbevelingen. Bij het rapporteren over de stralingsniveaus na het Tsjernobyl-ongeluk is meestal gesproken over doses in rem. Eenvoudigheidshalve is deze procedure in dit boek verder gevolgd met tussen haakjes de eenheid sievert. De lezer zal hebben begrepen dat hiermee eigenlijk wordt bedoeld het dosisequivalent.

## WAT IS HET RISICO ALS SLECHTS ÉÉN ORGAAN WORDT BESTRAALD?

Het risico van blootstelling van de mens aan ioniserende straling voor het optreden van late effecten zal kleiner zijn als slechts één orgaan wordt bestraald dan wanneer het hele lichaam dezelfde dosis ontvangt. Er moet daarom altijd informatie worden verstrekt of het totale lichaam is bestraald of slechts één gedeelte ervan. Voor de risico-evaluaties is in de praktijk van de stralingsbescherming de grootheid effectief dosisequivalent ingevoerd. Dit is de som van de dosisequivalentwaarden in alle bestraalde

organen vermenigvuldigd met een weegfactor voor dat orgaan. Deze weegfactoren zijn gebaseerd op kennis over het risico voor genetische effecten en kankerinductie in de afzonderlijke organen. Voor de diverse weefsels varieert de weegfactor tussen 0,03 en 0,25. Voor de longen en het rode beenmerg is de weegfactor gelijk aan 0,12. Indien de longen worden bestraald met een dosisequivalent van 1 rem, en de andere organen geen dosis ontvangen, bedraagt het effectief dosisequivalent voor de betreffende persoon 0,12 rem.

## 5. Stralingsbelasting van de mens

Zoals eerder is opgemerkt, kan de mens worden blootgesteld aan uitwendige en inwendige bestraling. Voor de beperking van de stralingsbelasting bij uitwendige bestraling kan een aantal voorzorgsmaatregelen worden genomen.

- a. Allereerst zal de periode waarin men in de buurt van een radioactieve bron verblijft, zoveel mogelijk dienen te worden beperkt.
- b. De geabsorbeerde dosis per tijdseenheid neemt sterk af naarmate de afstand tot de bron toeneemt. Daarom werd de bevolking die woonde rond Tsjernobyl na enkele dagen geëvacueerd: langer verblijf zou tot hogere doses hebben geleid. Deze afname van de doseringssnelheid (dosistempo) geschiedt met het kwadraat van de afstand. Bij hantering van radioactieve bronnen maakt men daarom gebruik van allerlei gereedschappen die de afstand tot de bron vergroten.
- c. De derde mogelijkheid om de stralingsbelasting ten gevolge van uitwendige bestraling te beperken is het gebruik van afschermingsmateriaal. Alfa- en bèta-deeltjes hebben slechts een geringe dracht en zullen alleen kunnen doordringen in de oppervlakkige huidlagen. Voor röntgen- en gammastraling, die een veel groter doordringingsvermogen hebben, worden materialen als lood en beton gebruikt om de stralingsdosis te verminderen.

Na opname van radioactiviteit in het lichaam kan direct gebruik gemaakt worden van braakmiddelen of laxerende middelen om te proberen de activiteit uit het maag-darmkanaal te verwijderen. Indien de radioactiviteit zich in een bepaald orgaan zou concentreren (zoals jodium in de schildklier) kan door een overmatige toediening van niet-actief jodium deze opname gedeeltelijk worden voorkomen.

## WAT ZIJN DE DOSISLIMIETEN VOOR STRALINGSWERKERS EN INDIVIDUELE LEDEN VAN DE BEVOLKING?

Door de Internationale Commissie voor Stralingsbescherming (ICRP) zijn aanbevelingen geformuleerd voor jaarlijkse limieten van het dosisequivalent voor bestralingen van het gehele lichaam of van specifieke organen (zoals de schildklier bij opname van jodium). In de Nederlandse wetgeving zijn dosislimieten vastgesteld voor werkers die stralingsbronnen toepassen (radiologische werkers) en voor de gewone burgers. De dosislimieten voor deze tweede groep zijn meestal een factor 10 lager dan die voor de radiologische werkers. Deze waarden gelden voor de som van in- en uitwendige bestraling waarbij de bijdragen ten gevolge van natuurlijke straling en van medische toepassingen niet worden meegerekend.

Voor omwonenden van een kerncentrale zijn door de Gezondheidsraad noodreferentieniveaus, NRN, ingevoerd voor het dosisequivalent ten gevolge van uitwendige of van inwendige bestraling. Bij waarden lager dan het NRN is het onwaarschijnlijk dat voor de omwonenden van de reactor uitgebreide maatregelen ter vermindering van het stralingsrisico zijn gerechtvaardigd. Bij overschrijding van het NRN dienen maatregelen ter beperking van de stralingsdosis te worden overwogen. De gegevens over dosislimieten en de noodreferentieniveaus zijn samengevat in tabel 5.1. In de nabije toekomst zullen de dosislimieten voor de individuele organen gewijzigd kunnen worden door de invoering van de weegfactoren en zal het effectieve dosisequivalent voor leden van het publiek niet meer dan 0,5 rem (5 millisievert) mogen bedragen.

## IS DE LEEFTIJD BELANGRIJK VOOR BEREKENING VAN HET DOSISEQUIVALENT?

Voor de gemiddelde mens zijn door de ICRP berekeningen uitgevoerd voor de stralingsbelasting door inhalatie of ingestie van radioactieve nucliden uit lucht, drinkwater, melk en ander voedsel. Hierbij worden veronderstellingen gemaakt over de hoeveelheid ingeademde lucht per dag en de gemiddelde dage-

Tabel 5.1

Limieten voor het jaarlijkse dosisequivalent (H-limiet) en nood-referentieniveaus (NRN) voor het dosisequivalent.

Orgaan	H-limiet radiol. werkers	H-limiet leden van bevolk.	H-limiet kinderen	NRN volw.	NRN kinderen
gehele lichaam	5 rem (50 mSv)	0,5 rem (5 mSv)	0,5 rem (5 mSv)	15 rem (150 mSv)	5 rem (50 mSv)
huid	30 rem (300 mSv)	3 rem (30 mSv)	3 rem (30 mSv)	90 rem (900 mSv)	30 rem (300 mSv)
schildklier	30 rem (300 mSv)	3 rem (30 mSv)	1,5 rem (15 mSv)	30 rem (300 mSv)	10 rem (100 mSv)
andere organen	15 rem (150 mSv)	1,5 rem (15 mSv)	1,5 rem (15 mSv)	30 rem (300 mSv)	10 rem (100 mSv)

Tabel 5.2

Gemiddelde waarden voor ingeademde lucht en melkconsumptie per dag en gewicht van de schildklier volgens de ICRP en het West-Duitse Ministerie voor Volksgezondheid.

	Ingeademde lucht (m <sup>3</sup> /dag)	Melkconsumptie (liter/dag)	Gewicht van schildklier (gram)
volwassenen	22	0,25	24
10-jarige kinderen	15	0,45	15
1-jarige kinderen	3,8	0,54	3,5



lijkse melkconsumptie. Een aantal van deze gegevens is vermeld in tabel 5.2 voor volwassenen en kinderen met leeftijden van 1 en 10 jaar.

In sommige gevallen zal de radioactiviteit zich concentreren in bepaalde organen zoals de schildklier bij jodiumopname en het bot bij besmetting met strontium. De geabsorbeerde dosis is afhankelijk van de massa van het orgaan waarin de radioactiviteit wordt opgenomen. In tabel 5.2 zijn ook de gewichten vermeld van de schildklier voor personen in de verschillende leeftijdsgroepen. In het geval van gammastraling zullen ook andere organen in het lichaam een dosis kunnen ontvangen. Deze berekeningen moeten worden gebaseerd op de ligging en grootte van de organen die van belang zijn voor de dosisbelasting.

De in het lichaam opgenomen activiteit zal afnemen ten gevolge van het fysische vervalproces en de biologische verwijdering van de activiteit uit het lichaam. De fysische halveringstijd is reeds eerder genoemd, voor de verdwijning via de stofwisseling is de grootheid 'biologische halveringstijd' ingevoerd. Door een eenvoudige berekening kan hieruit de effectieve halveringstijd (die in dit hoofdstuk niet nader wordt gedefiniëerd) worden afgeleid. Na de opname van de radioactiviteit wordt de te verwachten geabsorbeerde dosis of het dosisequivalent berekend over de gehele tijdsduur dat deze activiteit in het orgaan aanwezig is.

De hiervoor gebruikte grootheid wordt de volg dosis of het volg dosisequivalent genoemd. Voor de radiologische werkers zijn door de ICRP limietwaarden geformuleerd voor de jaarlijkse opname van radionucliden in becquerel en de daaruit afgeleide limieten voor de luchtconcentraties in becquerel per  $m^3$  voor een 40-urige werkweek. Deze concentraties resulteren dan in de limieten voor het dosisequivalent, zoals vermeld in tabel 5.1, in het kritieke orgaan voor de opname van deze soort radioactiviteit.

#### WAT IS HET DOSISEQUIVALENT BIJ OPNAME VAN RADIOACTIVITEIT?

Als wordt uitgegaan van een radioactiviteit van 1 becquerel per liter melk, of van 1 becquerel per  $m^3$  lucht, kan worden berekend wat het ontvangen volg dosisequivalent is in de schildklier en het totale lichaam ten gevolge van de consumptie van melk en

Tabel 5.3

Waarden voor het dosisequivalent voor melkconsumptie en luchtinademing bij een blootstelling gedurende één dag. De waarden in de tabel zijn berekend voor een activiteit van 1 Bq/l melk en 1 Bq/m<sup>3</sup> lucht en gebaseerd op de werkelijk gebruikte hoeveelheid melk volgens tabel 5.2.

	Volgdosisequivalent in $\mu\text{rem}$ (10 nSv) ten gevolge van opname van					
	I-131 in de schildklier		Cs-137 in gehele lichaam		Sr-90 in gehele lichaam	
	melk	lucht	melk	lucht	melk	lucht
volwassenen	11	590	0,35	19	0,9	130
10-jarige kinderen	38	830	0,42	9	1,8	90
1-jarige kinderen	190	840	0,5	2,4	5,9	49

van de hoeveelheid ingeademde lucht gedurende één dag (zie tabel 5.3). Indien de activiteit in melk en in de lucht een periode van 14 dagen deze zelfde waarde zou houden, dienen de getallen in tabel 5.3 met 14 te worden vermenigvuldigd. In tabel 5.4 zijn gegevens vermeld voor de activiteit van jodium-131 gevonden in koeien die op stal werden gehouden of buiten graasden. De activiteit van 100 becquerel per liter heeft tot gevolg dat het totale volgdosisequivalent op de schildklier van één-jarige kinderen na het drinken van 0,54 liter melk 19 millirem (190 microsievert) bedraagt. Voor de opname van cesium-137 en strontium-90 zijn ter illustratie in de tabel 5.3 ook de waarden gegeven voor het effectief volgdosisequivalent. Deze isotopen zijn echter momenteel in Nederland niet in aanzienlijke hoeveelheden aangetroffen.

Tabel 5.4

Activiteit van jodium-131 in melk (Bq/l) van:

---

	koeien die op stal zijn gehouden	koeien die buiten graasden
6 mei	35	100
7 mei	17	100
8 mei	50*	

---

\* op 7 mei naar buiten

Bron: Volkskrant 9 mei 1986.

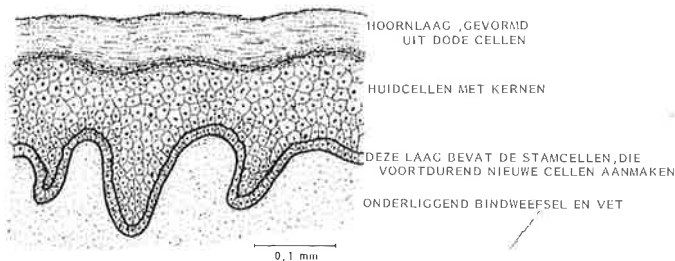
De piekwaarde van de luchtactiviteit van jodium-131 bedroeg op 2 mei 20 Bq/m<sup>3</sup>. Na een week was deze waarde verminderd tot 0,1 Bq/m<sup>3</sup>.

## 6. Het ontstaan van stralings schade bij mens en dier

Dieren en mensen zijn samengesteld uit weefsels, zoals spieren en bindweefsel, en uit organen, zoals het hart, de lever, de nieren, de hersenen. Weefsels en organen zijn weer opgebouwd uit levende cellen (figuur 6.1). In de meeste weefsels en organen leven die cellen maar een beperkte tijd. De dode cellen worden vervangen door nieuwe, die ontstaan door deling uit bestaande cellen. Op die manier worden vrijwel alle onderdelen van het lichaam voortdurend vernieuwd. Sommige onderdelen van het lichaam, zoals het bloedvormend weefsel, worden heel snel vernieuwd, andere veel trager. Als een weefsel plaatselijk wordt beschadigd kunnen de omliggende cellen sneller gaan delen en op die manier de verwonding of de breuk in de kortst mogelijke tijd laten genezen.

Een cel die zich deelt, levert twee precies gelijke dochtercellen op, die dezelfde eigenschappen hebben als de cel waaruit zij zijn ontstaan (figuur 6.2). Die eigenschappen worden bepaald door het DNA – het desoxyneucleïnezuur – dat zich in de kern van iedere cel bevindt. Het DNA is een grote en ingewikkelde chemi-

Figuur 6.1



*Doorsnede door de opperhuid van een mens die de opbouw uit cellen toont. Haren, zweetklieren en talgklieren zijn weggelaten.*

sche verbinding, een molecuul dus, dat in zijn structuur de code bevat voor alle eigenschappen en functies van de cel. Straling die doordringt tot de celkern, kan het DNA beschadigen. Als het DNA sterk wordt beschadigd, gaat de cel dood of is hij niet meer in staat zich te delen. Dit geeft vooral schade in weefsels die zich snel vernieuwen, zoals beenmerg.

Een kleine beschadiging van het DNA kan er toe leiden dat de cel verandert in een kankercel en daaruit kan op den duur een kankergezwell ontstaan. Een kleine beschadiging in het DNA van een geslachtscel (een zaadcel of een eicel) kan een mutatie tot gevolg hebben: dat is een verandering die pas in het nageslacht tot uiting komt. Iedere keer voordat een cel gaat delen, moet al het DNA worden gedupliceerd, zodat ieder van de dochtercellen weer de volledige code van de moedercel mee krijgt. Tijdens dat dupliceren – wat te vergelijken is met overschrijven – worden regelmatig schrijffouten gemaakt, wat hetzelfde effect heeft als beschadiging van het DNA. Bovendien ontstaan er dikwijls kleine beschadigingen van het DNA door reacties met stoffen in de cel zelf of met stoffen en straling die vanuit het milieu in de cel doordringen.

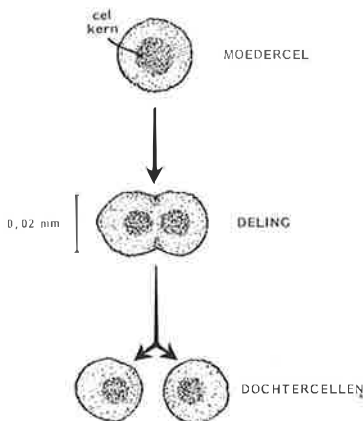
## HOE KUNNEN LEVENDE WEZENS BLIJVEN VOORTBESTAAN ALS HET DNA IN HUN CELLEN ZO GEMAKKELIJK EN VAAK SCHADE OPLOOPT?

Gelukkig heeft de natuur ervoor gezorgd dat cellen zijn uitgerust met een groot aantal middelen om die schade ook weer snel te herstellen. Dat gebeurt bijvoorbeeld door enzymen, die het beschadigde stuk DNA uitknippen en door andere enzymen, die het ontstane gat weer repareren. Een enzym is een stof die chemische reacties in biologische systemen regelt. Dat het wel eens mis gaat, omdat een reparatie niet goed werd uitgevoerd of omdat een beschadiging toch niet kon worden gerepareerd, blijkt uit het vóórkomen van spontane erfelijke afwijkingen en uit het feit dat bij veel mensen en dieren vooral op latere leeftijd kankers van allerlei aard voorkomen. Zoals elders wordt besproken, komen in de natuur ook straling en radioactiviteit voor, waaraan dus alle levende wezens bij voortduring zijn blootgesteld. Als wij de risico's van kunstmatige straling beoordelen, doen wij er daarom

verstandig aan steeds weer een vergelijking te trekken met de normaal al door de natuur veroorzaakte stralingsniveaus.

Als de cellen worden getroffen door een grote hoeveelheid straling in een korte tijd, is de schade aan het DNA zo uitgebreid dat deze niet kan worden gerepareerd en dan gaat die cel dood. Als alle cellen in een weefsel of orgaan door veel straling worden getroffen, gaan er uiteraard veel cellen dood. Net als bij andere beschadigingen, bijvoorbeeld een verwonding, zullen de verloren gegane cellen worden aangevuld met nieuwe cellen, die door celdeling uit de nog levende cellen worden gevormd. De cellen die speciaal met de produktie van nieuwe cellen bezig zijn, worden wel stamcellen of moedercellen genoemd (figuur 6.2.). Voor het herstel is het wel nodig dat er voldoende stamcellen over zijn en dat die stamcellen zich nog kunnen delen. Als dat niet meer het geval is, zal zo'n weefsel of orgaan blijvend beschadigd zijn en dat kan soms levensbedreigende gevolgen hebben.

Figuur 6.2.



*Schematische tekening van de celdeling; de celkern bevat het DNA.*

## 7. Directe gevolgen van zeer grote doses straling

Levensgevaarlijke schade ontstaat als mensen worden blootgesteld aan enkele honderden rem en wanneer daarbij het hele lichaam of het grootste deel van het lichaam wordt getroffen. Zulke schade veroorzaakt in korte tijd – dagen tot weken – ernstige ziekte. Dit noemt men acute gevolgen of effecten. Dat is voorgekomen bij de atoombomexplosies in Japan en als gevolg van een klein aantal ongelukken met radioactieve stoffen en kernreactoren. In de Japanse situatie was er uiteraard geen gelegenheid om nauwkeurige waarnemingen van de doses te doen bij degenen die zijn overleden. Men heeft achteraf wel ongeveer kunnen reconstrueren wat de stralingsintensiteit op verschillende plaatsen in de stad was geweest en daaruit viel af te leiden welke dosis de overledenen ongeveer ontvangen hadden. Gegevens zijn verder verkregen bij het kleine aantal personen (enkele tientallen), dat totale lichaamsbestraling opliep tijdens ongevallen. Ook is veel kennis opgedaan uit proeven met allerlei soorten dieren. Daardoor is vrij nauwkeurig bekend welke de dodelijke doses straling zijn voor de mens. De dosis waarbij 50% van de slachtoffers verwacht wordt te overlijden, wordt geschat op tussen de 350 en 400 rem. Bij 200 rem kan al een klein deel van de slachtoffers overlijden en boven de 600 rem gaat waarschijnlijk iedereen dood, als er geen speciale behandeling wordt gegeven. Na zulke grote hoeveelheden straling gaan de patiënten al spoedig ernstige ziekteverschijnselen vertonen: zij krijgen de stralingsziekte.

### WAT IS STRALINGSZIEKTE?

De stralingsziekte kan verschillende vormen hebben. Na bestraling met doses tussen de 200 en 1000 rem zijn de ziekteverschijnselen het gevolg van de vernietiging van het bloedvormend weefsel, dat voornamelijk in het beenmerg is gelokaliseerd. In

het beenmerg huizen de cellen, die middels een groot aantal celdelingen de produktie van de bloedcellen verzorgen. Iedere dag wordt ongeveer 100 gram van zulke cellen aangemaakt: dezelfde hoeveelheid gaat bij gezonde mensen dagelijks verloren door normaal verbruik. Als gevolg van hoge doses straling gaan de stamcellen in het beenmerg dood en houdt de aanmaak van nieuwe bloedcellen op. Er zijn drie belangrijke soorten bloedcellen:

- de rode cellen, die het transport van zuurstof uit de longen naar alle andere cellen in het lichaam onderhouden;
- de witte bloedcellen, die nodig zijn voor de verdediging van ons lichaam tegen infecties met bacteriën, virussen en schimmels;
- de bloedplaatjes, die zorgen voor de stolling van ons bloed als er een verwonding ontstaat.

Rode bloedcellen blijven, nadat zij zijn gevormd, gemiddeld drie maanden leven. Als de produktie van *rode* bloedcellen volledig stopt, kan het wel een maand duren voor er een ernstige levensbedreigende bloedarmoede optreedt en die kan trouwens heel goed worden bestreden met bloedtransfusies.

Veel gevaarlijker is het als de produktie van *witte* bloedcellen ophoudt; deze cellen hebben een kortere levensduur, namelijk ongeveer een week. Bij een tekort aan witte bloedcellen ontstaan op diverse plaatsen infecties, want ons lichaam is constant in aanraking met grote aantallen bacteriën en virussen. Ook bacteriën die voor een gezond mens volstrekt ongevaarlijk zijn, kunnen bij iemand zonder witte bloedcellen dodelijk verloopende infecties veroorzaken. Toediening van antibiotica kan deze infecties wel enkele dagen afremmen, maar zonder de hulp van witte bloedcellen kunnen die middelen geen genezing brengen. Ook behandeling met transfusies van witte bloedcellen van gezonde donors heeft slechts korte tijd een gunstig effect. Gebrek aan bloedplaatjes veroorzaakt kleine en grote bloedingen door het hele lichaam, ook zonder uitwendige verwondingen. Dat komt omdat in de wand van onze bloedvaten als gevolg van de normale spierbewegingen voortdurend hele kleine scheurtjes en gaatjes ontstaan. Die worden steeds weer gedicht door kleine bloedstolsels, voordat er een beduidend aantal rode bloedcellen door weg-



stroomt. Als het bloed niet meer kan stollen door gebrek aan bloedplaatjes, verbloedt de patiënt als het ware inwendig. Transfusies van bloedplaatjes, die uit het bloed van gezonde donors worden gewonnen, helpen ook hier maar zeer tijdelijk. Gelijktijdig optredende infecties en bloedingen zijn heel moeilijk te bestrijden. De meeste patiënten met ernstige stralingsziekte zullen dan ook tussen 2 en 6 weken na de bestraling zijn overleden, als het beenmerg zich niet spontaan herstelt en als zij niet worden behandeld.

#### WAT ZIJN DE GEVOLGEN VAN NOG HOGERE DOSES STRALING?

Als mensen worden blootgesteld aan stralingsdoses van meer dan 1000 rem (10 Sv) ontstaat er een onherstelbare schade aan de binnenbekleding van de darmen. Die bestaat uit een dun vlies, dat slijmvlies wordt genoemd, omdat de cellen die er deel van uitmaken onder meer het darmslijm produceren. Ook de cellen van dat vlies worden in hoog tempo aangemaakt om het grote verbruik te compenseren. Als door grote beschadiging de produktie van die cellen ophoudt, wordt de binnenkant van de darm binnen enkele dagen kaal, dat wil zeggen dat er geen slijmvlies meer is. Het slijmvlies heeft niet alleen tot taak om voedingsstoffen uit de inhoud van de darm op te nemen en naar het bloed over te brengen, maar ook om vloeistof en daarin opgelost zout uit de darm in het bloed terug te voeren. Een volwassen mens produceert per etmaal ongeveer 8 liter vloeistof in de vorm van speeksel, maagsap, gal en sap van de alveesklier en de darmkliertjes. Daarvan wordt meer dan 95% weer teruggenomen door de cellen die de binnenkant van de darm bekleden. Als die bekleding kapot is, kan dat sap niet worden teruggenomen en ontstaat er een onstuitbare diarree die veel lijkt op cholera. Het verlies van vocht en zout gaat zo snel, dat infusies niet voldoende helpen en de patiënten binnen enkele dagen sterven.

Bij nog veel hogere doses, namelijk groter dan 10.000 rem (100 Sv), ontstaat binnen 1 of 2 dagen een dodelijk verloopende beschadiging van de hersenen. Met dergelijke zeer grote doses bestaat bij mensen vrijwel geen ervaring. Bij ongevallen met kernreactoren, hoe ernstig ook, zullen zij ook zelden of nooit voorko-

men. Bij explosies van atoombommen uiteraard wel, maar degenen die zo dicht bij het explosiepunt verblijven dat zij door zulke grote doses straling worden getroffen, zullen vrijwel altijd al door de hitte, door vallende gebouwen of door de drukgolf direct zijn gedood, dus nog voordat de stralingsschade merkbaar wordt. Van het ongeval in Tsjernobyl is alleen uit Russische bron bekend dat er een kleine 200 mensen in ziekenhuizen zijn opgenomen wegens ernstige stralingsschade. Hoeveel van hen een levensbedreigende dosis hebben opgelopen en of er ook patiënten met onherstelbare darmschade bij waren, is nog niet bekend.

## IS BEHANDELING VAN STRALINGSZIEKTE MOGELIJK?

Zoals gezegd is spontaan herstel na doses van 600 rem en hoger vrijwel uitgesloten. Voor een deel van de patiënten die een levensgevaarlijke beschadiging van het beenmerg hebben opgelopen, kan tegenwoordig een behandeling met beenmerg (beenmergtransplantatie) levensreddend zijn. Reeds in 1957 is die behandeling toegepast bij vijf slachtoffers van een ongeval met een experimentele reactor in Vinca in Joegoslavië. In die tijd was er nog weinig ervaring met beenmergtransplantatie en het is nooit duidelijk geworden of de patiënten zijn hersteld dank zij de transplantatie of door herstel van hun eigen beenmerg. Inmiddels zijn er over de hele wereld ruim 10.000 beenmergtransplantaties verricht bij patiënten met bloedkanker (leukemie) en bij patiënten bij wie het beenmerg onherstelbaar was beschadigd door chemische stoffen of door onbekende oorzaak. Die ervaring heeft geleerd dat stralingsslachtoffers als boven beschreven waarschijnlijk met succes kunnen worden behandeld met beenmerg van een passende donor. Die kan worden gezocht onder de broers of zusters van de patiënt, met een bepalingmethode die enigszins lijkt op de bepaling van bloedgroepen. Als zo'n passende donor niet beschikbaar is, kan beenmerg van een ander familielid worden getransplanteerd, maar de kansen op herstel zijn dan minder groot. Overigens vereist de behandeling met beenmerg niet alleen ervaren dokters, maar ook een langdurige, gecompliceerde en moeilijke verpleging. Behandeling met beenmerg kan dus niet worden toegepast als het om zeer grote aantal

len patiënten gaat, zoals bij een oorlog met kernwapens. In de Russische ziekenhuizen is beenmergtransplantatie nog niet ingevoerd, vandaar dat zowel uit de Verenigde Staten als uit de Europese Gemeenschap het aanbod werd gedaan experts op dit gebied te hulp te sturen voor de behandeling van daarvoor in aanmerking komende patiënten uit Tsjernobyl. Inmiddels schijnen een aantal beenmergtransplantaties te zijn verricht.

#### WAT GEBEURT ER ALS MEN ZO'N GROTE DOSIS STRALING NIET INEENS OPLOOPT, MAAR IN DE LOOP VAN EEN PAAR DAGEN OF LANGER?

De algemene regel is dat de schade minder wordt als een dosis straling over een langere tijd gespreid wordt opgenomen. Anders gezegd: er is meer straling nodig om een bepaalde schade te veroorzaken als de hoeveelheid straling per tijdseenheid lager is. Die invloed van de tijd is niet voor ieder soort schade dezelfde. In het geval van totale lichaamsbestraling en de vorm van stralingsziekte die veroorzaakt wordt door vernietiging van het beenmerg, is de hoeveelheid die voor 50% van de slachtoffers dodelijk verloopt, ongeveer 350 rem (3,5 Sv) als de bestraling binnen 1 uur plaatsvindt. Als de bestraling over een periode van 4 weken plaatsvindt, bijvoorbeeld door een verblijf van die duur in een gebied met hoge radioactiviteit, zal pas bij een totale dosis van ruim 500 rem (5 Sv) 50% van de mensen sterven. Dit zijn uiteraard schattingen, die gemaakt zijn naar aanleiding van experimenteel onderzoek met proefdieren, maar de schaarse gegevens van patiënten zijn daarmee in overeenstemming.

#### ZIJN ER BEHALVE STRALINGSZIEKTE NOG ANDERE VORMEN VAN ACUTE STRALINGSSCHADE VAN BELANG?

Inderdaad, er zijn nog drie organen die onder bijzondere omstandigheden zo'n grote dosis straling kunnen oplopen dat er na korte tijd afwijkingen in ontstaan. Dit zijn de huid, de longen en de schildklier.

### *De huid*

Indien de onbedekte huid langere tijd in aanraking blijft met grote hoeveelheden radioactiviteit, kan binnen enkele dagen een soort ontsteking van de huid ontstaan, die enigszins lijkt op verbranding. Dit is in 1954 gebeurd bij de bewoners van het eilandje Rongelap, waar een sterk radioactieve neerslag van koraalstof en radioactieve stoffen plaatsvond, afkomstig van de explosie van een waterstofbom op de Bikini-atol, op ruim 100 mijl afstand. Omdat de mensen in dat tropische klimaat schaars gekleed gaan, werden grote stukken van hun huid met het stof bedekt. Zij waren zich niet van het gevaar daarvan bewust, zodat sommigen van hen twee dagen daarmee rondgelopen hebben, totdat zij geëvacueerd en ontsmet werden. De verbranding van de bestraalde huid is bij allen in enkele maanden genezen, zonder blijvende schade achter te laten. De hoeveelheid straling die op de huid is afgegeven, was niet bij benadering te bepalen, maar wordt geschat op minstens enkele duizenden rem (enkele tientallen Sv). In onze streken is de kans op zulke huidbeschadigingen veel kleiner: in de eerste plaats omdat wij meer kleren aan hebben en in de tweede plaats omdat in voorkomende gevallen zeker snel zal worden geadviseerd om de aan neerslag blootgestelde delen goed te wassen.

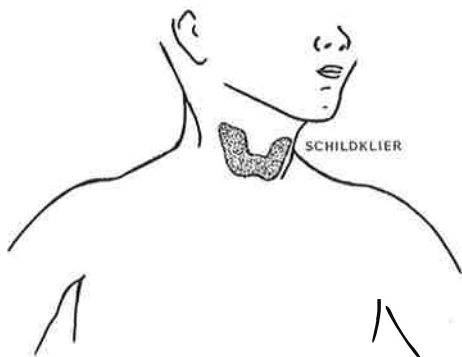
### *De longen*

De longen kunnen gevaar lopen als de lucht zulke grote hoeveelheden radioactiviteit bevat, dat het inwendige van de long door de inademing van die lucht aan hoge doses straling wordt blootgesteld. Het gaat dan om hoeveelheden van enkele duizenden rem (enkele tientallen Sv). Lang voor het zover komt, dienen maatregelen te worden genomen: eerst het advies om binnen te blijven en ramen en deuren zoveel mogelijk gesloten te houden om het stof buiten te houden. Daarna eventueel evacuatie. Evacuatie zal veelal eerder nodig zijn wegens het gevaar van totale lichaamsbestraling dan wegens het gevaar voor teveel straling in de longen.

### *De schildklier*

De schildklier is een klein orgaan in de hals, dat onder het strottenhoofd is gelegen (figuur 7.1). Daar vindt de produktie plaats

Figuur 7.1



van het schildklierhormoon, een stof die nodig is voor de groei van jonge kinderen en voor de regeling van onze stofwisseling. Het schildklierhormoon bevat enig jodium en de schildklier heeft de eigenschap om jodium uit het bloed te concentreren. Zodra er dus via voedsel, water of melk radioactief jodium in het lichaam wordt opgenomen, komt een groot deel daarvan in de schildklier terecht. Die krijgt dus ook veel meer straling dan andere plaatsen van het lichaam. Als de dosis in bijvoorbeeld enkele weken boven de 1000 rem (10 Sv) komt, kan er blijvende schade in de vorm van een verminderde functie van de schildklier ontstaan. De maatregelen ter beperking van de opname van radioactief jodium (via de melk) zijn er echter niet zozeer op gericht dit soort schade te voorkomen, maar om te verhinderen dat er later bij een deel van de aan radioactief jodium blootgestelde mensen kanker van de schildklier ontstaat. De daarvoor vastgestelde grens ligt veel lager, namelijk 5 rem (0,05 Sv) en is bepaald voor de schildklier van kinderen, die grote hoeveelheden melk drinken. Daarop was bij ons de norm van 500 Bq per liter melk gebaseerd. Het radioactieve jodium is een zeer vluchtige stof, die gemakkelijk uit een beschadigde kerncentrale kan ontsnappen en neerslaat op bijvoorbeeld grasland. Grazende koeien nemen daarvan grote hoeveelheden op en een deel daarvan komt in de melk terecht.

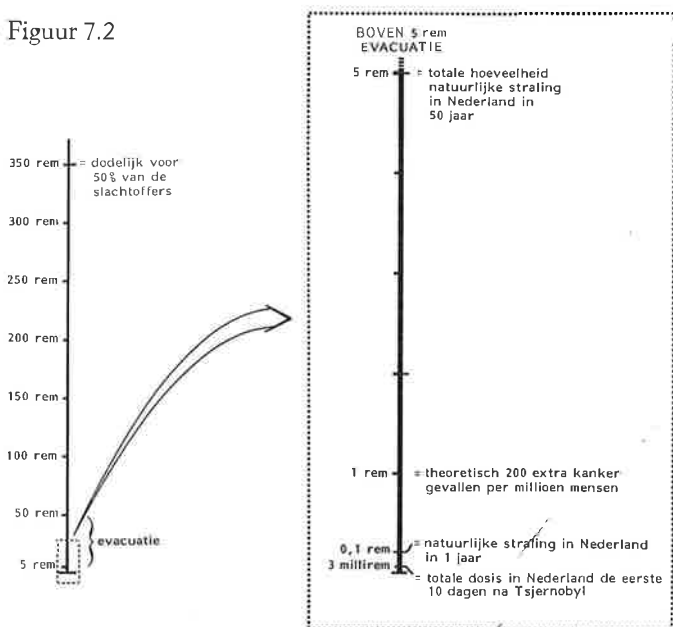
In het geval dat de opname van grote hoeveelheden radioactief jodium niet te vermijden is, bijvoorbeeld wegens hoge concentraties in de lucht of onvoldoende beheersing van de melkpro-

duktie en -distributie, kan de opname in de schildklier worden tegengehouden door het slikken van jodiumtabletten. Deze hebben echter alleen een gunstige werking als ze vlak voor of binnen enkele uren na de opname van het radioactieve jodium worden ingenomen. Bij continue blootstelling aan grote hoeveelheden radioactief jodium moet men om de zes uur een tablet met 100 mg jodium innemen. Onder zulke omstandigheden – lang aanhoudend – zal veelal evacuatie moeten worden overwogen. Het heeft geen zin jodiumtabletten in te nemen als de opname van radioactief jodium op andere wijze kan worden beperkt.

## WANNEER WORDT HET NOODZAKELIJK MENSEN TE EVACUEREN?

Daarover zijn onder meer aanbevelingen gedaan door de toon-

Figuur 7.2



aangevende ICRP, de International Commission on Radiological Protection (internationale commissie voor stralingsbescherming). Het advies dat in 1984 werd uitgebracht, stelt dat evacuatie reeds kan worden overwogen als de totale lichaamsbestraling ten minste een dosis van 5 rem (50 mSv) zal bereiken, indien de bevolking ter plaatse zou blijven (figuur 7.2). Evacuatie moet in ieder geval ondernomen worden voordat de totale lichaamsbestraling een dosis van 50 rem (500 mSv) bereikt. Deze waarden moeten worden vergeleken met de dosis van ongeveer 150 rem (1500 mSv), waarbij nog geen direct levensgevaar dreigt. In dit verband zijn ook waarden vastgesteld voor de te verwachten dosis straling op de longen, de schildklier of enig ander beperkt deel van het lichaam. Deze getallen zijn in tabel 7.1 af te lezen. Uit Russische bron werd gemeld dat de omwonenden van de

Tabel 7.1

Dosisniveaus waarbij tegenmaatregelen wenselijk zijn.

		Doses op hele lichaam	long of schildklier
binnenshuis blijven en jodium slikken	minimum 1)	0,5 rem	5 rem
	maximum 2)	5 rem	50 rem
evacuatie	minimum	5 rem	50 rem
	maximum	50 rem	500 rem

ICRP (Internationale Commissie voor Stralingsbescherming), publicatie 40, 1984.

1 rem = 0,01 sievert

- 1) het laagste niveau, waarbij die maatregel zin heeft
- 2) de grens, waarboven de maatregel niet achterwege mag blijven.

reactor te Tsjernobyl in de eerste dagen na het ongeval waren blootgesteld aan een straling van gemiddeld 15 mrem per uur, dat is 360 mrem (3,6 mSv) per dag. Omdat men de brand in de reactor niet spoedig onder controle kreeg, werd terecht voorzien dat deze bevolkingsgroep in de loop van 10 of 14 dagen de grensdosis van 5000 mrem of 5 rem (0,05 Sv) zou kunnen bereiken en werd na enkele dagen tot evacuatie besloten. Als de opgegeven waarden van het stralingsniveau juist zijn, heeft men tijdig en geheel in overeenstemming met de adviezen van de ICRP gehandeld.

### ZIJN ER IN ONS LAND VOORZIENINGEN GETROFFEN VOOR DE BEHANDELING VAN STRALINGSSLACHTOFFERS?

Vanaf het in gebruik stellen van onze reactoren is er een rampenplan dat ook voorziet in de behandeling en de verpleging van stralingszieken. Het aantal slachtoffers dat bij een ongeval met een van onze reactoren zo ernstig wordt bestraald dat verpleging en beenmergtransplantatie nodig is, wordt geschat op hooguit enkele tientallen en wel omdat de constructie en beveiliging van onze reactoren bijzonder degelijk is. Voor de ongevalssituatie is er een scenario dat voorziet in de opname van patiënten in een speciaal daarvoor ingerichte afdeling van het Academisch Ziekenhuis te Leiden. In geval van besmetting van de patiënten met radioactieve stoffen zal de ontsmetting daar ook kunnen plaatsvinden. Ook beenmergtransplantatie is daar goed mogelijk. Er is een regeling gemaakt met deskundigen van het Radiobiologisch Instituut TNO, die beschikbaar zullen zijn voor bijstand bij de behandeling van die patiënten. In Nederland is met die behandeling reeds veel ervaring opgedaan, niet alleen te Leiden, maar ook te Rotterdam in de Dr. Daniël den Hoed Kliniek en in het Academisch Ziekenhuis te Nijmegen, zodat indien nodig ook op die plaatsen patiënten kunnen worden opgenomen.

### KAN STRALING STERILITEIT VEROORZAKEN?

Inderdaad, maar daarvoor zijn grote doses straling nodig. Permanente steriliteit ontstaat na bestraling van de geslachtsorganen



met doses vanaf 500 rem. Dit is goed bekend omdat vroeger vrouwen die om gezondheidsredenen geen kinderen mochten krijgen, met straling werden gesteriliseerd. Ook over de gevolgen van bestraling van de testikels bij mannen is veel bekend geworden, omdat bestraling van de testikels soms moet worden uitgevoerd ter behandeling van kanker.

Steriliteit is echter van ondergeschikt belang bij stralingsongevallen, omdat slachtoffers die zouden zijn blootgesteld aan zulke hoge doses **algehele lichaamsbestraling**, weinig kans hebben te overleven. Wel kan bij lagere doses vanaf 100 rem tijdelijke onvruchtbaarheid ontstaan, die vier weken na de bestraling begint op te treden en soms twee jaar daarna nog niet geheel is hersteld.

## 8. Zwangere vrouwen en het ongebooren kind

BIJ ALLE DISCUSSIES OVER STRALINGSGEVAREN EN MAATREGELEN TER BESCHERMING VAN DE BEVOLKING WORDT BIJZONDERE AANDACHT GEGEVEN AAN DE RISICO'S VOOR HET ONGEBOREN KIND ( DE VRUCHT). WAT ZIJN DAARVOOR DE REDENEN?

In de eerste plaats zijn er bepaalde perioden in de ontwikkeling van de vrucht, waarin die extra kwetsbaar is voor straling. Deze perioden vallen samen met de tijd dat de belangrijkste delen van het lichaam worden gevormd. Die vorming vindt plaats vanuit één of enkele cellen, die via vele celdelingen het begin van een arm, een hart, enz. vormen. Als een van die cellen wordt gedood door de bestraling, zal dat deel onvolkomen tot stand komen en kan er een aangeboren afwijking uit voortkomen. In de periode tot 8 weken na de bevruchting van de eicel vindt de vorming van alle organen plaats, behalve van de hersenen. De hersenen worden in de periode van 8-15 weken na de bevruchting ontwikkeld. Een storing van de orgaanontwikkeling kan, als deze ernstig genoeg is, tot een misvorming bij het kind leiden. Een storing in de ontwikkeling van de hersenen leidt in ernstige gevallen tot geestelijke invaliditeit en in minder ernstige tot een vermindering van de capaciteit van de hersenen, die zich uit in een lagere intelligentie. Hoewel er ruim 1700 vrouwen onder de bevolking van Hiroshima en Nagasaki zwanger waren ten tijde van de explosies en later een levend kind ter wereld brachten, en hoewel er in de loop der jaren talloze zwangere vrouwen om medische redenen aan straling zijn blootgesteld, zijn er geen betrouwbare gegevens over het verband tussen de stralingsdoses op het ongebooren kind en over de kans dat die vrucht misvormingen zal ontwikkelen.

Op grond van veel experimenten met bestraalde zwangere mui-

zen weten wij dat bij een klein deel van de muizebabies al na een dosis vanaf 25 rem (250 mSv) misvormingen voorkomen. In de jaren dat abortus slechts op strikt medische indicatie werd verricht, hield men in Denemarken een dosis van 10 rem (100 mSv) op de minder dan 9 weken oude vrucht aan als grens waarboven abortus was toegestaan.

De kans dat beneden die dosis misvormingen worden veroorzaakt, wordt buitengewoon klein geacht, namelijk niet groter dan de spontaan optredende afwijkingen. Toch zou het goed zijn als er op dit gebied meer gegevens werden verzameld, maar dat kan uiteraard alleen nog maar door dierexperimenten, omdat bestraling van de ongeboren menselijke vrucht tegenwoordig zoveel mogelijk wordt vermeden.

Over het ontstaan van een ontwikkelingsstoornis van de hersenen is meer bekend geworden uit onderzoek van de kinderen van bestraalde Japanse vrouwen. De reeds eerder genoemde ICRP heeft de gegevens geanalyseerd van de kinderen van 140 vrouwen, die tijdens de zwangerschap het bombardement meemaakten. Uit die studie blijkt dat bij een stralingsdosis van 100 rem (1Sv) in de periode van 8-15 weken na de bevruchting de kans op hersenbeschadiging 40% is. Men moet er van uitgaan dat bij lagere doses de kans evenredig afneemt en dus dat er geen dosis is waarbij het risico nul is. Bij de laagste stralingsdosis die evacuatie nodig maakt, namelijk 5 rem, is de aldus berekende kans op hersenschade voor vruchten van 8-15 weken dus 2%. Als wij rekening houden met een afscherming door het moederlichaam met een factor 2, komt die kans op 1%. Dit is inderdaad een speciaal risico voor zwangerschappen van die leeftijd en het maakt dat die groep van zwangere vrouwen extra voorzorgen behoeft. Dat is dan ook de reden hen bij evacuatie voorrang te geven.

De tweede reden om zwangere vrouwen extra te beschermen heeft te maken met een verhoogde kans op het ontstaan van kanker door bestraling van de ongeboren vrucht. Vroeger werden er van ongeboren babies en van het bekken van de zwangere vrouw dikwijls röntgenfoto's gemaakt om na te gaan of er afwijkingen waren, waarmee dan weer bij de baring rekening kon worden gehouden. Tegenwoordig gebeurt dat bijna nooit meer, omdat men voor dat doel echografie (ultrageluid) kan gebruiken. Bo-

vendien is men veel voorzichtiger geworden met het gebruik van röntgenstraling bij zwangeren.

Uit een groot aantal onderzoeken bij kinderen van vrouwen die wel en van vrouwen die niet tijdens de zwangerschap röntgenologisch werden onderzocht, is de indruk verkregen dat als gevolg van een dergelijke bestraling de kans op kanker bij de kinderen van die vrouwen 1,5 tot 2 maal groter is. Er zijn nogal wat onopgeloste tegenstrijdigheden in die waarnemingen, maar als wij voor de zekerheid aannemen dat zij juist zijn, betekent het dat een betrekkelijk kleine dosis van ongeveer 1 rem (10 mSv) op de ongeboren vrucht een verdubbeling van de kans op kanker bij de kinderen veroorzaakt. Gelukkig komt kanker bij kinderen veel minder voor dan bij volwassenen, zodat het totale risico van een bestraalde bevolkingsgroep op extra kanker door de aanwezigheid van een klein aantal zwangeren nauwelijks wordt beïnvloed. Gezien de zeer kleine aantallen kankergevallen waar het om gaat, kan nu al worden voorspeld dat het zeer onwaarschijnlijk is dat voortgezet onderzoek bij de kinderen van vrouwen die zwanger waren en in de omgeving van Tsjernobyl enkele rem straling hebben opgelopen, een toename van kankergevallen aan het licht zal brengen.

De situatie van de afgelopen weken heeft wel geleerd hoe belangrijk het is dat meer zekerheid wordt verkegen over de risico's die zwangeren lopen bij stralingsongevallen, zodat eenduidige en voor iedereen aanvaardbare beschermingsmaatregelen kunnen worden uitgevaardigd. Die zekerheid kan alleen worden verkregen door het wetenschappelijk onderzoek over deze problemen met kracht te bevorderen.

#### IS ER REDEN VOOR ZWANGERE VROUWEN OM TE VREZEN DAT DE STRALING VAN DE AFGELOPEN WEKEN IN NEDERLAND ABORTUS VEROORZAAKT?

Beslist niet. Abortus treedt op als de vrucht zo ernstig wordt beschadigd, dat hij niet meer levensvatbaar is. Bij welke dosis straling dit kan gebeuren, is niet precies bekend, maar wel staat vast dat die kans zelfs bij doses waarbij evacuatie noodzakelijk wordt geacht (5 rem), zeer gering is. Abortus komt onder nor-

male omstandigheden al vrij vaak voor en alleen al door de stress die met paniek, evacuatie en dergelijke gepaard gaat, kan het aantal spontane abortussen toenemen.

## 9. Straling en kanker

### OP LANGE TERMIJN VEROORZAAKT STRALING KANKER. HOE KOMT MEN AAN DAT GEGEVEN?

Die uitspraak berust op onderzoek dat al ruim veertig jaar aan de gang is. Een hele belangrijke bron van zulke informatie zijn de overlevenden van de Japanse atoombomaanvallen. Daarnaast zijn er grote aantallen mensen die vroeger op een deel van hun lichaam zijn bestraald voor de behandeling van ziekten, en mensen die tijdens hun werk zijn blootgesteld aan radioactieve stoffen. Een voorbeeld daarvan zijn werkers in mijnen met een hoog gehalte aan radium of uranium. Al met al zijn het tienduizenden mensen van wie wordt bijgehouden aan welke ziekten zij tenslotte overlijden. Zulke langdurige studies zijn nodig omdat het vele jaren duurt voordat kanker na bestraling ontstaat. Voor enkele soorten is dat enkele jaren, maar voor de meeste vormen van kanker duurt de ontwikkeling gemiddeld 20 jaar en voor sommige andere nog veel langer.

### WAT IS KANKER?

Kanker is een ziekte die berust op een ontregelde en daardoor overbodige aanmaak van cellen. Het gedrag van deze kankercellen wijkt bovendien af van dat van normale cellen, doordat zij een grote neiging tonen om in het lichaam uit te zaaien en zich dan elders te vermenigvuldigen. Er zijn ongeveer honderd verschillende soorten kanker: in principe kan elk type cel, bijvoorbeeld van de huid, het beenmerg enz., een verandering ondergaan die tot kanker leidt.

### VEROORZAAKT STRALING EEN BEPAALD TYPE KANKER?

Er zijn geen kankers die exclusief door straling worden veroorzaakt. Straling veroorzaakt alleen een toename van het aantal kankers boven het zeer grote aantal dat door natuurlijke oorza-

ken of door kankerverwekkende chemische stoffen ontstaat. De soort kanker die ontstaat hangt af van het weefsel of het orgaan dat door de straling wordt getroffen. Men moet dus steeds het aantal kankergevallen dat ontstaat in een groep bestraalde personen, vergelijken met het aantal in niet bestraalde groepen. Kanker komt normaal heel veel voor, vooral op latere leeftijd. Van iedere miljoen mensen in West-Europa zullen er 350.000 kanker krijgen. De kans dat iemand ooit kanker krijgt is dus 1 op 3. Ongeveer 50% van alle patiënten met kanker kan tegenwoordig worden genezen. Sommige typen kanker zijn beter te genezen dan andere; schildklierkanker zonder uitzaaiing bijvoorbeeld in 95% en bijna alle soorten huidkanker in 100% van de gevallen. Daar staat tegenover, dat 90% van de gevallen van longkanker nog steeds ongeneeslijk is.

#### HOE GROOT IS HET RISICO DAT ER DOOR BESTRALING KANKER ONTSTAAT? (zie ook hfdst. 12)

Dat risico wordt bepaald door de hoeveelheid straling. Hoe groter de hoeveelheid straling die een groep mensen heeft ontvangen, hoe meer extra gevallen van kanker er ontstaan. Dat verband tussen de dosis straling en de aantallen extra kankers heeft men zeer duidelijk vastgesteld voor grote doses straling, namelijk voor doses van meer dan 50 rem (0,5 Sv). Daaruit werd berekend dat voor iedere extra rem 200 extra kankergevallen per miljoen mensen kunnen worden verwacht. Voor 50 rem betekent dat 10.000 extra gevallen boven de 350.000 per miljoen die normaal al voorkomen. Bij lagere doses dan 50 rem is het niet meer mogelijk het aantal extra kankers te bepalen, omdat een verhoging van de natuurlijke aantallen met minder dan 5% nauwelijks is vast te stellen.

#### HOE KAN MEN DAN SPREKEN OVER HET RISICO VOOR KANKER BIJ ZULKE KLEINE DOSES STRALING ALS ER BIJVOORBEELD DOOR DE RADIOACTIEVE WOLK VAN TSJERNOBYL OP DE NEDERLANDSÉ BEVOLKING ZIJN AFGEGEVEN

(ongeveer 3 millirem)?

Omdat niet bekend is wat zulke kleine doses straling doen en omdat onvoldoende bekend is hoe kanker precies door straling wordt veroorzaakt, neemt men uit veiligheidsoverwegingen aan dat iedere hoeveelheid straling, hoe klein ook, een evenredige verhoging van de kans op kanker meebrengt. Dit betekent dat ook de natuurlijke straling verantwoordelijk moet worden gesteld voor een deel van de kankers die normaal voorkomen. Men kan zo berekenen dat de natuurlijke straling verantwoordelijk kan worden gesteld voor 1% van de kankers die in de Nederlandse bevolking voorkomen. Op dezelfde wijze gaat men er van uit dat iedere extra rem straling de kans op het ontstaan van kanker met 0,06% doet toenemen (200 gevallen per 350.000).

Deze getallen voor lage stralingsdoses zijn dus theoretisch, maar zijn wel bruikbaar ten behoeve van de beschermingsmaatregelen tegen straling. Zo kan men uitrekenen dat in Nederland de straling van Tsjernobyl van de afgelopen weken (geschat op 3 mrem) ongeveer 9 extra kankergevallen zal kunnen veroorzaken voor de totale bevolking van 14 miljoen mensen. Die 9 extra gevallen moeten worden vergeleken met de 5 miljoen spontane kankergevallen in die zelfde bevolking over de komende decennia. Tenslotte zullen van die negen gevallen er zeven in de schildklier ontstaan en daarvan is het grootste deel met succes te behandelen. Als de bewoners die bij Tsjernobyl zijn geëvacueerd niet meer dan 5 rem per persoon gemiddeld hebben opgelopen en dus tijdig zijn geëvacueerd, zal hun risico om kanker te krijgen met ongeveer 1% zijn toegenomen.

#### IS HET DAN WEL NODIG OM ZULKE STRINGENTE VOORZORGEN TE NEMEN?

Ja, toch wel; men neemt voorzorgen om te voorkomen dat de opgelopen dosis bijvoorbeeld 10 maal zo groot wordt. In dat geval zou de kans op kanker met 10% toenemen. Als het bijvoorbeeld gaat om 100.000 personen, komt dit neer op 3.500 meer kankergevallen dan de 35.000 die deze groep spontaan zal krijgen. Weliswaar worden die extra gevallen uitgesmeerd over de komende vijftig jaar, maar men zal het er over eens zijn dat zo'n toename, indien mogelijk, moet worden vermeden.



## 10. Wat zijn de gevolgen voor het nageslacht van ouders die zijn blootgesteld aan lage doses straling?

Uit experimenten met muizen is gebleken dat aangeboren afwijkingen reeds voorkomen bij een klein percentage van de jongen uit ouderparen die vóór de bevruchting bestraald werden met een lage dosis van 1 rem. Bij de eerste generatie kinderen die werden geboren uit ouders die de kernexplosie van Hiroshima en Nagasaki overleefden, zijn echter geen aanwijzingen gevonden van een toename van erfelijke afwijkingen. Momenteel is hiervoor nog geen duidelijke verklaring te geven. Overigens zijn deze bevindingen in overeenstemming met de ervaring dat bij kinderen, verwekt door ouders die wegens kanker met straling behandeld werden, afwijkingen niet vaker voorkomen dan gemiddeld verwacht kan worden. Het aantal erfelijk bepaalde afwijkingen en ziekten (waaronder maar een deel echte misvormingen) is gemiddeld 6 à 9 op de 100 pasgeborenen, volgens onderzoek in Brits Columbia (Canada) en Noord-Ierland. Deze afwijkingen zijn een gevolg van vele kleine beschadigingen in het DNA van de geslachtscellen (zie hoofdstuk 6), die van generatie op generatie worden overgedragen op de nakomelingen. Al vanaf 1927 is uit onderzoek van Muller bij bananevliegen bekend dat lage doses straling een bijdrage kunnen leveren aan de afwijkingen die in het DNA optreden en daarmee aan de kans op het ontstaan van erfelijke afwijkingen.

Op grond van de gegevens die bij muizen zijn verzameld en extrapolatie naar de mens, neemt men aan dat voor iedere rem die een bevolkingsgroep ontvangt, twintig extra kinderen met erfelijke afwijkingen in de eerste generatie worden geboren per 1 miljoen levend geboren. In alle volgende generaties bij elkaar wordt het totale aantal extra erfelijke afwijkingen daarvan op 150 geschat, uiteraard als het bij die ene extra dosis straling in onze hedendaagse bevolking blijft. Dit aantal is heel klein, vergeleken met de 60.000 à 90.000 gevallen per miljoen die normaal al erfelijke afwijkingen vertonen. De dosis straling die door de radioac-

tieve neerslag in de afgelopen weken in ons land de bevolking trof (ongeveer 3 millirem), zou dus wellicht oorzaak zijn van  $(3/1000) \times 20 = 0,06$  per miljoen of 1 extra erfelijke afwijking op 16 miljoen kinderen die uit de thans aanwezige bevolking worden geboren. Daaruit kan worden geconcludeerd dat de genetische schade die Tsjernobyl in ons land kan hebben veroorzaakt, verwaarloosbaar klein is.

# 11. Natuurlijke straling en radioactiviteit

## IS NATUURLIJKE STRALING OVERAL?

Natuurlijke straling en radioactieve stoffen komen overal in de omgeving van de mens, in de grond, in het water en in de lucht voor. Ook in het lichaam van mens en dier zijn radioactieve stoffen altijd aanwezig.

## HOE GROOT ZIJN DE DOSES VAN NATUURLIJKE STRALINGSBRONNEN?

Een deel van de straling waaraan we zijn blootgesteld, is afkomstig van de zon en de sterren. Dit deel wordt kosmische straling genoemd. In ons land bedraagt de dosis van deze straling ongeveer 30 millirem per jaar. In berggebieden op grotere hoogte is deze dosis hoger, 60 millirem per jaar op een hoogte van 1000 meter, en 300 millirem per jaar op 4000 meter. Dit komt doordat op grotere hoogte de beschermende laag lucht dunner is. Om diezelfde reden heeft op grotere hoogte ook de zonnestraling, zowel het zichtbare als het ultraviolette licht, een hogere intensiteit. Een ander deel van de natuurlijke straling komt uit de grond en uit bouwmaterialen zoals steen en beton. Deze bodemstraling hangt sterk af van de grondsoort en van de herkomst van de bouwmaterialen. In Nederland is deze bodemstraling voor de klei- en zandgronden relatief laag en geeft een dosis van ongeveer 35 millirem per jaar, dus ongeveer evenveel als de kosmische straling op zeeniveau. In andere gebieden, bijvoorbeeld Bretagne en de Jura, worden waarden van 100 millirem per jaar gevonden. Er zijn gebieden in India en Brazilië waar de dosis nog een factor 10 hoger is.

## HOE KOMT NATUURLIJKE RADIOACTIVITEIT IN HET LICHAAM?

Ademhaling leidt tot opname van stofdeeltjes in de longen. Aan deze stofdeeltjes zitten vaak radioactieve vervalprodukten van uranium en thorium die in de grond en in bouwmaterialen voorkomen. De dosis die wordt afgegeven op de longen varieert sterk, in Nederland tussen 30 en 100 millirem per jaar, mede afhankelijk van de ventilatie in de woningen.

In drinkwater is vaak een lage concentratie radium aanwezig. Dit radium wordt opgenomen in het bot en geeft daar een dosis van de grootte van 10-20 millirem per jaar.

In voedsel zijn altijd de radioactieve stoffen kalium-40 en koolstof-14 aanwezig. De dosis afkomstig van deze stoffen bedraagt ongeveer 30 millirem per jaar.

Tabel 11.1

Gemiddelde waarden van het jaarlijks effectief dosisequivalent tengevolge van natuurlijke bronnen\*.

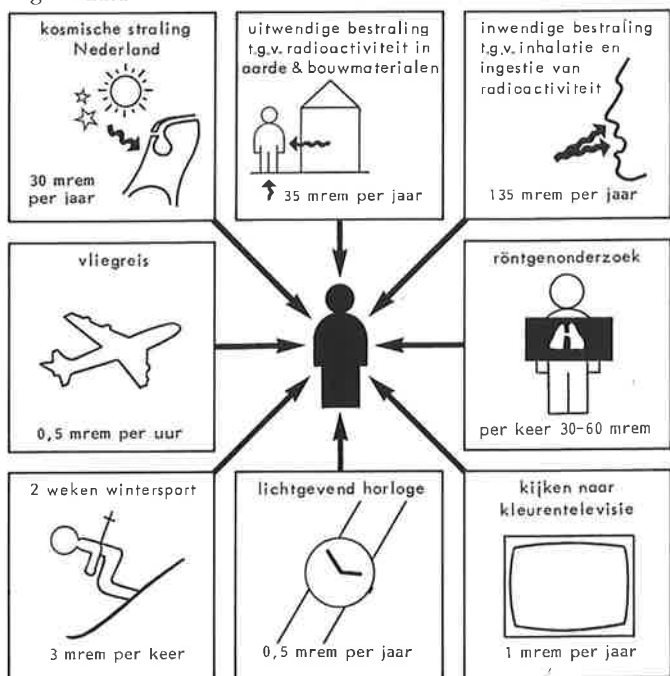
bron	effectief dosisequivalent in millirem (millisievert)	
kosmische straling	30 (0,30)	uitwendige bestraling
kalium-40 en koolstof-14	30 (0,30)	uitwendige bestraling + inwendige bestraling
uranium-238 en vervalprodukten	104 (1,04)	uitwendige bestraling + inwendige bestraling
thorium-232 en vervalprodukten	33 (0,33)	uitwendige bestraling + inwendige bestraling
<b>totaal</b>	<b>200 (2,0)</b>	

\* samengevat uit UNSCEAR 1982

## HOE GROOT IS DE TOTALE DOSIS ONTVANGEN DOOR DE NEDERLANDSE BEVOLKING?

Als gevolg van natuurlijke straling en opgenomen radioactieve stoffen ontvangt een Nederlander onder normale omstandigheden gemiddeld een dosis van ongeveer 200 millirem per jaar (tabel 11.1). Bovendien wordt echter een dosis ontvangen tengevolge van menselijke activiteiten die een bepaald nuttig doel dienen. De belangrijkste bijdrage wordt geleverd door toepassingen van straling in de geneeskunde, met name de medische röntgen-

Figuur 11.1



*Vergelijk: de straling tengevolge van de besmetting door 'Tsjernobyl' in Nederland bedraagt in de eerste 2 weken ongeveer 3 millirem.*

diagnostiek. Deze dosis bedraagt gemiddeld in Nederland ongeveer 50 millirem per jaar. Verder worden nog kleine bijdragen geleverd door het verblijf in bergstreken, het kijken naar kleurentelevisie, het maken van vliegreizen en de overgebleven radioactiviteit van atoombomexplosies uit de periode voor 1963. Een samenvatting van de belangrijkste bijdragen is gegeven in figuur 11.1.

Als algemene conclusie kan worden gesteld dat een inwoner van Nederland gemiddeld per jaar een totale dosis van 150 tot 250 millirem ontvangt.

### IS DE NATUURLIJKE STRALING GEVAARLIJK?

Beantwoording van de vraag of de mens niet te veel natuurlijke straling ontvangt, heeft geen praktische betekenis omdat nergens op aarde een plaats te vinden is waar geen straling voorkomt. Wel is uit veel onderzoek duidelijk geworden dat in sommige gebieden op aarde de dosis uit natuurlijke bronnen belangrijk hoger is dan in Nederland. Onderzoek naar de mogelijke gevolgen van een dergelijke hogere achtergrondstraling heeft tot nu toe niet uitgewezen dat schadelijke effecten, bijvoorbeeld het optreden van kanker, meer voorkomen in gebieden met een hogere natuurlijke stralingsdosis. Het meest uitgebreide onderzoek hierover is verricht in de Volksrepubliek China. Daar werd onder andere het voorkomen van erfelijke afwijkingen en van kanker onderzocht in gebieden waar de achtergrondstraling een factor drie hoger is dan de dosis in een ander gebied. Deze dosisverschillen zijn het gevolg van de straling uit de bodem; in het gebied met de laagste dosis bedraagt deze 70 millirem per jaar en in het gebied met hoge bodemradioactiviteit 200 millirem per jaar. In beide gebieden werd een bevolking van ongeveer 75.000 personen onderzocht. Er werden geen verschillen in het voorkomen van kanker en van genetische effecten gevonden vergeleken met gebieden waar de dosis lager is. Hiermee is echter niet bewezen dat de natuurlijke achtergrondstraling geen effect kan hebben, maar alleen dat het effect niet erg groot kan zijn in vergelijking met de andere factoren in en buiten de mens, die de kans op schadelijke effecten beïnvloeden.

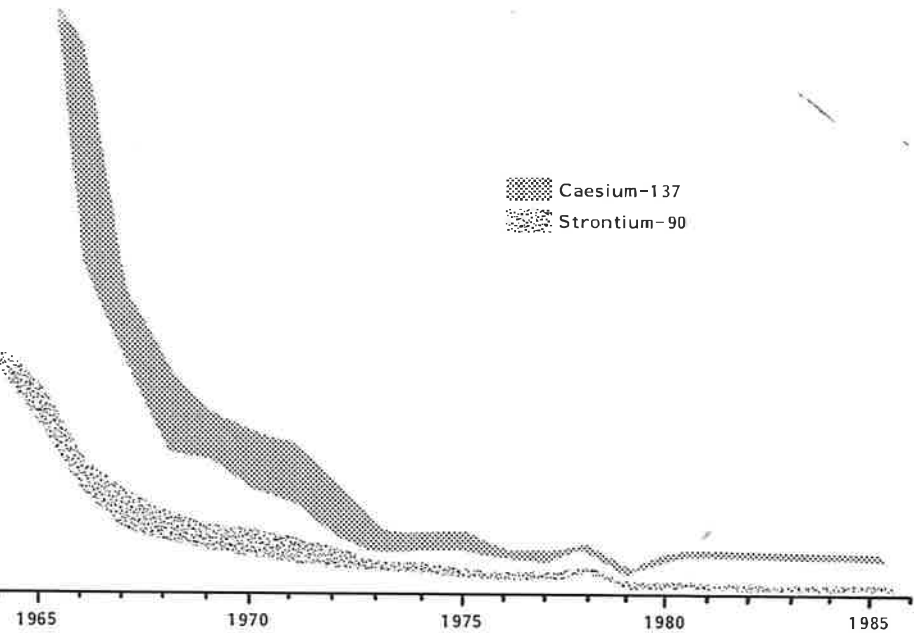
## WELKE GEVOLGEN ZOULDEN DOOR NATUURLIJKE STRALING KUNNEN OPTREDEN?

Hoewel de schadelijke effecten van de natuurlijke straling niet meetbaar blijken en dus relatief klein moeten zijn, kan op basis van de risicofactoren die afgeleid zijn uit gegevens over tumorinductie bij de mens door hogere doses, wel een berekening worden gemaakt. De kans op longkanker door de natuurlijke straling is volgens deze berekening van de orde van een half procent van de 'natuurlijke' frequentie, die overigens grotendeels door het roken van sigaretten wordt bepaald. De kans op leukemie door natuurlijke straling kan worden geschat op ongeveer 2 procent van de natuurlijke frequentie. Gemiddeld voor alle soorten kanker is de berekende bijdrage van natuurlijke straling ongeveer 1 procent.

## HOEVEEL RISICO BRENGT EEN TIJDELIJKE VERHOOGING VAN DE STRALINGSDOSIS DOOR ONNATUURLIJKE OORZAKEN MEE?

Door menselijke activiteiten is tot nu toe geen grote permanente verhoging van het stralingsniveau in de omgeving opgetreden. Wel was de radioactiviteit in de atmosfeer, in de biosfeer en in de mens tijdelijk verhoogd door proefexplosies van atoombommen in de atmosfeer in de periode tot 1963. Dit was voornamelijk het gevolg van radioactiviteit van strontium-90 en cesium-137. Een voorbeeld van het verloop in melk is gegeven in figuur 11.2. Hieruit blijkt een sterke afname nadat de proefnemingen met atoombommen in de atmosfeer in 1963 werden gestopt. Toch heeft deze verhoging tot een duidelijk meetbare radioactiviteit in de mens geleid. Op basis van de beschikbare gegevens is door een commissie van de Verenigde Naties berekend dat alle proefnemingen samen hebben geleid tot een gemiddelde blootstelling van de wereldbevolking aan een dosis gelijk aan vier jaren blootstelling aan de natuurlijke straling, overeenkomend met 800 millirem. Zoals gezegd, kan 1% van alle kankers worden toegeschreven aan natuurlijke straling. De extra dosis straling in de afgelopen 40 jaar ontvangen als gevolg van de atoombomexplosies zou dan verantwoordelijk zijn voor nog eens 0,05 procent.

gehalte aan Sr-90 en Cs-137 in landelijke melkmonsters





## KAN EEN SCHATTING WORDEN GEMAAKT VAN DE MOGELIJKE WERELDWIJDE EFFECTEN VAN HET ONGELUK MET DE KERNENERGIECENTRALE IN TSJERNOBYL?

Voor een dergelijke evaluatie zouden in de eerste plaats gegevens over de verspreiding en besmetting als functie van de afstand tot de centrale ter beschikking moeten komen, zowel in de Sovjet-Unie als in de omliggende landen. Wanneer geen nieuwe radioactiviteit meer uit de centrale naar buiten komt, zal de besmetting met kortlevende radioactieve stoffen zoals jodium-131 snel afnemen. Van de langer levende radioactieve stoffen zoals cesium-137 en strontium-90 zal de besmetting langer aanwezig blijven. Deze stoffen zullen in de loop van enkele jaren in diepere grondlagen terechtkomen en daardoor steeds minder bijdragen aan de stralingsdosis. Dan pas zal een berekening van de totale dosis kunnen worden gemaakt voor bevolkingen in gebieden op diverse afstanden van Tsjernobyl. Als op een te vroeg tijdstip berekeningen worden gemaakt kan men gemakkelijk een factor 10 naar boven of naar beneden van de werkelijkheid afwijken.

## WAT BETEKENT EEN VERHOGING VAN DE KANS OP KANKER VOOR DE AANTALLEN GEVALLEN VAN KANKER?

Hoewel een mogelijke bijdrage van 1 procent tengevolge van de natuurlijke straling aan het optreden van kanker niet hoog lijkt, en door een individueel persoon als van weinig belang kan worden ervaren, is het aantal personen in een grote bevolkingsgroep dat volgens de theoretische berekeningen door deze ziekte getroffen zou kunnen worden, niet klein. Van een bevolkingsgroep van een miljoen personen in Europa zal 35 procent kanker krijgen en 20 procent uiteindelijk overlijden aan kanker, d.w.z. 200.000 personen. Wanneer van dit aantal één procent toegeschreven zou moeten worden aan het effect van natuurlijke straling, dat wil zeggen aan de gedurende 75 jaar ontvangende totale dosis van  $75 \times 200 = 15.000$  millirem, dan komt dit overeen met een totaal aantal van 2000 personen. Hierbij moet bedacht worden dat deze 2000 gevallen tot uiting komen over een

periode van ongeveer 40 jaar, dus met 50 personen per jaar. Voor nog grotere bevolkingsgroepen en voor hogere doses kunnen evenredig hogere aantallen worden berekend.

Uit het bovenstaande voorbeeld blijkt dat de mogelijke schadelijke gevolgen van blootstelling van grote bevolkingsgroepen aan straling en radioactieve stoffen, afhankelijk van de wijze van presentatie, als geringe risico's in percentages of als grote aantallen getroffen personen kunnen worden uitgedrukt.

## 12. Stralingsbescherming en dosislimieten

### HOE KOMEN MAATREGELEN TOT STAND TEN BEHOEVE VAN DE STRALINGSBESCHERMING?

Al in het begin van deze eeuw bleek dat ioniserende straling schadelijke effecten kan veroorzaken in menselijke weefsels en organen. Sindsdien is de bescherming tegen deze gevolgen onderwerp van veel studie geweest. Daarbij is onderzoek verricht aan personen en groepen van personen die in allerlei situaties, bijvoorbeeld beroepshalve of als patiënt aan straling werden blootgesteld. Vooral na 1945 is de aandacht gericht geweest op het ontstaan van kanker en van genetische effecten. Experimenteel radiobiologisch onderzoek heeft voorts inzicht verschaft in de afhankelijkheid van deze effecten van de dosis, in de bijdrage van hersteleffecten en in de invloed van de leeftijd van bestraalde personen. Op basis van de analyses van alle beschikbare gegevens kunnen de risico's op schadelijke effecten berekend worden en op grond van deze getallen worden door internationale en nationale organisaties en overheden aanbevelingen en richtlijnen gegeven ter beperking van de stralingsdoses voorzover dit beheersbare bronnen betreft. Een samenvatting van deze risicofactoren is gegeven in tabel 12.1.

### OP WELKE GEGEVENS ZIJN DE RISICOBEREKENINGEN GEBASEERD?

Gegevens over het ontstaan van kanker bij de mens ten gevolge van blootstelling aan straling zijn met name de laatste twintig jaar geanalyseerd voor een aantal groepen personen. De belangrijkste serie gegevens is verkregen door onderzoek van overlevenden in Hiroshima en Nagasaki, die in 1945 blootgesteld werden aan straling van atoombommen. Van deze bevolking zijn ongeveer 45.000 personen die doses tussen 10 en 500 rem had-

Tabel 12.1.

Risicofactoren voor overlijden aan verschillende typen kanker door ioniserende straling.\*

orgaan/weefsel	risico per rem	risico-periode (jaar)	risico per rem per jaar gedurende de risicoperiode
beenmerg	20 per miljoen	20	1,0 per miljoen
long	20 per miljoen	40	0,5 per miljoen
bot	5 per miljoen	40	0,1 per miljoen
borst (vrouwen)	65 per miljoen	40	1,6 per miljoen
schildklier	5 per miljoen	40	0,1 per miljoen
andere organen**	50 per miljoen	40	1,2 per miljoen
totaal***	30 per miljoen		

\* Afgeronde waarden per rem stralingsdosis.

\*\* Verondersteld wordt dat individuele organen hoogsten een bijdrage leveren van 1/5 van deze waarde.

\*\*\* Het totaal is voor een gemiddelde bevolking (mannen en vrouwen) berekend door de kans op borstkanker voor de helft mee te tellen. Ongeveer 50% van alle kanker is te genezen. Het totale risico voor het ontstaan van kanker kan op grond van deze risicofactoren worden geschat op 260 gevallen van kanker per miljoen per rem.

den ontvangen sinds 1946 nauwkeurig gevolgd en vergeleken met een groep van ongeveer 35.000 personen die slechts een heel geringe dosis hadden ontvangen of niet bestraald waren. Daarnaast zijn gegevens verkregen over groepen patiënten die voor bepaalde ziekten met straling werden behandeld, over groepen personen die in industrieën werkzaam waren waar met radioactieve stoffen werd gewerkt, over een groep artsen-radiologen die door hun werk aan straling werden blootgesteld en over groepen mijnwerkers die tijdens hun werk radioactieve gassen inademen. Van de verschillende soorten kanker waarover gegevens be-

schikbaar zijn, zullen slechts enkele aspecten worden genoemd. Het is een algemene observatie dat na bestraling een aantal jaren verloopt voordat kanker wordt ontdekt. Deze periode noemt men de latente periode, die voor leukemie minimaal enkele jaren bedraagt, maar voor andere typen kanker 10 jaar of meer kan bedragen. Dit betekent niet dat na 10 jaar alle door straling veroorzaakte gevallen van kanker reeds direct optreden, want nieuwe gevallen kunnen gedurende vele tientallen jaren na bestraling nog worden gevonden. Alleen van leukemie is bekend, o.a. door onderzoek van overlevenden in Hiroshima en Nagasaki, dat na ongeveer 25 jaar praktisch geen extra gevallen meer worden waargenomen boven het niveau dat normaal voorkomt.

Na evaluatie van alle beschikbare gegevens, samengevat in het meest recente rapport van de Wetenschappelijke Commissie van de Verenigde Naties over effecten van straling (UNSCEAR), kan worden gesteld dat bij lage doses ontvangen straling een kans ontstaat van 20 per miljoen personen per rem op het optreden van leukemie. Dit komt overeen met gemiddeld 0,1 per miljoen personen per jaar over een risicoperiode van ongeveer 20 jaar. Deze waarde werd ook gebruikt in de meest recente aanbevelingen van de Internationale Commissie voor Stralingsbescherming.

Voor het ontstaan van borstkanker bij vrouwen die aan straling werden blootgesteld, blijken vrij grote verschillen in het risico te worden gevonden, variërend van 50 per miljoen personen afgeleid van gegevens uit Japan, tot 200 per miljoen personen per rem stralingsdoses afgeleid over groepen patiënten.

Voor het ontstaan van botkanker zijn o.a. gegevens verkregen over groepen personen die met radium-houdende verf lichtgevende cijfers aanbrachten op wijzerplaten van horloges. Opname via de mond van radium dat alfa-deeltjes uitzendt, bleek nog vele jaren later tot aantoonbare hoeveelheden radium in het bot te leiden. De kans op botkanker afgeleid uit deze en andere gegevens, bedraagt per rem ongeveer 5 per miljoen personen (zie tabel 12.1).

## HOE KOMEN DOSISLIMIETEN TOT STAND?

Met betrekking tot beheersbare bronnen werd in de periode

na de ontdekking van straling in de eerste plaats gedacht aan blootstelling van personen werkzaam in fabrieken, laboratoria, ziekenhuizen en industrieën. Men spreekt dan van beroepshalve ontvangen straling, die beperkt kan worden door vele soorten maatregelen en voorzorgen. Sinds 1928 worden regelmatig aanbevelingen over dosisbeperking en dosislimieten gedaan door een Internationale Commissie voor Stralingsbescherming (ICRP = International Commission on Radiological Protection). Deze aanbevelingen houden in dat per jaar voor beroepshalve ontvangen stralingsdoses een limiet geldt voor het 'effectief dosisequivalent' van 5 rem. Door deze dosislimiet als maximum aan te geven verwacht de ICRP dat de gemiddelde dosis ontvangen door beroepshalve bestraalde personen op een waarde van 500 millirem (5 millisievert) zal komen. Dit blijkt in de praktijk goed te werken. Met behulp van deze dosislimiet is het vervolgens mogelijk een corresponderende limiet voor radioactiviteit in lucht, drinkwater en voeding te berekenen. De aanbevelingen van de ICRP worden in alle landen gebruikt om maatregelen ten behoeve van de stralingsbescherming wettelijk te regelen.

Voor niet-beroepshalve blootgestelde personen, dus voor leden van grote bevolkingsgroepen, heeft de ICRP als dosislimiet een waarde van 0,5 rem per jaar aanbevolen, met de restrictie dat de jaarlijkse dosis gemiddeld over de hele levensduur niet hoger uitkomt dan 100 millirem per jaar. Dit houdt in dat het effectieve dosisequivalent van natuurlijke straling van ongeveer 0,1 tot 0,2 rem met niet meer dan 50 à 100 procent mag toenemen tengevolge van door de mens veroorzaakte straling. Hierbij wordt echter de dosis tengevolge van medische toepassing van straling niet meegeteld omdat bij deze toepassing, bijvoorbeeld ten behoeve van de röntgendiagnostiek, een duidelijk nut voor de onderzochte persoon wordt beoogd.

Met betrekking tot de dosislimiet voor leden van de bevolking kan als argument voor de verlaging ten opzichte van de limiet voor beroepshalve blootstelling worden genoemd dat in deze groep kinderen voorkomen, die mogelijk gevoeliger zijn voor het ontstaan van schadelijke effecten en waarin effecten nog over een lange levensduur kunnen optreden. Beroepshalve blootstelling vindt alleen plaats bij volwassenen en deze personen zullen bovendien regelmatig gecontroleerd worden met betrekking tot de

ontvangen stralingsdosis. Dit laatste geldt niet voor de totale bevolking.

## WAT ZIJN DE ALGEMENE UITGANGSPUNTEN VOOR DE STRALINGSBESCHERMING?

De door de ICRP aanbevolen dosislimieten vormen in feite slechts een onderdeel van een totaalpakket van aanbevelingen waarvan een aantal betrekking heeft op meer algemene uitgangspunten. Deze uitgangspunten kunnen als volgt worden omschreven:

1. Een bepaalde toepassing van straling is alleen gerechtvaardigd als er een nuttig doel mee gediend wordt waarvan het belang zwaarder weegt dan de nadelen van de blootstelling.
2. Indien aan een toepassing een zeker nut wordt toegekend, terwijl als gevolg daarvan personen straling kunnen ontvangen, dan moet een procedure worden gevolgd waarbij de dosis voor die personen zo laag wordt gehouden als praktisch mogelijk is, mede beoordeeld in het licht van de voordelen die er tegenover staan, b.v. de behandeling van ziekten. Men noemt dit wel het ALARA principe (As Low as Reasonably Achievable). Bij een belangrijk voordeel zal men een zekere blootstelling aan straling eerder accepteren om de voordelen niet op te offeren.
3. De doses die personen mogen ontvangen, worden volgens de normen van de Europese Gemeenschap en de Kernenergie-wet gelimiteerd tot bepaalde waarden, afhankelijk van de aard van de bestraling en de groep personen die straling ontvangt. Voor personen die beroepshalve met straling in aanraking komen, is een hogere limietdosis gesteld (5 rem per jaar) dan voor overige leden van de bevolking (0,5 rem per jaar).

## GELDEN DE DOSISLIMIETEN OOK VOOR ONGEVALLLEN?

Het zal duidelijk zijn dat bij de ramp met de kernenergiecentrale in Tsjernobyl door groepen personen in de omgeving in korte tijd doses straling zijn ontvangen die ver uitgaan boven de door de ICRP aanbevolen limieten, die in principe jaarlijks voor

de hele levensduur van de mens mogen worden ontvangen. Voor ongevalssituaties geldt dat het om een blootstelling gaat die slechts een tijdelijke sterke toename van straling en radioactiviteit meebrengt. Voor dergelijke rampsituaties zijn door de Gezondheidsraad in 1976 en de Internationale Commissie voor Stralingsbescherming, ICRP, in 1984 'referentieniveaus' gegeven. Wanneer de stralingsdoses onder deze niveaus blijven, wordt het in het algemeen niet gerechtvaardigd geacht maatregelen te nemen die voor de betreffende bevolking ernstige hinder zouden veroorzaken. Dit referentieniveau is voor kinderen gelijk aan een effectief dosisequivalent van 5 rem en voor volwassenen 15 rem. Bij ongevallen van zeer ernstige aard en bij langer durende blootstelling waarbij de referentieniveaus worden overschreden, moeten mogelijke maatregelen en hun effect ter vermindering van de stralingsdoses, worden afgewogen tegen de nadelen die deze maatregelen opleveren, zoals vernietiging van voedsel, beperking van verblijf in de open lucht of evacuatie.

#### BIJ WELKE HOEVEELHEDEN RADIOACTIVITEIT IN DRINKWATER EN VOEDSEL WORDEN MAATREGELEN GENOMEN?

De hierboven genoemde referentieniveaus kunnen worden bereikt door uitwendige bestraling tijdens het overtrekken van een radioactieve wolk of door opname van radioactieve stoffen uit de lucht en het voedsel. Het overtrekken van een radioactieve wolk zal in het algemeen gedurende een bepaalde tijdsduur plaatsvinden. De dosis die ontvangen kan worden tijdens het overtrekken van een radioactieve wolk, is heel moeilijk te voorspellen en men zal dus in het algemeen geneigd zijn aan de veilige kant te blijven met betrekking tot eventuele maatregelen. Voor de afleiding van doses die worden ontvangen door opname van radioactiviteit in het lichaam, zijn gecompliceerde berekeningen nodig. Daarbij spelen de wijze van opname, de verdeling in het lichaam en de eigenschappen van de radioactieve stoffen een rol. Voor jodium-131 kan berekend worden dat voor volwassenen die een kwart liter melk drinken met een concentratie van 100 becquerel per liter de volgdosis in de schildklier ongeveer 1 millirem bedraagt. Voor een kind van één jaar ligt deze waarde bij de-



zelfde concentratie een factor 17 hoger, deels omdat een kind meer melk drinkt, deels omdat biologische factoren anders zijn. De conclusie is dat geen algemene regel voor de noodzaak tot interventie te geven is, maar dat steeds aan de hand van metingen op actuele situaties moet worden gereageerd. Hiervoor is de aanwezigheid en beschikbaarheid van deskundige adviseurs een absolute voorwaarde.

## IS STRALING GEVAARLIJKER DAN ALLE ANDERE SCHADELIJKE STOFFEN?

Het is niet mogelijk de risico's van ioniserende straling en radioactiviteit direct te vergelijken met de kans op schadelijke effecten van de vele soorten chemische stoffen die in het milieu van de mens aanwezig zijn. De studie van stralingseffecten en van risico's van ioniserende straling heeft een relatief lange geschiedenis en in een aantal opzichten is de kennis betreffende stralingshygiëne richtinggevend geworden voor de bescherming ten aanzien van chemische stoffen. Dit geldt bijvoorbeeld met betrekking tot het onderscheid tussen vroege en late effecten, en verschillen in gevoeligheid tussen volwassenen en kinderen. In de stralingshygiëne hebben we echter in principe te maken met één factor, hoewel deze een gecompliceerde veelheid van effecten kan veroorzaken. Voor chemische stoffen geldt dat de soort schade afhankelijk is van de aard van de stof en van de reacties die deze aangaat met biologische systemen. Onderzoek aan grotere bevolkingsgroepen die min of meer homogeen zijn blootgesteld aan een bepaalde chemische stof, zijn uitermate schaars. Ook experimenteel onderzoek met proefdieren is voor slechts een beperkt aantal stoffen verricht en de aard van schadelijke effecten is vaak moeilijk vast te stellen. Chemische stoffen kunnen op korte termijn toxisch zijn voor de nieren, lever, zintuigen, zenuwstelsel en voor ongeboren kinderen en nageslacht, maar veel stoffen kunnen ook op langere termijn kanker veroorzaken. De evaluatie van effecten op lange termijn van grote rampen door besmetting van het milieu met chemische stoffen, zoals in Seveso en Bhopal, is nog lang niet voltooid.

## KAN STRALING DE EFFECTEN VAN SCHADELIJKE CHEMISCHE STOFFEN VERGROTEN?

Over de onderlinge invloed van effecten van straling en chemische schadelijke stoffen is veel te weinig bekend om in dit korte overzicht feiten te geven.

Wel is bijvoorbeeld bekend dat straling die door mijnwerkers werd ontvangen tijdens hun werk, samen met het roken van sigaretten, tot een grote kans op longkanker leidt.

Er zal echter nog zeer veel onderzoek nodig zijn om de risico's van de grote hoeveelheid schadelijke chemische stoffen in het milieu in combinatie met straling te kunnen evalueren en eventueel noodzakelijke maatregelen te treffen.

## 13. Overheidsmaatregelen en -voorlichting

Sinds 28 april heeft het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer via persberichten de media geïnformeerd over de haar ter beschikking staande gegevens omtrent het ongeval met de kerncentrale in Tsjernobyl. In de eerste berichten deelt het ministerie mee dat grote hoeveelheden radioactieve stoffen in de atmosfeer terecht zijn gekomen en door luchtstromen worden meegevoerd naar Noord-Europa. Een geïntensiveerd meetprogramma zal worden uitgevoerd voor lucht- en grasmonsters.

*Op 1 mei* geeft het ministerie informatie over het al of niet gebruiken van jodiumtabletten en het reizen naar Oostbloklanden en stelt een informatiecentrum in. Reizigers afkomstig uit Oost-Europa wordt aangeraden hun kleding te wassen, te douchen en hun voertuig met water schoon te spuiten.

*Op 2 mei* wordt melding gemaakt van een lichte verhoging van de radioactiviteit in de lucht door jodium-131. Deze geeft aanleiding tot een dosis van gemiddeld 1 millirem per 24 uur.

*Op 3 mei* is het stralingsniveau in de lucht afgenomen tot 0,1 millirem per dag. Op de bodem is een verhoogde activiteit waargenomen. Geadviseerd wordt groenten goed te wassen. 's Avonds komt het verbod melkkoeien buiten te houden en te laten grazen. Ook mogen geen vers gras of andere gewassen die nog op het veld staan gevoederd worden. De reden is dat radioactieve stof die op het gras is neergeslagen via grazend melkvee besmetting van melk veroorzaakt.

In de omringende landen bestaat dezelfde problematiek in verband met de verhoogde radioactiviteit als in Nederland. In verband hiermee heeft Italië besloten bepaalde certificaten te eisen bij invoer in dat land van alle land- en tuinbouwprodukten,

en ook van alle andere levensmiddelen. Exporteurs kunnen vanaf 4 mei voor deze certificaten terecht bij bepaalde Rijksdiensten. Voor binnenkomende schepen uit besmette gebieden worden bepaalde maatregelen aangekondigd. De Havenarbeidsinspectie kan besluiten metingen te verrichten en de resultaten door te geven aan de havenautoriteiten. Deze beslissen over de te nemen maatregelen, zoals schoonspuiten van het dek.

Vrachtwagens uit de Sovjet-Unie, Polen en de DDR worden aan de Westduitse grens gecontroleerd op besmetting. Besmette voertuigen worden teruggestuurd. De kans is dus klein dat besmette voertuigen in Nederland aankomen. Toch is er een mogelijkheid geschapen om ook in Nederland vrachtwagens te laten onderzoeken. Metingen zullen worden verricht door de Arbeidsinspectie en/of de Röntgentechnische Dienst.

*Op 4 mei* is het stralingsniveau verder afgenomen tot 0,03 mrem per 24 uur. Het totale stralingsniveau door alle radioactieve stofdeeltjes uit bodem en atmosfeer bedraagt 0,2 millirem per 24 uur.

*Op 5 mei* is het stralingsniveau van jodium in de lucht 0,02 millirem per 24 uur; het totale stralingsniveau is sinds 4 mei niet veranderd. Voor melk is een norm voor het gehalte aan jodium-131 vastgesteld, namelijk 500 becquerel per liter.

Uit metingen is gebleken dat het oppervlaktewater licht besmet is. Het normale stralingsniveau bedraagt ongeveer 300 becquerel per m<sup>3</sup>. In Eijsden aan de Maas is een waarde gemeten van 13.000 becquerel per m<sup>3</sup> en in Lobith aan de Rijn een waarde van 6.300 becquerel per m<sup>3</sup>. Als men gedurende een jaar drinkwater zou gebruiken bereid uit oppervlaktewater met een activiteit van 13.000 becquerel per m<sup>3</sup> zou dit hooguit leiden tot een verhoging bij de mens van ongeveer 10 millirem per jaar. De natuurlijke achtergrondstraling bedraagt al 100 millirem per jaar. Gedurende een beperkt aantal jaren mag de blootstelling zelfs 500 millirem per jaar bedragen.

*Op 6 mei* besluit minister Braks dat verse spinazie moet worden vernietigd. Bovendien is besloten verse schapemelk van scha-

pen die in de wei verblijven buiten de consumptie te houden en de bereiding van schapekaas, die binnen vijf weken na bereiding moet worden geconsumeerd, te verbieden. Alle bij het slachten aangetroffen schildklieren moeten als schadelijk voor de gezondheid worden aangemerkt en worden vernietigd.

Op 7 mei geeft het informatiecentrum te Leidschendam de volgende informatie over Nederland en West-Duitsland. De verhoging van de hoeveelheid jodium-131 in de lucht bedraagt 0,02 millirem per 24 uur. Op de bodem is een verhoging gemeten van 0,2 millirem per 24 uur. De natuurlijke achtergrondstraling uit bodem en atmosfeer is 0,2 millirem per 24 uur, zodat het totale stralingsniveau 0,4 millirem per 24 uur bedraagt. In oppervlaktewater is een toename van het stralingsniveau gemeten; de aangetroffen waarden betekenen geen gevaar voor de volksgezondheid of de drinkwatervoorziening. In bepaalde deelstaten in West-Duitsland – waar op de bodem hogere stralingsniveaus voorkomen dan in Nederland – komt het voor dat men het spelen van kinderen in zandbakken ontraadt en dat spinazie en sla uit de handel worden genomen.

Algemene informatie wordt gegeven betreffende vragen over:

- reizen naar en verblijf in het buitenland;
- het treffen van maatregelen voor en door reizigers uit Oost-Europa;
- de zin van het innemen van jodiumtabletten;
- import van besmet voedsel;
- kwetsbare groepen;
- drinkwaterconsumptie;
- meetgegevens oppervlaktewater/drinkwater;
- luchtfilters;
- neerdwarrelend gekleurd stof;
- melkvee/melk;
- een verbod om schildklieren te verwerken;
- huisdieren, bijen, kippen;
- andere radioactieve stoffen dan jodium-131.

In het kort is het advies alleen naar Oostbloklanden te reizen als het strikt noodzakelijk is. Eventueel besmette personen kun-

nen zelf zorgen voor het schoonmaken van zichzelf, kleding en de auto.

Er is geen enkele reden om jodiumtabletten in te nemen. Voor import van voedsel worden maatregelen overwogen. Voor kwetsbare groepen, zwangere vrouwen en kinderen, is er geen reden om speciale maatregelen te overwegen. Luchtfilters van airconditioninginstallaties behoeven niet te worden gewisseld omdat de gemeten niveaus van de radioactiviteit laag zijn. Het neerddwarrelend gekleurd stof is waarschijnlijk stuifmeel. Er wordt aangeraden geen ongewassen groenten en fruit aan huisdieren te voeren; bijen en de door hen geproduceerde honing lopen geen enkel gevaar en kippen kunnen buiten blijven; er bestaat geen gevaar voor mensen die eieren eten.

De meetresultaten van concentraties van andere radioactieve stoffen zoals cesium, ruthenium en tellurium, geven geen aanleiding tot het nemen van maatregelen.

Wat betreft reizen naar de Oost-Europese landen wordt op 16 mei aangeraden om grote delen van Wit-Rusland en de Oekraïne te vermijden. Bezoek aan andere landen wordt veilig geacht indien men de aanwijzingen van de lokale autoriteiten volgt en geen verse melk of verse groenten gebruikt.

# Register

## A

abortus, 60  
achtergrondstraling, 70  
acute gevolgen, 47  
ALARA principe, 79  
alfa-deeltjes, 30  
alfa-straling, 31

## B

Becquerel, 28  
becquerel (Bq), 31  
beenmerg, 47, 51  
beenmergtransplantatie, 50,  
51, 56  
bèta-deeltjes, 30  
bèta-straling, 31  
Bhopal, 81  
biologische halveringstijd, 41  
bloedtransfusie, 48  
brandstofstaven, 17

## C

chemische stoffen, 63, 81, 82  
China-syndroom, 24  
Curie, 28  
curie (Ci), 31

## D

darmen, 49  
darmschade, 50  
DNA, 44  
dosisequivalent, 36, 40  
    collectief, 36  
    effectief, 36, 68  
dosislimieten, 39, 75, 78, 79  
drukwaterreactor, 20

## E

echografie, 59  
effecten, 47  
    acute, vroege, 47  
    late, 36  
elektronen, 29  
erfelijke afwijkingen, 65  
evacuatie, 54, 60

## F

fall-out, 25

## G

gammastraling, 30, 31  
genetische schade, 66  
graasverbod, 25  
grafiet, 17  
Gray, 28  
gray (Gy), 34

## H

hersenenbeschadiging, 59  
huid, 52

## I

ionisaties, 34

## J

jodiumtabletten, 54, 83, 85, 86

## K

kalium, 68  
kanker, 62  
kernsplijting, 15  
koepel, 22  
kokend-waterreactor, 20

kosmische straling, 67, 68, 69  
kwaliteitsfactor, 36  
kweekreactor, 21

## L

latente periode, 77  
lichtwaterreactor, 18  
longen, 52

## M

melt-down, 23  
misvorming, 58, 59  
moderator, 16

## N

natuurlijke straling, 64, 67, 71  
neutronen, 15, 29  
[nood]referentieniveaus, 39,  
40, 80  
nucleaire geneeskunde, 32  
nuclide, 29, 30, 31

## O

oppervlaktewater, 84



## P

proefexplosies, 71  
protonen, 15, 29

## R

rad, 34, 35  
radioactief afval, 26  
radioactieve wolk, 80  
radioactiviteit, 30  
radiodiagnostiek, 32  
radiotherapie, 32  
regelstaven, 16  
reizen, 85  
risicofactoren, 75, 76  
roken, 82  
Röntgen, 28  
röntgen (R), 34

## S

schildklier, 25, 52, 64, 80, 85  
schildklierkanker, 63  
Seveso, 81  
Sievert, 28  
sievert (Sv), 36  
splijttingsprodukten, 16  
stamcellen, 46  
steriliteit, 56  
stralingsziekte, 47

## T

Three Mile Island, 22

## V

ventilatie, 68  
verrijking, 17  
volgdosis, 41  
volgdosisequivalent, 41

## W

weegfactor, 37

## Z

zwangerschap, 60

**26 april 1986.**

**Er gaat het één en ander mis in een kerncentrale in Tsjernobyl in Rusland. Daarna volgt er in Nederland twee weken lang nieuws.**

- ... de radioactieve straling is vijfmaal zo hoog als de natuurlijke achtergrondstraling . . .***
- ... de straling in de atmosfeer is nu weer bijna op het niveau van de achtergrondstraling, maar de straling in het oppervlaktewater is toegenomen . . .***
- ... de koeien moeten naar binnen . . .***
- ... was uw bladgroenten met grote zorg . . .***
- ... eet voorlopig maar geen spinazie . . .***
- ... over een week is alles weer zoals het vroeger was . . .***

**En niemand zag het en niemand hoorde het en maar weinigen begrepen het.**

**Radioactiviteit leek een ongrijpbaar spook, een dreigende kracht losgebrosen uit de centrale van Tsjernobyl. Nederland werd bestookt met becquerels, micrograys, met rads en met rems en met getallen, getallen waar bijna niemand weg mee wist.**

**Dit boek geeft antwoorden op vragen over straling en radioactiviteit. Vijf deskundigen van het Radiobiologisch Instituut TNO te Rijswijk schreven het. Zij noteerden de vragen die van alle kanten werden gesteld en stelden hun antwoorden zo op, dat iedereen er mee uit de voeten kan. Radioactiviteit is een natuurkundig verschijnsel, zoals de zwaartekracht dat is. Met behulp van de kennis uit dit boek kan de lezer in het doolhof met informatie over radioactiviteit zijn weg vinden.**