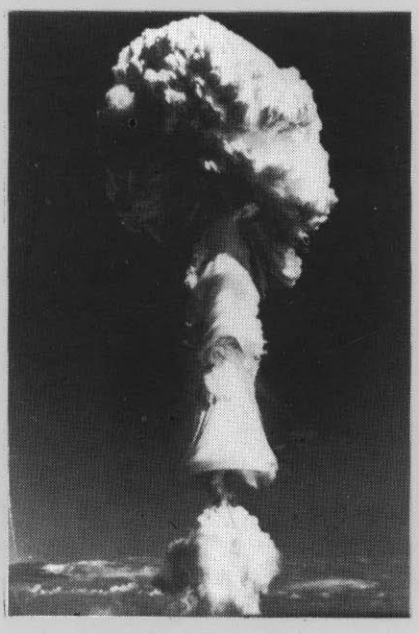
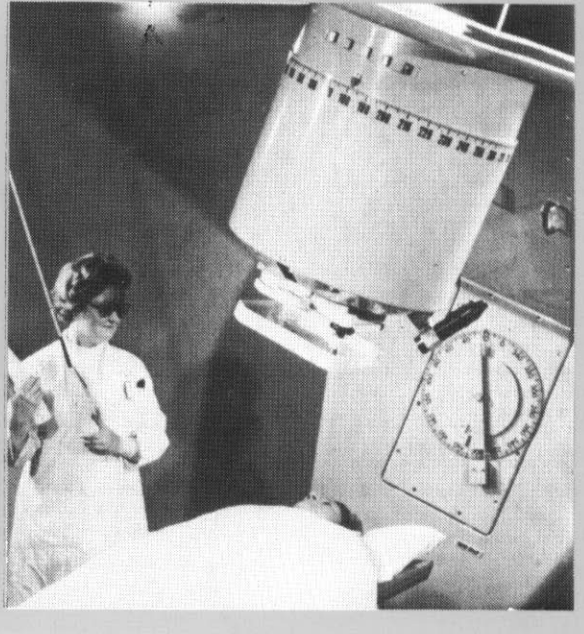
IONISERENDE STRALING

ARCHIEF exemplaar

doc. nr.

niet meenemen





PLON

Vakgroep Natuurkunde-Didactiek
Rijksuniversiteit Utrecht

TER INZAGE

NIET MEENEMEN S.V.P.

bovenbouw
HAVO/VWO

ioniserende straling

Samengesteld door de projectgroep van het PLON in samenwerking met de Vakgroep Natuurkunde-Didactiek van de Rijksuniversiteit Utrecht

voor de 5e klas HAVO/VWO

Experimentele uitgave

PLON

* Het Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde (PLON) is in 1972 begonnen onder auspiciën van de Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde (CMLN). De opdracht was: het ontwikkelen en door middel van onderzoek evalueren van leerpakketten voor natuurkundeonderwijs op mavo, havo en vwo, en het ontwerpen van een plan voor goede begeleide introductie daarvan in de scholen.
* Het PLON werkt onder toezicht van een stuurgroep waarin vertegenwoordigers uit het onderwijs, de vervolgopleiding, didactische instellingen, onderwijsondersteuningsinstituten, lerarenopleidingen en het Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen vertegenwoordigd zijn.
* Het PLON is ondergebracht bij de Vakgroep Natuurkunde Didaktiek van de Rijksuniversiteit Utrecht. Deze vakgroep participeert tevens in de activiteiten ten behoeve van havo-bovenbouw. Ten behoeve van vwo-bovenbouw bestaat een samenwerkingsverband met de universiteiten van Amsterdam (GU) en Groningen, en groepen leraren die werken aan de ontwikkeling van lesmateriaal.
* Het adres van het PLON is:
  PLON, lab. Vaste Stof, Postbus 80.008, 3508 TA, de Uithof, Utrecht, Tel. 030-532717

© 1984 Rijksuniversiteit Utrecht Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt 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 the prior permission of the publisher.

ARCHIEF exemplaar

doc. nr.

niet meenemen

Ioniserende Straling

TOELICHTING BIJ HET THEMA
(nieuwe versie, 1984)

Het thema 'Ioniserende Straling' is in de PLON-leergang voor HAVO-bovenbouw het derde thema voor klas 5.
Deze toelichting heeft betrekking op de in 1984 ingrijpend herziene versie van 'Ioniserende Straling'. Uit de docentenhandleiding (AVOL genoemd) hebben we hier enige pagina's overgenomen om het thema toe te lichten voor belangstellenden. In deze toelichting is ook de inhoudsopgave opgenomen van de volledige AVOL (114 pag.), die voor *f* 7,50 te verkrijgen is bij onderstaand adres.
Voor opmerkingen over thema en toelichting houden wij ons aanbevolen.

Medewerkers van het PLON
Lab. Vaste Stof
Rijksuniversiteit Utrecht
Postbus 80.008
3508 TA Utrecht

november 1984.

PLAATS EN KARAKTER VAN HET THEMA

1. DE PLAATS VAN HET THEMA IN DE CURSUS

De PLON-cursus voor 4 en 5 HAVO bestaat uit een tiental thema's. "Ioniserende Straling" is het derde thema voor 5 HAVO.

PLON thema's 4 HAVO	PLON thema's 5 HAVO
• Vergelijken	• Materie
• Weersveranderingen	• Lichtbronnen
• Muziek	• Ioniserende Straling
• Verkeer	• Elektronica
• Elektrische Machines	• Examen Doen
• Energie en Kwaliteit	

In de PLON-VWO cursus wordt het thema met een aanvullend hoofdstuk gebruikt in 5 VWO.

2. ACHTERGRONDEN EN VERANTWOORDING VAN DE THEMAKEUZE

In het thema Materie hebben leerlingen kennis gemaakt met ontwikkelingen rond 1900 die leidden tot de ontdekking van de röntgenstraling en de radioactiviteit. De nadruk lag in dat thema op de ontdekking van deze verschijnselen.
In dit thema komt ioniserende straling in een heel ander verband aan de orde en wel bezien van de gebruikerskant. Deze keuze behoeft enige toelichting.
Leerlingen hebben nu en in de toekomst, direkt en indirekt, te maken met ioniserende straling. In hoofdstuk 1 worden hiervan vele voorbeelden gegeven. Tegelijkertijd is het zo, dat in de moderne samenleving straling met een waas van geheimzinnigheid is omgeven en angstige reakties oproept bij het publiek. Dit wordt geillustreerd door de manier waarop bijv. tijdens het schrijven van deze AVOL door de persmedia aandacht wordt geschonken aan het vergaan van een schip, waarin zich vaten met uraanhexafluoride bevonden, voor de kust van Oostende.
Aan de gebruikerskant doen zich dus problemen voor met ioniserende straling en voor een goed inzicht in die problemen lijkt het ons noodzakelijk aan de gebruikerskant veel aandacht te besteden.
De conflicten rond toepassingen van ioniserende straling hebben veelal te maken met verschil van inzicht over de risico's en de voordelen van dergelijke toepassingen. Vandaar dat het ons belangrijk lijkt om expliciet aandacht te besteden aan procedures om risico's af te wegen tegen de voordelen. Het gaat dus niet om de uitkomst van deze afweging maar om de procedure. Wij verwachten dat een kennismaking met dergelijke procedures

ook van nut kan zijn voor leerlingen als ze met andere soorten risico's in de samenleving te maken krijgen. Om deze afweging tot zijn recht te laten komen hebben we in dit thema als rode lijn gekozen de vraag naar de aanvaardbaarheid van toepassingen van ioniserende straling.
Met in gedachten de bijdrage die natuurkundige kennis en inzicht kan leveren aan het beantwoorden van deze vraag, komen we uit op de volgende subthemavragen:
- waar komt de straling vandaan?
- wat zijn de eigenschappen van ioniserende straling?
- hoe kan deze straling worden gemeten?
- wat zijn de effecten van deze straling voor het menselijk lichaam?
- welke gebruiksmogelijkheden biedt de straling?
- hoe is bescherming mogelijk?

In het thema komen 5 toepassingsgebieden aan bod: natuurlijke straling, gezondheidszorg, kernenergie, kernwapens en toepassingen in de techniek. De 2e t/m 4e toepassingsgebieden zijn gekozen voor de keuzehoofdstukken. Het weglaten van de technische toepassingen berust op de overweging dat technische aspekten in het curriculum al veel aandacht krijgen. De uitvoerige aandacht voor medische toepassingen gebeurt met de bedoeling leerlingen te orienteren op mogelijke keuzes voor studie en beroep. De leerlingen kunnen bijv. op bezoek gaan bij tandarts, dierenarts, GGD of bepaalde afdelingen van ziekenhuizen. .

3. ERVARINGEN MET EEN VORIGE VERSIE

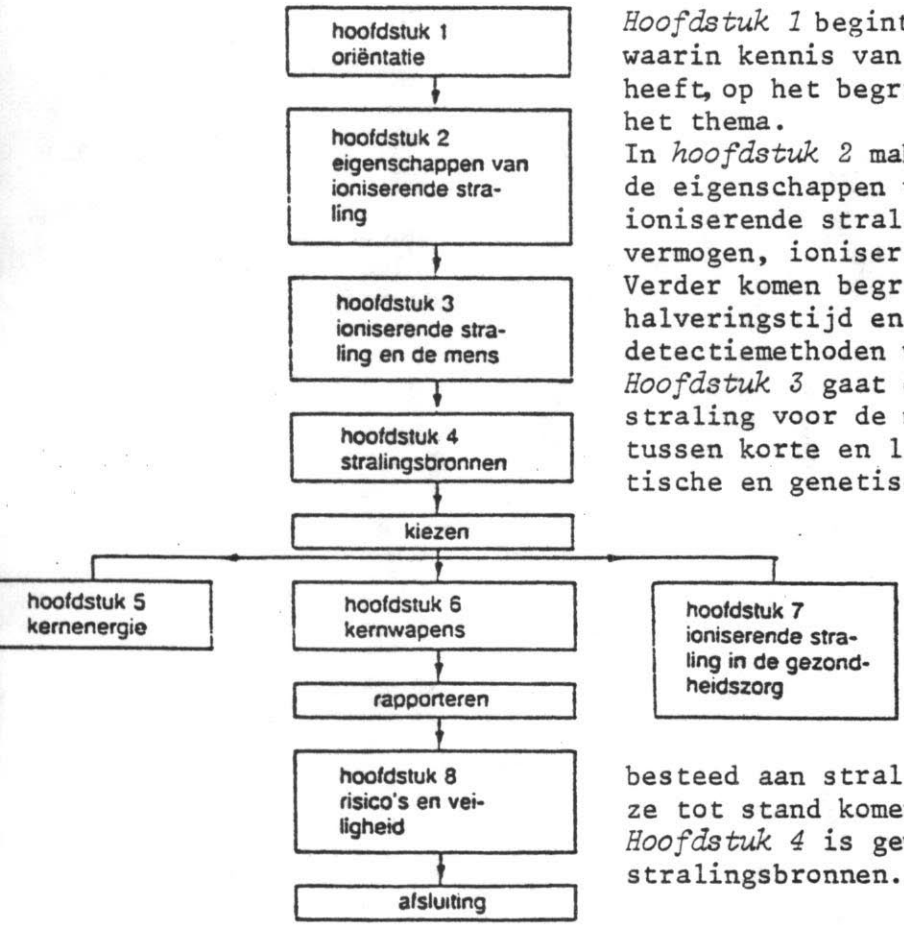
In 1983 is het gebruik van de eerste versie van Ioniserende Straling geevalueerd in 10 klassen. Van 172 leerlingen zijn ingevulde vragenlijsten ontvangen. Kort samengevat leverde analyse van de vragenlijsten het volgende resultaat op.
De leerlingen vinden het thema nuttig, leerzaam en interessant. Het is nuttig omdat het inzicht geeft in een actuele maatschappelijke problematiek en bijdraagt aan de meningsvorming hierover. Men vindt dat het thema een goed inzicht geeft in wat straling is, het gebruik van straling in de maatschappij en de diverse effecten die de straling dan heeft op de mens. Men krijgt meer inzicht in de positieve en negatieve aspecten en dat is voor de meningsvorming belangrijk. Het thema laat geen depressieve gevoelens bij de leerling achter en geeft hen niet het gevoel machteloos te staan. Eventuele incidentele momenten van gedeprimeerdheid verminderen niet de betrokkenheid bij de lessen en het onderwerp.
Het thema blijkt voor de leerlingen een optimale moeilijkheid te hebben. Wat meer afwisseling zou wel mogen. De meisjes vinden het thema nog leerzamer dan de jongens, maar ook moeilijker. Ze blijken na het thema kritischer te staan ten opzichte van het gebruik van ioniserende straling.

PLAATS EN KARAKTER VAN HET THEMA

De keuze van onderwerpen wordt bij de meisjes ingegeven door persoonlijke betrokkenheid bij het onderwerp; de keuze valt dan overwegend op het hoofdstuk "medische toepassingen van ioniserende straling".

Op grond van deze resultaten, van de reakties van leraren en van discussies binnen de PLON-groep is gekozen voor de volgende wijzigingen in de tweede versie van het thema:
- meer aandacht voor het begrip risico;
- een betere didaktische opbouw;
- meer leerlingaktiviteiten;
- leerstof uit de keuzehoofdstukken 5, 6 en 7, die door alle leerlingen gekend moet worden, verwerken in hoofdstuk 4 dat hiermee een orienterend en voorbereidend hoofdstuk wordt voor de differentiële periode;
- het gebruik van de SI-eenheden becquerel, gray en sievert in plaats van curie, rad en rem;
- het weglaten van desintegratie-constante, dosisberekeningen, scintillatie-detector en vele typen kernreactoren.

4. GLOBALE OPZET



Hoofdstuk 1 begint met een orientatie op situaties waarin kennis van ioniserende straling betekenis heeft, op het begrip risico en op de opzet van het thema.
In *hoofdstuk 2* maken de leerlingen kennis met de eigenschappen van verschillende soorten ioniserende straling: hun energie, doordringingsvermogen, ioniserend vermogen, lading en massa. Verder komen begrippen aan bod zoals activiteit, halveringstijd en stralingsdosis. Ook enkele detectiemethoden worden behandeld.
Hoofdstuk 3 gaat over de gevolgen van ioniserende straling voor de mens. Onderscheid wordt gemaakt tussen korte en lange termijn en tussen somatische en genetische effecten. Aandacht wordt besteed aan stralingsnormen en de manier waarop ze tot stand komen.
Hoofdstuk 4 is gewijd aan basiskennis over stralingsbronnen. Het is tevens een voorbereiding

op het werk in de keuzeperiode met behulp van de hoofdstukken 5 t/m 7.
Het eerste keuzeonderwerp is "kernenergie" (H-5). Het bevat een overzicht van de argumenten die in maatschappelijke discussies hierover worden gebruikt, een beschrijving van de splijtstofcyclus, informatie over de werking van een kerncentrale en suggesties voor opdrachten over risico en veiligheid in de splijtstofcyclus.
Het tweede keuzeonderwerp betreft "kernwapens" (H-6). Veel aandacht wordt besteed aan de effecten van explosies van kernwapens. De opdrachten gaan vooral over de mogelijkheden tot bescherming.
Het derde en laatste keuzeonderwerp behandelt de medische toepassingen van straling. Onderscheid wordt gemaakt tussen diagnose en behandeling. De opdrachten gaan over het verzamelen van informatie in literatuur of door het interviewen van tandarts, dierenarts, artsen of radiologische werkers in een ziekenhuis of bij de GGD.
Na de rapportage van de aktiviteiten in de keuzeperiode volgt een slot-hoofdstuk (8) over de afweging van risico's en voordelen van ioniserende straling. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen persoonlijke en maatschappelijke risico's.

Voor gebruik in het VWO is een speciaal hoofdstuk geschreven over het werk van een stralingsfysicus. Dit hoofdstuk wordt als een aparte bijlage uitgegeven en is beschikbaar in het begin van 1985.

LEERSTOF, VAARDIGHEDEN, BEGINSITUATIE

1. *Leerstof*

In het Experimenteel PLON Examen Programma (EPEP) is de examenleerstof beschreven die in dit thema aan de orde komt. In bijlage D2 van deze AVOL is het betreffende onderdeel van het gebied "Ioniserende Straling en Deeltjes" opgenomen.
In vergelijking met de reguliere landelijke leerstoflijst komen de volgende nieuwe onderwerpen aan bod in dit thema:
- risico
- eigenschappen van röntgenstraling
- activiteit, stralingsdosis, dosisequivalent
- acute en late effecten van straling
- kosmische straling en andere vormen van natuurlijke straling
- medisch gebruik van ioniserende straling bij diagnose en therapie
- kernfusie
- kernwapens: fysische werking, effecten
- stralingsbescherming
- splijtstofkringloop
- typen radioactief afval.

Aan de hand van klasse-ervaringen hopen we te zijner tijd voorstellen te kunnen doen voor een nieuw landelijk examenprogramma.

2. *Vaardigheden*

Voor de meeste scholen geldt dat ze voor experimenten met ioniserende straling zijn aangewezen op het rijdend stralingsprakticum. De nadruk in dit thema ligt dan ook niet op experimenteervaardigheden.
De volgende vaardigheden komen aan de orde in dit thema:
- de waarde van een grootheid kunnen berekenen met behulp van een aan de leerlingen bekende relatie;
- afloop van een experiment of gebeurtenis kunnen voorspellen, gebruik makend van bekende begrippen en wetten;
- een vergelijkingstabel kunnen opstellen;
- uitkomsten in een tabel en in een grafiek kunnen weergeven;
- factoren kunnen noemen die van belang zijn voor het resultaat van een experiment;
- een verschijnsel met behulp van een theorie kunnen verklaren;
- voor- en nadelen kunnen noemen van door stralingswerkers gebruikte methoden;
- rond een gegeven probleemstelling informatie kunnen selecteren uit teksten, diagrammen, tabellen en schema's;
- kritische vragen kunnen stellen over gemaakte keuzen;
- een kernreaktievergelijking kunnen opstellen;
- een redelijke schatting kunnen maken van de eigen stralingsbelasting;
- bij een bezoek aan een instelling relevante gegevens kunnen verzamelen rond een bepaalde probleemstelling;
- een risicoafweging kunnen maken;
- consequenties van keuzen kunnen beschrijven.

3. *Beginsituatie*

Het thema "Ioniserende Straling" is geschreven met in gedachten dat het in de tweede helft van het jaar in 5 HAVO of 5 VWO wordt behandeld. In het bijzonder worden bekend verondersteld de begrippen: frequentie, golflengte, lichtsnelheid, magnetisch veld, elektrisch veld, kinetische energie, vermogen, proton, neutron, elektron, energiebehoud en foton (E = hf). Verder gaan we er vanuit dat de leerlingen vertrouwd zijn met de atoom-modellen van Bohr en Rutherford, de bouw van de kern, de eenheid J en MeV voor energie, de versnelling van een geladen deeltje in een elektrisch veld en met de ontdekking van röntgenstraling en radioactiviteit aan het eind van de 19e eeuw.

LESSENPLAN

Bij het samenstellen van het thema heeft ons een bepaalde lessenverdeling voor ogen gestaan. Bij het schrijven van deze AVOL is de haalbaarheid van onze ideeën nog niet getoetst. Onze lessenverdeling is als volgt:

		HAVO	VWO
Hoofdstuk 1	(orientatie)	1	1
Hoofdstuk 2	(eigenschappen)	4	3
Hoofdstuk 3	(biologische effecten)	2	2
Hoofdstuk 4	(bronnen)	5	3
Hoofdstuk 5,6,7	(keuzeperiode)	3	3
Rapportage		2	1
Hoofdstuk X	(stralingsfysicus)	-	3
Hoofdstuk 8	(risico-evaluatie)	2	1
Stralingspraktic	um	2	2
Toets		1	1
	Totaal	22	20

De VWO-lessenverdeling is aan de krappe kant. Voor HAVO-leraren biedt het wellicht toch aanwijzingen voor mogelijkheden tot inkorten in geval van tijdgebrek.

Noot:
Het hoofdstuk X is het VWO hoofdstuk dat apart van het thema zal verschijnen.

INHOUD AVOL

Voorwoord 3

Plaats en karakter van het thema 4
1. De plaats van het thema in de cursus 4
2. Achtergronden en verantwoording van de themakeuze 4
3. Ervaringen met een vorige versie 5
4. Globale opzet 6

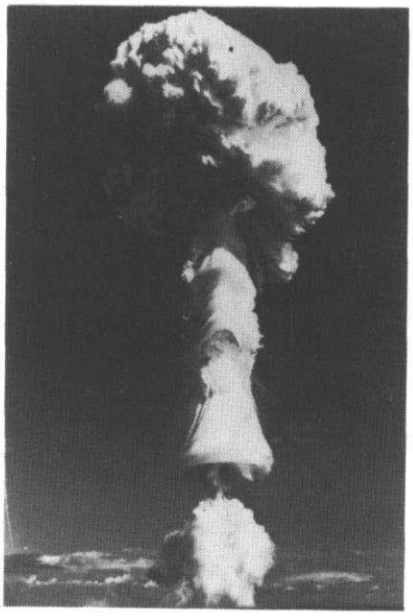
Leerstof, vaardigheden, beginsituatie 8
1. Leerstof 8
2. Vaardigheden 8
3. Beginsituatie 9

Lessenplan 10

Opmerkingen per hoofdstuk 11
1. Oriëntatie 11
2. Eigenschappen van ioniserende straling 13
3. Ioniserende straling en de mens 17
4. Stralingsbronnen 20
5. Kernenergie 24
6. Kernwapens 27
7. Straling in de gezondheidszorg 29
8. Risico's en veiligheid 31

Bijlagen 32
D1 Samenvatting thema Ioniserende Straling 32
D2 Ioniserende straling in het EPEP 40
D3 Toetsvragen bij ioniserende straling 41
D4 Een overzicht van grootheden en eenheden in de dosimetrie 52
I1 Gevolgen van blootstelling aan ioniserende straling 53
I2 Toen viel de bom op Rotterdam 56
I3 Bevolkingsonderzoek naar borstkanker 59
I4 Het (reizend) stralingspraktikum 60
I5 Simulatie-experimenten 62
I6 Het demonstreren van enige experimenten met radioactieve bronnen 69
I7 Kursus stralingsbescherming 80
I8 Een zelf te bouwen Geiger-Muller teller 81
I9 Een zelf te bouwen Wilsonvat 86
I10 Kennis & Vernuft - Kernenergie en taal 90
I11 Literatuur 91
I12 Films en video 94
I13 Adressen 95
I14 Moderne beeldvormende technieken in de medische diagnostiek 99

IONISERENDE STRALING



PLON

Vakgroep Natuurkunde-Didactiek
Rijksuniversiteit Utrecht

bovenbouw
HAVO/VWO

inhoud

		blz.
1	oriëntatie	5
2	eigenschappen van ioniserende straling	9
3	ioniserende straling en de mens	18
4	stralingsbronnen	30
5	kernenergie	41
6	kernwapens	54
7	straling in de gezondheidszorg	63
8	risico's en veiligheid	77
	index	82

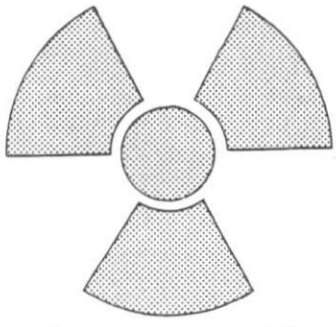
hoofdstuk 1

ORIENTATIE

inhoud blz.

1.1 ioniserende straling om ons heen 5
1.2 kleine en grote risico's 6
1.3 de opzet van het thema 'Ioniserende Straling' 8

1.1 IONISERENDE STRALING OM ONS HEEN



Op elke bron van radioactiviteit moet dit teken als waarschuwing staan.

In het dagelijks spraakgebruik wordt het woord straling in diverse betekenissen gebruikt. We hebben het over zonnestraling, de uitstraling van een artiest of politicus, stralingsgevaar, de straling van een PTT-toren en straalkacheltjes. Vroeger bedoelde men met straling altijd het uitzenden van licht of warmte. Niet verwonderlijk als je bedenkt dat ons lichaam deze vormen van straling kan waarnemen via de zintuigen.
Sinds de negentiende eeuw zijn ook andere vormen van straling ontdekt, die niet direkt door onze zintuigen kunnen worden opgespoord: straling van radioactieve stoffen (ook wel *kernstraling* genoemd) en röntgenstraling. Een belangrijke eigenschap van deze vormen van straling is het vermogen om atomen te *ioniseren*. Dat betekent dat ze in staat zijn om uit elektrisch neutrale atomen een elektron los te slaan. Het atoom wordt hierdoor elektrisch geladen; we noemen het dan een *ion*.
In cellen van levende wezens kunnen door straling gevormde ionen chemische reacties tot gevolg hebben. Door deze reacties kan de cel worden vernietigd of beschadigd waardoor bijv. de erfelijke eigenschappen kunnen veranderen. Dat is het gevaar van ioniserende straling voor mens, plant en dier. Soms zijn die effecten juist gewenst, bijv. om de groei van kankercellen te stoppen. Dan wordt ioniserende straling benut om deze cellen te doden.

Kern- en röntgenstraling mogen dan pas minder dan een eeuw bekend zijn, dat wil niet zeggen dat ioniserende straling een menselijke uitvinding is. Vanuit het heelal wordt de aarde voortdurend gebombardeerd door ioniserende *kosmische straling*. De aardkorst bevat allerlei gesteenten die radioactieve stoffen bevatten. We spreken in beide gevallen van *natuurlijke straling* of *achtergrondstraling*.
Nieuw is dat in deze eeuw de mensheid te maken kreeg met *kunstmatige straling*. Dit is het gevolg van het doelbewust gebruik van kern- en röntgenstraling na de *ontdekking* ervan rond 1900. De toepassingen van ioniserende straling vinden we op allerlei terreinen: in elektriciteitscentrales, in de industrie, in ziekenhuizen en op militaire bases.
Over het *nut* en de *risico's* van deze toepassingen lopen de meningen flink uiteen. Heftige discussies zijn daarvan het gevolg. In dat soort discussies worden vaak feiten gebruikt om meningen kracht bij te zetten. De kwaliteit van de discussies is er bij gebaat wanneer alleen juiste feiten gehanteerd worden en als duidelijk blijft wát een feit is en wát een mening. Dat vereist inzicht in de achtergronden van ioniserende straling. Aan dit inzicht wil dit thema een bijdrage leveren.

1. ENKELE SITUATIES WAARIN KENNIS VAN IONISERENDE STRALING BETEKENIS HEEFT

De lijst op blz. 6 geeft 22 situaties waarin mensen met ioniserende straling te maken kunnen krijgen.

a. Met welke situatie(s) heb je zelf te maken gehad? Beschrijf deze situatie(s).

b. Had je het gevoel over voldoende kennis van zaken te beschikken die nodig was voor die situatie(s)?
Zo ja, welke kennis had je nodig en hoe kwam je er aan?
Zo nee, wat had je op dat moment willen weten?

c. Met welke situaties zou je in de toekomst te maken kunnen krijgen? Ga voor één van die situaties na wat je dan zou willen weten of begrijpen.

ENKELE SITUATIES WAARIN KENNIS VAN IONISERENDE STRALING BETEKENIS HEEFT

1. Als verpleegkundige betrokken zijn bij het nemen van röntgenfoto's of het bestralen van patiënten.
2. Als vriend praten met iemand die bestraald wordt of met een arts praten over de resultaten van een radiodiagnostisch onderzoek bij een familielid.
3. Als technisch medewerker van een ziekenhuis verantwoordelijk zijn voor opslag en afvoer van radioactief afval.
4. Als aktievoerder meewerken aan een plaatselijke campagne tegen kernenergie.
5. Als tv-kijker een discussie volgen over het nut van het bouwen van schuilkelders in ons land.
6. Als leerling het praktikum ioniserende straling op het programma krijgen.
7. Als werknemer in een metaalbedrijf moeten werken met kernstraling om de dikte van het uitgewalste staal te controleren.
8. Als hartpatiënt een pace-maker geplaatst krijgen, die als energiebron een stukje plutonium bevat.
9. Als bezoeker van een kerncentrale worden rondgeleid door een ervaren voorlichter.
10. Als krantelezer een artikel tegenkomen over de ontwikkeling van een Franse neutronenbom.
11. Als consument een pak bestraald voedsel in de winkel aantreffen.
12. Als vakantiehulp verantwoordelijk zijn voor de verzorging van muizen waarmee stralingsproeven worden verricht.
13. Als typiste verzeild raken in een discussie over de mogelijke risico's van radioactieve brandmelders op de typekamer.
14. Als huiseigenaar een artikel lezen over de afgifte van radongas door een bepaald soort gipsplaten.
15. Als Groningse boer proefboringen moeten toelaten op je land, omdat men een zoutkoepel zoekt voor de opslag van radioactief afval.
16. Als analiste betrokken zijn bij een onderzoek waarbij radioactieve nucliden worden gebruikt.
17. Als patiënt van een tandarts regelmatig röntgenfoto's van je kaak voorgeschreven krijgen.
18. Als lid van een politieke partij op een afdelingsvergadering moeten stemmen over het standpunt van je partij inzake kernenergie of kernwapens.
19. Als bioscoopbezoeker een film zien over een ongeluk met een kerncentrale.
20. Als ambtenaar verantwoordelijk zijn voor de controle op de uitvoering van de kernenergiewet.
21. Als onderzoeker werken aan een rapport over de elektromagnetische effecten van de ontploffing van kernwapens.
22. Als inwoner van Dodewaard een kerncentrale in je buurt hebben staan.

Röntgenfoto van tanden en kiezen.

1.2 KLEINE EN GROTE RISICO'S

De heftigheid van de discussies over de toepassingen van ioniserende straling hangt samen met de waardering van de *risico's* die de straling met zich mee brengt. Wat is eigenlijk een risico? Wanneer is het klein of groot?

Een risico is de kans op schade of verlies. Het bevat dus altijd twee onderdelen: *kans* en *gevolg*.
Ten eerste is van belang de *kans* dat er iets gebeurt, bijvoorbeeld de kans dat je bij een verkeersongeval betrokken raakt of de kans dat er iets misgaat in een kerncentrale.
Deze kans kunnen we in het eerste geval bepalen door te kijken naar de ongevalsstatistieken van de afgelopen jaren. Je kunt de kans dan *berekenen* uit de statistische gegevens.

Bij de kerncentrale beschikken we over veel te weinig ervaring met reactoren om aan de statistiek iets te hebben. Men baseert de kans dan op *schattingen.*
Bij risico's spelen ook de *gevolgen* van het gebeuren mee, bijv. het overlijden van 1 persoon, de dood van 1000 mensen, het invalide worden van iemand of de gevolgen voor het milieu. Men maakt bij het beschrijven van de gevolgen ook wel gebruik van de termen micro-, meso- en macro-effecten:
– *micro-effecten:* gevolgen voor de direct betrokkenen (bijv. werknemers van een kerncentrale);
– *meso-effecten:* gevolgen voor de directe omgeving (bijv. de omgeving van een kerncentrale);
– *macro-effecten:* gevolgen voor zeer grote gebieden of voor de mensheid als geheel (bijv. klimaatsveranderingen).

Artikel 2.
Van de verzekering is uitgesloten schade ontstaan door:
1. oorlog en oproer
2. atoomkernreacties
3. overstroming
4. aarbeving en vulcanische uitbarsting.

Met behulp van het onderscheid tussen kans en gevolg kunnen we iets zeggen over de grootte van een risico. Het risico is in elk geval klein als zowel kans als gevolg klein zijn; het is groot als kans én gevolg groot zijn.
In de verzekeringswereld maakt men gebruik van een definitie van risico die luidt:
risico = kans × gevolg.
Bij het berekenen van de premie van auto-, glas- of begrafenisverzekeringen is deze formule bruikbaar, omdat kans en gevolg redelijk nauwkeurig zijn te berekenen.
De formule is niet zo makkelijk bruikbaar als het gaat om situaties waarin de kans heel klein is, maar de gevolgen zeer groot. Voorbeelden hiervan zijn de ontploffing van kernwapens of het smelten van de reactorkern in een kerncentrale. In verzekeringspolissen vind je daarom schade als gevolg van oorlogsgeweld vaak uitgesloten, terwijl verder kerncentrales niet volledig zijn te verzekeren.
Wanneer je met zo'n situatie van een kleine kans op grote gevolgen te maken hebt, zul je moeten afwegen wat zwaarder telt: de kans of de gevolgen. Die afweging is subjectief en kan voor iedereen een ander resultaat opleveren.

In het dagelijks leven worden we vaak voor de vraag gesteld of we een bepaald risico moeten accepteren of niet. Aan de beantwoording van zo'n vraag gaat een *analyse* en een *afweging* van risico's en voordelen vooraf. Je hebt dan tenminste antwoorden nodig op de volgende deelvragen:
– waarom wordt een bepaalde toepassing gebruikt;
– wat kan er allemaal misgaan;
– hoe waarschijnlijk is elk van deze gebeurtenissen;
– wat zijn de gevolgen van elke gebeurtenis;
– hoe erg vinden we deze gevolgen;
– wegen de risico's op tegen de voordelen?
In dit thema komen deze vragen aan bod in situaties waarin ioniserende straling een rol speelt. In de hoofdstukken 2 t/m 7 gaat het vooral om de eerste vijf vragen. De laatste vraag krijgt volop aandacht in het slothoofdstuk.

Waarschuwing tegen zwartrijden in de bus.

1. KANS EN GEVOLG BIJ ZWARTRIJDEN

In stads- en streekbussen hangen waarschuwingen dat het een duur ritje wordt als je op zwartrijden wordt betrapt. Desondanks rijden veel mensen (5 à 10%) zwart. We zien even af van de morele aanvaardbaarheid van zwart rijden, en bekijken of het risico van zwart rijden aanvaardbaar is.

a. Hoe groot schat je de kans gepakt te worden?
b. Wat zijn dan de financiële gevolgen?
c. Is het om financiële redenen verstandig zwart te rijden?
d. Welke andere dan financiële gevolgen zou je meewegen bij de overweging om al dan niet zwart te rijden?

2. RISICO'S IN HET VERKEER

a. Welke gegevens heb je nodig om de kans te berekenen dat je als fietser in een jaar een ongeluk krijgt?
b. Risico's in het verkeer worden vaak uitgedrukt in het aantal doden per afgelegde km in een bepaald vervoermiddel. Waarom is dat een onvolledige uitdrukking voor verkeersrisico's?

3. VOORBEELDEN VAN RISICO'S

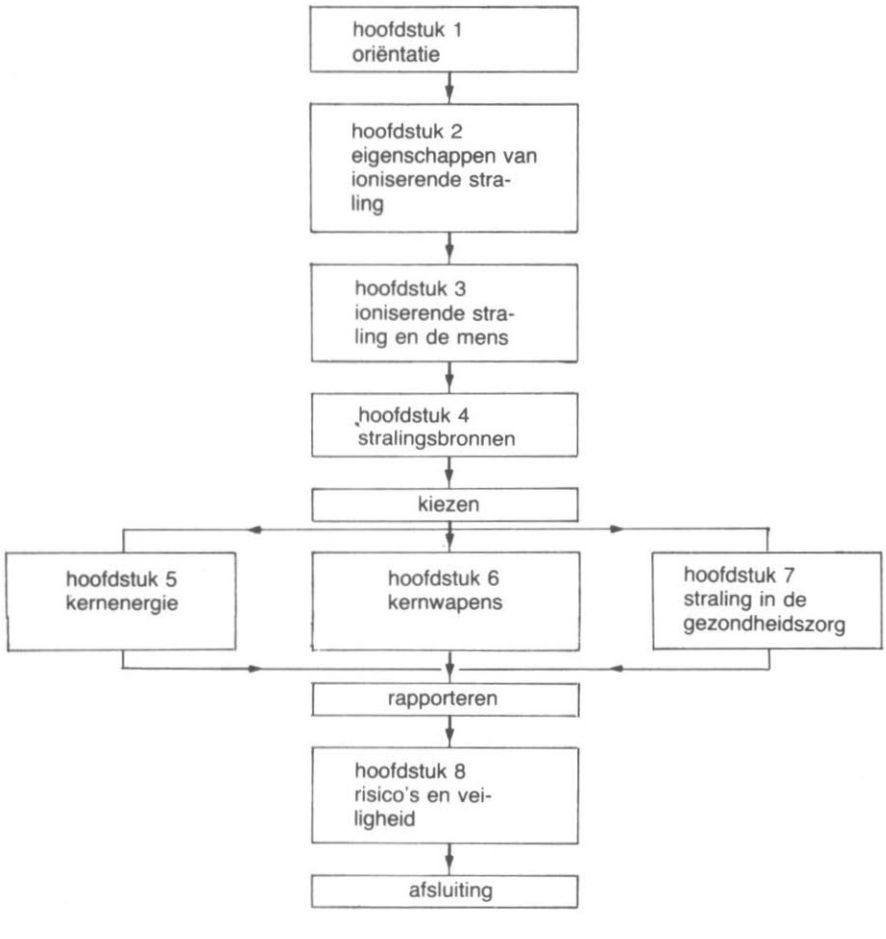
a. Bedenk voorbeelden voor de volgende soorten risico's:
- kleine kans en geringe gevolgen;
- grote kans en geringe gevolgen;
- kleine kans en grote gevolgen;
- grote kans en grote gevolgen.

b. In welke volgorde zou je deze soorten risico's naar grootte rangschikken?

1.3 DE OPZET VAN HET THEMA 'IONISERENDE STRALING'

Centraal staat in dit thema de vraag naar de aanvaardbaarheid van toepassingen van ioniserende straling. Bij de afweging van de risico's en voordelen kan natuurkundige kennis en inzicht een rol spelen, naast economische, politieke, medische en sociale aspecten. In dit thema ligt de nadruk op de natuurkundige kant van de zaak. Daarbij zullen we een antwoord zoeken op de volgende vragen:
- waar komt de straling vandaan;
- wat zijn de eigenschappen van ioniserende straling;
- hoe kan deze straling worden gemeten;
- wat zijn de effecten van deze straling voor het menselijk lichaam;
- welke gebruiksmogelijkheden biedt de straling;
- hoe is bescherming mogelijk?

De figuur hieronder toont de opbouw van het thema. De hoofdstukken 2 t/m 4 geven basisinformatie over eigenschappen, effecten en bronnen van ioniserende straling. De hoofdstukken 5 t/m 7 bieden je de gelegenheid om samen met andere leerlingen te werken aan één van de toepassingsgebieden: kernenergie, kernwapens en gezondheidszorg. In die drie hoofdstukken vind je een aantal opdrachten, waarbij je informatie zult moeten verzamelen uit beschikbare literatuur of door mensen te interviewen.
Tenslotte is hoofdstuk 8 gewijd aan de vraag naar de aanvaardbaarheid van de risico's van ioniserende straling.



hoofdstuk 2

EIGENSCHAPPEN VAN IONISERENDE STRALING

inhoud blz.

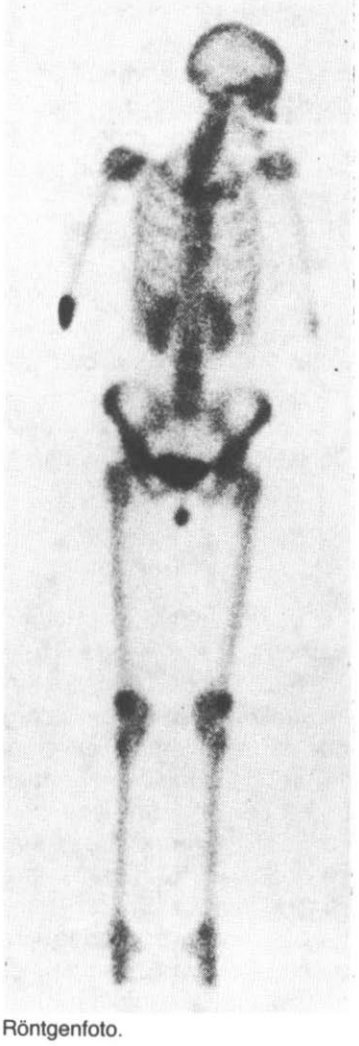
2.1 röntgenstraling 10
2.2 kernstraling 11
2.3 radioactief verval 13
2.4 stralingshoeveelheden 15
2.5 straling op het spoor 16

eigenschappen van ioniserende straling

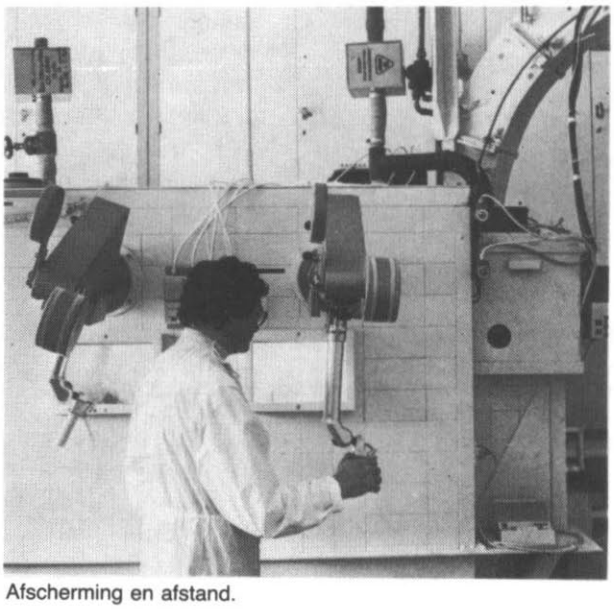
Er bestaan verschillende soorten ioniserende straling. Elk van die soorten onderscheidt zich van andere door zijn eigenschappen, zoals bijv. energie, doordringingsvermogen, ioniserend vermogen, lading, massa en gedrag in een elektrisch of magnetisch veld. Over deze eigenschappen gaat dit hoofdstuk.

Verder gaan we in op de vraag waar de straling vandaan komt en maak je kennis met enkele grootheden waarmee de 'hoeveelheid' straling kan worden beschreven.

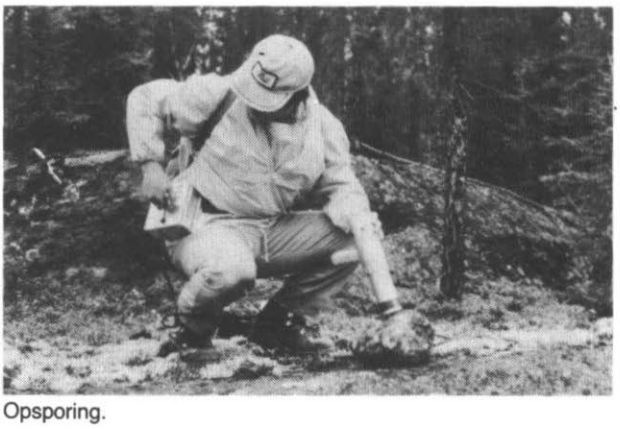
Tenslotte laten we zien hoe de genoemde eigenschappen gebruikt kunnen worden om straling op te sporen en om 'hoeveelheden' straling te meten.



Röntgenfoto.



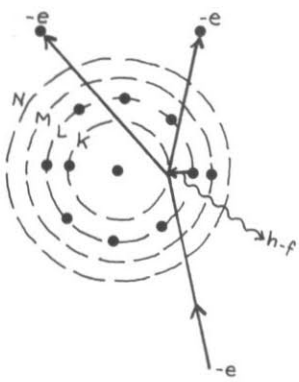
Afscherming en afstand.



Opsporing.

2.1 RÖNTGENSTRALING

W.C. Röntgen.



Röntgenstraling kan worden gevormd wanneer een elektron uit de L-baan de plaats inneemt van een ander elektron (uit de K-baan), dat zojuist door een derde snel elektron is weggestoten.

Röntgenstraling ontstaat niet alleen op de hierboven beschreven manier. Deze straling ontstaat ook als een elektron bij de nadering van een kern een versnelling ondergaat. De röntgenstraling die zo ontstaat noemen we remstraling. *De frekwentie van de röntgenstraling is afhankelijk van de grootte van de versnelling van het elektron. Omdat die versnelling voor elk elektron anders kan zijn, is het spectrum van de remstraling een* continu spectrum

Toen Röntgen in 1895 de naar hem genoemde straling ontdekte, kon hij niet verklaren waar die straling uiteindelijk vandaan kwam. Wel kon hij in zijn eerste artikel over de straling een aantal eigenschappen ervan melden, zoals:
- de straling plant zich rechtlijnig voort en wordt niet afgebogen door elektrische en magnetische velden;
- de straling kan een gas elektrisch geleidend maken;
- fotografische platen zijn gevoelig voor straling;
- voorwerpen blijken in verschillende mate de straling door te laten.

Ook was het Röntgen duidelijk dat de straling ontstaat op de plaats waar kathodestralen (snelle elektronen) op de wand van een glazen buis vallen.

Het opstellen van het Bohr-model voor het atoom maakte het pas mogelijk inzicht te krijgen in de oorsprong van de röntgenstraling. Het blijkt dat deze straling niet uit de kern komt, maar afkomstig is *van de elektronen* die zich om de kern bewegen in banen die gekenmerkt worden door een bepaalde energie. Een snel elektron dat met het atoom botst, is in staat één van de elektronen die zich in een baan vlak bij de kern bevinden, weg te schieten. Een elektron uit een baan met een grotere straal neemt dan de plaats van het verdwenen elektron in. Evenals bij het ontstaan van spectraallijnen van zichtbaar licht wordt er een foton uitgezonden als een elektron naar een lagere baan springt. Het verschil tussen zichtbaar licht en röntgenstraling is, dat bij röntgenstraling de energie van het foton groter is. Dat komt omdat het bij röntgenstraling niet gaat om elektronen aan de buitenkant van het atoom, maar om elektronen dichter bij de kern: de energieverschillen tussen de binnenste banen zijn groter dan tussen de buitenste banen.

Net als licht is röntgenstraling dus een vorm van elektromagnetische straling. De voortplantingssnelheid is dan ook de lichtsnelheid c. Het verband tussen golflengte λ en frekwentie f wordt ook nu weer gegeven door de formule $\lambda = c/f$.
Bij röntgenstraling is λ echter een stuk kleiner dan bij zichtbaar licht.

1. VERGELIJKING RÖNTGENSTRALING – ZICHTBAAR LICHT

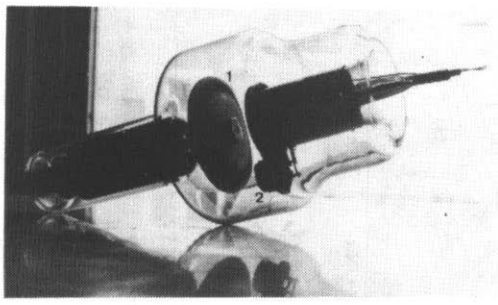
a. Welke overeenkomsten en verschillen zijn er tussen beide soorten straling?
b. Laat zien dat een kleinere λ samenhangt met een grotere energie van de fotonen.
c. Bereken de grenzen van de energie van fotonen van zichtbaar licht en röntgenstraling met behulp van de gegevens uit de tabel hiernaast.

De golflengte-gebieden van enkele soorten elektromagnetische straling

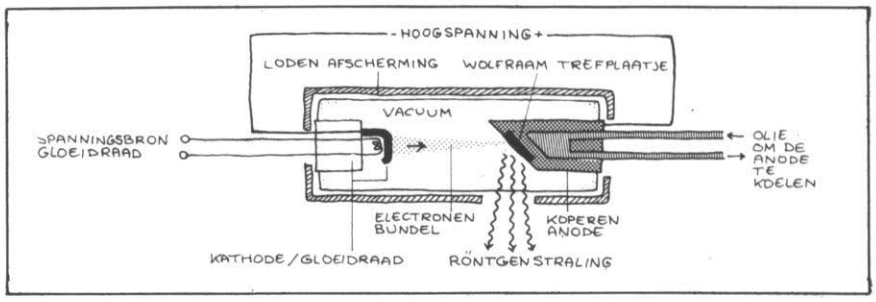
soort straling	λ in m
zichtbaar licht	$4 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-7}$
röntgenstraling	$10^{-8} - 10^{-11}$

röntgenbuis

In de tekening op blz. 11 vind je een schema van een moderne *röntgenbuis*. De buis bevat twee elektroden: een *kathode* en een *anode*. Tussen beide elektroden wordt een hoge spanning aangelegd, meestal tussen 10 kV (bij het maken van een röntgenfoto) en 1 MV (bij behandeling van kankerpatiënten met röntgenstraling).
De kathode wordt verhit door een gloeidraad, en er ontsnapt dan een groot aantal elektronen. Deze elektronen worden versneld door het elektrische veld tussen de beide elektroden. De snelle elektronen botsen tegen een wolfraam trefplaatje op de anode. Bij de botsing wordt röntgenstraling gevormd. Deze straling treedt via een venster uit de buis, omdat de anode een hoek van 45° maakt met de elektronenbundel.
De energie van de röntgenstraling hangt af van de spanning tussen de elektroden. Bij een spanning van 100 kV is de *maximale* energie van de röntgenstraling 100 keV, omdat dat ook de maximale energie is van de versnelde elektronen. Bij hoge energie spreken we van *harde* röntgenstraling, bij lage van *zachte* röntgenstraling.



Moderne röntgenbuis met een draaiende anodeschijf (1). Het elektronenkanon (2) zit niet in het midden.



Doorsnede van een röntgenbuis.

Slechts een deel van de energie van de snelle elektronen komt vrij in de vorm van röntgenstraling. Zo'n 99% van de totaal toegevoerde energie gaat verloren door verwarming van de anode. Daarom moet de anode worden gekoeld.

2. VARIATIES IN DE RÖNTGENBUIS

Röntgenbuizen bestaan in veel vormen. Ze verschillen onder meer in de manier van koeling van de anode. Ook het materiaal van het trefplaatje op de anode kan verschillen. Wél zijn alle moderne buizen vacuüm gezogen.

a. Waarom is een vacuüm in de buis noodzakelijk?

b. Welke eigenschap van wolfraam maakt het tot een geschikt materiaal voor de anode?

c. De buis is aangesloten op twee spanningsbronnen. Voor welke twee doelen zijn de twee spanningsbronnen nodig?

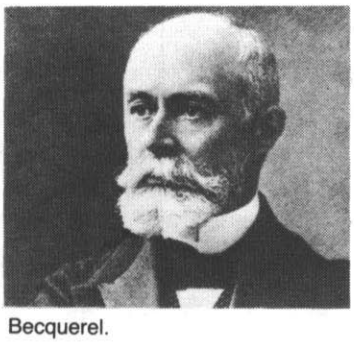
d. Wat zal het gevolg zijn voor de röntgenstraling wanneer de hoogspanning tussen kathode en anode wordt verhoogd?

e. Verhoging van de kathodegloeispanning zal een ander effect hebben. Welk?

3. REKENEN AAN RÖNTGENSTRALING

Welke spanning is nodig in de buis om röntgenstraling met $\lambda = 10^{-11}$ m te krijgen? Bereken daartoe eerst wat de energie per foton van deze straling is in joule en in elektronvolt. Gegeven:
$c = 3 \cdot 10^{8}$ m/s;
$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Js;
$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

2.2 KERNSTRALING



Becquerel.

Ook de geschiedenis van de ontdekking van *kernstraling* laat zien dat eerst het verschijnsel werd ontdekt. Vervolgens werden de eigenschappen van de straling gevonden. Daarna pas kwam een verklaring voor de oorsprong van de straling. Belangrijk werk werd in de beginjaren op dit gebied verricht door Becquerel, het echtpaar Curie en Rutherford.

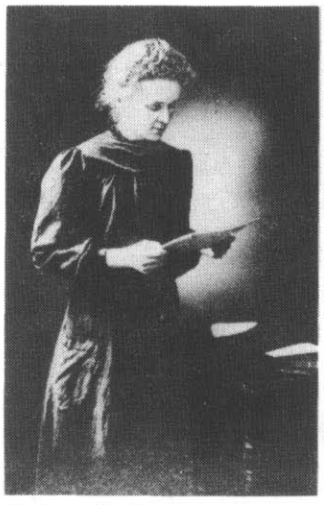
Al spoedig werd uit het onderzoek duidelijk dat er drie soorten kernstraling zijn: α-, β- en γ-straling.

– *α-straling*

α-straling bestaat uit kernen van een He-atoom. Elke kern bestaat uit 2 protonen en 2 neutronen. De lading is in *grootte* gelijk aan die van 2 elektronen, maar dan positief: $+2e$. De snelheid van de α-deeltjes hangt af van het radioactieve materiaal en is maximaal zo'n 10% van de lichtsnelheid. Hun doordringingsvermogen is niet groot: ze dringen niet verder dan enkele centimeters in lucht door, en worden door een dik vel papier geabsorbeerd. Over die korte afstand zijn ze wel in staat veel atomen te ioniseren.

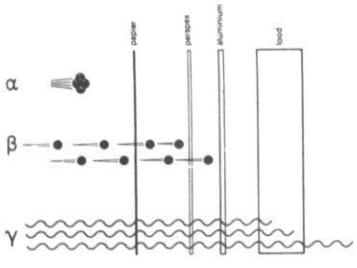
– *β-straling*

β-straling bestaat uit elektronen. Elk β-deeltje heeft dus een lading $-e$. De snelheid kan verschillende waarden hebben en is maximaal zo'n 90% van de lichtsnelheid. In lucht kunnen de β-deeltjes wel een meter doordringen. Door perspex of aluminium van enkele



Madame Curie.

Rutherford.



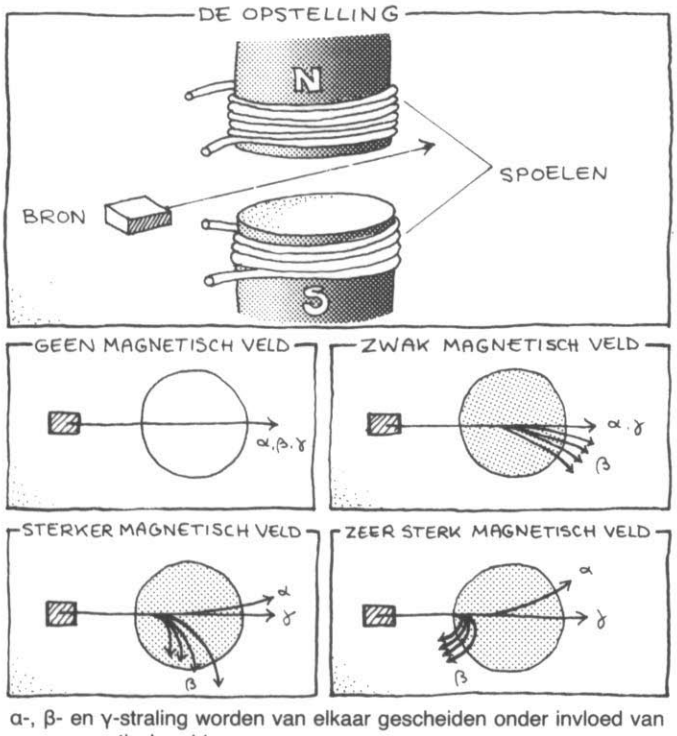
Symbolische voorstelling van de afscherming van α-, β- en γ-straling.

millimeters dikte worden ze geabsorbeerd. Hun ioniserend vermogen is een stuk kleiner dan dat van α-straling.

– *γ-straling*

γ-straling bestaat niet uit geladen deeltjes, maar uit fotonen en is dus een vorm van elektromagnetische straling. De voortplantingssnelheid is dus gelijk aan de lichtsnelheid. γ-straling is moeilijk te stoppen: enkele centimeters dik lood absorbeert wel veel, maar niet alle fotonen. Het ioniserend vermogen is echter een stuk kleiner dan dat van β-straling.

Kernstraling bestaat vaak uit een combinatie van α- en γ-straling of van β- en γ-straling. In alle gevallen is de straling afkomstig uit de kern, en dus niet van de elektronen rond de kern. Door het uitzenden van α-, β- of γ-straling verandert deze kern. Bij γ-straling verandert alleen de inwendige energie van de kern. Beide andere soorten straling gaan samen met veranderingen in de aantallen protonen en neutronen in de kern. Dat betekent dus dat een ander element wordt gevormd. In de volgende paragraaf gaan we op *radioactief verval* verder in.



α-, β- en γ-straling worden van elkaar gescheiden onder invloed van een magnetisch veld.

1. VERGELIJKING VAN SOORTEN KERNSTRALING

In bovenstaande tekst wordt achtereenvolgens een aantal eigenschapen van α, β- en γ-straling genoemd.

a. Maak ter vergelijking van deze soorten straling een overzicht van de eigenschappen zoals lading, massa, snelheid, doordringingsvermogen en ioniserend effect.

b. Kun je aan de hand van de eigenschappen voorspellen wat de invloed zal zijn van een magnetisch veld op elk van de soorten straling? Gebruik zonodig de tekening hiernaast om je antwoord toe te lichten.

2. RÖNTGEN- EN KERNSTRALING

We hebben nu kennis gemaakt met de eigenschappen van röntgen-, α-, β- en γ-straling. Ter vergelijking de volgende vragen.

a. Welke eigenschap hebben alle vier soorten straling gemeenschappelijk?

Bij snelheden groter dan 0,1 · c wordt de massatoename van de deeltjes merkbaar. Dat hangt samen met het feit dat deeltjes nooit sneller kunnen bewegen dan de lichtsnelheid. De energie van β-deeltjes met een snelheid van 0,9 c is dus niet zo eenvoudig uit te rekenen.

b. Welke kernstraling lijkt het meest op röntgenstraling? Licht het antwoord toe.

c. Tegen welke twee soorten straling is eenvoudig bescherming mogelijk?

3. ENERGIE VAN α-DEELTJES
Bereken de energie van α-deeltjes met een snelheid van 0,1 · *c*.

2.3 RADIOACTIEF VERVAL

In deze paragraaf bekijken we de veranderingen in de kern als gevolg van het uitzenden van kernstraling. Je herinnert je nog wel dat een kern bestaat uit protonen en neutronen; de aantallen noemen we *Z* en *N*. Het aantal *Z* noemen we het *atoomnummer*. De som van deze aantallen kerndeeltjes *Z* + *N* noemen we het *massagetal A*. Het is gebruikelijk de samenstelling van een kern (de *nuclide*) als volgt te noteren:
${}^{A}_{Z}X$.
Voorbeelden daarvan zijn:
${}^{1}_{1}H$ ${}^{4}_{2}He$ ${}^{12}_{6}C$ ${}^{238}_{92}U$
Atomen van de genoemde elementen (waterstof, helium, koolstof en uranium) kunnen ook een andere kern hebben; bijv.:
${}^{2}_{1}H$, ${}^{3}_{2}He$, ${}^{14}_{6}C$, ${}^{235}_{92}U$.
Het massagetal van hetzelfde element verschilt, en dat betekent dus dat het aantal neutronen *N* verschillend is. Kernen van één element met verschillend massagetal noemt men *isotopen*; bijv. ${}^{235}_{92}U$ en ${}^{238}_{92}U$. Men schrijft ook wel uranium-235 en uranium-238.
α- en β-deeltjes kunnen met behulp van dezelfde notatie worden beschreven: een α-deeltje noteer je als ${}^{4}_{2}He$ en een β-deeltje als ${}^{0}_{-1}e$.

Bij het uitzenden van β-straling verlaat een elektron de kern. Dat lijkt vreemd, omdat een kern bestaat uit protonen en neutronen. Er moet dus eerst een elektron in de kern ontstaan. Dat gebeurt als een neutron vervalt tot een proton en een elektron:
${}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e$
Het elektron wordt door de kern uitgestoten: β-straling. Bij de nieuw ontstane kern is het massagetal A even groot als bij de oorspronkelijke kern (de som van het aantal protonen en neutronen verandert niet). Het atoomnummer Z is echter met 1 toegenomen (er is één proton bijgekomen in de kern).

Wat zijn nu de gevolgen van het uitzenden van α- en β-straling voor de kern? Laten we als voorbeeld het door de Curies ontdekte radium-226 nemen. De kern ${}^{226}_{88}Ra$ zendt een α-deeltje (${}^{4}_{2}He$) uit. Het massagetal *A* daalt met 4 en het atoomnummer *Z* met 2. Wat resteert is een kern met massagetal 222 en atoomgetal 86: ${}^{222}_{86}Rn$ (radon). Het is gebruikelijk dit vervalsproces te beschrijven met een reactievergelijking:
${}^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$ (+ energie).
Zoals je ziet in deze reactievergelijking blijft het aantal kerndeeltjes *A* behouden, evenals de lading *Z*.
Voor β-straling geldt net zo'n verhaal. Nemen we het in de gezondheidszorg veel gebruikte jodium-131, dan levert de reactievergelijking voor deze β-straler:
${}^{131}_{53}I \rightarrow {}^{131}_{54}Xe + {}^{0}_{-1}e$ (+ energie).
Controleer het behoud van massagetal en lading.

1 H 1.0080																	2 He 4.003
3 Li 6.940	4 Be 9.013											5 B 10.82	6 C 12.011	7 N 14.008	8 O 16.000	9 F 19.00	10 Ne 20.183
11 Na 22.991	12 Mg 24.32											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.975	16 S 32.066	17 Cl 35.457	18 Ar 39.944
19 K 39.100	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.90	23 V 50.95	24 Cr 52.01	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.94	28 Ni 58.71	29 Cu 63.54	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.60	33 As 74.91	34 Se 78.96	35 Br 79.916	36 Kr 83.80
37 Rb 85.48	38 Sr 87.63	39 Y 88.92	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.95	43 Tc	44 Ru 101.1	45 Rh 102.91	46 Pd 106.4	47 Ag 107.880	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.70	51 Sb 121.76	52 Te 127.61	53 I 126.91	54 Xe 131.30
55 Cs 132.91	56 Ba 137.36	57–71 La Series	72 Hf 178.50	73 Ta 180.95	74 W 183.86	75 Re 186.22	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.09	79 Au 197.0	80 Hg 200.61	81 Tl 204.39	82 Pb 207.21	83 Bi 208.99	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra 226.03	89–103 Ac Series	(104)	(105)	(106)	(107)	(108)										

Lanthanide series	57 La 138.92	58 Ce 140.13	59 Pr 140.92	60 Nd 144.27	61 Pm	62 Sm 150.35	63 Eu 152.0	64 Gd 157.26	65 Tb 158.93	66 Dy 162.51	67 Ho 164.94	68 Er 167.27	69 Tm 168.94	70 Yb 173.04	71 Lu 174.99
Actinide series	89 Ac 227.04	90 Th 232.05	91 Pa 231.05	92 U 238.04	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw

Periodiek systeem van elementen.

1. RADIOACTIEVE ALCHEMIE
Tot verrassing van velen bleek aan het begin van deze eeuw dat elementen in elkaar konden overgaan. Zou het ideaal van de alchemisten werkelijkheid worden?
a. Ga via reactievergelijkingen na welke kernen worden gevormd bij het uitzenden van β-straling door de volgende – veelgebruikte – radioactieve nucliden: tritium (${}^{3}_{1}H$), cobalt-60, strontium-90 en cesium-137.
b. Doe hetzelfde voor de α-stralers uranium-235, uranium-238 en plutonium-239.

2. VERVALREEKS

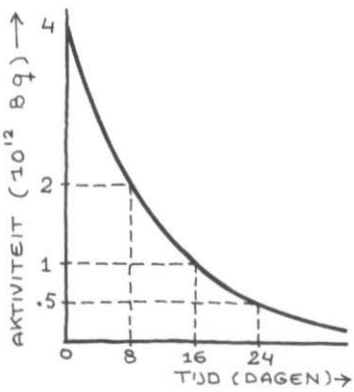
Meestal ontstaat uit een radioactieve kern na uitzending van straling weer een nieuwe radioactieve kern: een radioactieve 'dochter' van de 'moeder'. Zo ontstaat soms een reeks van elkaar opvolgende vervalprodukten: we spreken van een *vervalreeks*. Een voorbeeld hiervan is:

$^{228}_{90}Th \rightarrow {}^{224}_{88}Ra \rightarrow {}^{220}_{86}Rn \rightarrow {}^{216}_{84}Po \rightarrow {}^{212}_{82}Pb \rightarrow {}^{212}_{83}Bi \rightarrow {}^{212}_{84}Po \rightarrow {}^{208}_{82}Pb$ (stabiel).

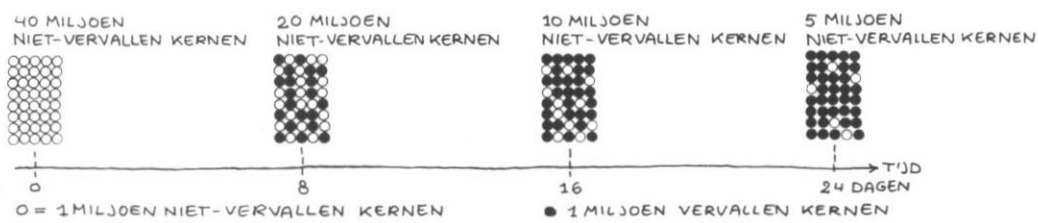
Welke vormen van straling treden op bij de verschillende tussenstappen?

activiteit en halveringstijd

Kernen die spontaan van samenstelling veranderen door het uitzenden van straling noemen we *instabiel*. Op welk moment een bepaalde instabiele kern zal vervallen, is nooit met zekerheid te zeggen. Het proces heeft namelijk een *toevalskarakter*, net als het werpen met een dobbelsteen. Werk je met grote aantallen dobbelstenen, dan is wél iets te zeggen over bijv. het aantal zessen dat je kunt verwachten. Een radioactieve stof bevat vele kernen en zo krijgen we een vergelijkbare situatie. Voor het eerder genoemde jodium-131 geldt bijvoorbeeld dat gemiddeld per seconde 1 op de 1000000 kernen vervalt tot xenon-131. Na 8 dagen is dan de helft van de kernen vervallen. Onderstaande figuur illustreert dit vervalsproces.



De activiteit van 1 mg jodium-131 in de loop van de tijd.



Het radioactief verval van jodium-131 in de loop van de tijd.

40 miljoen kernen lijkt veel. Bedenk echter dat 10^{-16} g I-131 meer dan 10^{15} atomen bevat. Immers 1 mol bevat $6 \cdot 10^{23}$ atomen

We beginnen dus met 40 miljoen niet-vervallen kernen. Na 8 dagen is de helft ervan over, weer 8 dagen later de helft daarvan enz. Elke 8 dagen halveert dus het aantal nog niet vervallen kernen. Een dergelijke tijdsduur noemen we de *halveringstijd*. De halveringstijd is dus een maat voor de snelheid van het vervalsproces.

De halveringstijd τ is kenmerkend voor een bepaalde isotoop. Ze varieert van fracties van een seconde tot miljarden jaren. De tabel hiernaast geeft enkele voorbeelden. Andere voorbeelden zijn te vinden in je tabellenboek (tabel 'Isotopenlijst').

Halveringstijd van enkele radioactieve isotopen

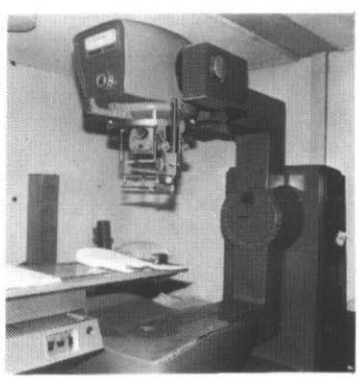
isotoop	*halveringstijd*
H-*3*	*12,3* jaar
C-*14*	*5570* jaar
K-*40*	10^9 jaar
Co-*60*	*5,2* jaar
Sr-*90*	*28* jaar
Cs-*137*	*27* jaar
Au-*198*	*2,7* dag
Rn-*220*	*52* s
U-*235*	$7{,}1 \cdot 10^8$ jaar
U-*238*	$4{,}5 \cdot 10^9$ jaar
U-*239*	$2{,}4 \cdot 10^4$ jaar
Ra-*226*	*1620* jaar
Po-*212*	$3 \cdot 10^{-7}$ s

Om de 'sterkte' van een radioactieve bron aan te geven, gebruiken we de term *activiteit*. Hiermee bedoelen we het aantal kernen dat per seconde vervalt (ofwel: het aantal desintegraties per seconde). In 1911 is voor activiteit de eenheid *curie* (Ci) ingevoerd: 1 Ci = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ desintegraties/s, overeenkomend met de activiteit van 1 gram radium-226. Tegenwoordig gebruiken we als aanheid de *becquerel* (Bq): 1 Bq = 1 desintegratie/s.

De grootte van de activiteit hangt af van het aantal niet-vervallen kernen. Hij is dus gehalveerd na $1 \cdot \tau$.

3.

Een oude kobaltbron (Co-60) uit een medisch bestralingstoestel blijkt nog 12,5% van de opgegeven activiteit te hebben. Hoe oud is deze bron?



Een cobalt-60 bestralingsbron.

tijd (min.)	*activiteit* (MBq)
0	*75,8*
10	*57,4*
20	*43,5*
30	*33,0*
40	*25,0*
50	*19,0*
60	*14,4*
70	*10,9*
80	*8,3*

4.
De tabel hiernaast laat zien hoe de activiteit van een hoeveelheid jodium-128 verandert in de loop van de tijd.
a. Zet in een diagram de activiteit uit tegen de tijd.
b. Bepaal uit het diagram hoeveel tijd nodig is voor een activiteitsafname van:
- 60 tot 30 MBq;
- 40 tot 20 MBq.

c. Hoe groot is de halveringstijd τ van I-128?
d. Hoeveel tijd is nodig geweest om de activiteit van 300 tot 75 MBq te doen dalen?

2.4 STRALINGSHOEVEELHEDEN

We hebben terloops gezien dat bij kernstraling ook energie vrijkomt. Over de oorsprong van deze energie zullen we meer informatie geven in hoofdstuk 4. Bij γ- en röntgenstraling vinden we de energie niet in de vorm van kinetische energie (het zijn immers geen deeltjes) maar in fotonenergie. Elk foton heeft een energie $E_f = h \cdot f$, waarbij h de constante van Planck en f de frekwentie van de elektromagnetische straling voorstelt. Voor elk van de besproken vormen van ioniserende straling geldt dat de energie per deeltje of foton in verschillende grootte kan voorkomen. Bij röntgenstraling is de energie per foton afhankelijk van de versnelspanning in de buis. Bij kernstraling hangt de energie per deeltje of foton af van het vervalsproces: elke nuclide heeft zijn eigen karakteristieke stralingsenergie (zie de tabel 'Isotopenlijst' in je tabellenboek).

1. KERNSTRALING EN ENERGIE
a. Bij de desintegratie van elke kern radium-226 komt 4,6 MeV energie vrij. Ga na hoeveel energie dan geleverd wordt door 1 gram radium in 1 uur. Gebruik daarbij dat de activiteit van 1 gram radium gelijk is aan $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq en dat 1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J.
b. Hoeveel energie is tot nu toe ongeveer geleverd door de 1 gram radium die Madame Curie in 1921 van de Amerikaanse vrouwen kreeg? Verwaarloos daarbij de vermindering van de activiteit ten gevolge van het aantal vervallen kernen.

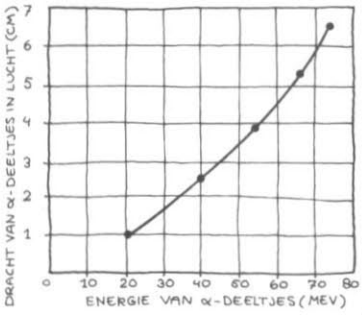
stralingsdosis
Bij de toepassing van ioniserende straling is het belangrijk te kunnen praten over hoeveelheid straling. Je zou dan van de bron kunnen uitgaan: de activiteit is een grootheid die hiervoor wordt gebruikt. Je kunt er mee te weten komen hoeveel energie er vrijkomt en hoeveel α- of β-deeltjes er per seconde door de kern worden uitgezonden.
Voor onze themavraag is het echter belangrijker te weten hoeveel straling wordt ontvangen door een bepaald voorwerp. Voor dat doel gebruikt men de grootheid *stralingsdosis*. Dit is een maat voor de geabsorbeerde stralingsenergie. Preciezer gezegd: de stralingsdosis is de energie die per kg door een bestraald voorwerp wordt geabsorbeerd. De eenheid is de *gray* (Gy): 1 Gy = 1 J/kg. Een voorbeeld: wanneer een liter water bij bestraling 1 J absorbeert aan stralingsenergie, dan is de ontvangen dosis 1 Gy. Let wel, het gaat om de *geabsorbeerde* energie. Bij γ- of röntgenstraling zal een deel van de straling het water passeren zonder te worden geabsorbeerd. Dat deel telt dan niet mee.

In veel boeken wordt nog de oude eenheid rad *gebruikt voor stralingsdosis. Maak bij het omrekenen gebruik van: 1* Gy = *100* rad

Bij sommige toepassingen is het van belang de stralingsdosis groot te laten zijn, bijv. bij het bestralen van kankergezwellen of bij het steriliseren van landbouwprodukten. Vaak is het echter belangrijker de dosis juist zo klein mogelijk te laten zijn. Hiervoor zijn twee principes van belang: *absorptie* en *afstand*.

soort straling	*maximale dracht in* *lucht*	*water*
α	*1-7* cm	*20-80* µm
β	*0,2-1* m	*0,1-10* mm

– *absorptie*
We zagen al dat lucht straling absorbeert. Water doet dat in veel sterkere mate. We zeggen dan dat in water de *dracht* korter is dan in lucht. De tabel illustreert dit. De absorptie hangt samen met het aantal botsingen met kernen en de energie-overdracht per botsing. Stoffen als lood (met een hoge atoommassa) absorberen dan ook nog



Dracht van α-deeltjes in lucht als functie van hun energie.

meer dan water. Röntgen- en γ-straling worden nooit helemaal geabsorbeerd.

afstand

Op een grotere afstand van de bron wordt de straling over een groter oppervlak verdeeld. Eenzelfde voorwerp absorbeert dan veel minder energie. De geabsorbeerde energie is (net als bij lichtbronnen) omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand r (en dus evenredig met $1/r^2$).

2. BESTRALING

Een kankergezwel wordt bestraald met een radioactieve bron. Welke vijf factoren zijn van belang voor de grootte van de door het gezwel ontvangen stralingsdosis? Denk daarbij aan factoren die met de bron, het medium en de ontvanger te maken hebben.

3. AFSTAND HOUDEN

Een stralingswerker ontvangt van een radioactieve bron op 10 m afstand in een uur een stralingsdosis van 1 mGy.

a. Welke soort straling zendt de bron in elk geval uit?

b. Hoe groot zou de dosis zijn geweest op 1 m, 5 m, 20 m en 100 m afstand? (Verwaarloos hierbij even de absorptie in de lucht.)

c. Beredeneer of de dosis op 1 m afstand hoger of lager zou zijn dan je net berekende, als je de absorptie in de lucht niet zou verwaarlozen?

2.5 STRALING OP HET SPOOR

Onze zintuigen zijn niet in staat om kern- of röntgenstraling waar te nemen. Daarvoor hebben we dus hulpmiddelen, apparaten nodig. Al die hulpmiddelen maken gebruik van de eigenschappen van ioniserende straling. Ze worden veel gebruikt om te controleren aan hoeveel en welk soort straling mensen blootgesteld zijn, als ze met ioniserende stralingsbronnen werken. We beperken ons hier tot twee veel gebruikte typen: de filmbadge en de geiger-müller-teller.

Deze filmbadge registreert de straling door middel van fotografisch materiaal.

filmbadge

Een van de oudste methoden om ioniserende straling waar te nemen, is gebruik maken van de eigenschap dat ioniserende straling *fotografische materialen* zwart. De methode wordt gebruikt in de filmbadges die door stralingswerkers verplicht worden gedragen op hun kleding. Het filmpje wordt regelmatig vernieuwd en het oude wordt dan ontwikkeld. De mate van zwarting wordt vergeleken met een standaard, zodat de ontvangen stralingsdosis over een bepaalde periode kan worden bepaald. Filters in de filmhouder worden gebruikt om onderscheid te kunnen maken tussen röntgen-/γ-straling en β-straling.

1. FILMBADGES

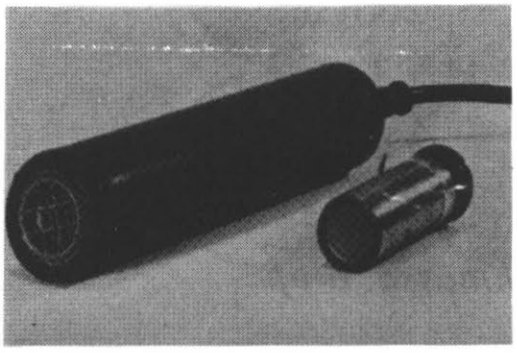
a. Waarom is α-straling moeilijk te meten met filmbadges? Zou dat erg zijn?

b. Welke twee nadelen van deze methode van stralingsdetectie kun je bedenken?

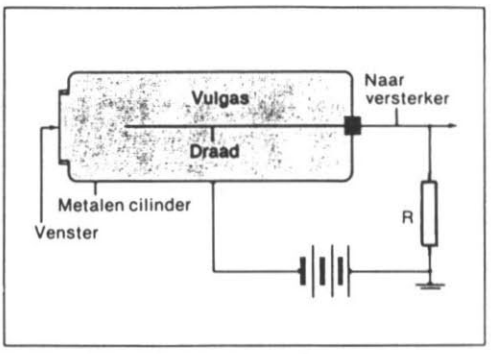
geiger-müller-teller

Een veel gebruikte stralingsdetector is de *geiger-müller-teller* (GM-teller). Je vindt ze bijv. op een radiologische afdeling van een ziekenhuis. Iedereen die met radioactief materiaal gewerkt heeft, moet zijn handen en voeten steken in een apparaat dat controleert of radioactief vuil wordt mee gedragen. In zo'n apparaat zit een geiger-müller-teller. Dit apparaat bestaat uit een telbuis, een versterker en een teller. De telbuis bestaat uit een metalen buis met een gasvulling (vaak argon), een mica venster en een centrale draad. Tussen de metalen buis en de draad (de elektroden) wordt een gelijkspanning van 400 V aangelegd.

Een geiger-müller detector in gebruik.



Een geiger-müller-telbuis.



Schematische voorstelling van één van de vele uitvoeringsvormen van een geiger-müller detector.

Wanneer via het venster ioniserende straling de telbuis binnen treedt, zullen in de gasvulling ionen en vrije elektronen worden gevormd. Deze geladen deeltjes bevinden zich in het elektrische veld tussen de elektroden, en zullen daarom versneld in de richting van de elektroden bewegen. Daarbij ontstaan door botsingen steeds weer nieuwe ionen en vrije elektronen: een lawine van ionen en elektronen bereikt de elektroden. Gedurende korte tijd loopt er dan een stroom door de weerstand R, zodat een spanning over R komt te staan. Deze spanning wordt versterkt en de spanningspulsen worden geteld door de eigenlijke teller.
De geiger-müller-teller is geschikt voor röntgen-, α-, β- en γ-straling. Maximaal kunnen 10000 deeltjes of fotonen per seconde worden geteld. Het apparaat kan zowel binnen als buiten worden gebruikt.

2. GEIGER–MÜLLER–TELLER

a. Van welke eigenschap van röntgen- en kernstraling maakt de GM-teller gebruik?

b. Waarom zou het mica venster zo dun mogelijk worden gemaakt?

c. Voor welke soort straling is de GM-teller minder geschikt?

hoofdstuk 3

IONISERENDE STRALING EN DE MENS

inhoud

		blz.
3.1	dosis en dosisequivalent	19
3.2	acute stralingseffecten	21
3.3	late somatische effecten	24
3.4	genetische effecten	25
3.5	stralingsnormen	26

ioniserende straling en de mens

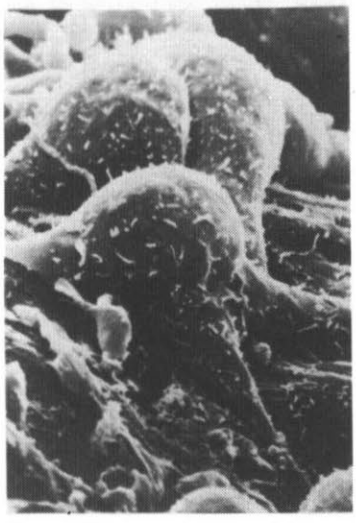
Ieder mens wordt in zijn leven in meer of mindere mate blootgesteld aan ioniserende straling. Natuurlijke achtergrondstraling, vanuit het heelal of afkomstig uit gesteenten, is altijd aanwezig. Andere vormen van straling zijn van kunstmatige aard, bijv. door toepassingen van ioniserende straling in de gezondheidszorg, de defensie, de techniek of bij de opwekking van elektrische energie.

In dit hoofdstuk gaan we in op de *gevolgen* die straling voor de mens heeft. We maken daarbij onderscheid tussen effecten op *korte* en op *lange termijn*. Met korte-termijn-effecten bedoelen we dan effecten die binnen één à twee maanden na de bestraling optreden. Ook maken we verschil tussen *somatische* en *genetische* effecten. Met somatische effecten bedoelen we de effecten op het lichaam van de bestraalde persoon zelf; genetische effecten treden pas op in zijn of haar nageslacht.

In de laatste paragraaf besteden we aandacht aan de *stralingsnormen*, waarin de maximale hoeveelheid straling die iemand mag ontvangen is vastgelegd.

Beschermingspakken tegen ioniserende straling.

3.1 DOSIS EN DOSISEQUIVALENT



Deze elektronenmicroscoopfoto toont een aantal kankercellen op de wand van een bloedvat. De vergroting is 7000 ×.

Ioniserende straling is schadelijk voor levende wezens, omdat het ionisaties in de cellen veroorzaakt. Hierdoor worden zeer sterk reagerende ionen zoals O_2^- gevormd. Die kunnen ongewenste chemische reacties in de cel op gang brengen, waardoor de cel beschadigd kan worden. Bij een zeer groot aantal beschadigingen kan celdood optreden, maar verreweg de meeste beschadigingen zijn onbelangrijk voor het functioneren van de cel of kunnen gemakkelijk door de cel zelf worden hersteld. Anders ligt dat met beschadigingen van het mechanisme dat de celdeling regelt. Bij een ernstige beschadiging van dat mechanisme kan een cel (tijdelijk of blijvend) ophouden zich te delen of kan de deling abnormaal gaan verlopen. In dat laatste geval kan het voorkomen dat de celdeling onbeperkt doorgaat, waardoor een grote celmassa ontstaat. We spreken dan van *tumorvorming*.

Ioniserende straling wordt in medische en technische toepassingen veel gebruikt en er is dan ook behoefte aan een grootheid waarmee de ernst van de toegebrachte schade aan het menselijk lichaam aangegeven kan worden. De stralingsdosis is daarvoor niet geschikt, omdat de schade niet alleen afhangt van de dosis, maar ook van het *soort straling* en de *aard van de getroffen organen en weefsels*.

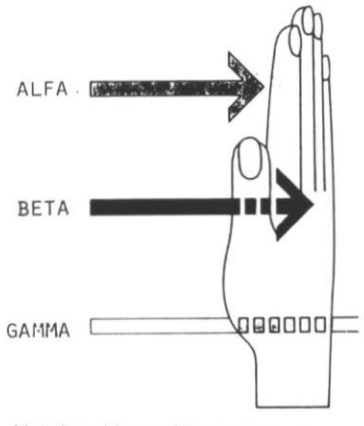
soort straling

Bij een gelijke grootte van de stralingsdosis veroorzaakt α-straling in een cel een veel groter aantal ionisaties dan β- of γ-straling. De schade zal dan ook veel groter zijn. Om de omvang van de schade aan te geven is het begrip *dosisequivalent* ingevoerd. De eenheid daarvan is de *sievert* (Sv); vaak treft je ook nog de oude eenheid *rem* aan: 1 rem = 0,01 Sv. Een dosis van 1 Gy van β- of γ-straling veroorzaakt een dosisequivalent van 1 Sv. Bij α- straling daarentegen veroorzaakt deze dosis een dosisequivalent van 20 Sv. Zo is er voor elk soort straling een omrekeningsfactor vastgesteld.
Vaak wordt in plaats van dosisequivalent tóch het woord 'dosis' gebruikt. Aan de eenheid kun je dan zien of de dosis, dan wel het dosisequivalent bedoeld wordt.

orgaangevoeligheid

De meeste beschadigingen worden pas goed merkbaar bij de celdelingen. Organen waarin veel celdelingen plaatsvinden zoals beenmerg, slijmvliezen en longen, zijn dan ook extra kwetsbaar.
De *gonaden* waarin zich de eicellen bevinden of waarin de zaadcellen geproduceerd worden, dienen extra voorzichtig behandeld te worden. Sommige beschadigingen van zaad- of eicellen worden doorgegeven naar het nageslacht, en kunnen daar afwijkingen of ziekten veroorzaken. De tabel hiernaast geeft een indruk van de *gevoeligheid* van verschillende organen voor stralingsschade. Uit de tabel blijkt dat ook borsten zeer stralingsgevoelig zijn. Dat wordt veroorzaakt door de snelle veranderingen in het borstweefsel onder invloed van de maandelijke menstruatie-cyclus.

weefsel/orgaan	*gevoeligheid*
gonaden	0,25
borsten	0,15
rode beenmerg	0,12
longen	0,12
schildklier	0,03
botoppervlak	0,03
andere organen	0,06



Het doordringend vermogen van straling.

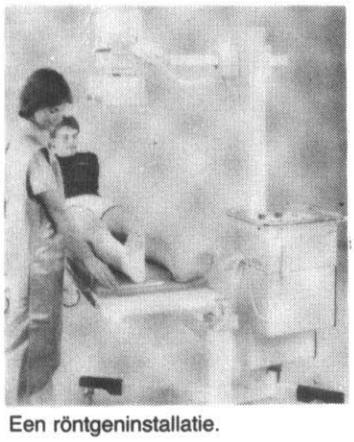
inwendige bestraling

Bij *uitwendige bestraling* is α-straling nagenoeg ongevaarlijk, omdat de α-deeltjes al hun energie afgeven aan de *dode* cellen in de hoornlaag van de opperhuid. Het doordringingsvermogen van α-straling is zeer gering. De β-straling dringt iets dieper door, maar het is de γ-straling die diep in het lichaam kan doordringen en daar ionisaties veroorzaakt.
Bij *inwendige bestraling* ligt dat anders. In het lichaam van ieder levend wezen bevinden zich radioactieve stoffen, die een inwendige bestraling veroorzaken. In dat geval is α-straling, door het hoge aantal ionisaties per cel, veel gevaarlijker dan γ-straling. De β-straling neemt een tussenpositie in.
Sommige stoffen, zoals de β-straler I-131, zijn dus *buiten* het lichaam onschadelijk. Pas als ze via het voedsel of de ademhaling *in* het lichaam komen, worden ze gevaarlijk. Bijzondere aandacht verdienen daarbij de stoffen die zich in een bepaald orgaan concentreren zoals bijv. jodium in de schildklier. Het dosisequivalent in zo'n orgaan kan daardoor zeer hoog worden.

lokale bestraling
De doses die in dit hoofdstuk genoemd worden, zijn doses voor het gehele lichaam. Een dosis van 1 Gy betekent dus dat er over het gehele lichaam 1 joule per kg wordt geabsorbeerd. Soms is er sprake van een *lokale dosis*; dat is een dosis die zich beperkt tot één of enkele organen.

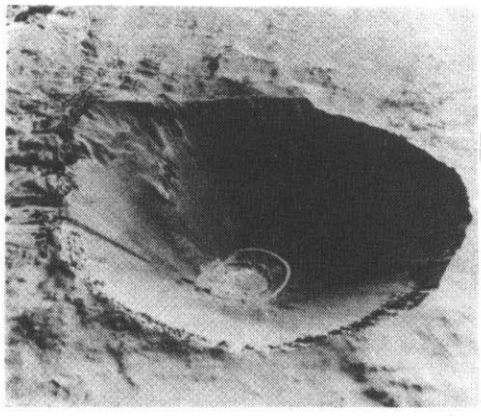
stralingsbelasting
In onderstaande tabel is de gemiddelde stralingsbelasting per hoofd van de Nederlandse bevolking aangegeven. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de natuurlijke achtergrondstraling en de door mensen veroorzaakte kunstmatige straling.

bron	dosisequivalent in mSv*		opmerkingen
kosmische straling	0,3		
bodem en woonomgeving	0,35 à 0,65		variatie van 0,3 mSv, afhankelijk van plaats en woonomgeving
natuurlijke radioactiviteit in het lichaam	0,25		met name K-40, C-14 en Ra-226 en door inademing in de longen Rn-222
totaal natuurlijke achtergrondstraling		0,90 à 1,20	
röntgendiagnostiek	0,25 à 0,80		individuele dosis varieert sterk met type medisch onderzoek, gemiddeld ongeveer 0,55 mSv
nucleaire geneeskunde	0,03		
fallout**	0,09		sinds 1970 vinden geen kernbomproeven in de atmosfeer meer plaats
vliegreizen	0,005		0,005 mSv per uur op 10 km hoogte
energieproduktie kerncentrales	minder dan 0,01		bij installatie van 3500 MW elektrisch vermogen
gebruiksgoederen	0,01		bijv. kleuren-TV
totaal kunstmatige straling		0,40 à 0,95	
totaal ontvangen dosisequivalent		1,30 à 2,15	


Een röntgeninstallatie.

* Schatting van het gemiddelde dosisequivalent dat elke Nederlander per jaar ontvangt.
** Radioactieve stoffen afkomstig van kernbomexplosies in de atmosfeer.

Er zijn gebieden op aarde waar de natuurlijke achtergrondstraling door een andere samenstelling van de bodem kan oplopen tot 10 mSv.
In de volgende paragrafen gaan we het effect van een vrij hoge stralingsdosis op de mens na. Om een indruk te krijgen van de hoogte van de dosis kun je die vergelijken met de hierboven genoemde waarden.



De krater die overblijft na de explosie van een kernbom.

Ook een TV toestel zendt straling uit.

Mocht U zwanger zijn – of denken het te kunnen zijn, meldt U dit dan even ?

Dit is belangrijk !!

1. INWENDIGE BESTRALING

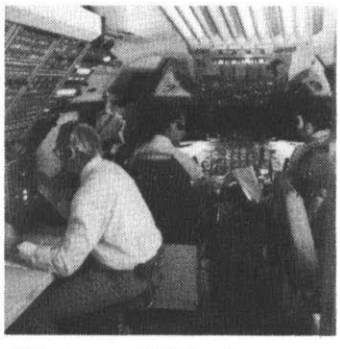
In de tabel op blz. 20 zijn een aantal nucliden genoemd die de inwendige bestraling veroorzaken. Ga van deze nucliden na of het α-, β- of γ-stralers zijn. Zoek de benodigde gegevens op in je tabellenboek.

2. ZWANGER?

De poster die hiernaast is afgebeeld, kun je in veel röntgenafdelingen van ziekenhuizen vinden. Verklaar waarom ongeboren kinderen zeer gevoelig zijn voor ioniserende straling.

3. DNA

Als een cel door straling getroffen wordt, treedt vaak beschadiging van het DNA in de cel op. Zoek een klasgenoot met biologie in zijn vakkenpakket, die je kan uitleggen wat DNA is en wat de gevolgen van een DNA-beschadiging zijn.



Vliegen op grote hoogte.

4. DOSIS OF DOSISEQUIVALENT

Vaak wordt in boeken en artikelen zeer slordig omgegaan met dosis en dosisequivalent. Zo wordt bijv. de stralingsbelasting opgegeven in Gy (of rad), en niet in Sv (of rem).
Geef aan waarom men daar niet zo erg op let, met name als het gaat om uitwendige bestraling.

5. VLIEGEN OP GROTE HOOGTE

Op intercontinentale vluchten vliegt men op een hoogte van 10 km. Vliegtuigbemanningen zijn dan ook vrij langdurig blootgesteld aan een hogere stralingsbelasting. Maak een schatting van het aantal vlieguren per jaar, en bereken de daardoor veroorzaakte jaarlijkse extra stralingsbelasting. Kun je hier spreken van een beroep met een verhoogd stralingsrisico?

3.2 ACUTE STRALINGSEFFECTEN

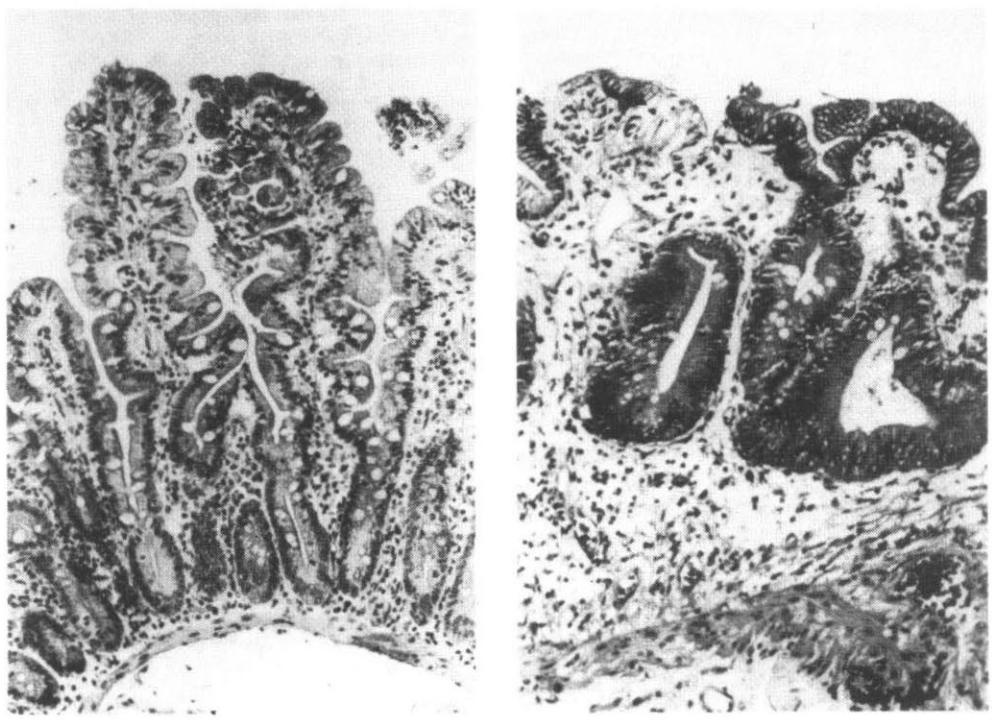
De effecten, die binnen één à twee maanden na een kort durende blootstelling van het gehele lichaam aan doordringende ioniserende straling optreden, noemen we de *acute stralingseffecten*. Daarbij kunnen naast het ontstaan van *steriliteit* drie groepen ziekteverschijnselen onderscheiden worden. Elke groep wordt aangeduid als een *syndroom*. De drie syndromen staan bekend als het *beenmergsyndroom*, het *darmsyndroom* en het *centrale-zenuwstelselsyndroom*. Deze syndromen komen pas enige tijd na de bestraling naar voren. De periode tussen de bestraling en het optreden van het syndroom noemen we de *latentietijd*. In die periode treden wél verschijnselen als misselijkheid, hoofdpijn, braken en diarree op. Als deze verschijnselen uitblijven, is de dosis waar-

schijnlijk minder dan 1 Sv (100 rem) geweest. Bij een grote dosis treden de verschijnselen eerder op en zijn zij ook heviger.

steriliteit
Een lokale dosis van 0,5 Sv op de geslachtsorganen van mannen kan leiden tot een tijdelijke beïnvloeding van de spermaproductie. Boven 10 Sv treedt een blijvende steriliteit op.
Ook bij vrouwen kan steriliteit optreden, maar daarvoor is een hogere dosis nodig. Wel wordt bij vrouwen bij een lage dosis al de hormoonproductie aangetast, waardoor de menstruatie tijdelijk of blijvend kan uitblijven.

beenmergsyndroom
Bij het beenmergsyndroom worden de *stamcellen* (cellen die door deling veel nieuwe cellen aanmaken) in de bloedbereidende organen, de lymfeklieren en het beenmerg beschadigd. Daardoor stopt de aanmaak van nieuwe rode en witte bloedlichaampjes. Door dit laatste neemt de weerstand tegen infecties sterk af. Ook het aantal bloedplaatjes neemt sterk af, waardoor ernstige bloedingen optreden. Bij een dosis hoger dan 5 Sv hebben meestal niet voldoende stamcellen de bestraling overleefd en volgt de dood door bloedverlies en infecties. Bij een dosis van 3 Sv of minder is de overlevingskans groter dan 50%.

darmsyndroom
Het darmsyndroom wordt veroorzaakt door beschadiging van de stamcellen van het darmslijmvlies. Dan stopt daar de aanmaak van nieuwe cellen. Binnen enkele dagen kan de darm daardoor geen voedingsstoffen, zouten en vocht meer opnemen. In plaats daarvan vindt juist verlies van vocht en zouten plaats, en kunnen bloedingen ontstaan. Bij een dosis groter dan 10 Sv treedt door ontwrichting van de stofwisseling binnen enkele dagen de dood in.
Anders dan bij het beenmergsyndroom is een lokale dosis voldoende om het darmsyndroom te laten optreden.



De linkerfoto toont de normale toestand van de darmwand. In de openingen tussen de darmvlokken worden voortdurend nieuwe cellen gevormd. Na een bestraling met een dosis van 10 Sv stopt deze produktie. De rechter foto toont de darmwand enkele dagen later.

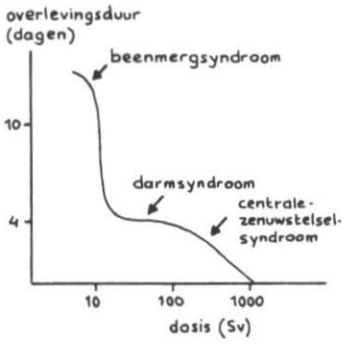


Diagram van het aantal overlevingsdagen na bestraling van het hele lichaam als functie van de stralingsdosis.

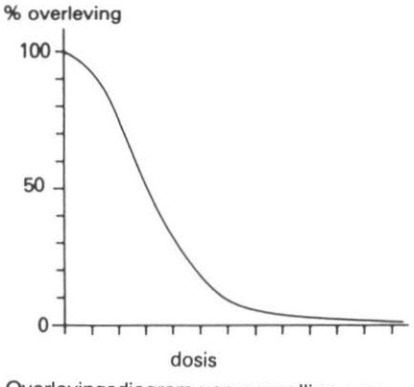
centrale-zenuwstelselsyndroom
De oorzaak van het centrale-zenuwstelselsyndroom ligt niet in het verhinderen van celdeling – dat komt in de volwassen hersenen niet meer voor – maar in de beschadiging van de hersencellen. In het diagram hiernaast is te zien dat de overlevingsduur afneemt, naarmate de dosis hoger is geweest. Ook dit syndroom kan na een lokale dosis (in dit geval op het hoofd) optreden.

Veel kennis van de stralingsziekten berust op waarnemingen die men bij experimenten op proefdieren heeft gedaan. Deze kennis wordt aangevuld door waarnemingen bij slachtoffers van kernbomexplosies in Hiroshima en Nagasaki en van ongevallen met sterke stralingsbronnen. Het precieze verband tussen de ontvangen stralingsdosis en de verschijnselen van stralingsziekte is minder goed bekend bij de mens dan bij proefdieren. Dat komt omdat bij ongevallen de stralingsdosis alleen bij benadering kan worden vastgesteld door reconstructie achteraf. Bovendien is de straling vaak ongelijk verdeeld geweest over het lichaam.

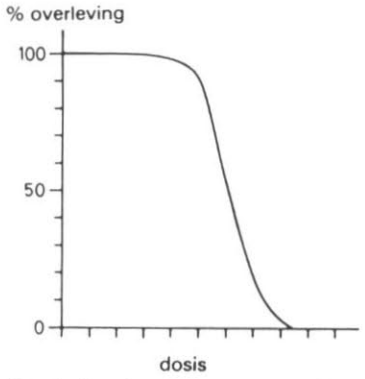
1. DOSIS SCHATTEN
Hoe kun je in de eerste dagen na de explosie van een kernbom een indruk krijgen van de dosis die iemand ontvangen heeft?

2. EEN ORGANISME IS MINDER GEVOELIG DAN EEN CEL
Het diagram hieronder geeft het percentage losse cellen in een celkweek, dat een bepaalde dosis overleeft. Het andere diagram geeft datzelfde percentage voor meercellige organismen.

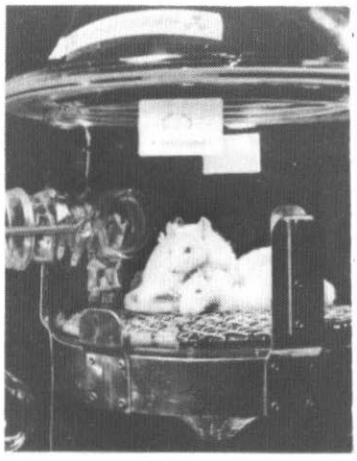
a. Wat is het belangrijkste verschil tussen deze twee diagrammen?
b. Waardoor zou dat verschil veroorzaakt worden?



Overlevingsdiagram van eencellige organismen.



Overlevingsdiagram van meercelligen, bijv. zoogdieren.



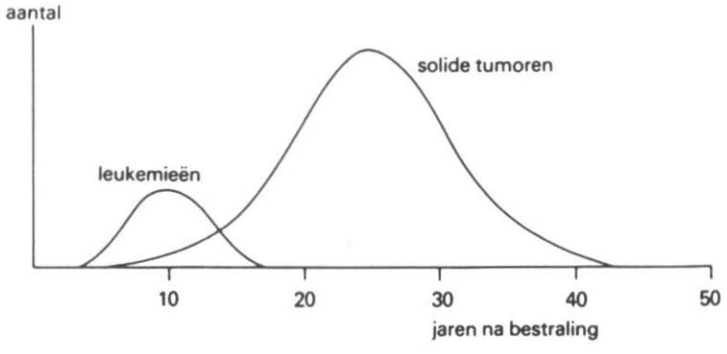
Muizen worden zeer veel als proefdieren gebruikt.

3. PROEFDIEREN
Het doen van experimenten met proefdieren is de enige manier om systematisch gegevens te verzamelen over de gevolgen van ioniserende straling bij hoge doses. Er bestaat verschil van mening over de vraag of een dergelijk gebruik van proefdieren aanvaardbaar is of niet. Welk standpunt spreekt je het meeste aan? Waarom?

3.3 LATE SOMATISCHE EFFECTEN

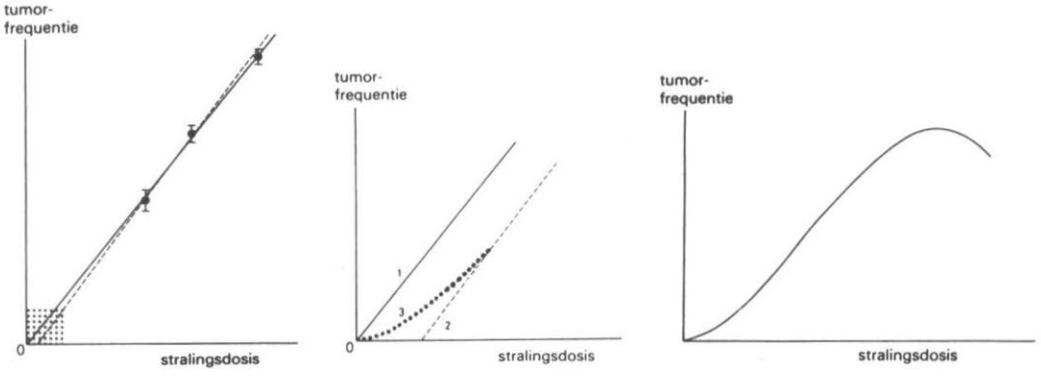
De effecten die pas na maanden of jaren na de bestraling optreden worden *late effecten* genoemd. In deze paragraaf komen alleen de *somatische* effecten aan de orde. Dat zijn de effecten op het lichaam van de bestraalde persoon zelf. De genetische effecten komen in paragraaf 3.4 aan de orde.

De belangrijkste late effecten zijn het optreden van *leukemie* (een afwijking van de witte bloedlichaampjes) en tumorvorming (kanker). Beide ziektes komen ook vrij veel voor bij mensen die geen hoge stralingsdosis ontvangen hebben. Een extra stralingsdosis veroorzaakt geen andere soorten tumoren, maar verhoogt alleen de kans dat ze bij de bestraalde persoon optreden en vervroegt het tijdstip waarop dat gebeurt. Zoals blijkt uit het diagram hieronder kan de latentietijd vele jaren beslaan.



Het verband tussen het tijdstip van bestraling en het moment waarop de ziekte wordt ontdekt.

Net als bij de acute effecten geldt ook hier dat het vaststellen van het precieze verband tussen stralingsdosis en kans op tumorvorming zeer moeilijk is.
Er bestaat een redelijk aantal gegevens over de tumorfrekwentie door een hoge dosis.



In het meest linkse diagram is dat verband weergegeven. Door de onnauwkeurigheid van de meetpunten is het mogelijk verschillende lijnen in het diagram te trekken. In het middelste diagram zijn die lijnen rond de oorsprong vergroot weergegeven. Als de onderbroken lijn (lijn 2) het juiste verband aangeeft, dan bestaat er een *drempeldosis*. Dan is een dosis die kleiner is dan die drempeldosis niet schadelijk. Het lineaire verband (lijn 1) betekent dat elke dosis straling schadelijk is. De meeste experimentele gegevens uit dierproeven wijzen in de richting van lijn 3, zoals het diagram rechts laat zien. In wetenschappelijke kringen is men het niet eens over het precieze verloop van de lijn in het diagram. Om onderschatting van het risico te vermijden, gebruikt men de meest ongunstige kromme. En dat is lijn 1: het lineaire verband tussen stralingsdosis en tumorfrekwentie.

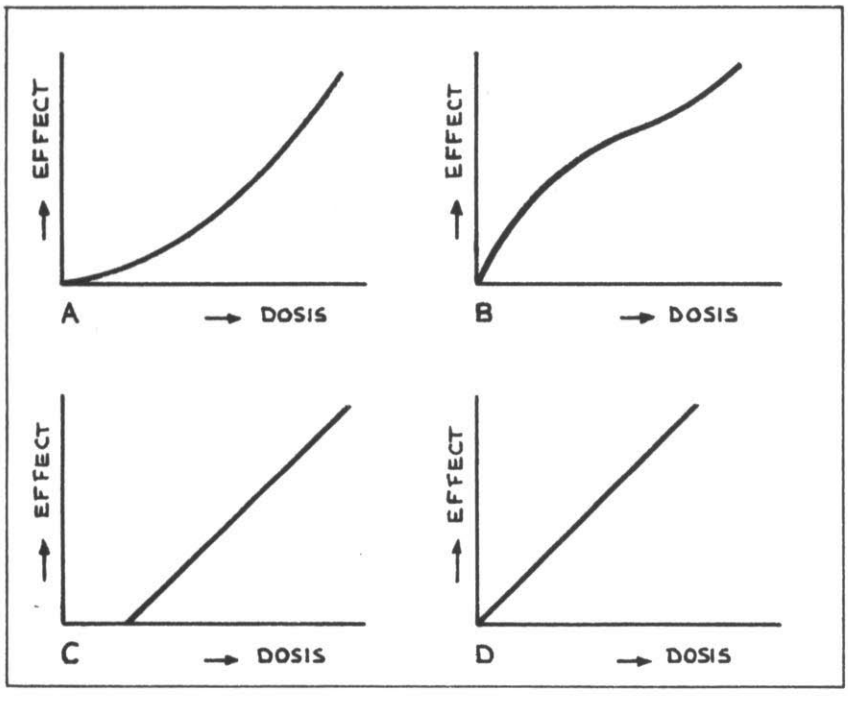
Naast een verhoogde kans op leukemie en kanker kan ook troebeling van de ooglens optreden en ontstaat soms bindweefselwoekering in de longen. Deze verschijnselen treden op bij een dosis van 6 tot 9 Sv en hebben een latentietijd tussen de 1 en 10 jaar. Bestraling tijdens de eerste vijf maanden van de zwangerschap kan een miskraam of zeer ernstige geboorteafwijkingen tot gevolg hebben.

1. LATENTIETIJD

In het diagram op blz. 24 is voor een groot aantal bestraalde personen aangegeven op welk moment de leukemie of de tumor ontdekt werd.

a. Na hoeveel jaar treden de late effecten van straling voor het eerst op? En wanneer voor het laatst?

b. Hoe groot is de gemiddelde latentietijd van leukemie? En van kanker?



2. DE CONTROVERSE ROND DE LAGE DOSES

Stralingsdeskundigen verschillen in opvatting over de effecten van straling bij lage doses. Men kan ruwweg vier opvattingen onderscheiden, die in de diagrammmen hiernaast zijn uitgedrukt.

a. Waarom is het zo moeilijk een nauwkeurige relatie tussen effect en dosis vast te stellen?

b. Waarom is dat extra moeilijk bij zeer lage doses?

c. Tegenwoordig gaat men ervan uit dat een veilige stralingsdosis niet bestaat. Welk diagram is met deze aanname in strijd?

d. Welk diagram is optimistischer dan diagram d?
Welk diagram is pessimistischer?

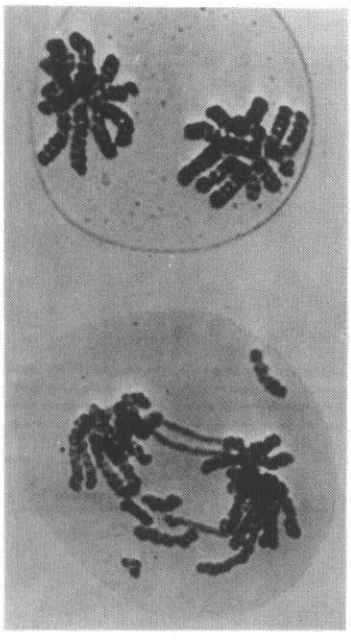
3.4 GENETISCHE EFFECTEN

De genen bevinden zich in de kern van de cel. Ze zijn noodzakelijk voor de aanmaak van de eiwitten die de cel nodig heeft. Bij celdeling worden de genen van de ene naar de andere cel doorgegeven.

Ioniserende straling kan een verandering in de *genen* van de cellen van bestraalde personen veroorzaken. Zo'n verandering van de genen wordt een *mutatie* genoemd. Mutaties in de zaad- en eicellen worden doorgegeven aan het nageslacht, en kunnen daar zichtbaar worden in aangeboren afwijkingen. Bij zeer ernstige mutaties volgt meestal een miskraam. De effecten die pas in het nageslacht zichtbaar worden, noemen we *genetische effecten*.

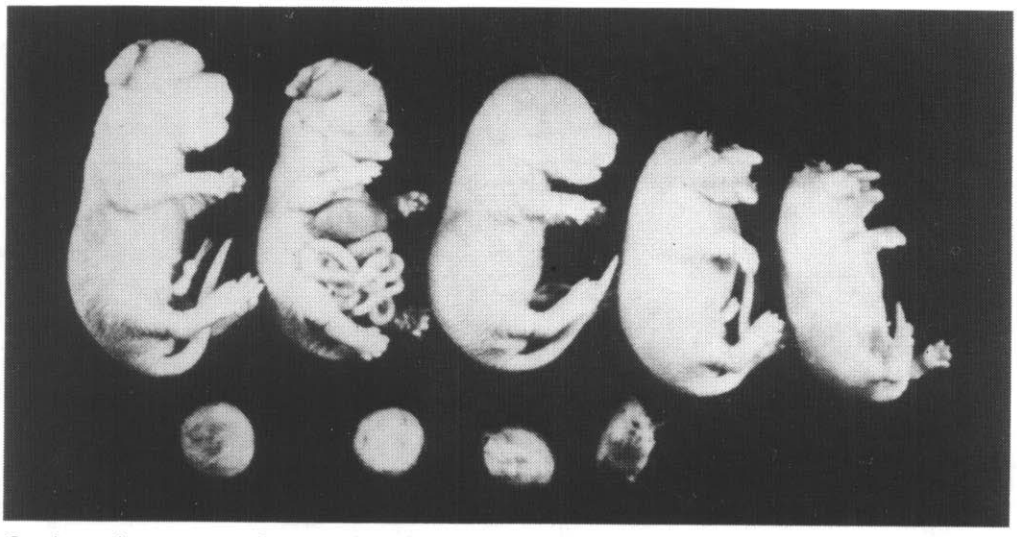
Ook door de natuurlijke achtergrondstraling worden mutaties veroorzaakt; deze worden *spontane mutaties* genoemd. Men schat het aantal spontane mutaties op één of twee per honderdduizend zaad- of eicellen. Door mutaties in het verleden blijkt ongeveer 10% van de nieuwgeboren kinderen één of meer genetische defecten te vertonen. Dat lijkt wel veel, maar veel van die effecten zijn tamelijk onschuldig.

Over genetische effecten van straling bestaat nog veel onzekerheid. Er zijn wel resultaten van experimenten met muizen, maar het is onzeker in welke mate die resultaten ook voor mensen geldig zijn. Tegenwoordig schat men de *verdubbelingsdosis* op ongeveer 1 Sv. Bij die dosis is het aantal mutaties tweemaal zo groot als het aantal spontane mutaties als gevolg van de achtergrondstraling. Deze schatting is gebaseerd op onder-



De kern van een cel van een plant vóór en nà bestraling. De losse stukken en de bruggen zijn typische verschijnselen bij stralingsschade. Deze beschadigingen zullen afwijkingen in het nageslacht veroorzaken.

zoek naar vijf verschillende genetische effecten. Bij de erfelijke ziektes bij de mens, zoals bloedarmoede, suikerziekte of epilepsie wordt het nog veel moeilijker, omdat die maar voor een deel genetisch bepaald zijn. De schattingen van dat deel lopen uiteen van 5 tot 50%.
De jaarlijkse dosis door medische toepassingen is volgens de tabel op blz. 20 gemiddeld 0,55 mSv. Een toediening van deze dosis gedurende dertig jaar kan het aantal genetische ziektegevallen met ongeveer 0,2% laten stijgen.



Groeistoornissen van ongeboren muizen door een hoge stralingsdosis bij de ouders. Alleen de middelste heeft geen afwijkingen.

3.5 STRALINGSNORMEN

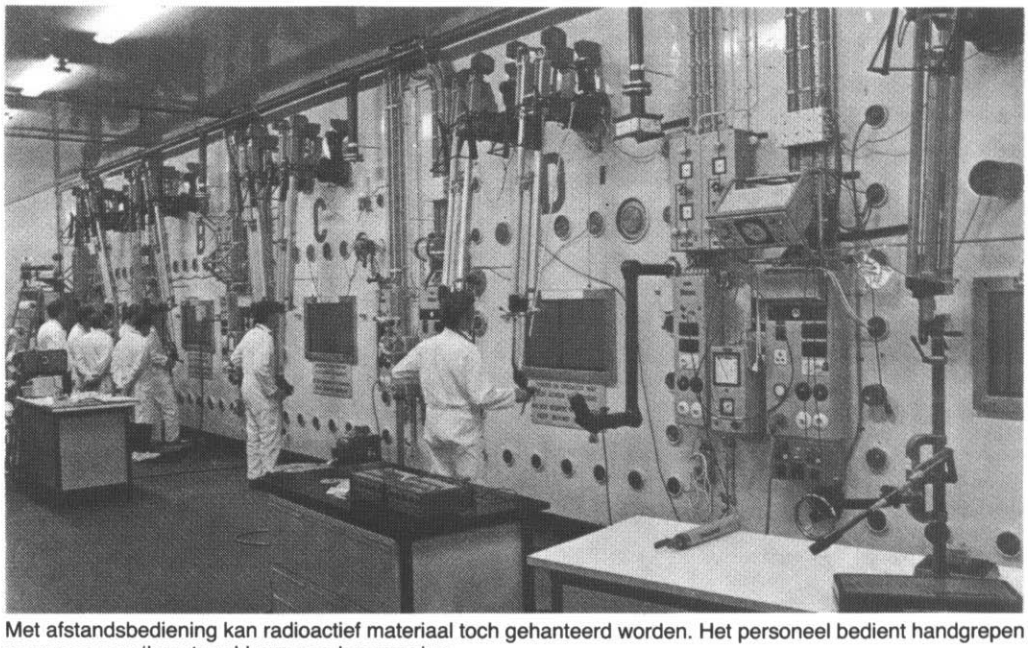
In het begin van deze eeuw waren mensen die beroepshalve te maken hadden met ioniserende straling zich nog niet erg bewust van de gevaren. Tijdens congressen van radiologen in de jaren '20 bleken vele aanwezigen wel één of andere verbranding of lichamelijk gebrek te vertonen ten gevolge van de opgelopen dosis röntgenstraling. Sindsdien hebben internationale commissies zich met de gevaren van ioniserende straling bezig gehouden. In deze commissies van stralingsdeskundigen gaat men ervan uit dat veilige straling niet bestaat. Blootstaan aan straling houdt altijd zekere risico's in. Deze risico's worden afgewogen tegen de voordelen van het gebruik van stralingsbronnen en vergeleken met de risico's van het blootstaan aan natuurlijke straling. Zo heeft de Nederlandse Gezondheidsraad in 1975 geadviseerd leden van de bevolking niet regelmatig bloot te stellen aan een extra stralingsdosis die hoger is dan de variatie in de natuurlijke dosis. Deze variatie wordt veroorzaakt door verschillen in grondsoort en in bouwmaterialen van woningen, en bedraagt in Nederland 0,3 mSv (zie de tabel op blz. 20).

Tegenwoordig gaat men bij de stralingsbescherming uit van de volgende drie kernpunten: *rechtvaardiging*, het *ALARA-principe* en de *limietwaarden*.

rechtvaardiging
De afweging van de voor- en nadelen van de toepassing moet een gunstig resultaat opleveren. Dat betekent het uitbannen van toepassingen als apparatuur die vroeger in schoenwinkels werd gebruikt om met behulp van röntgenstraling te zien of schoenen wel goed passen. De risico's wegen hierbij zwaarder dan het gemak van zo'n toestel.

ALARA-principe
ALARA betekent: As Low As Reasonably Achievable. Het spreekt vanzelf dat de opvattingen over wat redelijk is daarbij nogal uiteen kunnen lopen. Bij die afweging spelen ook

economische en maatschappelijke factoren een rol. De toepassing van kernenergie is daarvan een voorbeeld. Bij die discussie spelen niet alleen het stralingsrisico, maar ook de kosten van de elektriciteit, de beschikbaarheid en risico's van andere energiebronnen en de vraag naar energie een rol.



Met afstandsbediening kan radioactief materiaal toch gehanteerd worden. Het personeel bedient handgrepen waarmee een 'kunstarm' bewogen kan worden.

limietwaarden

De ICRP (International Commission on Radiological Protection) is een gezaghebbende commissie die adviezen uitbrengt over de maximale doses – de *dosislimieten* – waaraan mensen blootgesteld mogen worden. De limietwaarden voor de bevolking zijn 10% van die voor *radiologische werkers* (mensen die beroepshalve met straling in aanraking komen). Dit percentage is niet op basis van biologische kennis vastgesteld, maar berust op voorzichtigheid. In de onderstaande tabel zijn de dosislimieten voor de radiologische werkers opgenomen.

	ICRP 1959		VBIS 1963		ICRP 1966***	
	per 13 weken*	per jaar*	per 13 weken*	per jaar*	per 12 weken*	per jaar*
totale lichaamsbestraling	30	50	30	50	30**	50
kritiek orgaan						
gonaden en bloedvormende organen	30	50	30	50	30**	50
ooglens	30	50	30	50	40**	150
huid	80	300	80	300	80	300
schildklier	80	300	40	150	80	300
handen, onderarmen, voeten en enkels	200	750	150	600	100	750
andere afzonderlijke organen	40	150	40	150	40	150

* Dosis in mSv.

** Mits zelden voorkomend.

*** Stralingsbelasting van meer dan twee organen boven de helft van de waarde is ontoelaatbaar.

Bij de toepassing van deze dosislimieten blijft de natuurlijke achtergrondstraling buiten beschouwing.
De limietwaarden gelden niet bij de bestraling van patiënten in de gezondheidszorg. Voor deze groep gelden wel de rechtvaardiging en het ALARA-principe.

De verschillen tussen de dosislimieten voor de radiologische werkers en de rest van de bevolking zijn vrij groot. Dat heeft te maken met de volgende overwegingen.
– Ieder beroep heeft zijn eigen risico, en elk werkend lid van de bevolking heeft dus zijn eigen beroepsrisico. De normen voor de radiologische werkers zijn zodanig, dat hun beroepsrisico niet groter is dan dat van anderen.
– De bevolking kiest niet zelf voor toepassing van straling en heeft er geen direkt voordeel van. Bij de radiologische werkers is dat wél het geval.
– Radiologische werkers worden regelmatig gekeurd en de tijdens het werk opgelopen stralingsdosis wordt voortdurend gemeten.
– Het gaat bij deze beroepsgroep om een gering aantal mensen, zodat de genetische risico's voor de mensheid beperkt blijven.

Bovendien moet men bedenken dat een verdere verlaging van de normen voor radiologische werkers economische gevolgen heeft. De werktijden van deze mensen zouden soms verkort moeten worden, omdat anders de limietwaarden worden overschreden.

1. MEDISCHE BEHANDELING

Waarom gelden dosislimieten niet voor mensen die een medische behandeling met ioniserende straling ondergaan?

Hoe wordt er dan wél op de door hen opgelopen dosis gelet?

2. ICRP-NORMEN

Op blz. 27 staat de tabel met de ICRP-normen voor radiologische werkers.
a. In de loop van de jaren zijn de normen aanzienlijk verscherpt. Hoe blijkt dat uit deze tabel?
b. Bij de vaststelling van de normen werd druk uitgeoefend op de ICRP om een drempeldosis te aanvaarden bij de normstelling. Wie hebben er belang bij dat iets dergelijks gebeurt?
c. Vergelijk de tabel met ICRP-normen met de orgaangevoeligheidstabel op blz. 19.
Welke organen worden niet apart in de ICRP-tabel genoemd? Waarom is dat ook niet nodig?

3. DE FACTOR MENS

Hoe het ondanks allerlei beveiligingsmaatregelen toch nog mis kan gaan, kun je in het kranteartikel op blz. 29 lezen. Zo'n groot ongeluk met ioniserende straling is tot nu toe niet voorgekomen.
a. In het artikel worden nog oude eenheden gebruikt. Maak een overzicht van dè grootheden en eenheden die in het artikel genoemd worden, en noteer de nieuwe eenheden erachter. Reken de ontvangen doses om in Sv.
b. Vergelijk de dosis van de groep van 200 mensen met de ICRP-normen. Wat is de conclusie?
c. Welke acute en welke late effecten zouden er bij de arbeiders van de sloperij kunnen optreden? Zijn er ook genetische effecten mogelijk?
d. Waarom wil men meteen een langetermijn-studie van dit ongeval starten?
e. Is dit nu gewoon een kleine diefstal? Welke maatregelen zouden er volgens jou tegen de elektriciën genomen moeten worden?

De eenheid röntgen *wordt in dit thema niet gebruikt. Deze eenheid geeft aan hoeveel ionisaties de straling per kg lucht veroorzaakt.*

Radioactief cobalt in Juarez: ongeluk zonder precedent

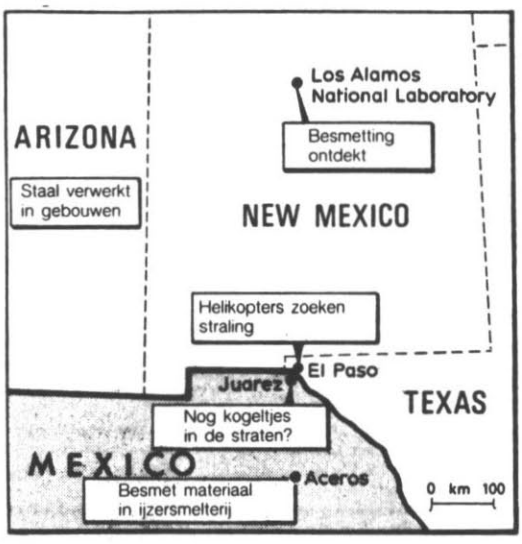
In november 1983 ontdekte een elektricien van het Centro Medico in de Mexiaanse grensstad Juarez in een opslagruimte van het ziekenhuis een apparaat dat bedoeld was om kankerpatienten met straling te behandelen. De elektricien brak de kennelijk reeds lang niet meer gebruikte machine open en sloopte er een 20 kilo zware lood-en-stalen cylinder uit. Hij bracht de cylinder naar de Jonke Fenix sloperij in de stad en kreeg er ongeveer 30 gulden voor.

In december braken nietsvermoedende arbeiders in de sloperij de cylinder open en strooiden al doende de inhoud over het terrein. Die inhoud bestond uit 6010 minuscule metaalkogeltjes, elk ter grootte van een speldeknop (1 millimeter) en elk gevuld met ongeveer 70 microcurie Cobalt-60, een sterk radioactieve stof. De kogeltjes raakten overal verspreid. Ze kwamen terecht tussen de sloopmaterialen die naar ijzersmelterijen gingen, en ze werden, klevend aan de banden van vrachtwagens de stad en de wijde omgeving in gevoerd.

Niemand vermoedde iets, tot een vrachtauto geladen met betonijzer uit de Aceros ijzersmelterij in de Mexicaanse stad Chihuahua, op 16 januari van dit jaar op zijn afleveringsadres, het gigantische atoomonderzoekcomplex van het Los Alamos National Laboratory in de Amerikaanse staat Nieuw Mexico, de weg kwijt raakte. Een automatische alarminstallatie op het terrein registreerde dat de wagen een radioactieve lading vervoerde. En zo werd door puur toeval een van de ernstigste incidenten met radioactief materiaal uit de geschiedenis ontdekt.

Koortsachtig speurwerk van de Amerikaanse Nucleaire Reglementerings Commissie (NRC) leidde snel naar Juarez. De Mexicaanse autoriteiten werden gealarmeerd en nu, maanden later, begint de omvang van de radioactieve besmetting duidelijk te worden. Minstens 200 mensen hebben aanzienlijke doses gammastraling opgelopen, varierend van 1 tot 50 rem. (Bij het reactorongeluk bij Harrisburg kreeg niemand van het publiek meer dan 100 millirem, of 0,1 rem. Een borst-röntgenfoto geeft ongeveer 30 millirem. Een dosis van 300 tot 400 rem over het gehele lichaam is in de helft van de gevallen dodelijk.)

Vier Mexicaanse arbeiders van de Jonke Fenix sloperij kregen stralingsdoses van 300 tot 350 rem over het hele lichaam. Twee kregen brandwonden als gevolg van enorme stralingsdoses in de orde van 10.000 rem op hun handen en voeten. De sloperij is ernstig radioactief verontreinigd en vormt een gevaar voor het publiek. Buiten het terrein zijn stralingsniveaus van 3 tot 30 milliröntgen per uur gemeten. Een pickup truck waarop de coabaltcylinder werd ontmanteld is zo 'heet' van radioactiviteit geworden dat zelfs op 300 meter afstand aan de Amerikaanse oever van de Rio Grande de Geigertellers nog uitslaan.



De minuscule cobaltkogeltjes zijn in de wijde omgeving verspreid geraakt. Helikopters met detectie-apparatuur hebben de straten van Juarez en de wegen in de omgeving afgezocht. Een deel van de kogeltjes is met het sloopijzer in de smelterijen van Aceros de Chihuahua en Falcon de Juarez verwerkt in meer dan 4000 ton betonijzer. Daarvan is 500 ton in de Verenigde Staten terecht gekomen. Het hoogste stralingsniveau dat aan deze staven is gemeten bedraagt 600 à 700 milliröntgen per uur. Dat is meer dan een Nederlander in een heel jaar aan straling mag ontvangen.

Enkele nieuwe huizen in Nieuw Mexico en Arizona zijn met het betonijzer besmet. De resterende 3500 ton is in Mexico gebleven en ook daar voor een deel in de woningbouw verwerkt. Tussen de 30 en 40 huizen in Juarez zijn radioactief besmet en sommige zullen moeten worden afgebroken.

Een ander deel van het cobalt is via de ijzersmelterij van Falcon de Aranjuez terecht gekomen in ongeveer 6000 ijzeren tafelpoten, die naar het Amerikaanse moederbedrijf Falcon Products of St Louis in Missouri zijn gestuurd. Inspecteurs van de NRC zijn in diverse Amerikaanse staten naarstig op zoek naar deze tafelpoten, die iemand binnen een uur een stralingsdosis van twee of drie röntgenfoto's kunnen bezorgen. Bijna alle tafelpoten schijnen inmiddels te zijn terug gevonden.

Het grootste deel van het besmette ijzer dat niet erg radioactief is, zal volgens Robert Trevino van de Mexicaanse nucleaire veiligheidscommissie worden verwerkt in grote betonnen constructies, zoals stuwdammen. Het zwaarder besmette ijzer zal samen met de teruggevonden cobaltdeeltjes en de eveneens besmet geraakte smeltovens op ongeveer 60 kilometer ten zuiden van Juarez worden begraven. De Mexicaanse regering hoopt begin april met het inrichten van de begraafplaats te beginnen. Een speciaal probleem vormt de sterk radioactieve pickup truck. Cobalt 60 heeft een halfwaardetijd van 5 jaar, wat betekent dat de radioactiviteit elke vijf jaar de helft kleiner wordt. Het stralingsgevaar zal dus vrij snel verdwijnen.

Een andere vraag is hoe het met de 200 Mexicanen zal gaan die aanzienlijke tot levensgevaarlijke stralingsdoses hebben opgelopen. Volgens de Mexicaanse autoriteiten maken al deze mensen het goed. Volgens Amerikaanse deskundigen moeten er echter veel meer mensen in Juarez op mogelijke radioactieve besmetting worden onderzocht. Volgens Trevino van de Mexicaanse veiligheidscommissie zulen er meer onderzoeken worden gedaan en „mogelijk ook langetermijn studies samen met de Amerikanen".

„Het ongeluk kent geen precedent", aldus de gezondheidsfunctionaris Donald Nussbaumer van de NRC. „Ik kan me niets zoals dit herinneren."

HANS FRIEDEMAN

de Volkskrant 31-3-1984.

hoofdstuk 4

STRALINGSBRONNEN

inhoud blz.

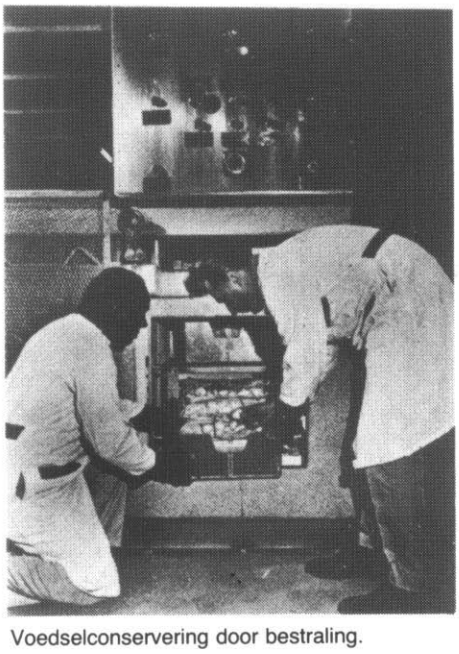
4.1 straling in de natuur 31
4.2 straling in de gezondheidszorg 32
4.3 straling bij kernenergie 34
4.4 straling van kernwapens 37
4.5 straling in huishouden en techniek 39

stralingsbronnen

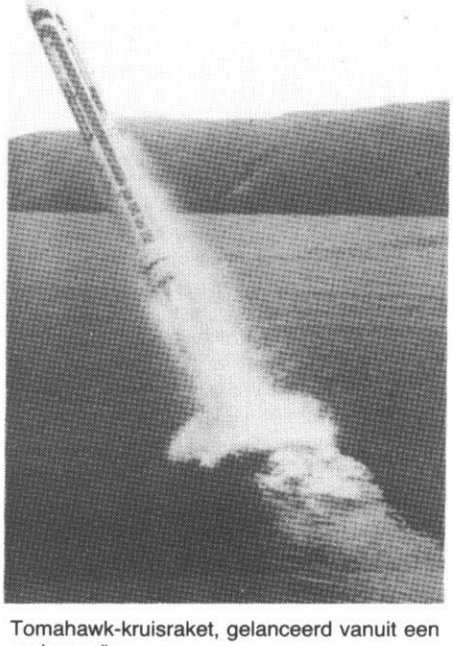
Ioniserende straling vinden we op allerlei plaatsen in natuur en samenleving. Natuurlijke straling is er altijd al geweest, ook al kon deze nog niet worden waargenomen. De maatschappelijke toepassingen zijn nog geen eeuw oud.

In dit hoofdstuk staan we stil bij de grote variatie aan stralingsbronnen om ons heen. Het gaat daarbij om het begrijpen van de werking van de bronnen en om een indruk te krijgen van de stralingsdosis die een gebruiker krijgt in normale omstandigheden.

Een andere bedoeling van dit hoofdstuk is om de keus voor te bereiden welke van de drie volgende hoofdstukken je het liefst gaat doen. Die drie hoofdstukken zijn elk aan een belangrijke soort toepassing gewijd: gezondheidszorg, kernenergie en kernwapens. Verder levert dit hoofdstuk de nodige basiskennis om tijdens die keuzeperiode met kennis van zaken aan de aktiviteiten van die hoofdstukken te beginnen.



Voedselconservering door bestraling.



Tomahawk-kruisraket, gelanceerd vanuit een onderzeeër.

4.1 STRALING IN DE NATUUR

hoogte in km	Dosis in mSv/jaar breedtegraad		
	0°	30°	50°
0	0,35	0,40	0,50
1	0,60	0,70	0,90
2	1,00	1,30	1,70
4	2,50	3,60	5,00
10	14,00	23,00	45,00
20	35,00	60,00	140,00

De dosis die een mens per jaar ontvangt als gevolg van kosmische straling, hangt af van de hoogte boven zeeniveau en van de breedtegraad op aarde.

Overal op aarde kom je in aanraking met ioniserende straling. Zelfs op díe plaatsen waar men geen gebruik maakt van geavanceerde technieken, staan de mensen voortdurend aan straling bloot. En zo is het altijd geweest. De straling waar we het nu over hebben heet *natuurlijke* of *achtergrond-straling*. Bijdragen aan deze natuurlijke stralingsbelasting worden geleverd door de kosmos, de aardbodem, bouwmaterialen en door het voedsel dat je eet, het water dat je drinkt en de lucht die je inademt.

kosmische straling

De aarde wordt voortdurend gebombardeerd door snelle deeltjes uit de ruimte. Deze energierijke ioniserende deeltjes komen van de zon en van andere sterren. Ze botsen tegen deeltjes in de atmosfeer van de aarde, en deze botsingen leveren weer andere ioniserende deeltjes op (zoals protonen, pionen, muonen en elektronen) en/of γ-straling. Deze straling noemen we *kosmische straling*.

De stralingsdosis die mensen hierdoor oplopen, hangt af van de plaats op aarde. Bij de polen is de straling het sterkst, bij de evenaar het geringst. Dit hangt samen met het magnetisch veld van de aarde. Op grotere hoogte neemt de stralingsdosis ook toe: de ioniserende deeltjes zijn daar door botsingen minder energie kwijtgeraakt dan op zeeniveau. In ons land bedraagt de stralingsdosis als gevolg van kosmische straling zo'n 300 μSv (microsievert) per jaar per inwoner.

De Concorde vliegt op grote hoogte met een snelheid die groter is dan de snelheid van het geluid (supersonische vlucht).

1. KOSMISCHE STRALING

a. De stralingsdosis als gevolg van kosmische straling hangt van twee factoren af. Welke?

b. Op welke plaatsen op aarde zal de kosmische straling de hoogste dosis opleveren? Waar de geringste?

c. Bij vliegtuigreizen op grote hoogte (zo'n 10 km) speelt kosmische straling een belangrijke rol. De stralingsdosis is daar ongeveer 5 μSv per uur. Hoeveel μSv loopt een passagier op bij een vlucht van Amsterdam naar New York?

d. Bij supersonische vluchten is de stralingsdosis niet hoger dan bij gewone lange-afstand lijnvluchten, ondanks de grotere vlieghoogte. Kun je bedenken waarom?

straling uit de aardbodem

De aardkorst bevat een aantal radioactieve ertsen die gevormd zijn in het stolproces waarbij de aardkorst ontstond. We vinden in de aardkorst voornamelijk de volgende radioactieve stoffen: uranium-238, kalium-40, thorium-232 en de vervalprodukten van deze stoffen. De halveringstijden zijn zeer lang en liggen tussen de 1 en 14 miljard jaar.

De gemiddelde stralingsdosis die een mens per jaar ontvangt, is afhankelijk van de samenstelling van de bodem en van gebruikte bouwmaterialen in zijn omgeving. In ons land ontvangt ieder mens gemiddeld 350-650 μSv per jaar. Op andere plaatsen in de wereld zijn waarden van 2000 μSv gemeten.

Mijnwerker in een uraniummijn.

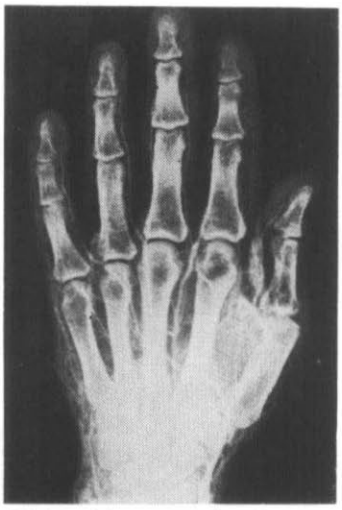
2. STRALING UIT DE AARDBODEM
a. Waarom vinden we in gesteenten voornamelijk nucliden met zo'n lange halveringstijd?
b. Ga na wat de vervalprodukten zijn van de drie genoemde radioactieve stoffen. Bedenk dat K-40 een β-straler is en de beide andere α-/γ-stralers zijn.
c. Waarom is het vervalprodukt Rn-222 voor werkers in een uraniummijn gevaarlijker dan de oorspronkelijke stof (U-238)?

overige stralingsbronnen
Tot zover hebben we het gehad over bronnen die voor *uitwendige* straling zorgen. Ook in voedsel, water en lucht bevinden zich radioactieve isotopen. Deze blijven soms in het lichaam achter, en zorgen dan voor *inwendige* straling. We kunnen deze dosis stellen op 250 µSv per jaar voor ieder mens.

3. NATUURLIJKE STRALINGSDOSIS
a. Bereken met behulp van de gegevens uit deze paragraaf de stralingsdosis die je jaarlijks ontvangt uit je omgeving.
b. Op welke manieren zou je invloed kunnen uitoefenen op de grootte van deze stralingsdosis?
c. Energiebesparing door afdichting van kieren wordt wel eens strijdig genoemd met het minimaliseren van de stralingsdosis die je thuis ontvangt. Kun je bedenken waarom?

4.2 STRALING IN DE GEZONDHEIDSZORG

	röntgen- straling	*β-* en *γ-* straling
diagnostisch	x	x
therapeutisch	x	x



Röntgenfoto van een hand.

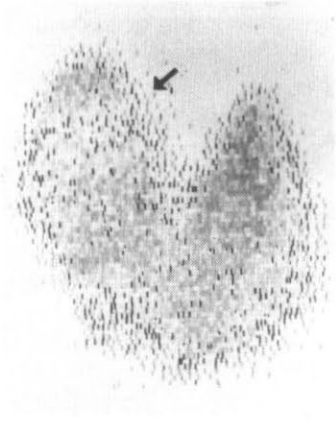
Wanneer je met een huisarts of een specialist te maken krijgt, kun je altijd onderscheid maken tussen onderzoek en behandeling. Bij het onderzoek probeert de arts te weten te komen wat er met je aan de hand is: hij of zij probeert een *diagnose* te stellen. Daarna volgt eventueel een behandeling: de kwaal wordt dan bestreden. We noemen dat *therapeutisch* werk.
Ook bij het gebruik van ioniserende straling in de gezondheidszorg is het zinvol het genoemde onderscheid te maken. Voor beide medische aktiviteiten kan men gebruik maken van röntgenstraling of kernstraling. In de matrix hiernaast kun je zien tot welke vier soorten medische toepassingen dat leidt. We behandelen ze hier elk kort, ter introductie van hoofdstuk 7.

toepassing van röntgenstraling
Röntgenapparatuur wordt vooral gebruikt door radiodiagnosten, maar ook door bijvoorbeeld cardiologen en tandartsen. De werking van dit type apparaten hebben we al bekeken in paragraaf 2.1.
Bij gebruik voor diagnostische doeleinden wordt het resultaat vaak fotografisch vastgelegd. Een geoefend waarnemer kan uit deze schaduwfoto's veel afleiden. Soms is een momentopname voor de arts niet voldoende. De patiënt wordt dan tussen de röntgenbuis en een fluorescerend scherm geplaatst (doorlichten).
De opgelopen dosis kan sterk verschillen per keer en hangt af van diverse factoren. Een normale borstfoto levert zo'n 100 µSv op; doorlichten kan wel 10000 µSv per keer geven. Met de modernste apparatuur is deze dosis aanzienlijk lager.
Veel grotere doses worden gegeven bij de behandeling van kankerpatiënten. Er moet

dan een afweging plaats vinden tussen de ernst van de ziekte, mogelijke andere behandelwijzen en de risico's van de bestraling.

1. DE GROOTTE VAN RÖNTGENDOSES

a. Waarom ontvangt een patiënt bij het maken van een röntgenfoto vaak een veel kleinere dosis dan bij doorlichten?
b. Kun je een reden bedenken waarom vroeger het maken van röntgenfoto's veel grotere stralingsdoses opleverde?
c. Noem drie manieren waarop de stralingsdosis bij het nemen van een röntgenfoto kan worden gevarieerd.



Resultaat van een schildklieronderzoek met behulp van radioactief jodium. Bij de pijl is een lichte vlek te zien. Dat wijst op een slecht functionerend deel.

toepassingen van radioactieve stoffen

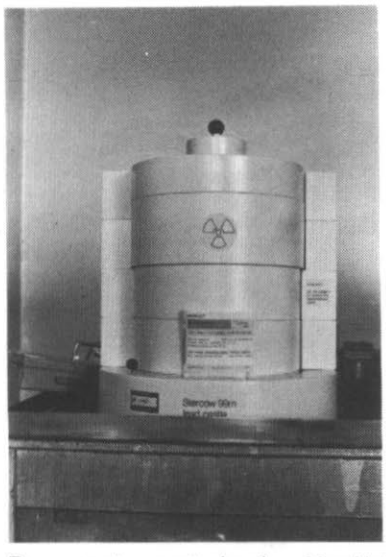
Röntgenapparaten kun je bij veel ziekenhuizen en tandartsen aantreffen. De medische toepassing van β- en γ-straling is echter tot een zo klein mogelijk aantal plaatsen beperkt. Alleen grote ziekenhuizen hebben een afdeling *nucleaire geneeskunde*.
Bij het stellen van diagnoses wordt de patiënt een radioactieve isotoop toegediend van een element dat vrijwel uitsluitend door het te onderzoeken orgaan wordt opgenomen. Voor de schildklier is dat bijv. de isotoop I-123. Na toediening van de stof wordt met een teller of een reeks tellers gemeten wat de activiteit is van (onderdelen van) een orgaan. Daarmee kan het functioneren van dat orgaan (schildklier, hart, enz.) worden onderzocht. De radioactieve stof moet een korte halveringstijd hebben om de risico's voor de patiënt zo klein mogelijk te laten zijn. Een voorbeeld is technetium-99m: een γ-straler met een halveringstijd van 6 uur. In onderstaand kader wordt de werking toegelicht van de generator waarmee Tc-99m wordt geproduceerd.

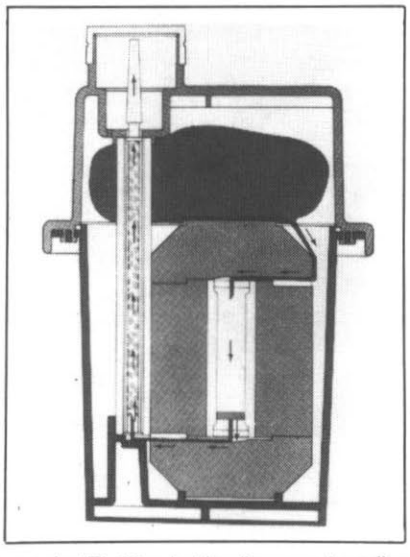
2. NUCLEAIRE DIAGNOSTIEK

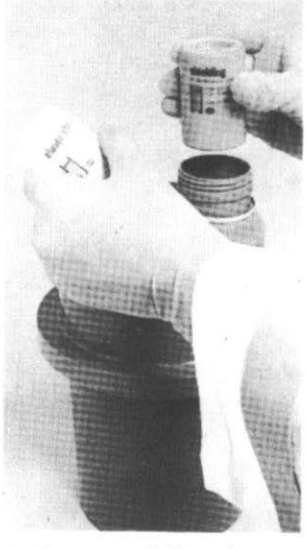
a. Welke soort kernstraling is het meest geschikt voor diagnostisch onderzoek? Waarom?
b. De andere vormen van kernstraling zijn niet alleen van weinig nut, maar zelfs riskant. Leg dat uit.
c. Deze toepassing van ioniserende straling leidt tot radioactief afval. Waaruit zal dit afval bestaan?

GENERATOREN VAN RADIONUCLIDEN

Wanneer een medisch centrum zoals gewoonlijk niet over eigen activeringsfaciliteiten (bijv. een versneller) beschikt (nodig om allerlei radioactieve nucliden te vormen), is het toch mogelijk met een klein apparaat een radioactieve stof met een korte halve-







Een generator voor technetium-99m. Het aftappen van het Tc-99m, het 'melken van de radioactieve koe', moet zeer voorzichtig gebeuren om radioactieve besmetting te voorkomen. Bij de rechter foto, waar de koe 'gemolken' wordt, is de loodomhulling verwijderd om beter te kunnen zien wat er gebeurt. Op de linker foto is deze loodomhulling (20 kg) wel te zien. De middelste figuur geeft een doorsnede van de generator. Het donkere deel bovenin is een zak met een steriele zoutoplossing. Bij het aftappen van het Tc-99m wordt een, vacuüm gezogen, flesje aangesloten op de afvoerbuis links boven. Een deel van de zoutoplossing loopt daardoor via het vat in het midden, waar het Tc-99m meegenomen wordt, naar beneden. Via de pijp links in de figuur komt de vloeistof dan in het flesje.

ringstijd te produceren. Zo'n generator van radionucliden bevat een radioactieve stof met een wat langere levensduur: de *moedernuclide*. Deze kernen desintegreren en het vervalprodukt is dan de *dochternuclide* met de korte halveringstijd. De dochternuclide wordt afgetapt en gebruikt voor medische doeleinden. Dit aftappen (het scheiden van dochter- en moedernuclide) wordt wel 'het melken van de radioactieve koe' genoemd. Na voldoende lange wachttijd zijn voldoende nieuwe dochternucliden gevormd, en kan een nieuwe hoeveelheid worden 'gemolken'. Veel gebruikt wordt de generator die de γ-straler technetium-99m levert (halveringstijd 6 uur). De moedernuclide is in dit geval molybdeen-99 (halveringstijd 67 uur), dat door β-verval overgaat in het gewenste Tc-99m.
Het molybdeen is in de generator aanwezig in de vorm van natriummolybdaat (Na_2MoO_4). Door de desintegratie van het molybdeen ontstaat natriumpertechnetaat ($NaTcO_4$), dat de gewenste dochternuclide bevat. Het gevormde pertechnetaat heeft eigenschappen die zo sterk van die van het molybdaat verschillen, dat het met behulp van een NaCl-oplossing selectief aan de generator kan worden onttrokken.

3. TECHNETIUM-GENERATOR

a. Waarom wordt technetium-99m niet rechtstreeks van een fabriek betrokken?

b. Schrijf de reactievergelijking op van het verval van molybdeen-99.

c. Op zeker moment is de activiteit van de moedernuclide zo ver afgenomen, dat de generator terug moet naar de fabriek. Stel dat de grens ligt bij 6,25% van de oorspronkelijke activiteit. Hoeveel dagen kan een ziekenhuis de generator dan gebruiken?

Voor behandelingsdoeleinden wordt ook vaak gebruik gemaakt van radioactieve stoffen, verpakt in een gesloten niet-radioactieve omhulling (gesloten bronnen) of verwerkt in een oplossing (open bronnen).

– *gesloten radioactieve bronnen*

Voor uitwendige bestraling wordt gebruik gemaakt van een bestralingsapparaat dat een sterke γ-bron bevat. Veelal wordt hiervoor cobalt-60 en, in mindere mate, cesium-137 benut met halveringstijden van 5,3 en 30 jaar.
Voor inwendige bestraling worden radioactieve naalden, buisjes of 'zaadjes' gebruikt, die in of dichtbij het te bestralen weefsel worden aangebracht. Vroeger werd hiervoor radium-226 gebruikt, tegenwoordig cesium-137, iridium-192, goud-198 en cobalt-60.

– *open radioactieve bronnen*

Een derde methode van bestralen is het middels een slok of inspuiting toedienen van een radioactieve oplossing aan de patiënt. De samenstelling van de oplossing hangt af van het te bestralen orgaan. Voor de behandeling van bijv. een schildklier wordt jodium-131 gebruikt, dat voor bijna 90% door dit orgaan wordt opgenomen. Daardoor is de gewenste stralingsbelasting van de schildklier zeer hoog.

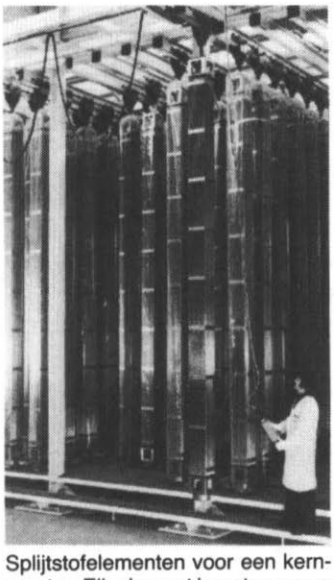
4. RADIOACTIEVE BESTRALING

a. Verklaar waarom men voor uitwendige bestraling *γ-bronnen* gebruikt met een *lange halveringstijd*.

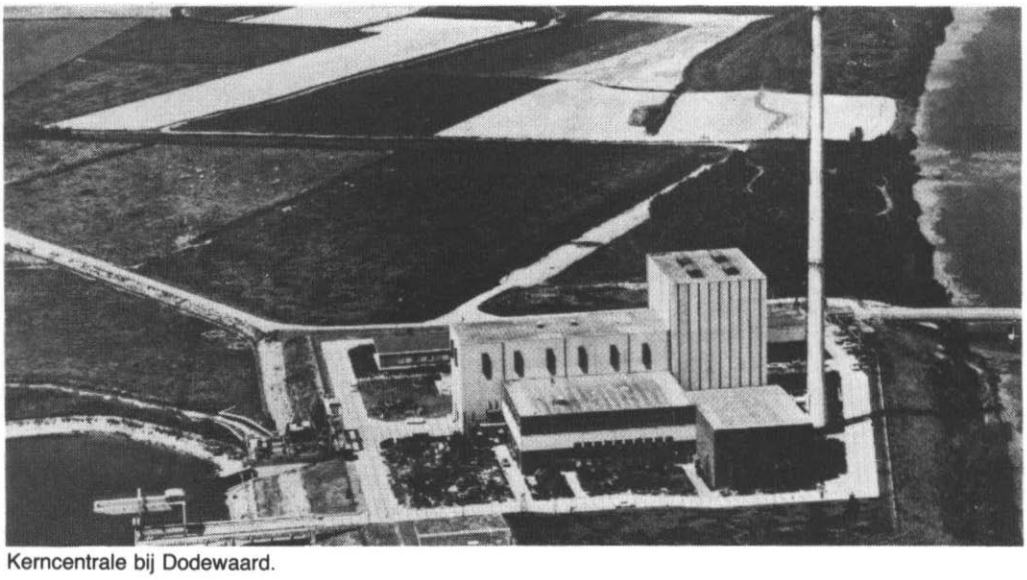
b. Met welke factoren zal de radiotherapeut onder andere rekening moeten houden bij het kiezen van de juiste bestralingsmethode?

4.3 STRALING BIJ KERNENERGIE

Enkele jaren voor de tweede wereldoorlog werd ontdekt dat zware kernen kunnen worden gespleten door neutronen, en dat hierbij veel energie vrijkomt. Tijdens de tweede wereldoorlog werd in het reusachtige Manhattan-project gewerkt aan de toepassing van dit principe in de vorm van kernwapens. Na 1945 werd ook gezocht naar vreedzame toepassingen, zoals de opwekking van elektrische energie met behulp van de energie die vrijkomt bij de splijting van zware kernen. Dat zoeken leidde tot de bouw van tal van



Splijtstofelementen voor een kernreactor. Elk element bevat een aantal splijtstofstaven. Elke staaf is gevuld met 'pillen' van uraniumoxide. Na een laatste inspektie worden ze in het magazijn hangend opgeslagen.



Kerncentrale bij Dodewaard.

kerncentrales, met name in de Verenigde Staten, Frankrijk, Engeland, Canada en de Sovjet-Unie.

In kerncentrales wordt vaak gebruik gemaakt van uranium-235. Wanneer deze kern wordt beschoten met neutronen kan één van de neutronen worden geabsorbeerd. Dan ontstaat de zeer instabiele kern uranium-236, die snel uiteenvalt in twee grote brokstukken en enkele neutronen. Bij deze reactie komt ook energie vrij.

Kenmerkende reactievergelijkingen voor de splijting van uranium-235 zijn:

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{140}_{54}Xe + {}^{94}_{38}Sr + 2{}^{1}_{0}n + 160 \text{ MeV}$$

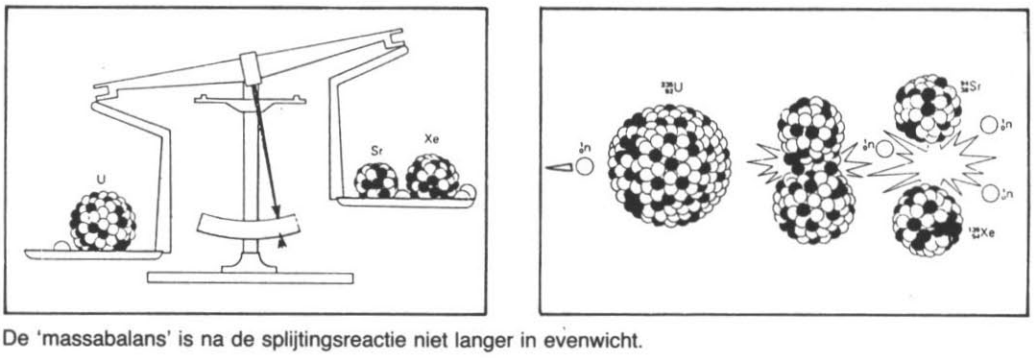
$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3{}^{1}_{0}n + 170 \text{ MeV}$$

Ook andere reacties zijn mogelijk. Net als bij de α- en β-reactievergelijkingen geldt hierbij dat er behoud van lading en van massagetal is. Er is echter nog een derde behoudswet, waar we het tot nu toe niet over hebben gehad: behoud van massa en energie. Einstein liet zien dat massa en energie eigenlijk met elkaar overeenkomen, en in elkaar worden uitgedrukt met de formule $E = m \cdot c^2$ (met E: energie; m: massa; c: lichtsnelheid).

Keren we terug naar de splijting van uranium-235. De rustmassa van de uraniumkern en het neutron samen blijkt bij precieze berekening wat groter te zijn dan de som van de rustmassa's van de deeltjes ná de splijting. Dit *massaverschil* of *massadefect* komt overeen met de energie die we in beide reactievergelijkingen hebben uitgedrukt in de eenheid MeV.

Albert Einstein.

Voor een bespreking van het begrip rustmassa *verwijzen we naar het thema 'Materie' (p. 69)*



De 'massabalans' is na de splijtingsreactie niet langer in evenwicht.

Hoe komt die energie beschikbaar? Dat gebeurt in vier vormen:

- de kinetische energie van de brokstukken, bijv. Xe en Sr, of Ba en Kr;
- de energie die vrijkomt bij het radioactief verval van deze brokstukken;

– de kinetische energie van de neutronen;
– de γ-straling.

Deze energie wordt uiteindelijk omgezet in warmte. In een kerncentrale wordt deze warmte gebruikt om een stoomturbine en een generator aan te drijven.

1. SPLIJTINGSENERGIE

Uit de reactievergelijking bij de splijting van U-235 in Xe-140 en Sr-94 hebben we gezien dat er 160 MeV aan energie vrijkomt.

a. Schrijf de reactievergelijking op, en ga na dat aan twee behoudswetten (lading en aantal kerndeeltjes) is voldaan.

b. Laat zien dat 160 MeV overeenkomt met $2{,}6 \cdot 10^{-11}$ J.

c. Bereken de massa waarmee deze hoeveelheid energie overeenkomt.

d. Je krijgt een idee van de orde van grootte van deze massa als je deze vergelijkt met de massa van een neutron. Met hoeveel procent van de massa van een neutron komt de gevormde energie overeen?

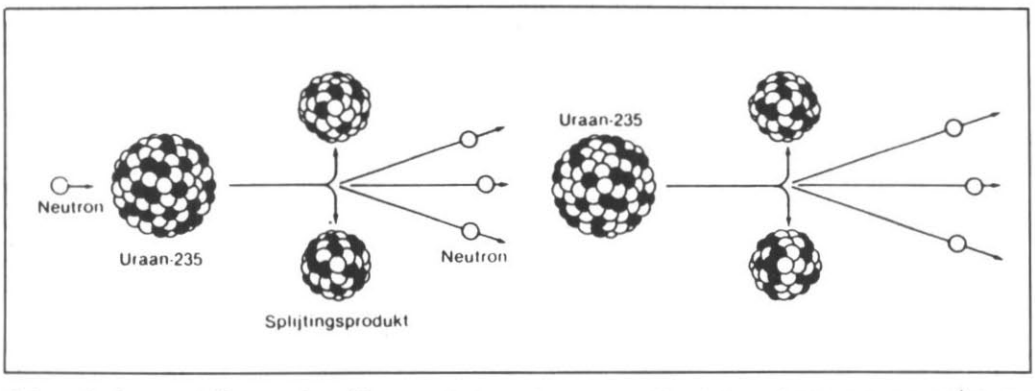
e. Ga na hoeveel kernen uranium-235 aanwezig zijn in 1 gram van die stof. Gebruik het gegeven dat 1 mol (235 gram) U-235 $6{,}02 \cdot 10^{23}$ kernen bevat.

f. Hoeveel energie (in J) komt vrij wanneer 1 gram U-235 volledig zou worden gespleten?

g. Met hoeveel kg steenkool komt de splijtingsenergie van 1 gram zuiver U-235 overeen ? (Zoek de verbrandingswarmte van steenkool op in je tabellenboek.)

kernreactor

Je hebt gezien dat er meer neutronen geleverd worden bij de splijting van een kern dan nodig zijn voor de splijting van een nieuwe U-235 kern. Maar veel van die neutronen zijn niet echt bruikbaar omdat ze niet de juiste, lage snelheid hebben of omdat ze het brokje uranium al hebben verlaten voor ze een nieuwe splijting hebben veroorzaakt. Om die laatste reden is er een bepaalde *minimum massa* uranium nodig.



Schematische voorstelling van de splijtingsreactie in een kernreactor. Van de twee à drie neutronen die bij elke splijting vrijkomen veroorzaakt er één de volgende splijting. De andere neutronen worden door andere dan U-235-kernen ingevangen. Langs die weg kan bijv. plutonium ontstaan uit U-238 (zie blz. 37).

Als een kernreactor een constant vermogen levert, is het aantal splijtingen per seconde constant. De neutronen die bij elke splijting vrijkomen, veroorzaken dan precies weer één volgende splijting. Om dat te bereiken is niet alleen een minimum massa nodig, maar moeten de neutronen ook de juiste snelheid hebben en mogen er niet teveel neutronen door andere kernen geabsorbeerd worden. De snelheid van de neutronen in een kernreactor wordt geregeld door de *moderator*. Door botsingen van de neutronen met de kernen van de moderator worden de neutronen afgeremd tot de juiste, lage snelheid. Het aantal neutronen kan worden geregeld met de *regelstaven*. Die kunnen een eventueel overschot aan neutronen absorberen. De regelstaven kunnen in en uit de reactor geschoven worden. Wanneer alles volgens het boekje verloopt, en dus gemiddeld na elke splijting één van de vrijgekomen neutronen een nieuwe splijting veroorzaakt, dan zeggen we dat de reactor *kritiek* is.

Als een kern een neutron absorbeert, ontstaat een andere isotoop die vaak instabiel is. De nieuwe isotoop vervalt en verandert van samenstelling. In een kernreactor is bijv. van belang de reactie:
$^{238}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{239}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{93}Np + {}^{0}_{-1}e$
Het gevormde Np-239 is een β-straler:
$^{239}_{93}Np \rightarrow {}^{239}_{94}Pu + {}^{0}_{-1}e.$
Op deze wijze wordt het beruchte plutonium-239 gevormd.

Bij normaal gebruik levert een kerncentrale weinig extra stralingsdoses op voor de omgeving. Deze extra dosis voor een mens bedraagt minder dan 10 μSv per jaar, en is voornamelijk afkomstig uit het koelwater van de centrale. Bij een ongeluk in de centrale kan die dosis uiteraard veranderen. De kans op een ongeluk is erg klein, de gevolgen kunnen echter heel ernstig zijn.
Een zorg voor veel mensen is het radioactieve afval van een kerncentrale. Met name de staven waarin de splijtstof zich bevindt zijn zeer radioactief, omdat de meeste kernen die uit de splijtingsreactie ontstaan radioactief zijn. Bovendien absorberen veel andere materialen in de reactor neutronen en worden daardoor radioactief.

2. SPLIJTING
Bij splijting van een U-235-kern kunnen als splijtingsproducten Kr-90 en Ba-143 ontstaan.
a. Hoeveel neutronen komen bij deze splijting vrij?
b. Welke bijdrage leveren deze neutronen aan het ontstaan van radioactief afval?

3. SPLIJTINGSPRODUCTEN
Splijtingsproducten als Kr-90 en Ba-143 zijn niet stabiel. Ze vervallen als volgt:

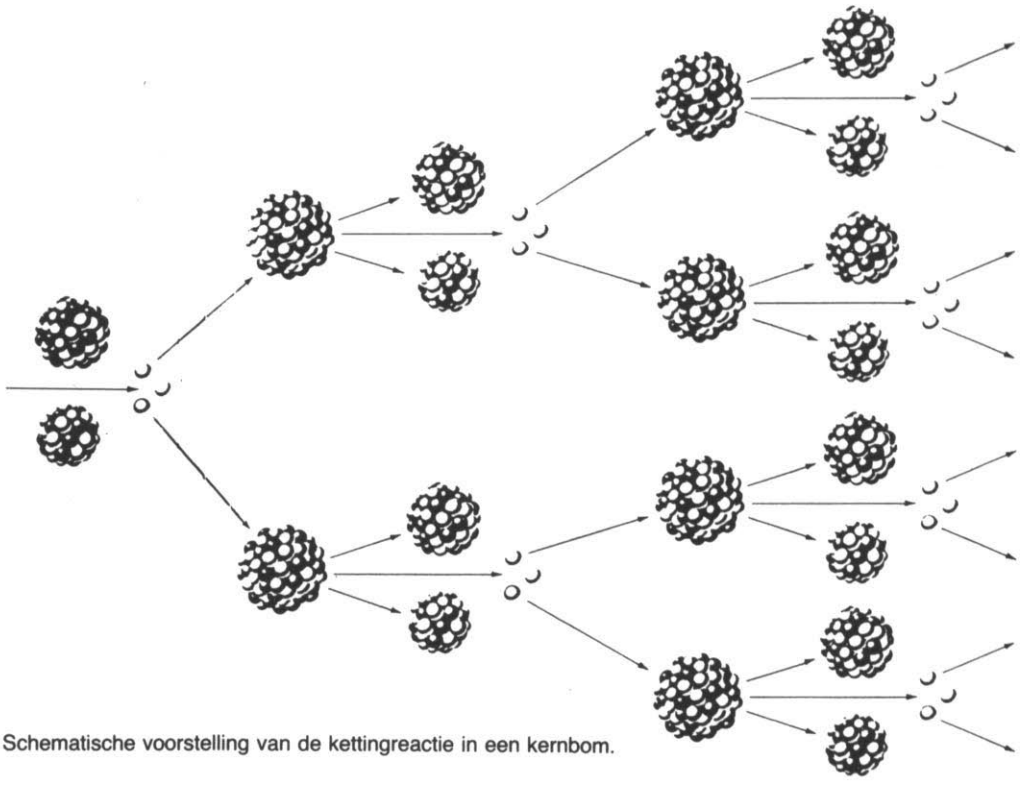
$$^{90}_{36}Kr \xrightarrow[33\ s]{\beta} ? \xrightarrow[2{,}9\ min]{\beta} {}^{90}_{38}Sr \xrightarrow[28{,}1\ j]{\beta} ? \xrightarrow[64\ h]{\beta} {}^{90}_{40}Zr$$

$$^{143}_{56}Ba \xrightarrow[12\ s]{\beta} ? \xrightarrow[14\ min]{\beta} {}^{143}_{58}Ce \xrightarrow[33\ h]{\beta} ? \xrightarrow[13{,}6\ d]{\beta} {}^{143}_{60}Nd$$

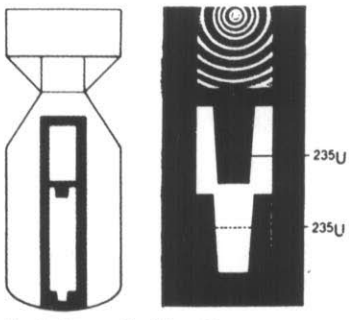
a. Wat moet er hierboven op de plaatsen van de vraagtekens komen te staan?
b. Welke (klein)dochterkern van $^{90}_{36}Kr$ zal op lange termijn de meeste problemen geven?

4.4 STRALING VAN KERNWAPENS

splijtingsbom
Kern- of atoomwapens ontlenen hun naam aan de energie die afkomstig is uit de atoomkern. De eerste kernbommen haalden deze energie uit de splijting van uranium-235 of plutonium-239. Hiroshima en Nagasaki zijn in 1945 verwoest door zo'n *splijtingsbom*.



Schematische voorstelling van de kettingreactie in een kernbom.



In de bom, die Hiroshima op 6 augustus 1945 verwoestte en die aangeduid werd met de naam 'Little Boy', kwam de kernexplosie tot stand doordat een stuk uraan-235 door middel van een explosie met grote snelheid in een ander stuk uraan-235 werd geschoten, waarin het precies paste.

Bij kernwapens is het de bedoeling dat in zeer korte tijd heel veel kernen splijten. Na elke splijting moet gemiddeld *meer dan één* van de vrijgekomen neutronen een nieuwe splijting veroorzaken. Daarvoor is een bepaalde minimum-hoeveelheid splijtstof vereist. In kernwapens bevinden zich stukken U-235 of Pu-239 die elk op zich te klein zijn. Wanneer ze echter bij elkaar worden gebracht, vormen ze een *superkritieke massa*: elke splijting heeft meer dan één nieuwe splijting tot gevolg. De figuur hiernaast toont een manier om zo'n superkritieke massa te vormen.
De energie van de explosie wordt uitgedrukt in *ton TNT*. TNT is het chemische explosief trinitrotolueen. De bom op Hiroshima had bijvoorbeeld een sterkte van 14000 ton TNT (14 kton TNT).

1. SPLIJTINGSENERGIE VAN KERNWAPENS

Bij een kernwapenexplosie met een explosieve kracht van 1 Mton TNT worden $1{,}5 \cdot 10^{26}$ kernen U-235 gespleten. Iedere splijtende kern draagt gemiddeld een energie van 180 MeV bij aan de explosie.

a. Hoe groot is de massa U-235 in de bom tenminste?

b. Reken na dat bij de splijting van deze bom een energie van $4{,}2 \cdot 10^{15}$ J vrijkomt.

c. Welk soort splijtingsprodukten levert de bom na explosie?

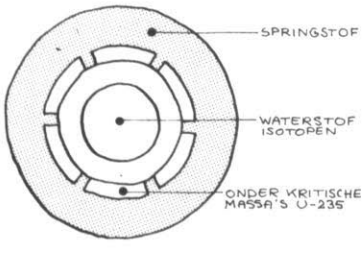
fusiebom

In het begin van de jaren '50 werd een ander type kernbom ontwikkeld: de *fusiebom* of waterstofbom. De fusiebom maakt gebruik van reacties waarbij zeer lichte kernen fuseren (samensmelten). Daarbij komt ook veel energie vrij, net als bij de splijting van zware kernen. Voorbeelden van reacties in fusiebommen zijn:

$${}^{3}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n + 17{,}4 \text{ MeV}$$

$${}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{1}_{1}H + 4{,}0 \text{ MeV}$$

In de eerste reactie fuseren tritium en deuterium tot α-deeltjes en neutronen. In het tweede voorbeeld levert de fusie van twee deuteriumkernen tritium en protonen op. Omdat in fusiebommen veel gebruik wordt gemaakt van de fusie van waterstofisotopen spreekt men ook wel over waterstofbommen.
Uit de reactievergelijkingen is te zien dat het hier gaat om het bij elkaar brengen van positief geladen atoomkernen. Fusie treedt pas op als deze kernen zeer dicht bij elkaar zijn gekomen (op een afstand van ongeveer 10^{-15} m). Daartoe moet de afstotende elektrische kracht worden overwonnen. Dat kan alleen als de kernen een zeer hoge snelheid hebben, en daarvoor zijn temperaturen van miljoenen kelvin nodig. Bij de fusiebom ontstaat deze hoge temperatuur door de explosie van een splijtingsbom. Een fusiebom is dus altijd een splijtings-fusiebom. De splijtingsbom werkt als een soort ontsteking. Fusiebommen kunnen zeer krachtig zijn, tot zo'n 50 Mton TNT.



Principe van een waterstofbom.

Fusie van lichte atoomkernen vindt ook plaats in de zon. Dat proces zorgt voor het zonlicht waar we dagelijks van profiteren. Al jaren wordt in laboratoria geprobeerd dit fusieproces te benutten om elektrische energie op te wekken. Dat vereist grote dichtheden van de gasmengsels met de te fuseren kernen èn zeer hoge temperaturen. Rendabele fusiereactoren zijn de eerste tientallen jaren nog niet te verwachten.

2. VERGELIJKING TUSSEN SPLIJTINGS- EN FUSIEBOMMEN

a. Kun je een reden bedenken waarom de splijtingsbom eerder werd ontwikkeld dan de fusiebom?

b. Welke overeenkomsten zijn er tussen splijtings- en fusiebommen?

c. In welke opzichten verschillen ze van elkaar?

straling na kernexplosies

Een van de gevolgen van de ontploffing van een kernwapen is kernstraling. Deze is te onderscheiden in directe en latere straling.

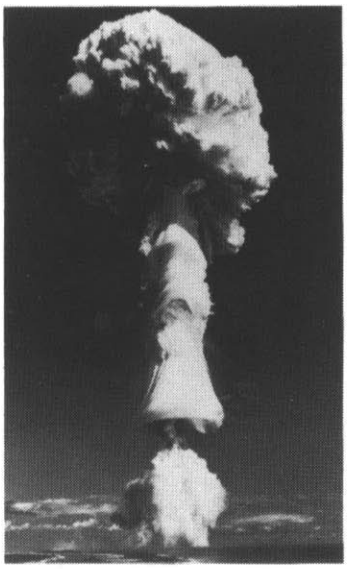
De *directe straling* treedt op binnen een minuut na de explosie. Ze bestaat uit α,- β-, γ- en neutronenstraling. Alleen beide laatste soorten zijn van belang, omdat α- en β-straling al op korte afstand worden geabsorbeerd in de lucht. De reikwijdte van γ- en neutronenstraling is groter, maar ook hiervoor geldt dat het bereik van de straling beperkt wordt door absorptie in de lucht.

De tabel hiernaast illustreert deze absorptie. Ze geeft voor diverse afstanden aan hoe groot de stralingsdosis is die iemand ontvangt van een ontploffende 2 Mton bom in de eerste minuut.

stralingsdosis (Sv)	*afstand tot explosie* (km)
10	*2,5*
5	*2,7*
1	*3,1*

Naast de directe straling bij een kernexplosie moet ook vooral rekening worden gehouden met latere straling: de *fallout*. Deze fallout bestaat uit twee soorten stoffen:

- *splijtingsprodukten*: deze zijn rechtstreeks afkomstig van het splijten van de zware atoomkernen; de meeste zenden γ- en β-straling uit;
- *nieuwe radioactieve stoffen*: bij de kernreacties vrijkomende neutronen worden ingevangen door kernen, die daardoor radioactief worden en meestal ook γ- en β-straling uitzenden.



De ontploffing van de eerste Franse waterstofbom in de Stille Oceaan (1970).

De splijtingsprodukten worden bij elke atoombom gevormd. Belangrijke nucliden in dit verband zijn Cs-137 en Sr-90 met halveringstijden van 30 en 28 jaar. Sr-90 is het gevaarlijkst, omdat de eigenschappen lijken op die van calcium: het wordt dus in de botten opgenomen. Bij kinderen in de groei kan dit ernstige effecten hebben. Een toename van Sr-90 in melk heeft mede geleid tot het verdrag over de stopzetting van bovengrondse kernproeven.

De tweede soort fallout treedt voornamelijk op bij explosies van kernbommen vlak bij de grond. De neutronenstraling ontmoet dan veel materie op zijn weg. De daardoor gevormde radioactieve stoffen verdampen door de hitte van de explosie, en worden meegezogen tot hoog in de dampkring. Na condensatie bereiken ze op den duur de aarde weer.

3. FALLOUT

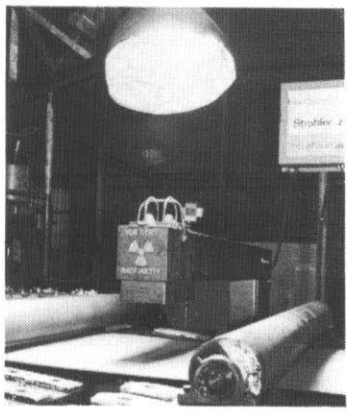
a. Op welke manieren kan fallout aan het menselijk lichaam schade toebrengen?

b. Na 14 dagen is de activiteit van de fallout nog ongeveer 0,1% van die van de oorspronkelijke fallout (30 minuten na de explosie). Vanwaar deze afname van de activiteit?

c. Van welke vier factoren zal de fallout op een bepaalde plaats afhangen?

d. Wat zouden de gevolgen zijn voor de fallout wanneer een kerncentrale door een kernbom wordt getroffen?

4.5 STRALING IN HUISHOUDEN EN TECHNIEK



Bij het walsen van metaalplaat kan de dikte ononderbroken worden gemeten met een radioactieve bron en een detector (onder de bewegende plaat).

Het gebruik van ioniserende straling beperkt zich niet tot de gebieden die we tot nu toe hebben gezien: energievoorziening, gezondheidszorg en bewapening. In deze paragraaf vermelden we nog enkele andere toepassingen, zonder volledig te zijn. In de *industrie* wordt ioniserende straling gebruikt om de dikte van metalen platen te meten. Een röntgen- of γ-bron zendt straling uit. De straling wordt gedeeltelijk geabsorbeerd door de metalen plaat, afhankelijk van de dikte. Een teller vangt de doorgelaten straling aan de andere zijde van de plaat op. Afwijkingen in de dikte veroorzaken veranderingen in de telgegevens. Automatisch wordt het produktieproces dan bijgesteld.

Een andere industriële toepassing is het volgen van gas- of vloeistofstromen in gesloten machines of langs moeilijk toegankelijke plaatsen. Aan het gas of de vloeistof wordt dan een radioactieve nuclide toegevoegd, waarvan de verplaatsing van buiten af met tellers kan worden gevolgd. Bij het transporteren van water en pulp bij papierfabricage worden hiervoor in water oplosbare verbindingen van natrium-24 en broom-82 gebruikt; de halveringstijden zijn 15 en 35 uur.

Schilderij van Rembrandt (zelfportret). De rechter foto is verkregen met behulp van röntgenstraling.

Op het gebied van de *kunstgeschiedenis* wordt röntgenstraling gebruikt om schilderijen aan een nauwgezet onderzoek te onderwerpen. Daarmee kan men te weten komen of zich een andere schildering bevindt onder de nu zichtbare, of in hoeverre bepaalde delen van het schilderij later tot stand zijn gekomen. Ook kan de schilderwerkwijze van de kunstenaar worden bestudeerd, door na te gaan hoe het proces verlopen is van ruwe versie tot uiteindelijk schilderij.

In een *TV-toestel* wordt röntgenstraling geproduceerd doordat snelle elektronen door het glas van de straalbuis worden afgeremd. Aangezien de versnelspanning niet zo hoog is, blijft de energie van de röntgenstraling laag. Door afstand te houden kan de stralingsbelasting worden beperkt. Kleuren-TV's leveren een grotere dosis dan zwart-wit toestellen: 20 respectievelijk 10 µSv per jaar als je elke dag een uur kijkt.

1. BEPAAL JE EIGEN STRALINGSBELASTING

Dit hoofdstuk bevat veel informatie over de stralingsbelasting die je in het dagelijks leven kunt oplopen.
Maak een schatting van de stralingsdosis die jij jaarlijks ontvangt. Vergelijk deze schatting met die van je klasgenoten en probeer de verschillen te verklaren. Blijft jullie geschatte stralingsbelasting binnen de gestelde normen?

hoofdstuk 5

KERNENERGIE

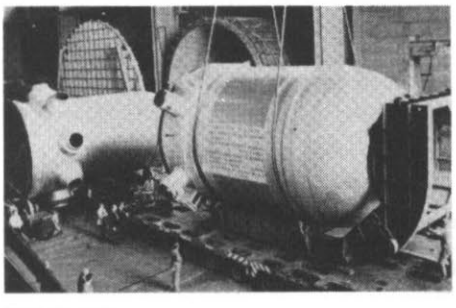
inhoud

		blz.
5.1	een felle discussie	42
5.2	de splijtstofcyclus	43
5.3	de kerncentrale	46
5.4	risico en veiligheid	48

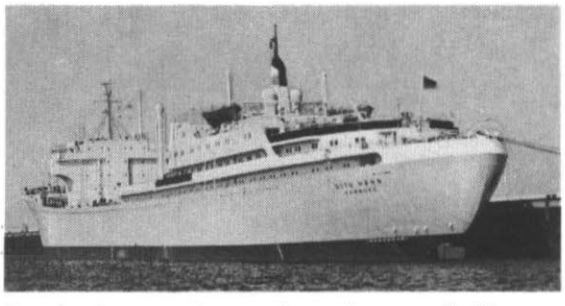
kernenergie

In aanvulling op paragraaf 4.3 biedt dit hoofdstuk nieuwe informatie over kernenergie. De toepassing van kernenergie staat al jaren in de belangstelling en leidt vaak tot zeer emotionele reacties. De discussie concentreert zich voornamelijk op de veiligheid van kerncentrales en het opbergen van het radioactieve afval.

In dit hoofdstuk geven we eerst een overzicht van de argumenten die in deze discussie vaak een rol spelen. Daarna bekijken we het gehele verwerkingsproces van uranium: van de mijn via verrijking naar de centrale, gevolgd door de verwerking en opslag van het radioactief afval. Binnen dit geheel speelt de kerncentrale een belangrijke rol, en die komt dan ook daarna uitgebreid aan de orde. We concentreren ons daarbij op de risico's, die aan deze toepassing van ioniserende straling verbonden zijn.



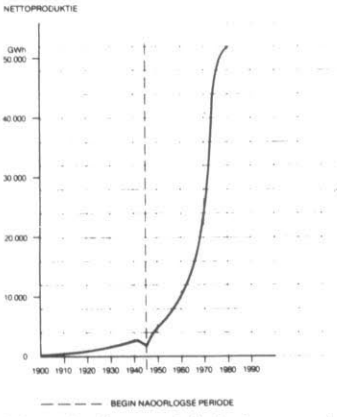
Reactorvaten.



Een door kernenergie aangedreven koopvaardijschip.

In de paragrafen 5.2 en 5.4 vind je een aantal opdrachten. Het is de bedoeling dat je één (of meer) van die opdrachten uitkiest. Voor de uitwerking van de gekozen opdracht(en) zul je een aantal informatiebronnen moeten aanboren: boeken, brochures, folders enz. Het gaat daarbij dus om een *literatuuronderzoek*.

5.1 EEN FELLE DISCUSSIE



Het gebruik van elektrische energie in Nederland van 1900 tot 1980.

Omschrijving	Kernenergie schatting KIVI/NIRIA	Kernenergie schatting Milieufederatie Groningen
Kosten elektriciteit in ct/kWh		
Kapitaallasten	3,9	6,4
Exploitatiekosten	1,1	1,5
Brandstoffen	2,9	5,7
	7,9	13,6

De schattingen van de kosten per kWh lopen zeer uiteen. (Het KIVI en NIRIA zijn verenigingen voor ingenieurs.)

De discussie over het al of niet gebruiken van kernenergie verloopt vaak vrij heftig. Voorstanders betogen dat inschakeling van kernenergie noodzakelijk is om de energievoorziening van de *toekomstige generaties* veilig te stellen. Olie en gas raken snel op en steenkool veroorzaakt veel milieuvervuiling, zo stellen zij. Tegenstanders stellen daar tegenover dat energiebesparing en de inschakeling van zon en wind voldoende mogelijkheden biedt voor het veilig stellen van de toekomstige energievoorziening.
Er zijn ook *politieke* aspecten aan die keuze verbonden. Een energievoorziening die gebaseerd is op olie en steenkool maakt Nederland afhankelijk van leveranciers als het Midden-Oosten (olie) en de landen van het Oostblok (steenkool). De grootste voorraden uranium bevinden zich in het Westen. Ook vanuit het oogpunt van een grotere *spreiding* van de energiebehoefte over allerlei energiebronnen kan men voor kernenergie kiezen.

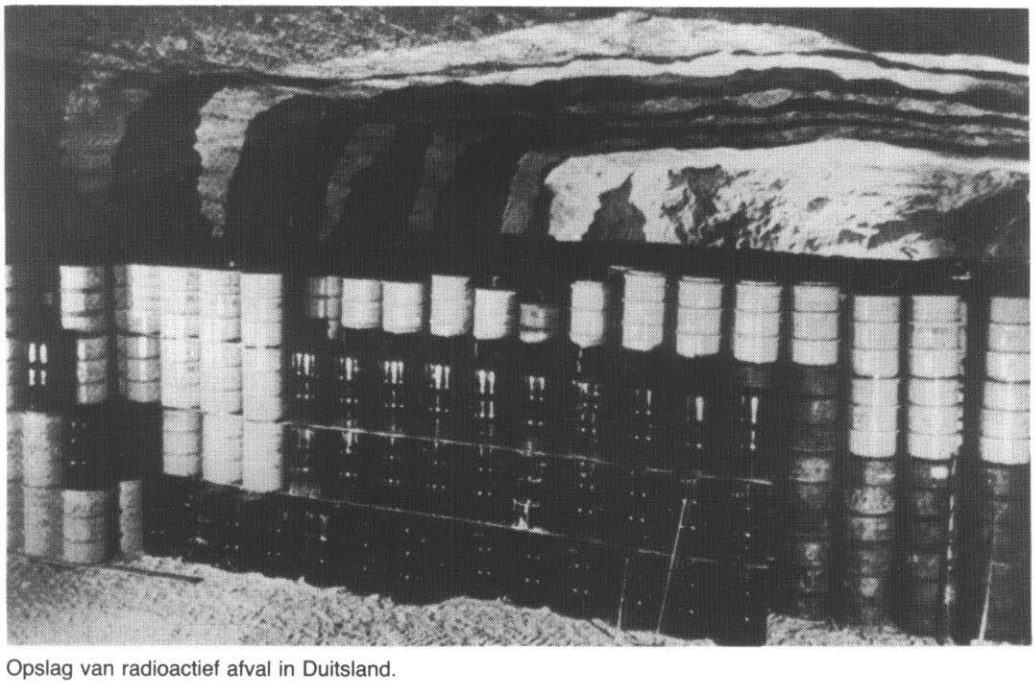
Bij de discussies over de wenselijkheid van kernenergie spelen vele factoren een rol, waarover ook de deskundigen het lang niet altijd eens zijn: kostprijs, veiligheid, verspreiding van kernwapens enz.

– *kostprijs*

De berekeningen voor de kostprijs van 1 kWh elektrische energie uit een kerncentrale lopen zeer uiteen. De kosten van de afbraak van verouderde reactoren worden zeer uiteenlopend geschat. Ook denkt men zeer verschillend over de kosten van verwerking en opslag van radioactief afval. Door het gebrek aan ervaringen zijn over deze aspecten nauwelijks gegevens beschikbaar.

– *radioactief afval*

Het kernsplijtingsafval zal vele eeuwen bewaard moeten worden. Sommigen zijn van mening dat dit opslagprobleem binnen korte tijd afdoende zal worden opgelost. Anderen willen geen nog onbekende risico's nemen of zijn van mening dat een veilige opslag niet mogelijk is.



Opslag van radioactief afval in Duitsland.

– *veiligheid*

Men is het erover eens dat de kans op een ongeval met een kerncentrale of een opwerkingsfabriek klein is, maar men verschilt grondig van mening over de omvang van de gevolgen van zo'n ongeval.

– *democratie*
Sommigen zijn van mening dat de beveiliging tegen sabotage en terreuracties zoveel extra mankracht en bevoegdheden van de politie vereist, dat de kwaliteit van de democratie in gevaar komt.
– *oorlog*
Kerncentrales zijn een groot gevaar in tijden van oorlog. Als de tegenstander besluit een in werking zijnde kerncentrale te bombarderen, zijn de gevolgen niet te overzien. Met name bestaat verschil van mening wat betreft de mate van radioactieve besmetting van grote gebieden rondom de centrale.
– *verspreiding van kernwapens*

De bom die in 1945 op Nagasaki viel, bevatte 8 kg Pu

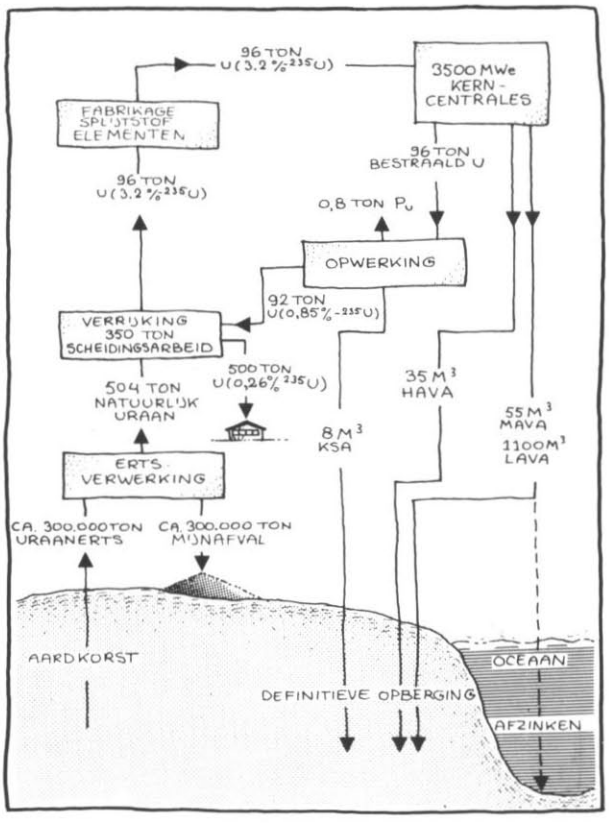
In de splijtstofcyclus wordt plutonium geproduceerd: een grondstof voor kernwapens. Daardoor kan het risico van een verdere verspreiding van kernwapens vergroot worden. Men probeert deze verspreiding tegen te gaan door het maken van internationale afspraken en het uitvoeren van controles. De meningen over de effectiviteit daarvan lopen zeer sterk uiteen.

5.2 DE SPLIJTSTOFCYCLUS

Het vermogen van een elektriciteitscentrale wordt uitgedrukt in MWe. *Die 'e' geeft aan dat het geleverde* elektrische *vermogen bedoeld wordt*

Bij het beoordelen van de risico's van het gebruik van kernenergie moet niet alleen de kerncentrale, maar het hele proces van uraniumwinning tot en met afvalverwerking en -opslag bekeken worden. Dat proces noemen we de *splijtstofcyclus*. In de figuur hieronder is deze cyclus geschetst voor het geval er in Nederland een vermogen van 3500 MWe aan kerncentrales opgesteld staat. Tot nu toe staan er alleen kerncentrales in Dodewaard (52 MWe) en in Borssele (425 MWe).
Er bestaan echter plannen om meer kerncentrales te bouwen tot een totaal vermogen van 3500 MWe.

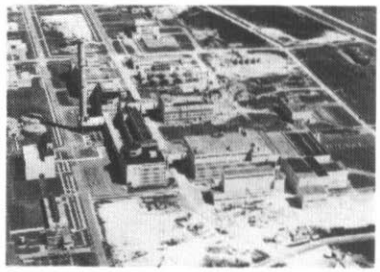
In de splijtstofcyclus kunnen we een aantal stappen onderscheiden: de *ertsverwerking*, de *verrijking*, de *fabricage van splijtstofelementen*, de *kerncentrale*, de *opwerking* en de *opslag van radioactief afval*.



De splijtstofcyclus, bij een opgesteld vermogen van 3500 MWe aan kerncentrales. De in de figuur vermelde hoeveelheden gelden per jaar.

Uraniumwinning

Verrijkingsfabriek met kerncentrales


Opwerkingsfabriek

Uranium-ertsdelving veroorzaakt een sterke verstoring van het landschap.

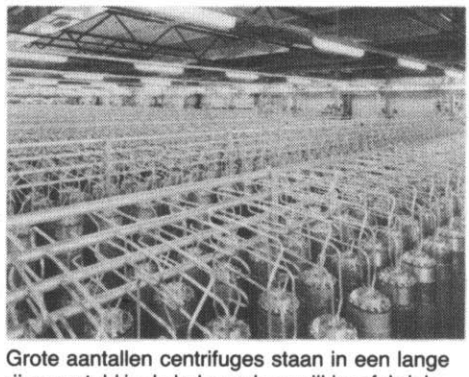
ertsverwerking

De splijtstofcyclus begint bij de uraniummijn. Het uraniumerts, dat slechts 0,1 à 0,3% uranium bevat, wordt ondergronds of in dagbouw gedolven. Bij de ertsverwerking wordt het erts fijngemalen en in sterke zuren opgelost. Als het uranium daaruit verwijderd is, blijft een grote hoeveelheid radioactieve en zure modder achter. Deze modder wordt in grote bassins opgeslagen en met een dikke laag aarde afgedekt. Het natuurlijke uranium, dat op deze manier gewonnen wordt, bestaat voor 99,3% uit U-238 en voor 0,7% uit U-235.

verrijking

In de verrijkingsfabriek wordt de concentratie van 0,7% U-235 in het natuurlijke uranium opgevoerd tot 3%. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het verschil in massa tussen beide uraniumisotopen. Er zijn op dit moment twee methoden om uranium te verrijken: de *gasdiffusie-* en de *ultracentrifuge-methode*. Beide methoden gebruiken een gasvormige verbinding van uranium met fluor: UF_6.

De diffusiefabriek Eurodif in Frankrijk heeft vier 930 MW kerncentrales nodig om de benodigde energie te leveren. Deze centrales staan op de voorgrond. Toch kan het verrijkte uranium 30 keer zoveel energie leveren dan er nodig was voor de verrijking.



Grote aantallen centrifuges staan in een lange rij opgesteld in de hal van de verrijkingsfabriek in Almelo.

Bij gasdiffusie maakt men gebruik van het feit dat de lichtere $^{235}UF_6$-moleculen iets sneller bewegen dan de $^{238}UF_6$-moleculen. Het is ook mogelijk beide isotopen te scheiden in zeer snel ronddraaiende trommels (een paar duizend omwentelingen per seconde). In Nederland wordt deze ultracentrifuge-methode gebruikt in de verrijkingsfabriek in Almelo. Beide methoden moeten vele malen herhaald worden om tot een noodzakelijke verrijking van 3,2% U-235 te komen.
De grote hoeveelheid verarmd uranium die bij verrijking vrijkomt, wordt voorlopig opgeslagen. Het uranium moet daarbij als radioactief afval behandeld worden, omdat er een vrij grote hoeveelheid radioactief radongas vrijkomt.

splijtstofelementen-fabricage

De produktie van splijtstofstaven voor een gasgekoelde reactor.

Na de verrijking wordt het gas weer omgezet in het vaste uraniumoxide en in de splijtstofelementenfabriek tot 'pilletjes' verwerkt. Deze pilletjes worden dan opgestapeld in een hermetisch afgesloten *splijtstofstaaf*. Een aantal van deze staven vormt een *splijtstofelement*.
Bij de fabricage van splijtstofstaven komt zeer weinig radioactiviteit vrij en wordt nauwelijks afval geproduceerd. De kans op ongevallen is niet groter dan bij een 'normale' fabriek.

kerncentrale

De splijtstofelementen verblijven ongeveer drie jaar in de kernreactor. In die tijd wordt een deel van het U-235 verspleten en wordt plutonium (Pu) gevormd uit U-238. Door de splijting van U-235 komt warmte vrij. Die warmte wordt, net als bij een gas-, kolen- of oliegestookte centrale, gebruikt om water te verhitten. De zo gevormde stoom drijft een turbine aan, die op zijn beurt een generator in beweging zet.
Er zijn vele types kerncentrales. Een van die types wordt in paragraaf 5.3 behandeld: de Pressurised Water Reactor (PWR).

Britse fabriek loost te veel kernafval

Londen, 5 juli — Het staatsbedrijf voor de opwerking van gebruikte splijtstof in het Britse Sellafield loost nog steeds onnodig veel radioactief afval in de Ierse Zee. Dit heeft een adviesorgaan van de Britse regering vastgesteld.

Sellafield, vroeger bekend onder de naam Windscale, is verreweg de grootste Europese bevuiler van de zee met radioactief afval, aldus een rapport.

De lozingen hebben de 69 procent van de internationaal nog aanvaardbaar geachte waarde bereikt. Het bureau noemt dit overigens „ongewenst" in plaats van gevaarlijk. British Nuclear Fuels (BNF), de maatschappij die de opwerkingsfabriek exploiteert, heeft meegedeeld dat zij de lozingen „zo ver wil verminderen als maar mogelijk is".

Er is al lange tijd kritiek op de veiligheidsnormen die in Sellafield worden gehanteerd. Milieuorganisaties hebben al herhaaldelijk aangedrongen op de beëindiging van de lozing van radioactief afval in zee. In november van het vorige jaar moest de regering stranden in de buurt van het bedrijf sluiten omdat er te hoge doses straling werden gemeten.

NRC 5-7-1984.

opwerking

De 'opgebrande' splijtstofelementen bevatten nog bruikbaar U-235 en Pu. In de opwerkingsfabriek worden deze uit de staven gehaald. Het U-235 wordt naar de verrijkingsfabriek gestuurd, en het Pu kan worden gebruikt bij de fabricage van splijtstofelementen of kernwapens. De restanten van deze opwerking vormen het zeer radioactieve *kernsplijtings-afval* (KSA).

Er zijn in Europa maar twee van dergelijke opwerkingsfabrieken, en die kampen regelmatig met vrij ernstige storingen. Daardoor is er nog nauwelijks ervaring opgedaan met het op grote schaal opwerken van gebruikte splijtstofstaven. Voorlopig worden de staven in waterbassins opgeslagen.

radioactief afval

Naast het KSA komt ook hoog-, middel- en laag-actief vast afval vrij.

hoog-actief vast afval (HAVA)

Dit is materiaal met een stralingsactiviteit tussen 1000 en 4000 GBq/m^3. Het bestaat voornamelijk uit onderdelen van kernreactoren.

middel-actief vast afval (MAVA)

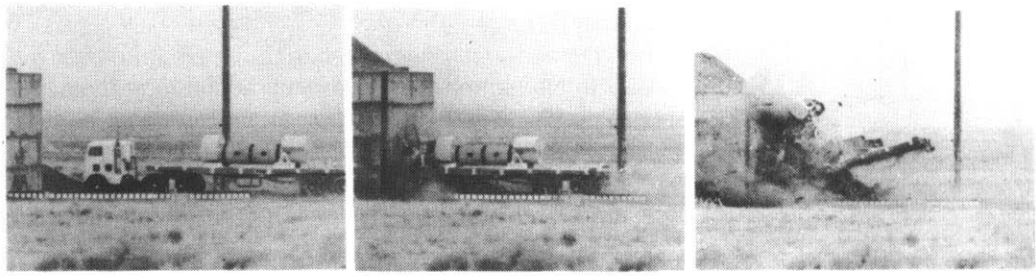
De activiteit van dit afval bedraagt ongeveer 500 GBq/m^3. Dit afval bestaat bijv. uit radioactief vervuilde filters, die gebruikt worden voor het zuiveren van water en lucht in de kerncentrale.

laag-actief vast afval (LAVA)

Dit afval bestaat vooral uit besmette kleding en schoonmaakmateriaal. Het heeft een activiteit van ongeveer 500 MBq/m^3.

transport

Binnen de splijtstofcyclus vindt transport over zeer grote afstanden plaats. Het uranium voor de Nederlandse kerncentrales wordt voornamelijk geleverd door mijnen in Afrika, en de 'opgebrande' splijtstofstaven moeten van Nederland naar Engeland of Frankrijk gebracht worden. Later wordt het KSA weer teruggestuurd naar Nederland. Ook voor dumping van LAVA en MAVA in de oceaan is transport nodig. Voor dit transport zijn speciale containers ontworpen.



De vaten die gebruikt worden bij het transport van radioactief afval worden aan zware botsingsproeven onderworpen. Bij deze test, waarbij een vrachtwagen met een snelheid van 130 km/h tegen een betonnen muur botste, bleek het vat niet beschadigd te zijn.

1. URANIUMMIJN

a. Hoeveel procent van het gedolven erts wordt bij de ertsverwerking nuttig gebruikt?

b. Stel dat het afval opgeslagen zou worden op een (voetbal)veld van 90 bij 120 m. Hoe hoog staat het afval, dat volgens de splijtstofcyclus op blz. 43 jaarlijks geproduceerd zou worden, na één jaar op dat veld? Neem voor de dichtheid van het afval 2000 kg/m^3.

2. RADIOACTIEF MIJNAFVAL

De radioactieve modder bij de uraniummijn bevat nog U-238. U-238 vervalt via de tussenstap van Ra-226 tot het gasvormige Rn-222.

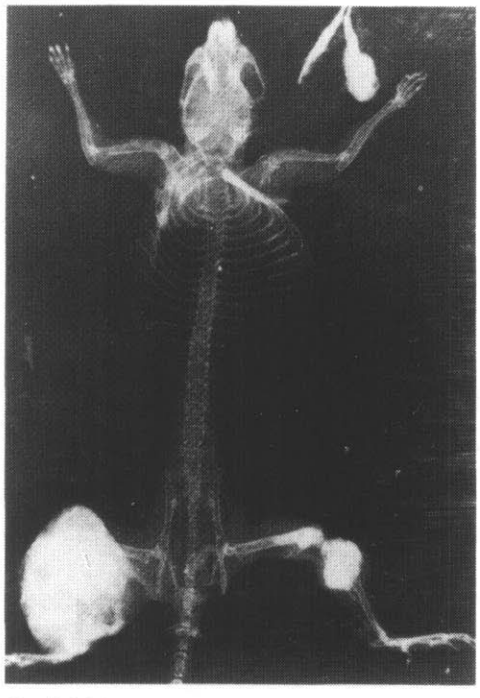
De verwerking van die modder heeft in het verleden nogal eens tot milieurampen geleid, doordat grote hoeveelheden in een rivier terecht kwamen. Sindsdien wordt de modder met een dikke laag grond afgedekt, waardoor ook de stra-

lingsdosis van de omwonenden en het personeel van de mijn zo laag mogelijk blijft. Uit berekeningen blijkt dat de longdosis ongeveer 0,6 mSv bedraagt voor iemand die zich het hele jaar op 1 km afstand van de mijn bevindt. De lichaamsdosis bedraagt dan 0,1 mSv.

a. Schrijf de reeks vervalsvergelijkingen op van U-238 tot Ra-226 en daarna tot Rn-222. De benodigde gegevens kun je vinden in je tabellenboek.

b. Waarom is het gasvormige Rn-222 een groot gevaar voor mijnwerkers en omwonenden?

c. Vergelijk de bovengenoemde doses met de tabellen op blz. 20 en blz. 27. Wat is je conclusie?



Een injektie vcan 0,1 µg plutonium-239 per kg lichaamsgewicht is voldoende om ernstige bottumoren te veroorzaken. De röntgenfoto toont een door plutonium veroorzaakte bottumor bij een rat.

3. PLUTONIUM

Plutonium komt in de splijtstofcyclus in grote hoeveelheden vrij. Het ontstaat in de kernreactor als een U-238-kern een neutron invangt. Bij deze reactie worden twee elektronen uitgezonden. Plutonium is een uiterst gevaarlijke stof. Niet alleen kan men er kernwapens van maken, maar het is ook uiterst giftig. Een deeltje van één miljoenste gram kan bij inademing longkanker veroorzaken.

a. Schrijf de reactievergelijking op waarmee plutonium ontstaat.

b. Zoek in je tabellenboek op welke straling plutonium uitzendt en hoe groot de halveringstijd is. Schrijf de kernreactie bij het verval van plutonium op.

c. Waarom is plutonium juist bij inademing zo gevaarlijk?

d. Waarom zijn de veiligheidseisen juist in de opwerkingsfabriek zo ontzettend streng?

4. EEN TON BRANDSTOF

De energieopbrengst van een ton splijtstof kan vergeleken worden met die van een ton steenkool.

a. Hoeveel energie leveren de 3500 MWe kerncentrales jaarlijks?

b. Hoeveel ton splijtstof wordt er jaarlijks gebruikt? (Zie de illustratie van de splijtstofcyclus op blz. 43.)

c. Hoeveel elektrische energie kan met een ton splijtstof opgewekt worden?

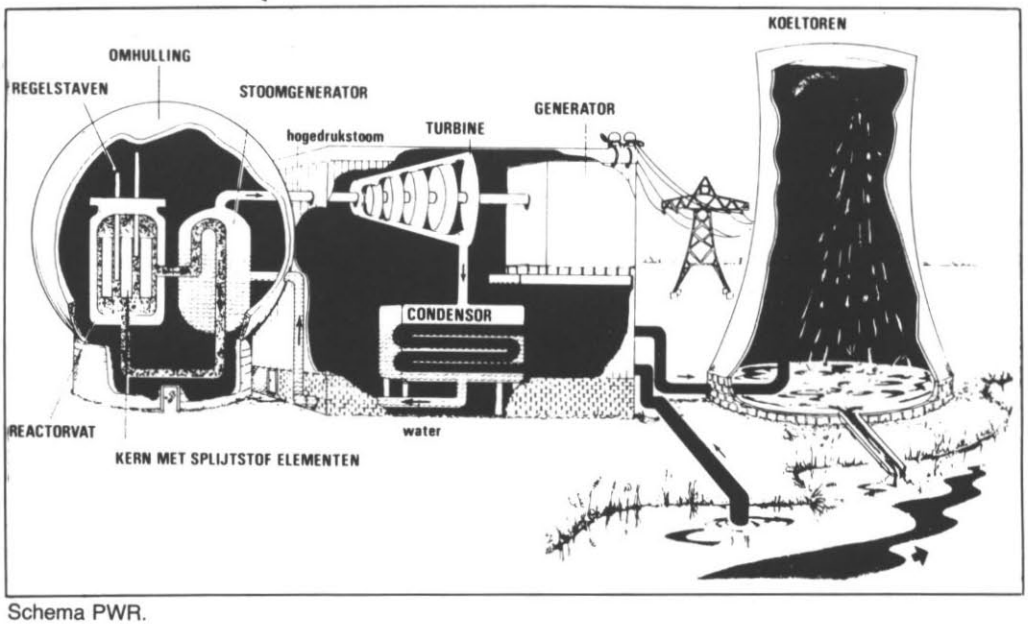
d. Steenkool heeft een verbrandingswarmte van $29 \cdot 10^6$ J/kg. Hoeveel elektrische energie komt er per ton steenkool vrij, als de centrale een rendement van 35% heeft?

e. Vergelijk je antwoorden bij 4c en 4d. Welke conclusie trek je?

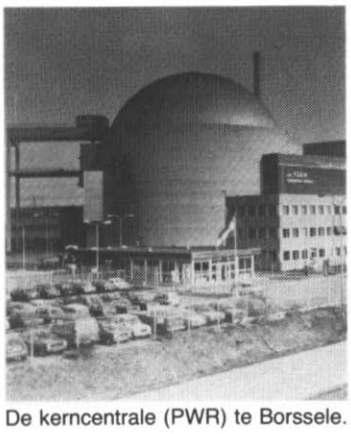
5.3 DE KERNCENTRALE

De kerncentrale speelt een centrale rol in de splijtstofcyclus. In 1981 waren over de hele wereld verspreid ongeveer 250 kerncentrales in dienst, die samen 1600 jaar gewerkt hadden. We spreken dan van een ervaring van 1600 *reactorjaren*. Er staan in Nederland twee verschillende reactortypen: een Pressurised Water Reactor (PWR) in Borssele en een Boiling Water Reactor (BWR) in Dodewaard. We bespreken in deze

paragraaf alleen de werking van een PWR. De veiligheidsaspecten komen in de volgende paragraaf aan de orde.



Schema PWR.



De kerncentrale (PWR) te Borssele.

In bovenstaande tekening is een PWR schematisch weergegeven. De *kern* met de *splijtstofelementen* is geheel onder water gedompeld. De snelle neutronen, die bij de splijting vrijkomen, botsen met de watermoleculen en verliezen daardoor een deel van hun energie. Het water doet hier dienst als *moderator*: het vertraagt de neutronen, waardoor die beter in staat zijn een nieuwe splijting te veroorzaken.
Het water in het reactorvat wordt verhit tot 317 °C. Het kookt niet, omdat de druk op het water zeer hoog is (157 atm). Een pomp laat het water circuleren in het *primaire koelcircuit*, waar het een deel van zijn energie afgeeft in de *stoomgenerator* en daarna weer als 'koud' water (287 °C) teruggepompt wordt in het reactorvat. In de stoomgenerator, die deel uitmaakt van het *secundaire koelcircuit*, wordt stoom onder hoge druk gevormd. Daarmee wordt een *turbine* aangedreven. De afgewerkte stoom condenseert tot water in de *condensor*, en wordt weer naar de stoomgenerator gepompt. De condensor wordt gekoeld door een *derde koelsysteem*. Het warme koelwater wordt geloosd in een rivier of plas of door een koeltoren geleid.

In het thema 'Energie en Kwaliteit' heb je gezien dat warmte niet voor 100% benut kan worden voor het verrichten van arbeid

regeling

De reactor wordt geregeld met *regelstaven*. Dit zijn staven van een neutronenabsorberend materiaal, bijv. cadmium. Zij kunnen in het reactorvat op en neer geschoven worden. Door de staven iets uit het reactorvat te trekken, stijgt het aantal splijtingen per seconde en gaat de reactor meer vermogen leveren. Als het gewenste vermogen bereikt is, moet men de regelstaven weer laten zakken. Als het vermogen verminderd moet worden, volgt men de omgekeerde weg.
Zelfs als de regelstaven plotseling geheel uit het reactorvat getrokken worden, zal er geen ontploffing volgen. Het aantal splijtingen per seconde zal zeer snel stijgen, waardoor er meer energie vrijkomt en de temperatuur van het koelwater snel stijgt. Hierdoor stijgt ook de snelheid van de neutronen. Een snel neutron heeft veel minder kans een splijting te veroorzaken en veel méér kans om ingevangen te worden door een U-238-kern. Daardoor wordt na enige tijd het aantal splijtingen per seconde weer constant, zij het bij een zeer hoge temperatuur.
De kans dat de regelstaven plotseling uit de reactor getrokken worden is nagenoeg nul.

5.4 RISICO EN VEILIGHEID

Bij de discussies over het al of niet inschakelen van kerncentrales voor de opwekking van elektrische energie speelt de veiligheid daarvan een belangrijke rol. Vaak wordt er dan alleen over de kernreactor gepraat, maar voor een juiste beoordeling van de risico's van kernenergie mogen de andere onderdelen van de splijtstofcyclus niet vergeten worden. In deze paragraaf wordt een aantal algemene aspecten van risico en veiligheid aan de hand van de kerncentrale behandeld. Bij het werken aan de opdrachten kunnen deze algemene aspecten toegepast worden op de andere onderdelen van de splijtstofcyclus.

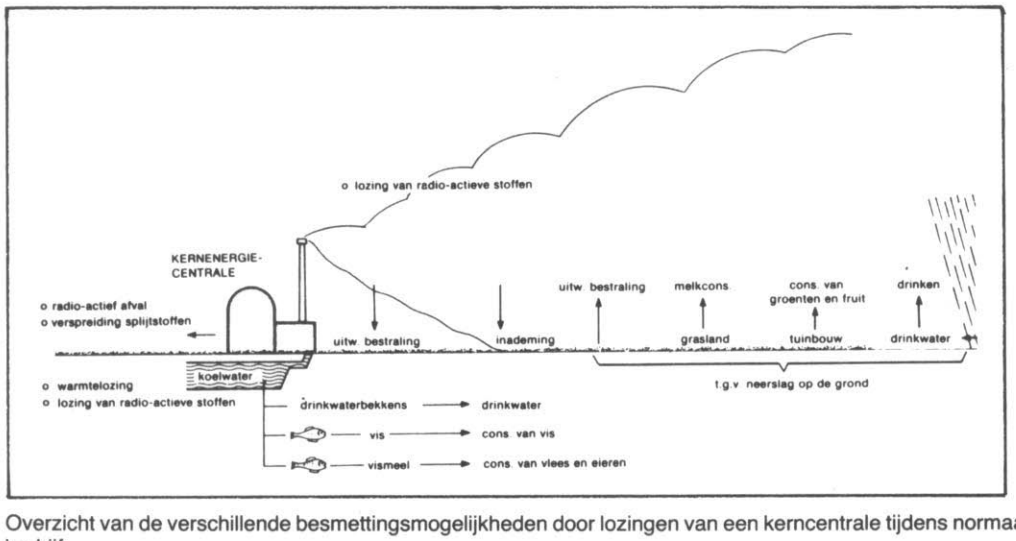
beveiliging

Bij de constructie van een kerncentrale is rekening gehouden met het neerstorten van een straaljager op het gebouw. Er mag dan geen radioactiviteit vrijkomen. Omdat geen rekening gehouden is met het neerstorten van een groot verkeersvliegtuig, mogen kerncentrales niet in de buurt van vliegvelden gebouwd worden.

De kernreactor is van een uitgebreid stelsel beveiligingen voorzien. De meeste daarvan zijn *automatisch* en dus niet afhankelijk van menselijke ingrepen. De beveiligingen zijn in het algemeen dubbel of driedubbel en volgens het *'fail-safe'*-principe uitgevoerd. Dat laatste houdt in dat bij storing in de beveiligingsapparatuur de kernreactie gestopt wordt. Dat laatste gebeurt door de regelstaven in de reactor te laten zakken. De splijtingsreactie stopt dan wel, maar door het verval van de grote aantallen radioactieve kernen in het reactorvat blijft een vrij grote hoeveelheid warmte vrijkomen. De koeling moet dus blijven functioneren, anders smelt de kern en bestaat de mogelijkheid dat deze door de bodem van het reactorvat zakt.

stralingsbelasting van de omgeving

Een kerncentrale loost bij normaal bedrijf een geringe hoeveelheid radioactieve stoffen in het milieu. De onderstaande figuur geeft een overzicht van de wegen waarlangs besmetting van de bevolking kan plaatsvinden.



Overzicht van de verschillende besmettingsmogelijkheden door lozingen van een kerncentrale tijdens normaal bedrijf.

De concentratie van de radioactieve stof kan in de voedselketen steeds groter worden. Déze acute effecten zijn overigens nog nooit waargenomen.

Via de schoorsteen worden voornamelijk radioactieve edelgassen (zoals krypton en xenon), jodium-131 en tritium geloosd. Met name de β-straler I-131 is daarbij van belang, omdat deze zich in de schildklier ophoopt. De radioactieve stoffen in het koelwater kunnen zich concentreren in vissen, waardoor besmetting via het voedsel kan optreden.
Het gebruik van kernenergie brengt een verhoging van de stralingsdosis voor de bevolking met zich mee. In de tabel op blz. 49 staan de dosislimieten die de Gezondheidsraad hiervoor heeft opgesteld. Daarbij wordt ook het maximaal aantal personen genoemd dat een dergelijke dosis mag ontvangen. De werkelijke stralingsbelasting blijft meestal ruim onder deze limieten. Daarbij mag echter niet vergeten worden dat men er van uit gaat dat er geen drempeldosis bestaat.

Oorzaak	aantal betrokken personen	maximale stralingsdosis (mrem/jaar)
lozing via de ventilatie-schacht		
gassen	60	0,5
vaste stoffen, neerslag op bodem	10	0,6
inhalatie halogenen	10	0,8 (schildklier)
neerslag halogenen-gras-melk	waarschijnlijk geen	10 (schildklier)
alle andere manieren van bestraling		< 0,1

De dosislimieten voor een totaal vermogen aan kerncentrales van 3500 MWe in Nederland bij normaal bedrijf.

ongelukken

Er is nauwelijks een maatschappelijk gebied te noemen waar zoveel veiligheidsstudies zijn verricht en waar zoveel veiligheidsmaatregelen zijn getroffen als op het gebied van de kernenergie. Toch gaat de discussie over de veiligheid van kernenergie gewoon door. Dat wordt veroorzaakt door het bijzondere karakter van de risico's: de *kans* dat er iets misgaat is erg gering, maar de *gevolgen* zijn zeer ernstig. Het beoordelen van dit risico is buitengewoon moeilijk door het ontbreken van een ruime ervaring. Men moet zich daarbij dan ook, zowel bij de kans als bij het gevolg, baseren op *schattingen*.

Bij de schatting van de gevolgen gaat men uit van het *ergst denkbare ongeval*. Bij een PWR neemt men daarvoor een breuk in de hoofdleiding van het primaire koelsysteem. Men maakt daarna schattingen van de hoeveelheid radioactiviteit die vrijkomt en van de verspreiding daarvan. Op grond daarvan maakt men schattingen van de schade aan het milieu, van het aantal doden en gewonden, besmetting van de bodem enz.

Een probleem hierbij is de keuze van het ergst denkbare ongeval. Sommigen zijn bijv. van mening dat bij een PWR een breuk van het reactorvat niet uitgesloten mag worden. Bij een dergelijk ongeval zijn de schattingen van de gevolgen ernstiger dan bij een breuk in de hoofdleiding van het primaire koelsysteem. Afhankelijk van de keuze van het ergst denkbare ongeval lopen de schattingen van de gevolgen dus nogal uiteen. Maar in beide gevallen zijn die gevolgen ernstig te noemen.

Bij de schatting van de kans op een ongeval bepaalt men de kans op falen van elk onderdeel van de centrale apart. Die kansen worden gecombineerd, om zo te komen tot de faalkans van het geheel. In onderstaand kader wordt daarvan een voorbeeld gegeven.

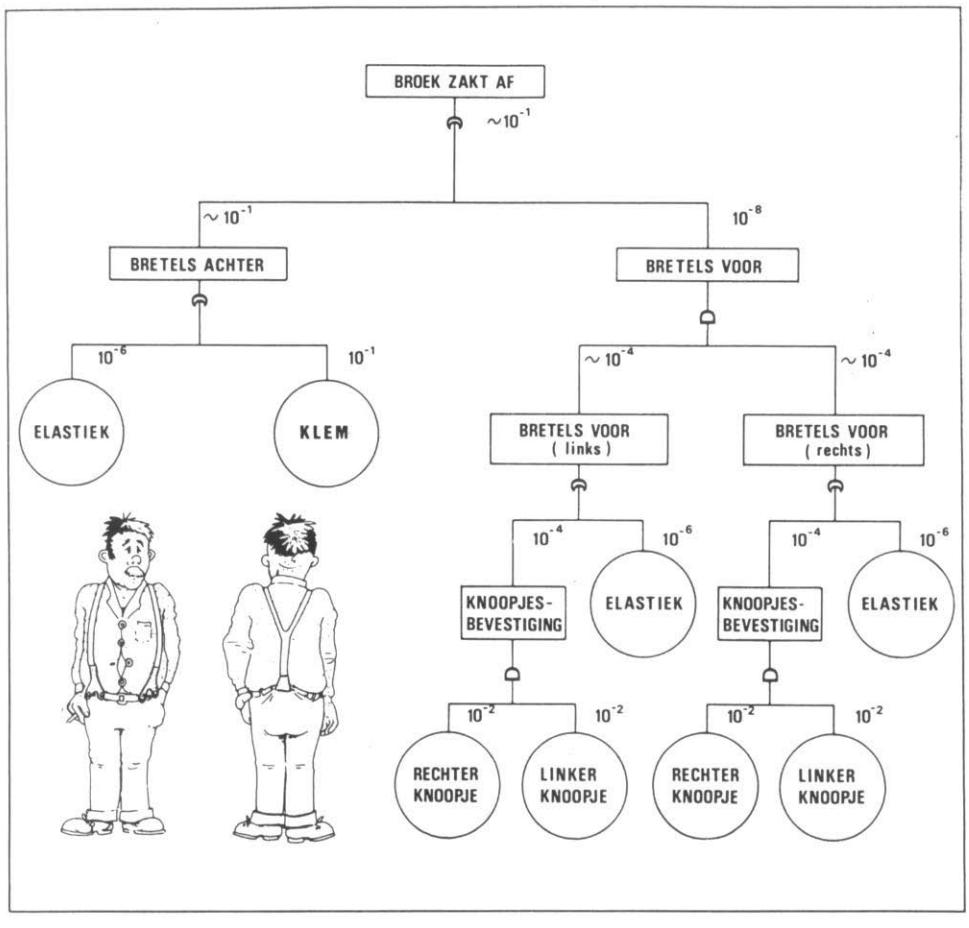
De Technische Hogeschool Twente heeft een studie gemaakt van de gevolgen van een groot ongeluk met een kerncentrale op de Maasvlakte bij Rotterdam. Op deze kaart zie je binnen lijn b het gebied met een onaanvaardbaar hoog stralingsniveau, één jaar na het ongeluk. Aangenomen is dat het tijdens het ongeluk regende en de wind uit het zuidwesten kwam.

DE MAN MET DE BRETELS

Bij het nagaan van de kans op het optreden van een bepaalde gebeurtenis wordt vaak een *foutenboomanalyse* gemaakt. Een foutenboomanalyse is een systematisch onderzoek naar de manier waarop een bepaalde gebeurtenis, bijv. een breuk in de hoofdleiding van het primaire koelsysteem van een PWR, kan ontstaan. In het geval dat we hier bekijken is de gebeurtenis: het afzakken van een broek (zie blz. 50).

De broek zal zeker afzakken als de bretels voor *óf* achter falen. Er zijn dus twee mogelijkheden, hetgeen aangegeven wordt met een ∩-teken. Het falen van de bretels vóór leidt alleen tot het afzakken van de broek als dat links *én* rechts gebeurt. Als beide moeten falen, voordat de broek afzakt, wordt dat aangegeven met een ∪-teken. De fouten in het ophangmechanisme, die bijdragen tot het afzakken van de broek, kunnen zo systematisch in kaart gebracht worden. Zo falen bijv. de bretels achter als óf het elastiek breekt óf de klem loslaat. Stel dat het elastiek gemiddeld breekt na 1 miljoen keer dragen. De kans op die breuk bedraagt dan 1 op 1 miljoen (10^{-6}). Toch zal de broek 1 op de 10 keer afzakken door het falen van de achterste bretels. Dat wordt veroorzaakt door de klem die 1 op de 10 keer loslaat. De kans dat de broek afzakt door het falen van de voorste bretels blijkt veel kleiner te zijn (10^{-8}). Dat komt omdat de kans dan één van de

voorste bretels faalt maar 10^{-4} is en ze beide moeten falen voordat de broek afzakt.



De foutenboomanalyse wijst daarmee uit dat de klem de zwakke plek is in het hele systeem. Bij het maken van een dergelijke foutenboomanalyse moet er wel voldoende ervaring met het systeem opgedaan zijn. Een dergelijke analyse kan niet gemaakt worden nadat men tien keer in een broek met bretels heeft rondgelopen. Bij heel kleine kansen, zoals een kans van 10^{-6} op het breken van het elastiek, werkt men vaak met schattingen. Bij een foutenboomanalyse van een kerncentrale wordt er daardoor veel met schattingen gewerkt. Over de juistheid van die schattingen verschilt men vaak van mening.
Ook bestaat er bij de grotere systemen, zoals een kernreactor of een raketmotor, een grotere kans dat men een weg waarlangs iets fout kan gaan, vergeet of weglaat. Zo wordt bij de kerncentrale meestal de mogelijkheid van sabotage of slordigheid uitgesloten. In onze analyse vergeten we dat een broek ook afzakt als de bretels van je schouders glijden. Foutenboomanalyses zijn vaak een handig hulpmiddel, maar de beperkingen ervan mogen niet vergeten worden.

Drie mensen besmet met radioactiviteit in Belgische centrale

BRUSSEL (ANP) — In de kerncentrale bij het Belgische Tihange aan de Maas tussen Namen en Luik zijn in het afgelopen weekeinde drie mensen met radioactiviteit besmet. Dat is maandag bekend geworden.

Ook op 27 april kregen twee mensen in Tihange een overdosis straling. Zes jaar geleden deed zich in deze centrale hetzelfde voor bij zes mensen. Ze ademden radioactief gas in.

Zaterdag werd een man met radioactief stof besmet toen hij zijn gezichtsmasker te vroeg afzette. Zondag ademden twee mensen radioactief stof in toen zij tegen de voorschriften in geen gezichtsmasker.

Volgens de directie van de kerncentrale is de dosis radioactiviteit, waaraan de leden van de onderhoudsploeg werden blootgesteld, niet fataal geweest. Deskundigen van buiten de centrale zullen nagaan of de mededelingen van de directie correct is.

de Volkskrant 8-5-1984.

De schattingen die gemaakt worden, hebben betrekking op het technische deel van de kerncentrale. Ook aan de mensen die ermee omgaan, worden hoge eisen gesteld. De kleine kans dat er echt iets misgaat, maakt het moeilijk blijvend de benodigde waakzaamheid op te brengen. Eén van de oorzaken van het ongeval in Harrisburg (zie opdracht 2 op blz. 51) was dan ook de overtuiging van het personeel, dat er met kerncentrales toch niets mis kan gaan.

In hoofdstuk 8 gaan we verder in op de beoordeling van de aanvaardbaarheid van de risico's bij kernenergie.

literatuuronderzoek

1. DE BOILING WATER REACTOR

In Dodewaard staat een kleine reactor van dit type.

- Zoek een schema van een BWR en ga na waarin deze van een PWR verschilt.
- Ga ook na of er verschillen zijn in veiligheid en in uitstoot van radioactieve stoffen.

literatuuronderzoek

2. HARRISBURG

In 1979 ontstond er in de kerncentrale Three Mile Island 2 nabij de stad Harrisburg in de Verenigde Staten een ernstige stituatie. Door het uitvallen van het primaire koelsysteem dreigde de reactorkern te smelten. Men vreesde een explosie, waarbij veel radioactiviteit zou vrijkomen. De stad werd geëvacueerd en dagen lang beheerste Harrisburg het nieuws. Uiteindelijk kreeg men de reactor onder controle en konden de bewoners naar hun huizen terugkeren.

Dit ongeluk heeft vele discussies over de veiligheid van kernenergie losgemaakt; er is zelfs een film over gemaakt.

- Beschrijf wat er precies in Harrisburg gebeurde en wat er allemaal mis ging. Welke invloed had het ongeluk op de omgeving? Wat waren de uiteindelijke gevolgen?
- Enerzijds wordt er gezegd: 'Het is gebleken hoe onveilig kernenergie is. Ondanks alle voorzorgsmaatregelen kan er toch nog zoveel misgaan, dat de bevolking aan gevaar wordt blootgesteld'.

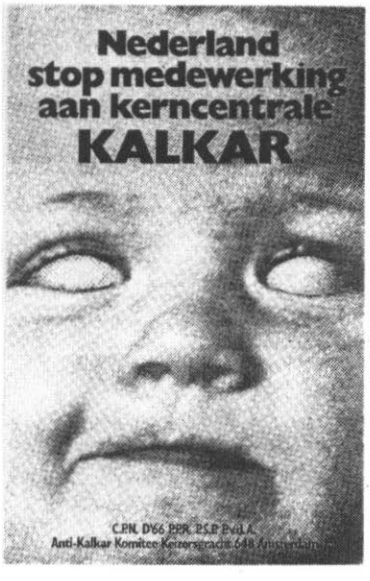
Anderen stellen daarentegen: 'Hier is gebleken hoe veilig kernenergie is. Ondanks alle fouten die er gemaakt zijn, is er door de ingebouwde veiligheidsvoorzieningen zo goed als geen radioactiviteit naar buiten gekomen en geen mens heeft een ontoelaatbare stralingsdosis opgelopen'.

Bespreek beide argumenten. Welk standpunt spreek je het meeste aan? Waarom?

literatuuronderzoek

3. DE SNELLE KWEEKREACTOR

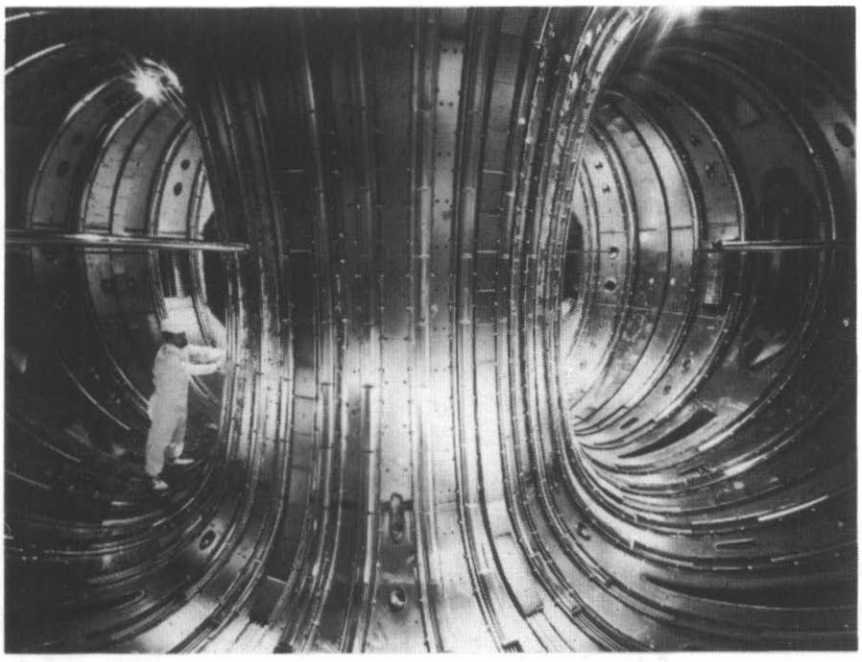
Vlak over de grens met West-Duitsland wordt in Kalkar al jaren gebouwd aan een nieuw type kernreactor. Deze reactor werkt niet met langzame, maar met *snelle* neutronen. De reactor zal volgens de verwachtingen *méér splijtstof produceren dan hij zelf verbruikt*. Daarom luidt de naam ook *snelle kweekreactor*. De constructie van deze reactor wijkt sterk af van de PWR die in dit hoofdstuk aan de orde is gekomen.



Een anti-Kalkar affiche.

Er bestaat al jaren lang zeer fel verzet tegen de bouw van deze reactor, waardoor men al enkele jaren op het bouwschema achter loopt. Ook is de begroting ervan reeds vele malen overschreden. Nederland betaalt een deel van de kosten van deze reactor.

- Zoek een schema van deze snelle kweekreactor op, en ga na welke de belangrijkste verschillen zijn met de PWR.
- Waarom is de bouw van dit type centrale voor de verdere ontwikkeling van de kernenergie van zeer groot belang?
- Waarom is er juist tegen deze reactor zo'n fel verzet?



Het onderzoek naar kernfusie is, net als dat naar elementaire deeltjes, erg kostbaar en daardoor sterk internationaal gericht. De foto toont de binnenkant van de Joint European Torus, waar kernfusie plaats zal moeten vinden bij een temperatuur van 100 miljoen °C. (foto: JET Joint Undertaking.)

literatuuronderzoek

4. KERNFUSIE

Kernfusie is een geheel andere vorm van kernenergie dan kernsplijting. Bij kernfusie worden twee lichte kernen tot één samengevoegd. Net als bij de splijting van een zware kern treedt ook hier een massadefect op en komt er energie vrij. Er wordt veel onderzoek gedaan naar kernfusie en sommigen hebben er zeer hoge verwachtingen van. Ze stellen dat fusie veel veiliger is dan splijting, minder stralingsbelasting van de omgeving veroorzaakt en dat ook de afvalproblemen veel kleiner zijn.

- Hoe werkt een experimentele kernfusieopstelling?
- Ga na hoe kernfusie in zijn werk gaat en waarom dat zo moeilijk te realiseren is. Hoe zijn de toekomstverwachtingen?
- Waarom denkt men dat fusie veiliger is en minder radioactief afval veroorzaakt dan splijting?

literatuuronderzoek

5. VERRIJKING

In dit hoofdstuk zijn twee verschillende manieren van verrijking genoemd. Zoek voor één van de twee wat meer informatie op.

- Hoe werkt een dergelijke installatie precies?
- Waar in Europa staan ze? Wie is de eigenaar ervan?
- Loost de fabriek radioactieve stoffen in het milieu?

literatuuronderzoek

6. OPWERKING

De opwerkingsfabriek in Windscale.

In Europa staan opwerkingsfabrieken in La Hague in Frankrijk en in Windscale in Engeland. De fabrieken worden geteisterd door bedrijfsongevallen en voldoen niet aan de verwachtingen.

- Waarom is dat opwerken eigenlijk nodig?
- Ga na hoe de verwerking van de splijtstofelementen plaatsvindt en welke maatregelen genomen zijn om een besmetting met radioactieve stoffen te voorkomen.
- Veroorzaken de ongelukken in deze fabrieken een verhoogde stralingsbelasting van het personeel en de omgeving? Vergelijk de lozing van radioactieve stoffen met die van een kerncentrale.

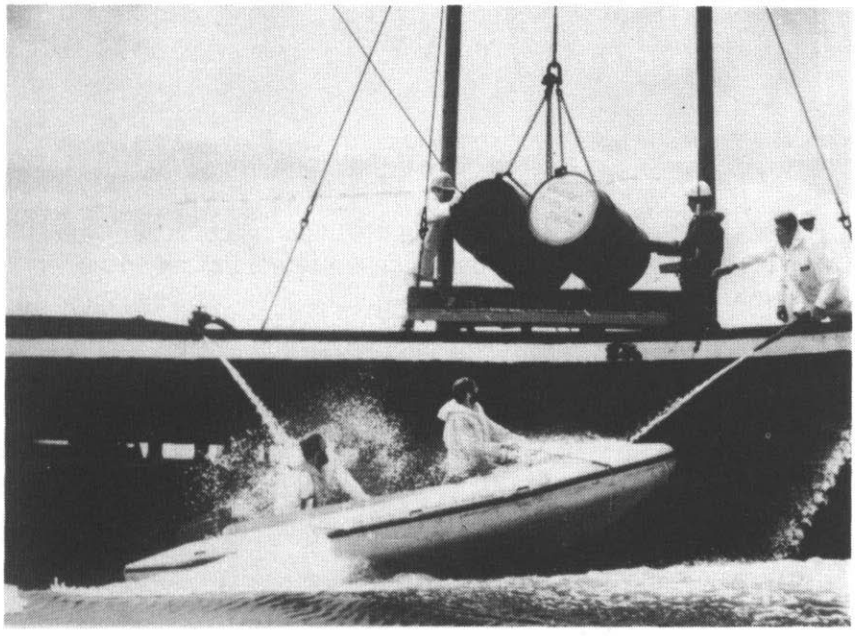
literatuuronderzoek

7. DE OPSLAG VAN KERNSPLIJTINGSAFVAL

De opslag van kernsplijtingsafval vormt één van de grootste problemen bij het gebruik van kernenergie. De hoge activiteit, de samenstelling van het afval en de lange halveringstijd van sommige isotopen stellen zeer hoge eisen aan de opslagplaats. Nederland komt voor dit probleem te staan als over een aantal jaren het afval van de opgewerkte splijtstof naar ons land teruggestuurd wordt.

- Ga na aan welke eisen een opslagplaats moet voldoen.

• Men heeft wel eens voorgesteld het afval met een raket naar de zon te schieten. Waarom vindt niet iedereen dat een goed idee? Welke mogelijkheden worden nog meer genoemd voor de opslag?
• Naar welke opslagmogelijkheden wordt op het ogenblik onderzoek gedaan? Hoe verloopt dat onderzoek? Zijn er al resultaten bekend?
• Sommigen zijn van mening dat een opslagplaats nooit aan de eisen kan voldoen. Voor geen enkele plaats kan gegarandeerd worden dat het afval er ongestoord enkele honderdduizenden jaren bewaard kan blijven. Wat vind je van dit standpunt?



Green Peace verzet zich tegen de dumping van radioactief afval (MAVA en LAVA) in zee.

literatuuronderzoek

8. DUMPING IN ZEE
De dumping van LAVA en MAVA in zee is zeer omstreden. De voorstanders zijn van mening dat de getroffen maatregelen ruim voldoende zijn. De tegenstanders zijn het daar grondig mee oneens. Green Peace bestreed de dumping door met rubberboten te varen onder de hijskranen waarmee het afval overboord gezet wordt. De NRC schreef bij de foto hiernaast 'Held of Don Quichote', wat het dilemma illustreert.
• Welke maatregelen worden genomen om te voorkomen dat het afval zich in het water zal verspreiden?
• Welke argumenten gebruiken de voor- en tegenstanders van dumping in zee? Welke argumenten spreken je het meest aan?

hoofdstuk 6

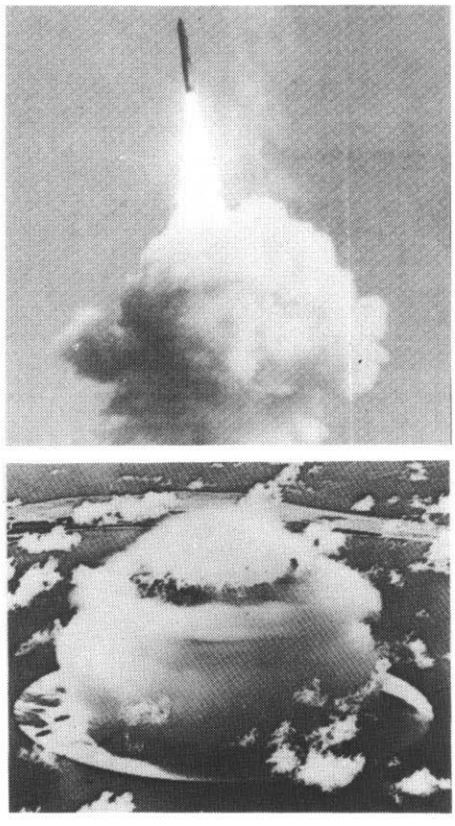
KERNWAPENS

inhoud blz.

6.1 kernwapens: bijzondere wapens 55
6.2 onmiddellijke effecten van een kernexplosie 56
6.3 effecten op langere termijn 59
6.4 mogelijkheden tot bescherming 60

kernwapens

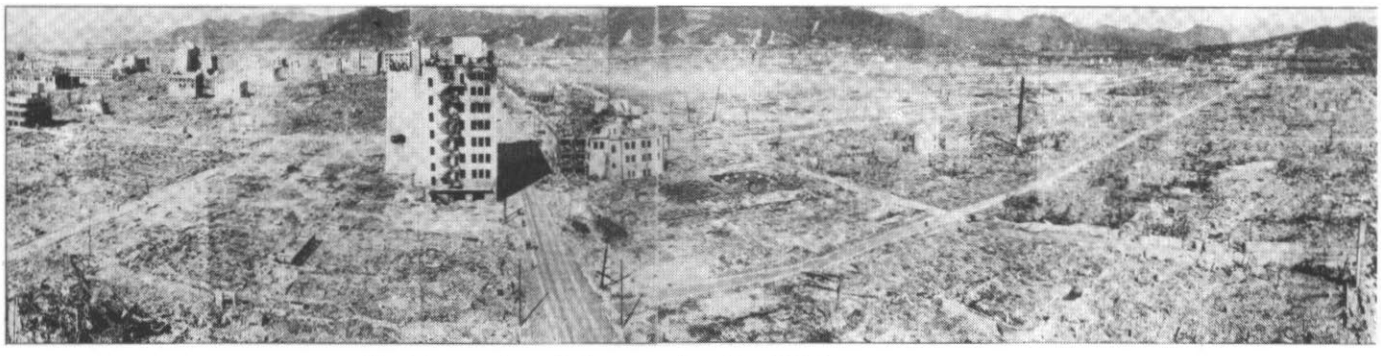
In aanvulling op paragraaf 4.4 biedt dit hoofdstuk nieuwe informatie over kernwapens. Beschreven wordt wat voor soorten kernwapens er zijn, hoe ze worden getransporteerd en in welk opzicht kernwapens uitzonderlijk zijn in vergelijking met conventionele wapens. Daarna wordt ingegaan op de effecten van kernexplosies op korte en lange termijn, dichtbij en veraf.
Tenslotte gaan we in op de vraag of bescherming tegen kernwapens mogelijk en gewenst is.



In de paragrafen 6.1, 6.3 en 6.4 vind je een aantal opdrachten. Het is de bedoeling dat je één (of meer) van die opdrachten uitkiest. Voor de verwerking van de gekozen opdracht(en) zul je een aantal informatiebronnen moeten aanboren: boeken, brochures, folders enz. of mensen die bij bepaalde instellingen werken. Het gaat daarbij dus om een *literatuuronderzoek* of om informatie verzamelen via een *interview*. Als je kiest voor informatie verzamelen via een interview, bedenk dan dat je tijdig afspraken maakt voor een bezoek.

6.1 KERNWAPENS: BIJZONDERE WAPENS

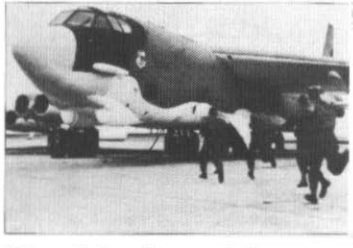
Wapens die gebruik maken van explosies, spelen al eeuwen lang een belangrijke rol in het uitvechten van geschillen tussen mensen, groeperingen en staten. Door de uitvinding van kernwapens zijn de wapenarsenalen aangevuld met een nieuw type explosief wapen, dat in een aantal opzichten verschilt van conventionele explosieven.
Een eerste bijzondere eigenschap van kernwapens is het onvoorstelbare vernietigingsvermogen. In de bom die Hiroshima in 1945 verwoestte, werd feitelijk niet meer dan 1 kg uranium-235 gespleten. Daarbij kwam een energie vrij die te vergelijken is met die van zo'n 14 miljoen kg TNT. De achtergrond hiervan is dat de energie die bij de splijting van een atoomkern optreedt ruim een miljoen maal groter is dan de energie die bij een chemische reactie tussen atomen vrijkomt. Conventionele explosieven ontlenen hun effect aan chemische reacties.



Hiroshima na de explosie van de kernbom (1945).

Een tweede kenmerk van kernwapens is het optreden van kernstraling, zowel directe straling tijdens de explosie als latere straling door de fallout van de gevormde radioactieve stoffen. Deze fallout zorgt ervoor dat de effecten op grotere afstand en gedurende langere tijd te merken zijn dan bij conventionele explosieven het geval is.
Een derde verschil met conventionele wapens is dat kernwapens (nog) niet gemakkelijk te maken of vrij te koop zijn in de wapenhandel. Slechts enkele landen beschikken nu over kernwapens: de Verenigde Staten, de Sovjet-Unie, Engeland, Frankrijk, China en India. Diverse andere landen (waaronder ook Nederland) zijn technisch in staat zich bij deze landen aan te sluiten.

overbrengingsmiddelen



Bij groot alarm kunnen de bommenwerpers zeer snel opstijgen om zo aan een raketaanval te ontkomen. De bommenwerpers zijn geladen met kernwapens.

Kernwapens kunnen over grote afstanden worden vervoerd. Sinds de tweede wereldoorlog wordt veel onderzoek gedaan ten behoeve van de ontwikkeling van snelle, trefzekere en moeilijk tegen te houden overbrengingsmiddelen: vliegtuigen of raketten. Deze laatste kunnen worden afgeschoten vanuit onderzeeboten of vanaf bases op het land. Elke raket kan één of meer kernbommen dragen.
De trefzekerheid is de laatste jaren sterk opgevoerd. Om de trefzekerheid aan te geven gebruikt men de grootheid *CEP* (Circular Error Probable). Dit is de straal van de cirkel om het doelwit waarbinnen de helft van de er op afgevuurde projectielen terecht zal komen. In de jaren '60 was de CEP enkele kilometers. In de jaren '80 is de CEP verkleind tot enkele tientallen meters.

literatuuronderzoek

1. SOORTEN KERNWAPENS
In artikelen over kernwapens vallen termen als zware en lichte wapens, vuile en schone bommen, A-, H- en N-bommen. Zoek in de literatuur informatie over de betekenis van deze termen. Maak gebruik van natuurkundige begrippen om de betekenis van deze termen toe te lichten.

literatuuronderzoek

De laatste hand wordt gelegd aan een kruisraket.

2. SOORTEN OVERBRENGINGSMIDDELEN

Onderstaand lijstje bevat een aantal namen van overbrengingsmiddelen van kernwapens.

- Zoek uit wat elk van de namen betekent.
- Ga na of je informatie kunt vinden over het bereik, de snelheid, richtnauwkeurigheid (CEP), onderschepkans, het aantal kernkoppen dat ze kunnen vervoeren, gestationeerd aantal en ontwerpjaar.
- Orden deze raketten en vliegtuigen naar bereik (kort, middenlang, lang) en naar het land dat er over beschikt.

Lance	Pluton	F-16	SS-4
SS-20	Badger	Mirage	SS-5
Pershing-2	MIRV	Houwitzer	ABM
Kruisraket	Delta SLBM	Polaris SLBM	Vulcan
Trident SLBM	Backfire		

literatuuronderzoek

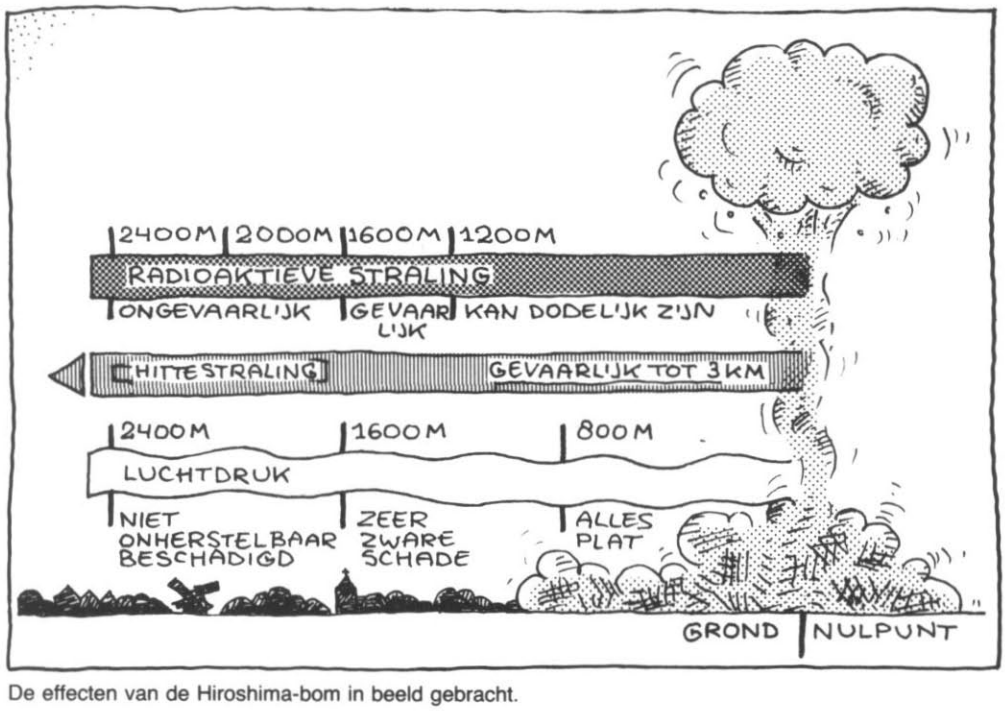
3. GEVOLGEN VAN EEN KLEINERE CEP

Door sommigen wordt gesteld dat de grotere richtnauwkeurigheid (dus kleinere CEP) de kansen op een kernoorlog vergroot.

- Leg uit wat men hiermee bedoelt.
- Zou het aantal slachtoffers onder de bevolking toe- of afnemen door een kleinere CEP?

6.2 ONMIDDELLIJKE EFFECTEN VAN EEN KERNEXPLOSIE

Met de onmiddellijke gevolgen van een kernexplosie bedoelen we de gevolgen binnen één minuut. Tot deze eerste effecten rekenen we: *hittestraling, drukgolf, directe kernstraling* en de *elektromagnetische puls*. Beide eerstgenoemde effecten treden ook op bij gewone explosies; bij een kernbom zijn de gevolgen wel veel heviger. Elk van de effecten zullen we wat nader beschrijven, met uitzondering van de directe kernstraling die in paragraaf 4.4 al aan de orde is gekomen.



De effecten van de Hiroshima-bom in beeld gebracht.

hittestraling
Onmiddellijk na de kernexplosie ontstaat een vuurbal die zeer fel licht geeft. Afhankelijk van de ontploffingskracht kan deze lichtflits 1 tot 10 seconde duren. Ook op grote afstand is deze flits vele malen feller dan het licht van de zon. Het kijken naar de vuurbal kan dan ook tijdelijke of blijvende blindheid veroorzaken door verbranding van het netvlies van het oog.
Verder kunnen verbrandingen van de huid optreden die veel ernstiger zijn dan wanneer je lang in de zon hebt gezeten. De enorme intensiteit van de lichtflits kan ook branden veroorzaken, vooral door het ontvlammen van kleding, papier, droge bladeren en hout.

drukgolf
Door de kracht van de ontploffing van een kernbom neemt de luchtdruk plotseling sterk toe. Deze plotselinge overdruk verspreidt zich in alle richtingen met een snelheid van ongeveer 400 m/s, en wordt gevolgd door een sterke wind. De gevolgen van deze drukgolf zijn samengevat in de tabel hieronder.

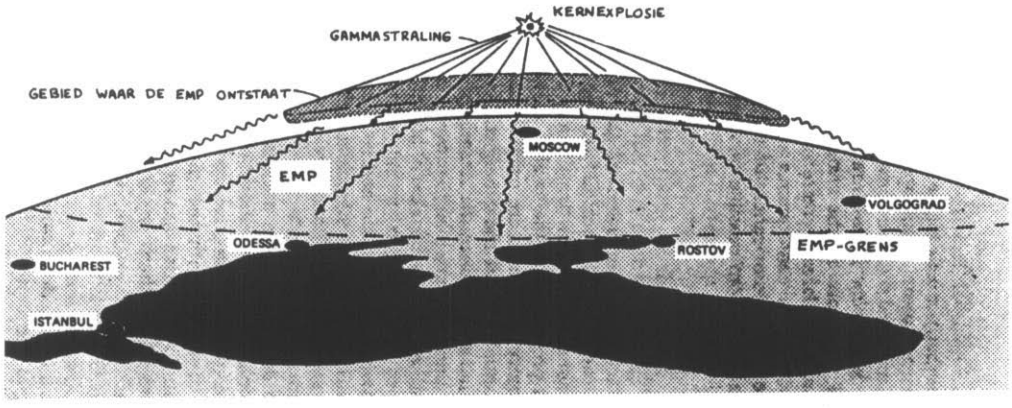
Twee slachtoffers van de ontploffing boven Hiroshima.

Overzicht van de effecten van een drukgolf. (De getallen gelden voor een 1 Mt bom, die op 2 km hoogte ontploft.)

maximale overdruk (in atm.)	effecten	afstand waarover effecten optreden (in km)
1,4	• hoge betonnen gebouwen volkomen vernield • windsnelheid 800 km/h	3
0,7	• meeste fabrieken, kantoorgebouwen en huizen storten in • windsnelheid 500 km/h	4,3
0,35	• stenen huizen vernield, overige gebouwen beschadigd • windsnelheid 250 km/h	6,4
0,14	• beperkte schade aan huizen • mensen gewond door rondvliegend glas en voorwerpen • windsnelheid 110 km/h	11,2
0,07	• matige tot lichte schade	16

Het menselijk lichaam kan op zichzelf wel een hoge druk weerstaan. Tot 1 atm. overdruk treedt alleen lichte schade op (zoals het springen van trommelvliezen). Pas boven de 2,5 atm. is de overdruk dodelijk.
De meeste slachtoffers van de overdruk vallen door indirecte effecten zoals instortende gebouwen en rondvliegende stukken glas en andere brokstukken. Bovendien kunnen veel mensen omkomen in branden die ontstaan omdat de drukgolf vernielingen aanricht aan CV-ketels, gasleidingen, brandstoftanks en elektrische installaties.

elektromagnetische puls
Bij de explosie van een kernwapen komt een hoeveelheid elektromagnetische straling vrij gedurende een zeer korte tijd. Je kunt het vergelijken met een kort radiosignaal, maar dan wel miljoenen malen sterker. We noemen dit de *elektromagnetische puls* (EMP). Deze EMP is niet schadelijk voor mensen, maar heeft wél een verwoestende werking op elektronische onderdelen die maar kleine stromen kunnen verwerken, zoals transistors en chips.
De hoogte waarop de kernbom ontploft, is van groot belang voor de omvang van het gebied waarin de EMP werkt: hoe hoger, des te groter het gebied. De gevolgen van de EMP zijn het uitvallen van telefoon, radio en TV en beschadiging van elektronische schakelelementen. Afdoende bescherming is zeer kostbaar.



De invloedssfeer van de EMP van een (kleine) kernbom van 24 kton TNT, die op een hoogte van 400 km tot ontploffing komt boven Kiev/Moskou.

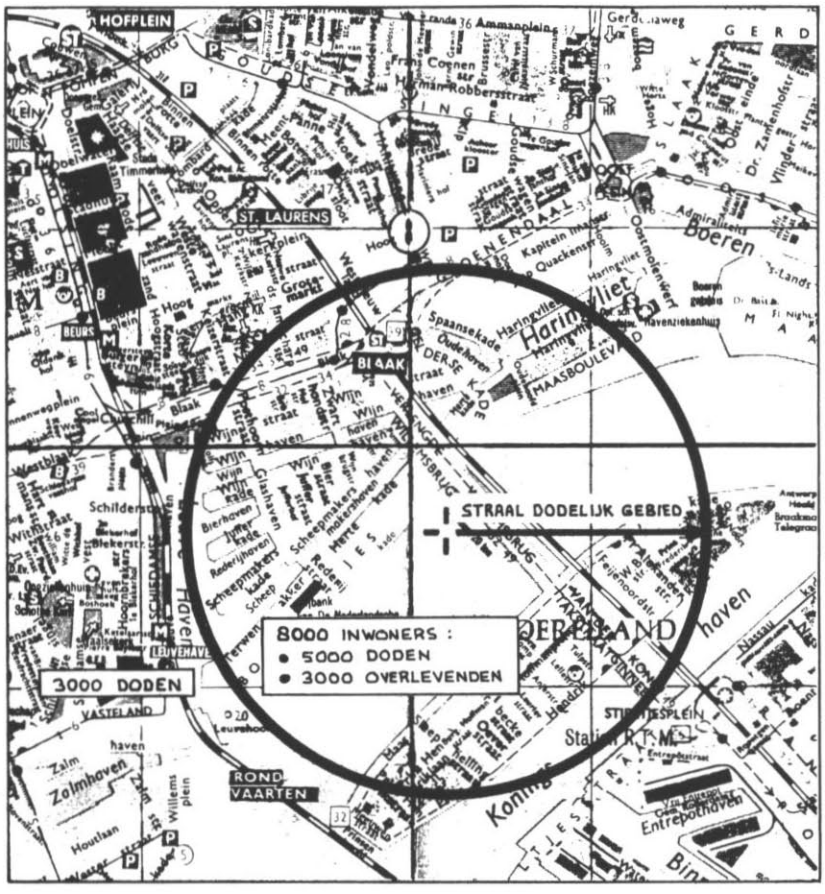
In het voorgaande hebben we heel globaal gesproken over de vier directe effecten van een kernexplosie. De grootte van het aantal slachtoffers van de eerste effecten (hitte, druk en straling) hangt van een heleboel dingen af. Om er een aantal te noemen: de ontploffingskracht van de kernbom, de hoogte waarop de bom explodeert, de weersomstandigheden, de bevolkingsdichtheid, de tijd van de dag en de voorzorgsmaatregelen die voor de bevolking zijn getroffen. De volgende aktiviteiten gaan wat dieper in op enkele van de genoemde punten.

1. DODELIJKE GEBIEDEN

De ontploffingskracht van de meeste kernbommen ligt tussen de 1 kt en de 10 Mt. We gaan de verschillende effecten nu vergelijken voor bommen in dit bereik. Een maat voor het aantal slachtoffers is het *dodelijk gebied*. Het totaal aantal doden is gelijk aan het aantal mensen dat in dat gebied woont. Je moet echter wel bedenken dat in werkelijkheid ook *buiten* dit gebied slachtoffers vallen, terwijl sommige mensen *binnen* dit gebied overleven (zie de figuur op blz. 59).
In de tabel hieronder geven we de straal aan van de dodelijke gebieden per effect en per bomsterkte.

effect	straal (in km) van het dodelijk gebied als gevolg van directe effecten van kernexplosies				
	1 kt	10 kt	100 kt	1 Mt	10 Mt
druk	0,7	1,25	2,4	4,7	10,0
hitte	0,65	1,9	4,9	11,2	22,4
straling	1,00	1,35	1,9	2,6	4,1

a. Welk effect wordt het snelst groter bij toenemende ontploffingskracht?
b. Kun je een reden bedenken waarom de invloed van kernstraling zo weinig toeneemt wanneer de ontploffingskracht steeds groter wordt?
c. Bij een toename van de ontploffingskracht met een factor 1000 (bijv. van 1 kt naar 1 Mt), lijkt het effect veel minder snel toe te nemen. De straal van het dodelijk gebied als gevolg van hitte bijv. neemt dan slechts met ongeveer een factor 20 toe (van 0,65 naar 11,2 km). De toename van het effect wordt duidelijker als je het *oppervlak* van het dodelijke gebied bekijkt.
Bereken de oppervlakken van de dodelijke gebieden voor de drie effecten bij ontploffingskrachten van 1 kt en 1 Mt. (Gebruik het gegeven dat de oppervlakte van een cirkel met een straal r gelijk is aan $\pi \cdot r^2$.)
Met welke factoren nemen de oppervlakken van de dodelijke gebieden toe, bij een toename van de ontploffingskracht met een factor 1000?



Het dodelijke gebied bij een kernbomexplosie. De aangegeven getallen zijn een willekeurig voorbeeld.

2. LOKALE GEVOLGEN VAN EEN KERNEXPLOSIE

a. Maak een copie van een kaart van de omgeving van je woonplaats (tenminste 35 bij 35 km). Kies een plaats op de kaart dat als doelwit zou kunnen dienen (bijv. militaire basis, elektriciteitscentrale, belangrijke fabriek, vliegveld).

b. Teken op de kaart met een passer de cirkel waarbinnen hoge betonnen gebouwen volkomen vernield worden als gevolg van de drukgolf bij een ontploffing van een 1 Mt bom op 2 km hoogte. Teken ook de cirkels voor de andere effecten van de drukgolf. (Gebruik de gegevens in de tabel op blz. 57.)

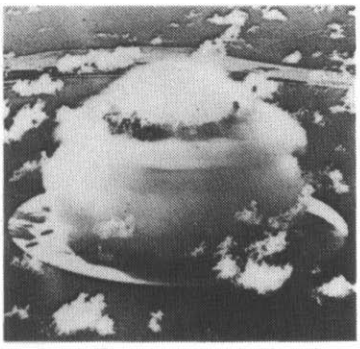
c. Ga na wat de gevolgen zijn voor wijken, dorpen, belangrijke gebouwen, natuurgebieden, dijken enz. binnen elk van de cirkels. Hoeveel slachtoffers denk je dat er vallen?

d. Bereken de duur van de tijdsperioden tussen het moment van explosie, het waarnemen van de lichtflits en van de drukgolf op een afstand van 11,2 km.

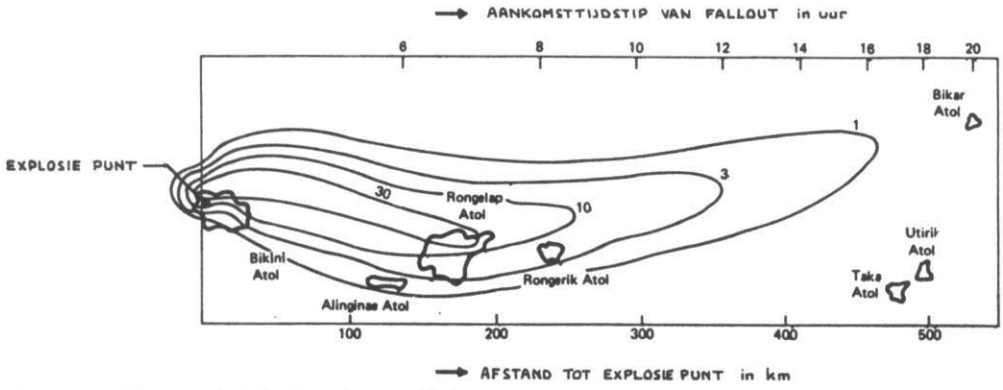
6.3 EFFECTEN OP LANGERE TERMIJN

In paragraaf 4.4 hebben we al gezien op welke manieren *fallout* wordt gevormd. Dit is een van de belangrijkste effecten op langere termijn.
Tussen het moment van de explosie en het neerkomen van de eerste fallout verlopen ongeveer 30 minuten. De grootste deeltjes komen het eerst op de grond, de kleinste blijven lang in de lucht. De windrichting en -sterkte spelen natuurlijk een belangrijke rol.

Als voorbeeld nemen we het fallout-patroon van de proefontploffing van een 15 Mt waterstofbom op het atol Bikini in de Stille Oceaan op 1 maart 1954. De cijfers in het fallout-patroon op blz. 60 geven de opgelopen stralingsdosis in Sv in de eerste vier dagen na de ontploffing.



De ontploffing van een 15 Mton fusiebom (een zware bom) op het atol Bikini.



De verspreiding van de fallout na deze explosie.

Op drie manieren kan de fallout schade toebrengen aan het menselijk lichaam:
– *uitwendige* bestraling door radioactieve deeltjes op de huid, in kleren en in schoeisel;
– *inwendige* bestraling door het inademen van radioactieve deeltjes;
– *inwendige* bestraling door het eten en drinken van voedsel en drank waarin zich radioactieve deeltjes bevinden.
Deze straling is dus langdurig en kan vooral gevolgen hebben op langere termijn: leukemie, kanker of schade voor het nageslacht.

Voor de effecten op langere termijn is het van belang ook in overweging te nemen wat de gevolgen zijn van een *kernoorlog*. Het gaat dan om een groot aantal explosies en niet om slechts één zoals we tot nu toe hebben gezien.
Effecten van een kernoorlog zullen zijn:
– het ontbreken van medische zorg voor de overlevenden, waarvan er veel zullen sterven aan epidemieën en de gevolgen van de fallout en de branden;
– vernietiging van het vee en van de oogst, met als gevolg hongersnood;
– chaotische toestanden als gevolg van vernietiging van communicatiemedia, wegen en transportmiddelen;
– rook en stof in de atmosfeer als gevolg van de branden zullen maandenlang het zonlicht verduisteren (de *nucleaire winter*); dit zal leiden tot felle kou en het afsterven van veel planten en dieren;
– aantasting van de ozonlaag kan ernstige gevolgen hebben voor allerlei kringloopprocessen op aarde die onder andere van belang zijn voor het klimaat.

literatuuronderzoek

1. ONDERZOEK NAAR LANGE-TERMIJN-EFFECTEN

In de Verenigde Staten en de Sovjet-Unie wordt sinds kort veel onderzoek gedaan naar de lange-termijn-effecten.

- Probeer één van de publikaties hierover te bemachtigen en maak een korte samenvatting.
- Wat is het belang van dit soort onderzoek?
- Welke positieve en negatieve effecten verwacht je van publikatie van de resultaten van het onderzoek?

6.4 MOGELIJKHEDEN TOT BESCHERMING

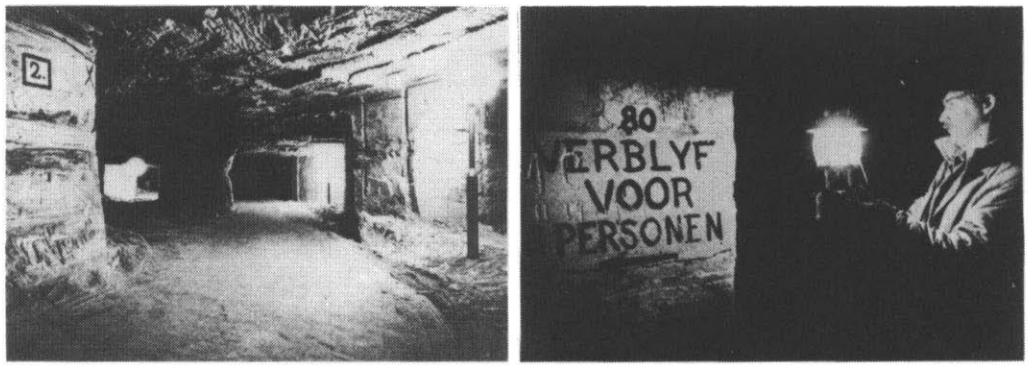
1. BESCHERMING TEGEN DIRECTE EFFECTEN

Onderstaande maatregelen zijn te vinden in literatuur met wenken voor de bevolking bij een eventuele aanval met kernwapens:
– gas en water afsluiten;
– aluminium jaloezieën sluiten;
– handschoenen en bivakmuts dragen;
– plat op de grond liggen;
– kelder opzoeken;
– donkere bril dragen;
– witkalken van ruiten;
– zandzakken voor ramen.

Geef bij elke maatregel aan tegen welk effect de maatregel is bedoeld en becommentarieer de zinvolheid ervan.

Er zijn maar weinig plaatsen in Nederland waar de weg wordt gewezen naar een openbare schuilgelegenheid.

Wanneer men de eerste effecten van een kernexplosie heeft overleefd, heeft men ongeveer 30 minuten de tijd om een schuilgelegenheid te zoeken. Deze schuilgelegenheid moet zo goed mogelijk van de buitenwereld geïsoleerd zijn. Kieren en gebroken ramen moeten gedicht worden. Alleen voedsel en drank uit voorraad mag gebruikt worden. Het verdient aanbeveling zo lang mogelijk (minimaal 2 dagen, bij voorkeur 14 dagen) in de schuilgelegenheid te blijven. Als gevolg van radioactief verval is na 14 dagen de straling nog 0,1% van de oorspronkelijke fallout. Als men tussentijds toch naar buiten moet, dan het lichaam zo veel mogelijk bedekken, een doek voor neus en mond houden en contact met stof vermijden. Bij terugkeer overkleding en schoeisel uitdoen en zo mogelijk het lichaam ontsmetten.



Door de winning van mergel is in Valkenburg (L) een uitgebreid stelsel van grotten ontstaan. In de zomer fungeert dit als trekpleister voor toeristen; dankzij een noodstroomvoorziening zijn deze grotten ook na de explosie van een kernbom als schuilgelegenheid te gebruiken. In totaal is er ruimte voor tienduizend mensen.

De Nederlandse overheid gaat er vanuit dat 4,5 miljoen Nederlanders een redelijke schuilgelegenheid kunnen vinden bij een kernexplosie. Driehonderdduizend mensen kunnen terecht in een van de 163 officiële openbare schuilkelders in ons land. Deze bevinden zich in parkeergarages, metrostations, kelders van grote gebouwen, bruggehoofden en grotten (Valkenburg). De overige 4,2 miljoen moeten het doen met een plaats in een van de kelders van flatgebouwen, die sinds 1956 verplicht van dergelijke ruimtes zijn voorzien.

interview

2. OFFICIËLE SCHUILKELDERS IN DE BUURT

- Zoek uit welke officiële schuilkelders er zijn in jouw omgeving. Op het stadhuis en bij de Bescherming Bevolking (BB) of brandweer kunnen ze je verder helpen.
- Vraag informatie over de grootte van de kelders en over de voorzieningen die er getroffen zijn. Wie heeft de organisatie in handen? Hoeveel mensen mogen erin per m^2?
- Probeer ook een bezoek te brengen aan zo'n schuilkelder.

ontwerp

3. ONTWERPEN VAN EEN SCHUILKELDER

Welke mogelijkheden biedt jouw huis of school ter bescherming tegen de gevolgen van een kernexplosie?

- Kies een ruimte uit die hiervoor redelijk geschikt lijkt.
- Ga na wat je in die 2 à 14 dagen dat je erin zou moeten verblijven nodig hebt (lucht, water, voedsel, energie, sanitair).
- Stel een aantal aanbevelingen op om die ruimte zo geschikt mogelijk te maken voor bescherming tegen directe effecten en fallout.
- Maak een lijst van spullen die je zelf zou meenemen naar zo'n ruimte.

literatuuronderzoek

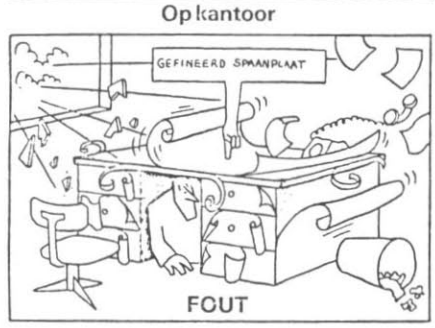
4. NUT VAN SCHUILKELDERS

Over het nut van schuilkelders wordt heel verschillend gedacht.

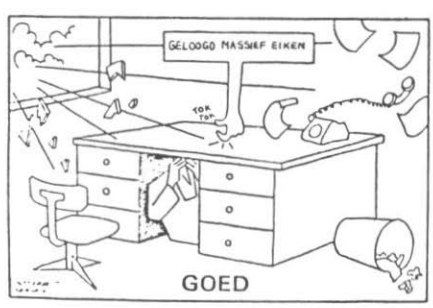
- Zoek een aantal meningen bij elkaar en schrijf argumenten op die de diverse opvattingen ondersteunen.
- Probeer in je groep een gemeenschappelijk standpunt in te nemen, en formuleer dit standpunt in de vorm van een stelling. Zorg ervoor dat je in staat bent de stelling te verdedigen tegenover anderen.

Overleven? Doe het zelf!

Op kantoor



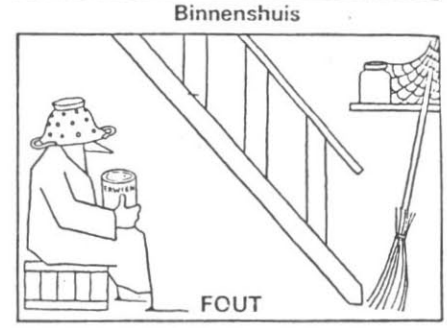
Fineer laat door de hitte los en de gevaarlijke spaanplaatgassen komen dan vrij.



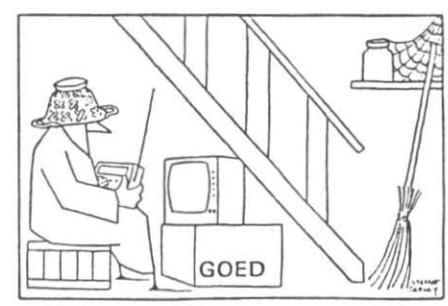
Overtuig u dus eerst of het bureaublad wel van eikenhout is.

Overleven? Doe het zelf!

Binnenshuis



Een vergiet is bestand tegen vallend puin. De gaatjes laten echter de radioactieve straling door. Geen plastic vergiet gebruiken. Die smelten!



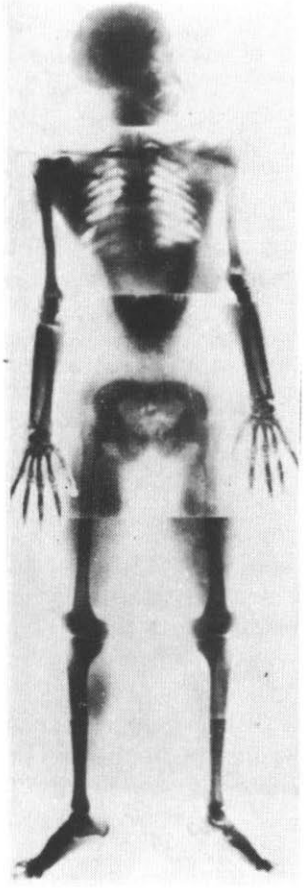
Veilige plaats onder de keldertrap. Gaatjes van het vergiet dicht stoppen met stopverf of dicht plakken met pleister of plakband. (Stefan Verweij.)

hoofdstuk 7

STRALING IN DE GEZONDHEIDSZORG

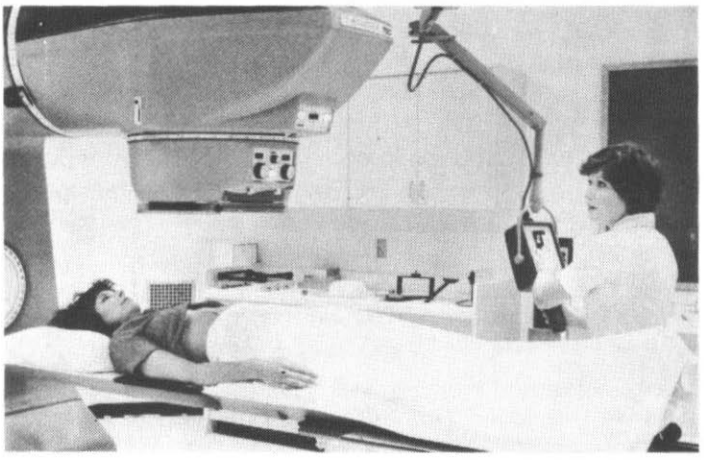
inhoud

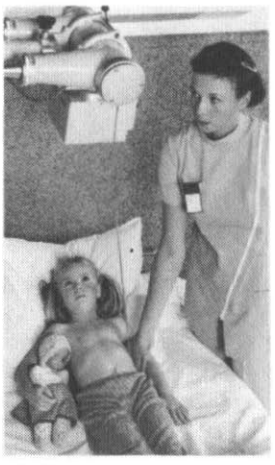
		blz.
7.1	medische toepassingen	64
7.2	onderzoek met röntgenstraling	65
7.3	onderzoek met radioactieve nucliden	69
7.4	radiotherapie	72



straling in de gezondheidszorg

In aanvulling op paragraaf 4.2 biedt dit hoofdstuk nieuwe informatie over straling in de gezondheidszorg. In hoofdstuk 3 zijn de effecten van ioniserende straling op de mens besproken. Daarbij bleek dat ioniserende straling mensen op korte of lange termijn ziek kan maken. Straling kan echter ook worden gebruikt om ziektes of afwijkingen op te sporen of om ziektes te behandelen. Over deze toepassingen gaat dit hoofdstuk. We maken daarbij onderscheid tussen straling als hulpmiddel bij het stellen van een *diagnose* en straling als middel voor *behandeling* van ziektes.

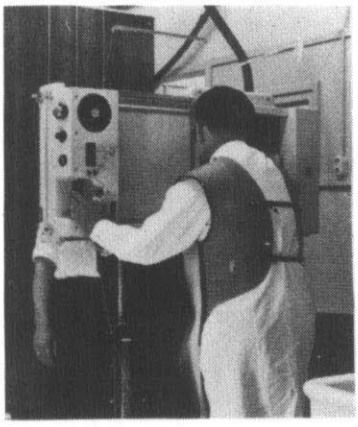




In de paragrafen 7.2, 7.3 en 7.4 vind je een aantal opdrachten. Het is de bedoeling dat je één (of meer) van die opdrachten uitkiest. Voor de uitwerking van de gekozen opdracht(en) zul je een aantal informatiebronnen moeten aanboren: boeken, brochures, folders enz. of mensen als een tandarts, dierenarts, arts of radiologisch werker in een ziekenhuis of bij de GGD. Het gaat daarbij dus om een *literatuuronderzoek* of om informatie verzamelen via een *interview*.
Als je kiest voor informatie verzamelen via een interview, bedenk dan dat je tijdig afspraken maakt voor een bezoek.

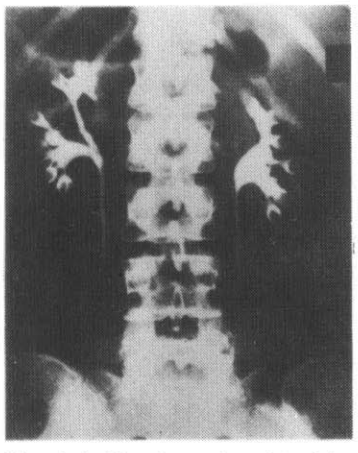
Voordat je dit hoofdstuk kiest, moet je je wel bedenken dat dit geen 'leuk' hoofdstuk is. Vooral in de laatste paragraaf staat een ziekte centraal die in de samenleving met een waas van angstige gevoelens en associaties is omgeven. Soms durft men het woord niet eens uit te spreken en praat men over 'K' of 'C' als men kanker bedoelt. Als je van jezelf weet dat je depressief wordt van dergelijke onderwerpen kun je misschien beter paragraaf 7.4 niet bestuderen.

7.1 MEDISCHE TOEPASSINGEN



Röntgenonderzoek.

Ioniserende straling wordt op medisch gebied voornamelijk toegepast door de röntgenafdeling en de afdelingen radiotherapie en nucleaire geneeskunde in de ziekenhuizen en bij de tandarts en de dierenarts.
De *röntgenafdeling* werkt voornamelijk diagnostisch. Het eenvoudige röntgenapparaat is daarbij vervangen door gecompliceerder en verfijnder apparatuur. Daardoor zijn de diagnostische mogelijkheden steeds verder uitgebreid, en is de stralingsbelasting van de patiënten aanzienlijk afgenomen.
Op de afdeling *radiotherapie* worden met name kankerpatiënten bestraald. Men maakt daarbij gebruik van röntgen- en γ-straling. Helaas zijn er ook vele patiënten wiens leven niet meer met zo'n behandeling gered kan worden. De bestraling richt zich dan op het verbeteren van de levensomstandigheden van de patiënt, bijv. op de pijnbestrijding. Een dergelijke behandeling wordt *palliatief* genoemd.
Op beide afdelingen wordt gebruik gemaakt van gesloten bronnen.
De afdeling *nucleaire geneeskunde* werkt met open bronnen, zoals radioactieve vloeistoffen, die dan ook zeer voorzichtig gehanteerd moeten worden. De veiligheidsmaatregelen op deze afdeling zijn dan ook veel strenger dan die op de beide andere afdelingen.
Nucleaire geneeskunde biedt unieke mogelijkheden tot het uitvoeren van een *dynamisch onderzoek*. Daarbij wordt een reeks opnamen na elkaar gemaakt, waardoor het mogelijk wordt het functioneren van een orgaan zichtbaar te maken. Dit onderzoek wordt dan ook vaak *functie-onderzoek* genoemd. Zo kan bijv. de nierfunctie vastgesteld worden door het meten van de snelheid waarmee de nieren een ingebrachte radioactieve stof weer uitscheiden.



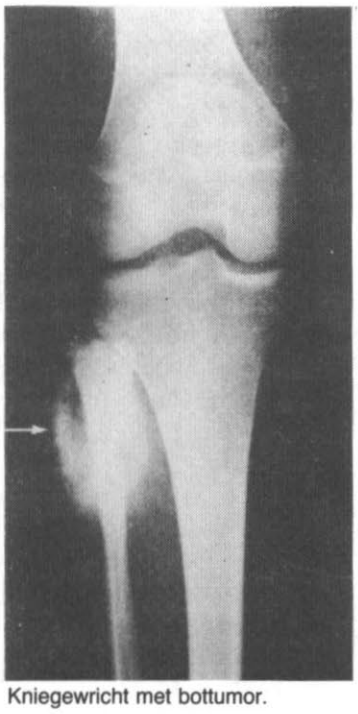
Het nierbekken is op deze foto duidelijk zichtbaar geworden.

stralingsdosis
Bij het werken aan dit hoofdstuk zul je vele waarden van een toegediende stralingsdosis tegenkomen. Die waarden kunnen uiteenlopen van zeer laag (zoals bij sommige röntgenfoto's) tot zeer hoog (zoals bij radiotherapie). Er zijn drie manieren om een indruk te krijgen van de grootte van zo'n dosis:
– vergelijken met de gemiddelde stralingsbelasting van de Nederlander (zie de tabel op blz. 20);
– vergelijken met de in paragraaf 3.2 genoemde waarden voor de acute effecten;
– vergelijken met de ICRP-normen (zie de tabel op blz. 27; daarbij moet je wél bedenken dat deze tabel geldt voor radiologische werkers; de normen voor anderen bedragen 10% hiervan).

Bij medische toepassingen worden meestal slechts één of enkele organen bestraald. We spreken dan van een *lokale dosis*. In bovengenoemde tabellen is meestal een dosis opgegeven, waarbij men ervan uitgaat dat het *gehele lichaam* bestraald wordt. Men noemt dat een *lichaamsdosis*.
Het omrekenen van een lokale dosis naar een lichaamsdosis is in de meeste gevallen niet eenvoudig. In onderstaand kader wordt voor een eenvoudig geval aangegeven hoe je dat kunt doen. Probeer in andere gevallen zoveel mogelijk achter de grootte van de lichaamsdosis te komen. Bij een vergelijking met de ICRP-normen is dat niet nodig: daar zijn ook de lokale normen vermeld.

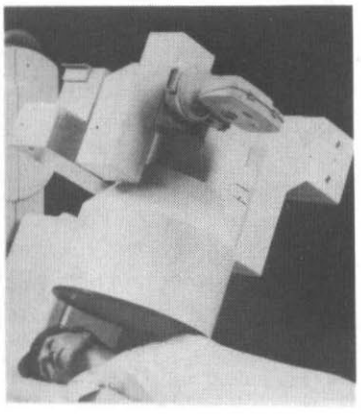
Voor het omrekenen van de lokale dosis naar een lichaamsdosis kun je in eenvoudige gevallen de tabel van de orgaangevoeligheid op blz. 19 gebruiken. Hier geven we een voorbeeld.
Er wordt een lokale dosis van 100 μSv toegediend aan de schildklier. De orgaangevoeligheid van de schildklier bedraagt 0,03. De overeenkomstige lichaamsdosis wordt berekend met: lichaamsdosis = lokale dosis × gevoeligheid. In dit geval bedraagt de lichaamsdosis dus 100 × 0,03 = 3 μSv.

7.2 ONDERZOEK MET RÖNTGENSTRALING



Kniegewricht met bottumor.

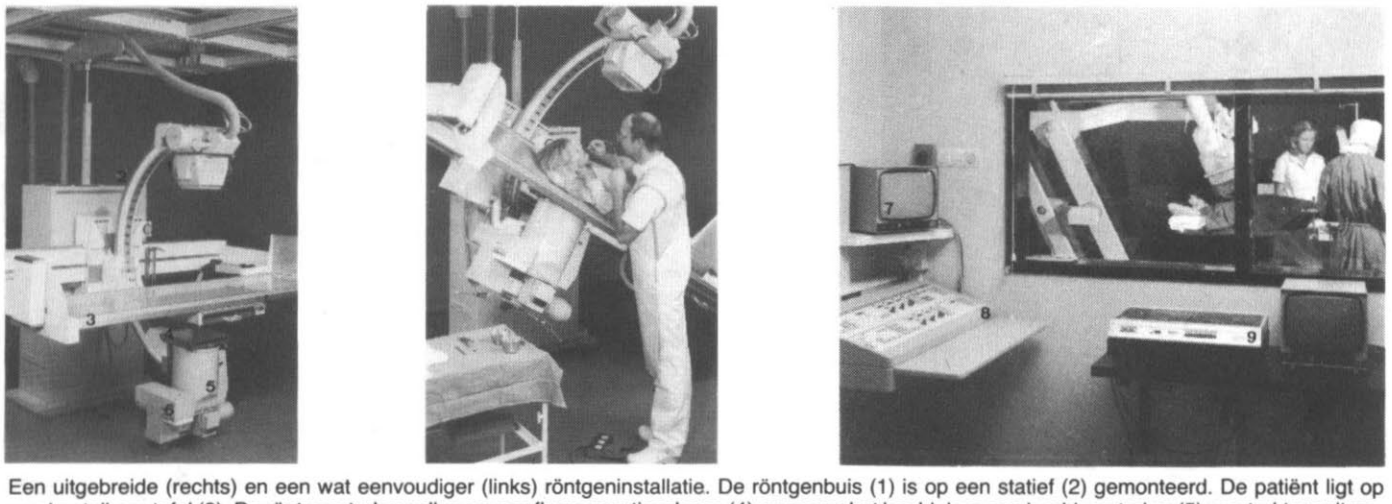
De röntgenfotografie heeft zich ontwikkeld tot een onmisbaar hulpmiddel. Elk ziekenhuis heeft een röntgenafdeling en elke tandarts een röntgenapparaat. Bij het maken van een *röntgenfoto* gaat er straling door het lichaam. Lichaamsdelen met een relatief hoge dichtheid (zoals bijv. botten) absorberen meer straling dan bijv. weefsel. Op die plaats verschijnt dan ook een *lichte plek* op de foto (zie de röntgenfoto hiernaast). Zo kunnen afwijkingen aan de beenderen (bijv. een scheur in een bot) opgespoord worden. Door een zachtere – minder energierijke – straling te gebruiken, wordt ook het verschil in dichtheid van een tumor en gewoon weefsel zichtbaar. Op deze wijze kunnen tumoren in zachte weefsels (bijv. borsten) opgespoord worden.



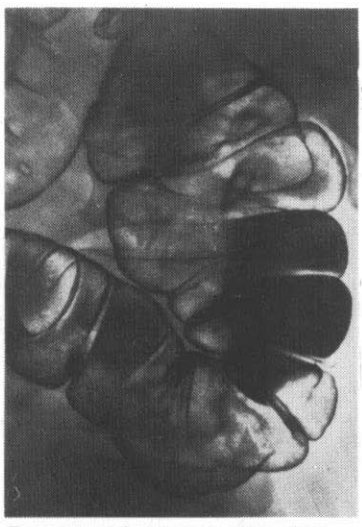
Een grote beeldversterker.

Door de pijlsnelle opkomst van de elektronica is de röntgenafdeling drastisch veranderd. De röntgenfoto en het doorlichten bestaan nog steeds, maar zijn aangevuld met nieuwe technieken waardoor de dosis aanzienlijk is verlaagd. Bij het *doorlichten* wordt tegenwoordig bijv. meestal een *beeldversterker* gebruikt. Deze versterkt het beeld van het fluorescentiescherm en geeft dat door aan een TV-monitor. Hierdoor kan de intensiteit van de gebruikte röntgenstraling tegenwoordig aanzienlijk lager zijn dan vroeger.

Naast het doorlichten en de röntgenfoto zijn er nog andere belangrijke onderzoeksmethoden. We zullen hier ingaan op het gebruik van *contrastvloeistof* en de *computertomografie*.



Een uitgebreide (rechts) en een wat eenvoudiger (links) röntgeninstallatie. De röntgenbuis (1) is op een statief (2) gemonteerd. De patiënt ligt op een kantelbare tafel (3). De röntgenstralen vallen op een fluorescentiescherm (4), waarvan het beeld door een beeldversterker (5) versterkt wordt en op een TV-monitor (7) wordt weergegeven. De beelden kunnen ook op een videorecorder (9) opgeslagen worden. Als de arts besluit tot het maken van een röntgenfoto, klapt de camera (6) voor het beeld. Soms is er ook een aparte, haarscherpe monitor; dan worden er foto's van dat monitorscherm gemaakt. De hele installatie wordt vanuit de bedieningslessenaar (8) bediend.



Een röntgenfoto van de dikke darm.

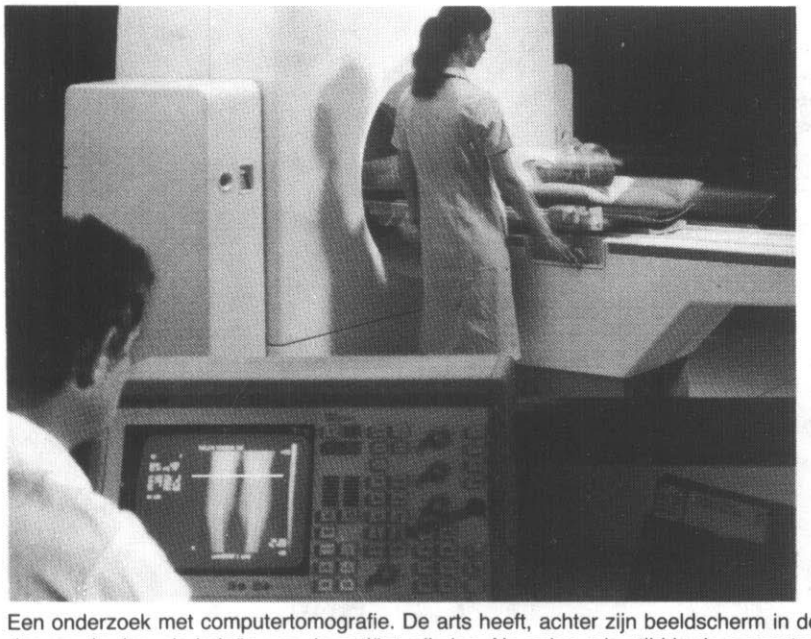
contrastvloeistof

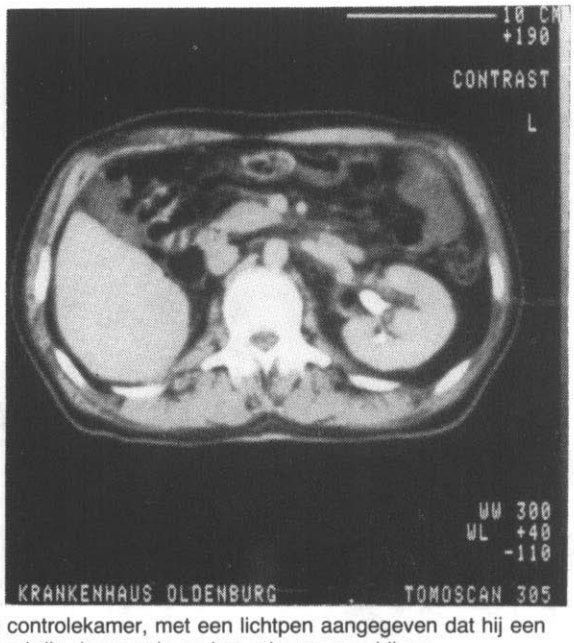
Zachte organen als maag, darmen en bloedvaten zijn normaal niet op röntgenfoto's te zien. De weefsels lijken teveel op elkaar om een bruikbaar contrast op de foto te geven. Maagzweren en tumoren in het maag-darmkanaal kunnen tóch zichtbaar gemaakt worden door de patiënt een *stralingsabsorberend middel* (meestal bariumpap) toe te dienen. Deze pap verspreidt zich in het maag-darmkanaal, waardoor dit orgaan zichtbaar wordt op de foto.
Ook vernauwingen en verstoppingen in het bloedvatenstelsel kunnen op een soortgelijke manier zichtbaar gemaakt worden. Men spreekt dan van *angiografie*.

computertomografie

Röntgenfoto's hebben het nadeel dat er allerlei strukturen over elkaar heen afgebeeld worden op de foto. Bij computertomografie (CT) wordt dat vermeden. De installatie bestaat uit een draaibaar statief, waarop de bron en de detectoren gemonteerd zijn. De patiënt ligt op een rijdbare tafel. De bron draait om de patiënt heen, en meet vanuit een groot aantal hoeken de absorptie van de straling.

Deze gegevens worden opgeslagen in een computer. Dan schuift de tafel een klein stukje verder en herhaalt het proces zich. Zo kan het hele lichaam van de patiënt, of desgewenst alleen het te onderzoeken gedeelte, afgetast worden. De arts geeft dan met een lichtpen op het monitorscherm aan, welke lichaamsdoorsnede hij of zij zou willen zien. De computer stelt op grond van de talloze gegevens in het geheugen het gewenste beeld samen. Op deze wijze kunnen grootte, vorm en plaats van de afwijkingen nauwkeurig in beeld gebracht worden. Door de zeer hoge kosten van het apparaat is het niet in elk ziekenhuis aanwezig.





Een onderzoek met computertomografie. De arts heeft, achter zijn beeldscherm in de controlekamer, met een lichtpen aangegeven dat hij een doorsnede door de knieën van de patiënt wil zien. Na enige rekentijd in de computer zal die doorsnede op het scherm verschijnen.
De rechter foto toont een CT-scan van een doorsnede door de buik. De lichte vlek is de ruggegraat.

interview

1. DE RÖNTGENAFDELING – RÖNTGENONDERZOEK

Op de röntgenafdeling wordt voornamelijk diagnostisch, maar soms ook therapeutisch gewerkt. Naast de 'gewone' röntgenfoto's en het doorlichten zijn er een aantal bijzondere technieken in gebruik. Hieronder vind je suggesties voor vragen bij twee soorten onderzoek als je bij een röntgenafdeling op bezoek gaat. In het kader op blz. 68 vind je suggesties voor vragen rond de stralingsbelasting,

de (technische kant van de) röntgeninstallatie en rond de vereiste veiligheidsmaatregelen.

- Het diagnostisch onderzoek naar tumoren in de borsten wijkt sterk af van het gewone röntgenonderzoek. Ga na wat de verschillen zijn en waarom een aparte installatie noodzakelijk is.
- Welke voordelen biedt de computertomografie (CT) in vergelijking met röntgenfoto's? Zijn er ook nadelen aan verbonden? Voor welk type onderzoek wordt CT gebruikt? Vinden patiënten het niet 'eng' om aan zo'n groot apparaat te liggen?

interview

2. DE RÖNTGENAFDELING – ANGIOGRAFIE

Terwijl de arts op de monitor kijkt, schuift hij de draad door de bloedvaten van de patiënt. Rechts hangt een infuus met contrastvloeistof.

Met behulp van angiografie kan een verstopt bloedvat weer geopend worden. De arts brengt daartoe van buiten af een buisje in het lichaam en schuift dat via het bloedvatenstelsel naar de verstopte plek. Daar wordt het ballonnetje opgeblazen, dat aan het eind van het buisje zit. Daardoor wordt de verstopping meestal opgeheven. Het bloedvatenstelsel is daarbij zichtbaar gemaakt door het inspuiten van een contrastvloeistof in het bloed. De arts kan zijn verrichtingen op een TV-monitor volgen.

Als je bij een röntgenafdeling op bezoek gaat, kun je de onderstaande suggestie voor een vraag aanvullen met de vraagsuggesties in het kader op blz. 68 rond de stralingsbelasting, de (technische kant van de) röntgeninstallatie en rond de vereiste veiligheidsmaatregelen.

- Bij welke ziektes kan deze methode gebruikt worden?

interview

3. DE TANDARTS

Ook tandartsen maken tegenwoordig veel gebruik van röntgenfoto's om de toestand van het gebit vast te stellen. Sommigen maken elk jaar een aantal foto's van de gehele boven- en onderkaak. Anderen doen dat alleen bij nieuwe patiënten en weer anderen alleen als daar aanleiding toe bestaat.

Hieronder vind je suggesties voor vragen als je bij een tandarts op bezoek gaat. In het kader op blz. 68 vind je suggesties voor vragen rond de stralingsbelasting, de (technische kant van de) röntgeninstallatie en rond de vereiste veiligheidsmaatregelen.

- Maakt de tandarts waar je op bezoek bent veel röntgenfoto's of is hij daar zuinig mee? Wat zijn zijn argumenten en wat is zijn mening over de andere hierboven genoemde methoden?
- Vindt de tandarts de veiligheidsmaatregelen bij zijn röntgeninstallatie noodzakelijk of overdreven?
- Welke informatie kan een tandarts uit de foto's aflezen over de toestand van het gebit?
- Hoe weet de tandarts dat hij precies de goede tand of kies op de foto krijgt.

interview

4. DE DIERENARTS

Veel dierenartsen beschikken tegenwoordig over een röntgenapparaat. Hieronder vind je suggesties voor vragen als je bij een dierenarts op bezoek gaat. In het kader hieronder vind je suggesties voor vragen rond de stralingsbelasting, de (technische kant van de) röntgeninstallatie en rond de vereiste veiligheidsmaatregelen.

- Welke dieren kunnen met de röntgeninstallatie onderzocht worden? En welke soorten onderzoek worden het meest gedaan?
- Bestaan er ook stralingsnormen voor dieren? Houdt de dierenarts rekening met de organen die extra gevoelig zijn voor straling? Hoe doet hij dat dan?
- Wat kun je nu aan zo'n röntgenfoto zien?

STRALINGSBELASTING, RÖNTGENINSTALLATIE EN VEILIGHEIDSMAATREGELEN

Hieronder vind je een aantal suggesties voor vragen die je kunt stellen bij een bezoek aan de röntgenafdeling van een ziekenhuis, de tandarts of de dierenarts.

stralingsbelasting

Medische toepassingen van ioniserende straling leveren een forse bijdrage aan de stralingsbelasting van de gemiddelde Nederlander (zie de tabel op blz. 20). Met het ALARA- en het rechtvaardigingsprincipe probeert men deze dosis zo laag mogelijk te houden.

Sommigen vinden de drukte rond röntgenfoto's overdreven. Zij stellen: 'De dosis bij een borstfoto is ongeveer even groot als die bij een paar weken wintersport op een hoogte van 2000 m, en daar maakt niemand zich druk over.'

– Ga voor een aantal veel voorkomende behandelingen na hoe groot de dosis is. Vraag daarbij wel naar een dosis die teruggerekend is naar het hele lichaam. Vergelijk die met de opgelopen dosis bij een paar weken wintersport op 2000 m hoogte.

– Vindt men de zorg rond de stralingsdosis reëel of overdreven? Waarom? Welk standpunt spreekt je daarbij het meeste aan?

– Wordt de patiënt op de hoogte gesteld van die extra stralingsdosis? Is die dosis wel eens een reden om de behandeling door een andere te vervangen of niet te laten doorgaan?

hoogte boven het zeeniveau in km	*jaarlijkse dosis in* mSv
0	*0,30*
1	*0,45*
2	*0,75*
3	*1,05*
5	*2,90*
7	*6,50*
9	*11,20*
12	*28,05*
20	*55,25*

de röntgeninstallatie

Het principe van alle röntgeninstallaties is hetzelfde, maar er bestaan zeer veel verschillende uitvoeringen. Bij het bestuderen van het röntgenapparaat bij de instantie waar je op bezoek bent, kun je gebruik maken van de onderstaande vragen.

– Wordt het apparaat diagnostisch of therapeutisch gebruikt?

– Vergelijk de opbouw van het apparaat met die van het apparaat op blz. 65.

– Hoe wordt de installatie geregeld? Hoe regelt men de intensiteit van de straling? En de hardheid ervan? Op welke manier wordt de tijdsduur van de bestraling vastgesteld?

– Worden er filters en diafragma's gebruikt? Wat is de rol van deze voorzieningen? Op welke manier zorgt men ervoor dat de afstand tussen de bron en de huid de juiste is?

– Hoe ziet een röntgencassette eruit? Zitten er versterkingsschermen in? Wat is daarvan de functie?

veiligheidsmaatregelen

De kans op het ontvangen van een hoge dosis is voor mensen die met röntgenstraling werken aanzienlijk hoger dan voor anderen. Strenge veiligheidsmaatregelen zijn daarom vaak noodzakelijk.

– Ga na welke veiligheidsmaatregelen getroffen zijn voor de patiënt en het bedienend personeel. Houdt men zich altijd aan deze voorschriften? Zo nee, waarom niet?
– Wordt rekening gehouden met de hoge gevoeligheid van sommige organen (zoals de gonaden) bij de bestraling van de patiënt? Welke mogelijkheden zijn daarvoor aanwezig?
– Gelden voor het bedienend personeel de stralingsnormen voor de radiologische werkers of die voor anderen? Wordt de dosis die het personeel ontvangt, bijgehouden? Zo ja, hoe gaat dat dan?

literatuuronderzoek/interview

5. HET BEVOLKINGSONDERZOEK

Bij een bevolkingsonderzoek wordt een deel van de bevolking onderzocht op het voorkomen van bijv. tuberculose. Zo kan de ziekte in een vroeg stadium ontdekt worden en is de kans op genezing groter. Ook borst- en baarmoederkanker zou op deze wijze eerder ontdekt kunnen worden dan nu veelal het geval is. Dergelijke bevolkingsonderzoeken brengen wel hoge kosten en een extra toename van de stralingsdosis met zich mee. Er zijn dan ook voor- en tegenstanders van het bevolkingsonderzoek met ioniserende straling.

- Ga aan de hand van literatuur of interviews na welke argumenten in deze discussie een rol spelen. Daartoe kun je mensen bij het consultatiebureau voor tuberculose of bij de GGD interviewen.
- Welk standpunt spreek je het meest aan? Waarom?

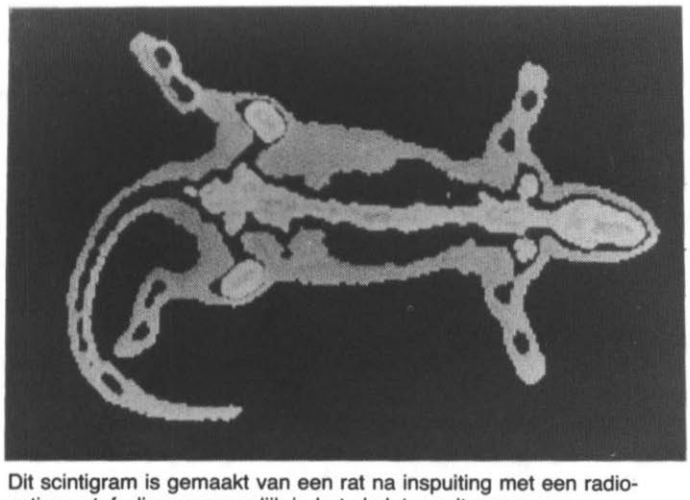
literatuuronderzoek

6.

Ideeën voor een literatuuronderzoek kun je met name vinden in de opdrachten 1, 2 en 5 en in het kader op blz. 68.

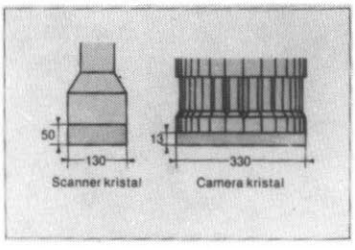
7.3 ONDERZOEK MET RADIOACTIEVE NUCLIDEN

Bij deze steeds meer gebruikte onderzoeksmethode wordt een radioactieve stof in het lichaam gebracht. Er wordt bij het bestuderen van een bepaald orgaan een stof gekozen, die juist in dát orgaan opgenomen wordt. Zo wordt bijv. bij het bestuderen van de schildklier I-123 in de bloedbaan gespoten. Na 45 minuten heeft zich al 95% van het ingespoten jodium in de schildklier verzameld. Bij een goed functionerende schildklier



Dit scintigram is gemaakt van een rat na inspuiting met een radioactieve stof, die voornamelijk in het skelet wordt opgenomen.

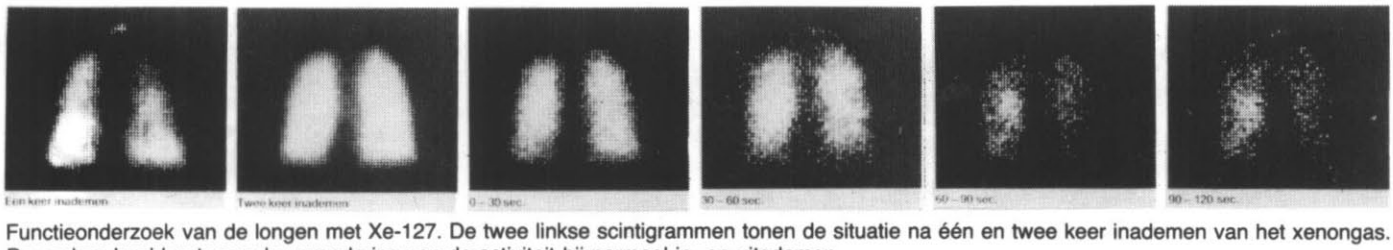
Bij hersenonderzoek wordt soms een opstelling met een groot aantal detectoren gebruikt.



De gammadetector maakt gebruik van één kristal, terwijl er in de gammacamera een groot aantal kristallen zijn opgenomen. De getallen geven de afmetingen in mm.

is het jodium gelijkelijk over de hele schildklier verdeeld. Een slecht functionerend deel kan op een tumor wijzen.
Er zijn twee methoden beschikbaar om een indruk te krijgen van de verdeling van het jodium. De isotoop I-123 is een γ-straler met een energie van 159 keV. Beide methoden maken dan ook gebruik van een gammadetector.
Bij de ene methode beweegt deze detector langzaam over de schildklier en bepaalt op een groot aantal punten de intensiteit van de uitgezonden straling. Op een TV-monitor wordt de intensiteitsverdeling met kleuren zichtbaar gemaakt. Zo is bijv. een gebied met een hoge intensiteit rood en met een lage intensiteit groen. Een dergelijk beeld noemt men een *scan*. Deze methode wordt snel verdrongen door de *gammacamera*. Zo'n camera meet het hele oppervlak ineens. Het beeld wordt, na versterking met een *beeldversterker*, zichtbaar gemaakt op een TV-monitor en tegelijkertijd op een röntgenfilm afgebeeld. Zo'n beeld heet een *scintigram*. Men kan ook een scintigram maken van de hersenen, de lever, nieren enz. Bij elk orgaan heeft men dan een andere radioactieve stof nodig.

dynamisch onderzoek
De sterkste kant van de nucleaire geneeskunde is het *functie-onderzoek*. Daarmee kan vastgesteld worden in hoeverre een bepaald orgaan zijn functies vervult. Om dat te kunnen doen wordt het betreffende orgaan zichtbaar gemaakt. Vaak gebruikt men daarbij lichaamseigen stoffen (zoals antilichamen en bepaalde eiwitten) die 'gemerkt' worden met een radioactief atoom. Daarvoor wordt meestal technetium-99m gebruikt. De 'm' geeft aan dat de kern bij verval alleen een gammafoton uitzendt, waardoor de stralingsbelasting vrij laag blijft. De toegediende hoeveelheid Tc-99m is niet schadelijk voor het lichaam en kan gemakkelijk in organische stoffen ingebouwd worden. We lichten dat toe met enkele voorbeelden.



Functieonderzoek van de longen met Xe-127. De twee linkse scintigrammen tonen de situatie na één en twee keer inademen van het xenongas. De andere beelden tonen de verandering van de activiteit bij normaal in- en uitademen.

De milt breekt beschadigde rode bloedlichaampjes af. Om het functioneren van de milt na te gaan, worden rode bloedlichaampjes bij de patiënt afgenomen. Deze worden 'gemerkt' met Tc-99m en vervolgens licht beschadigd door ze tot 41 °C te verhitten. Na het inspuiten van deze 'gemerkte' rode bloedlichaampjes bij de patiënt, kan gedurende enige tijd het functioneren van de milt met een gammacamera bestudeerd worden.
Zo is het ook mogelijk de hartspier radioactief te 'merken' en deze in bedrijf gade te slaan. Daarbij kan de hartfunctie, het hartvolume en de doorstroming van het bloed in de hartvaten worden onderzocht.

halveringstijd
Om de stralingsbelasting van de patiënt zo laag mogelijk te houden gebruikt men stoffen met een korte halveringstijd. Daarbij is níet alleen de fysische, maar ook de *biologische halveringstijd* van belang. De biologische halveringstijd is de tijd waarin het lichaam de helft van de radioactieve stof heeft uitgescheiden. De biologische en de fysische halveringstijd samen vormen de *effectieve halveringstijd*. Deze grootheid én de aard van de radioactieve stof bepalen samen de grootte van de stralingsbelasting.
Bij een stof met een lange fysische halveringstijd vervallen per seconde relatief weinig kernen, en wordt er dus weinig γ-straling uitgezonden. Er is dan een vrij grote hoeveelheid van die stof nodig om buiten het lichaam een meetbare hoeveelheid straling op te leveren. Bij een korte biologische halveringstijd hoeft dat niet zo'n bezwaar te zijn voor

de patiënt. De stof verlaat het lichaam dan vrij snel. Het afval van een dergelijke behandeling blijft dan wél vrij lang radioactief.
Om de stralingsbelasting van patiënt en milieu zo laag mogelijk te houden, geeft men dan ook de voorkeur aan stoffen met een korte biologische én fysische halveringstijd. De gebruikte stoffen mogen bovendien geen α-straling en liefst ook geen β-straling uitzenden en mogen niet giftig zijn. Het is niet eenvoudig stoffen te vinden die aan al deze eisen voldoen.

veiligheid
Op de afdeling nucleaire geneeskunde werkt men met *open* radioactieve bronnen. In tegenstelling tot de *gesloten* radioactieve bronnen zitten deze niet in een goed afgesloten permanente behuizing.
Het werken met open bronnen vereist aanzienlijk scherpere beveiligingsmaatregelen, omdat het gevaar van morsen, kwijtraken enz. veel groter is.

in vitro onderzoek
Bovenbeschreven onderzoeken worden *in vivo* onderzoeken genoemd. Daarbij worden radioactieve stoffen toegediend aan levende mensen. Tegenwoordig worden radioactieve stoffen ook zeer veel gebruikt om het gehalte aan hormonen, enzymen, virussen enz. te bepalen. Men neemt daartoe enig lichaamsvocht af bij de patiënt. Dergelijke onderzoeken worden *in vitro* onderzoeken genoemd. Daarbij wordt de patiënt niet met straling belast.
Met in vitro onderzoek kunnen vaak zeer lage concentraties bepaald worden.

interview

1. DE AFDELING NUCLEAIRE GENEESKUNDE – STRALINGSBELASTING

Elke hoeveelheid straling brengt risico met zich mee.

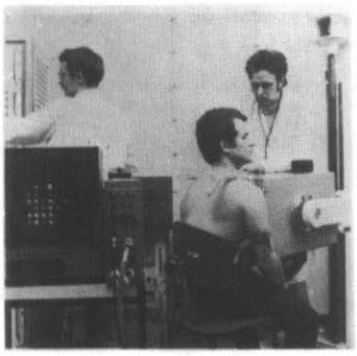
- Ga bij een bezoek aan de afdeling nucleaire geneeskunde voor een veel toegepast onderzoek na hoe groot de stralingsdosis is. Brengt dat een groot risico met zich mee?
- Zijn er alternatieven voorhanden? Komt het wel eens voor dat men van het onderzoek afziet, omdat de dosis te hoog zou zijn?
- Zowel röntgen- als nucleair onderzoek wordt meestal diagnostisch gebruikt. Beide technieken brengen een stralingsbelasting voor de patiënt met zich mee. Wanneer gebruikt men de ene methode en wanneer de andere? Welke redenen heeft men daarvoor? Speelt de grootte van de stralingsbelasting bij deze overwegingen een rol?

interview

2. DE AFDELING NUCLEAIRE GENEESKUNDE – VEILIGHEIDSMAATREGELEN

De radioactieve stoffen worden in een loden kast met loden laden opgeslagen.

- Ga na welke veiligheidsmaatregelen er binnen de afdeling nucleaire geneeskunde genomen zijn om een radioactieve besmetting van patiënten en personeel te voorkomen. Houdt men zich altijd aan deze maatregelen? Zo nee, waarom niet?
- Wat wordt er gedaan als er toch een besmetting optreedt?
- Behoort het personeel tot de groep van de radiologische werkers? Wat vinden ze ervan om op een dergelijke afdeling te werken?



Bij het hart meet men soms met een groot aantal tellers de tijdstippen waarop een in de arm geïnjekteerde radioactieve stof in de verschillende hartsegmenten aankomt. De monitor toont het beeld van die tellers.

interview/literatuuronderzoek

3. DE AFDELING NUCLEAIRE GENEESKUNDE – DYNAMISCH ONDERZOEK

Het dynamisch onderzoek is één van de sterkste kanten van de nucleaire geneeskunde. Ga bij een bezoek aan deze afdeling of met behulp van literatuur na hoe een dergelijk onderzoek verloopt bij één van de volgende organen: nieren, longen, hart, hersenen.

interview

4. DE AFDELING NUCLEAIRE GENEESKUNDE – RADIOACTIEF AFVAL

Op de afdeling nucleaire geneeskunde wordt nogal wat afval geproduceerd. Dat afval kan bewaard worden tot de activiteit ervan gedaald is, of worden afgevoerd.

- Ga na waaruit het afval bestaat en probeer een indruk te krijgen van de omvang en de activiteit ervan. (Zie ook blz. 45.)
- Wat gebeurt er precies met dat afval? Wordt het bewaard? Hoe lang dan en waar? Of wordt het afgevoerd? Waarheen dan en wat doen ze er daar mee?
- Is men van mening dat het afvalprobleem op deze manier voldoende is opgelost?

Opslag kortlevend afval.

interview/literatuuronderzoek

5. DE AFDELING NUCLEAIRE GENEESKUNDE – RADIOFARMACA

De stoffen die men in de nucleaire geneeskunde bij het in vivo onderzoek gebruikt, worden *radiofarmaca* genoemd. We hebben al gezien dat ze een korte fysische halveringstijd moeten hebben. Dat betekent ook dat je ze niet lang kunt bewaren. Om dat probleem op te lossen is de zogenaamde *radioactieve koe* ontworpen.

- Maak een overzicht van de eisen waaraan een radiofarmacon dient te voldoen. Waarom is Tc-99m zo'n ideaal middel?
- Waar worden deze stoffen gemaakt en hoe worden ze vervoerd?
- Hoe werkt zo'n radioactieve koe (zie blz. 33)? Hoe lang kun je zo'n koe gebruiken?

literatuuronderzoek/interview

6. DETECTIEMETHODEN

- Ga aan de hand van literatuur of door een gesprek met een technicus van een ziekenhuis na hoe een scanner of een gamma-camera werkt.
- Wat zijn de kosten, de mogelijkheden en de beperkingen van een dergelijk apparaat?

7.4 RADIOTHERAPIE

	aantal personen tussen 40 en 80 jaar	*geregistreerde kankersterfte in die groep*
vrouwen	*2450000*	*8490*
mannen	*2230000*	*13130*
totaal	*4680000*	*21620*

De stralings- of *radiotherapie* wordt vooral gebruikt bij het behandelen van de verschillende soorten kanker. In Nederland is kanker de op één na belangrijkste doodsoorzaak. Er overlijden aanzienlijk meer mannen dan vrouwen aan kanker, zoals de tabel hiernaast laat zien. Ook de soorten kanker waar mannen en vrouwen aan lijden zijn verschillend.

De grootte van de overlevingskans wordt meestal aangegeven met het percentage patiënten dat vijf jaar na de ontdekking van de tumor nog in leven is (zie de tabel op blz. 73). Die overlevingskans hangt sterk af van het soort kanker en het moment van ontdekking. Een ontdekking in een vroeg stadium maakt de genezingskans meestal aanzienlijk groter. Dat geldt helaas niet voor alle kankersoorten: de overlevingspercentages lopen sterk uiteen van meer dan 75% voor huidkanker tot minder dan 10% voor long- en darmkanker.

De behandeling van kanker kan bestaan uit opereren, het toedienen van medicijnen, bestralen of een combinatie van twee of meer van deze methoden. De operatieve verwijdering van een tumor gecombineerd met een bestraling om de uitzaaiingen (de

plaats	vijfjaar-overlevingspercentages
huid	75%
lip	75%
testis (seminoom)	70%
speekselklieren	70%
larynx (stembanden)	50%
baarmoeder	45%
borst	45%
schildklier	40%
mond	35%
blaas	35%
maag/darm	10%
long	10%

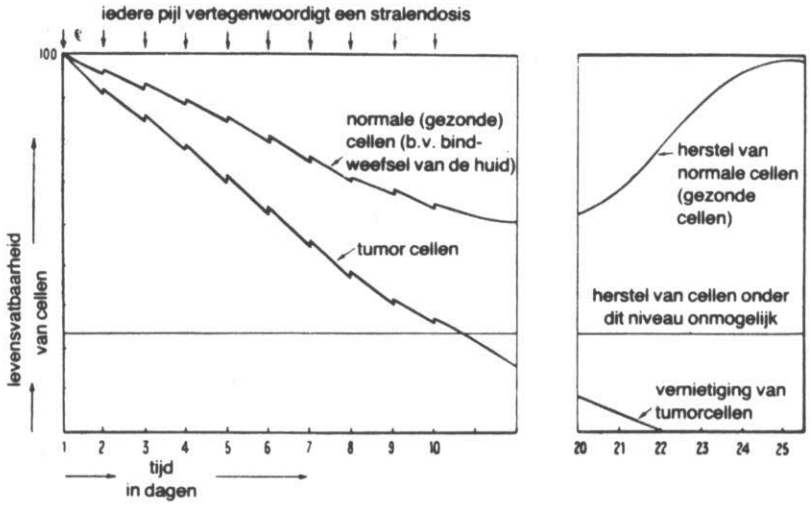
metastasen) te vernietigen, wordt veel toegepast. In deze paragraaf zullen we ons beperken tot de bestraling.

bestralingsplan

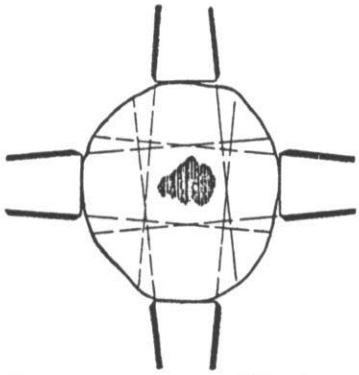
Bij het diagnostisch gebruik van ioniserende straling veroorzaakt men zo min mogelijk stralingsschade. Bij de behandeling van kanker is deze beschadiging juist de bedoeling. Het gaat erom de groei van de tumorcellen af te remmen of deze te doden. Bij dit *therapeutische gebruik* van straling is de dosis dan ook vele malen hoger dan bij diagnostisch gebruik.

Bij de radiotherapie wordt er naar gestreefd
- een zo hoog mogelijke en gelijke dosis te verkrijgen in het gehele te behandelen weefselvolume waarin de tumor zich bevindt;
- de omringende gezonde weefsels zo veel mogelijk te sparen.

Helaas is het niet mogelijk alleen de tumorcellen te bestralen. Ook de gezonde weefsels in het bestraalde doelvolume ontvangen een hoge dosis. Nu is het gelukkig zo dat de cellen van veel tumoren iets gevoeliger voor straling zijn dan de cellen van normale weefsels. Dit verschil in bestralingseffect kan nog verder vergroot worden door niet met een eenmalige grote dosis, maar met meerdere kleinere doses te bestralen (gefractioneerde bestraling).
Een bestralingsbehandeling is gelukt als de tumorcellen dodelijk beschadigd zijn, terwijl de normale cellen nog in staat zijn zich weer te herstellen. Om dat te bereiken moet zeer goed afgewogen worden hoe groot de totale dosis moet zijn, welk soort straling er gebruikt gaat worden, op welke manier deze zal worden toegediend en wat de uiteindelijke dosisverdeling in en om het te behandelen doelgebied is.



Een geslaagde bestralingskuur.


Een bestraling van verschillende kanten verhoogt de dosis op het doelvolume.

Er wordt dan ook voor elke patiënt een *bestralingsplan* opgesteld, waarin dit alles vermeld staat. Het opstellen van zo'n bestralingsplan vereist zeer specialistische kennis van zowel medische als natuurkundige aard. Door het inschakelen van computers is de benodigde tijd ervoor drastisch teruggebracht. De meeste bestralingsplannen bestaan uit een reeks behandelingen na elkaar, elk bestaande uit bestraling van het doelvolume vanuit verschillende hoeken. In de figuur hiernaast is te zien dat daardoor de tumor een aanzienlijk hogere dosis krijgt dan de omringende weefsels. Soms wordt rotatiebestraling toegepast, waarbij de bestralingsbron om de patiënt draait en de bestralingsbundel steeds op het doelgebied gericht blijft. Ook daarbij is het doel een gelijkmatige bestraling van de tumor bij een zo laag mogelijke dosis in het omringende weefsel.

Bij sommige behandelingen wordt een groter gebied bestraald, om daar de metastasen te doden. Bij dit bestralingsplan probeert men de zeer stralingsgevoelige organen (zie de tabel op blz. 19) zoveel mogelijk te ontzien.

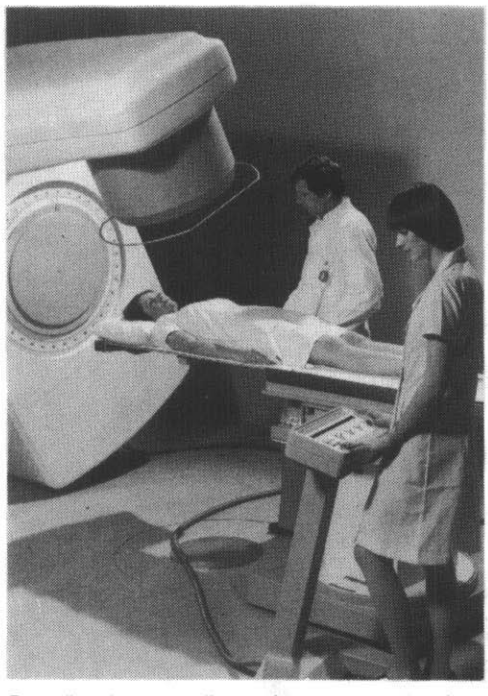
bestralingsmethoden

We bespreken hier drie verschillende methoden: *röntgenstraling*, *grote γ-bronnen* en *lokale behandeling*.

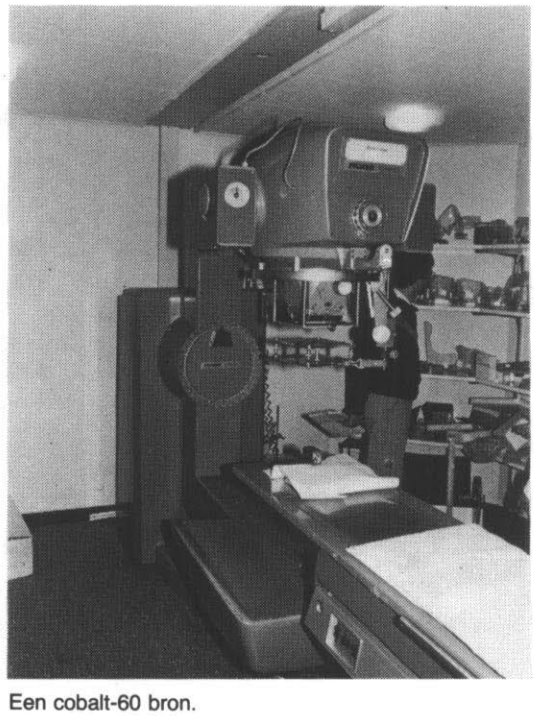
– *röntgenstraling*

Naast de tijdsduur en de intensiteit van de röntgenstraling hangt de grootte van de toegediende dosis ook af van de *hardheid* van de straling. Harde straling bevat fotonen met een hoge energie, zachte straling heeft fotonen met een lage energie.

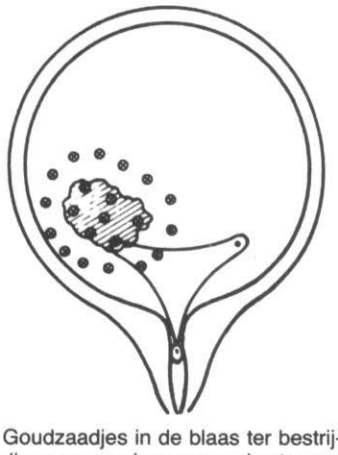
Voor de bestraling van huidtumoren gebruikt men relatief zachte straling, terwijl voor dieperliggende tumoren harde straling nodig is. In toenemende mate wordt gebruik gemaakt van *lineaire versnellers*, waardoor de elektronen een zeer hoge energie krijgen. Er ontstaat zo een zeer harde röntgenstraling.



Deze lineaire versneller werkt met een versnelspanning van 4 tot 6 MV.



Een cobalt-60 bron.



Goudzaadjes in de blaas ter bestrijding van een daar aanwezige tumor.

– *grote γ-bronnen*

Het bestralingsapparaat bestaat uit een γ-bron, omgeven door een dikke laag van een zwaar metaal. Door een opening treedt de stralenbundel naar buiten, afgeperkt door loden platen (de *collimator*). Tegenwoordig bestaat de bron meestal uit cobalt-60. Deze isotoop heeft een halveringstijd van 5,3 jaar. De bron hoeft daardoor niet al te vaak vervangen te worden. Bij het opstellen van het bestralingsplan moet uiteraard met de steeds afnemende activiteit van de bron rekening gehouden worden.

– *lokale behandeling*

In plaats van het toedienen van straling door bestraling van buitenaf, kan ook een gesloten radioactieve bron in of dichtbij het te bestralen doelgebied gebracht worden. De dosis in het te bestralen weefsel zal dan zeer hoog zijn, terwijl die in de omringende gezonde weefsels – tengevolge van de 'kwadraten wet' – laag zal zijn. Vaak gebruikt men cesium buisjes of naalden, iridiumdraad of goudzaadjes als bestralingsbronnen.

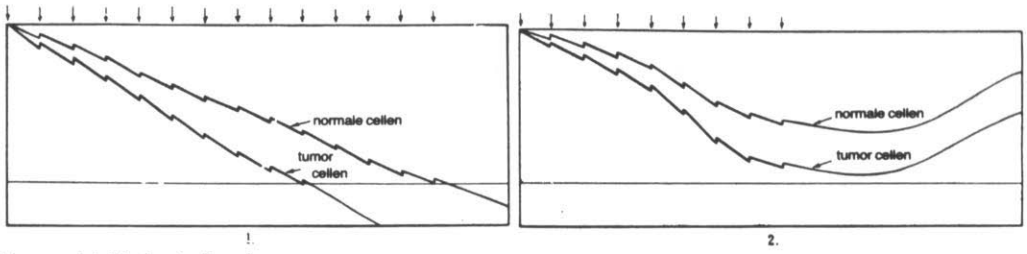
Een bijzondere vorm van lokale behandeling is de *therapeutische slok*. Sommige stoffen concentreren zich in bepaalde organen, zoals bijv. jodium in de schildklier. Bij schildklierkanker krijgt de patiënt een drankje of een injectie waarin zich een vrij grote hoeveelheid van de β-straler I-131 bevindt. Dit radioactieve jodium verzamelt zich in de schildklier, waardoor deze een veel hogere dosis ontvangt dan de rest van het lichaam.

Bij deze therapie wordt de patiënt geheel radioactief. Hij moet dan ook gedurende minimaal 48 uur in een geheel geïsoleerde ruimte verpleegd worden. In de opleiding

van het personeel is de stralingsbescherming dan ook een belangrijk onderdeel. Bij de verpleging gelden voor het personeel zeer strenge veiligheidsvoorschriften die steeds rekening houden met *afstand, bescherming* en *tijd*. Alle afvalstoffen uit de geïsoleerde ruimte zoals handdoeken, waswater enz. dienen als radioactief afval behandeld te worden.

1. EEN MISLUKTE BEHANDELING

Op blz. 73 staat een voorbeeld van een geslaagde bestralingskuur. Bijgaande figuren beelden twee kuren uit die mislukt zijn. Geef in beide gevallen aan wat de oorzaak van de mislukking zou kunnen zijn en welke gevolgen dat kan hebben.



Twee mislukte bestralingskuren.

interview

2. DE AFDELING RADIOTHERAPIE – HET BESTRALINGSPLAN

- Ga bij een bezoek aan de afdeling radiotherapie na hoe een bestralingsplan tot stand komt en welke personen daarbij betrokken zijn.
- Hoe ziet een bestralingsplan er in grote lijnen uit? Hoe groot is de in totaal toegediende dosis ongeveer?
- Waarom wordt de dosis zelden in één keer, maar meestal verspreid over een aantal keren toegediend?
- Zijn er natuurkundige verschillen tussen röntgen- en γ-straling. Wanneer gebruikt men de ene en wanneer de andere soort straling?

interview

3. DE AFDELING RADIOTHERAPIE – APPARATUUR

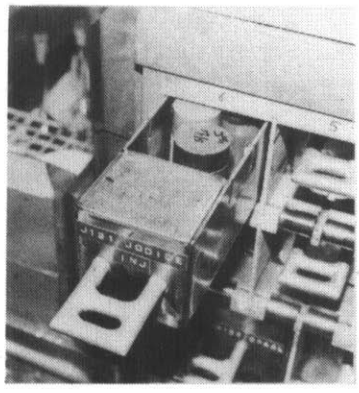
Bij de afdeling radiotherapie wordt zowel röntgen- als γ-bestralingsapparatuur gebruikt.

- Ga bij een bezoek aan deze afdeling na hoe een γ-bestralingsapparaat is opgebouwd. Kan de bron geregeld worden?
- Hoe wordt de hardheid en de intensiteit van de straling bij een röntgenapparaat geregeld? Wat is de rol van de filters en diafragma's?
- Op welke manier zorgt men ervoor dat de straling op de gewenste plaats komt en niet op zeer gevoelige plaatsen zoals bijv. de gonaden?

interview

4. DE AFDELING RADIOTHERAPIE – VEILIGHEIDSMAATREGELEN

- Ga bij een bezoek aan de afdeling radiotherapie na hoe groot de toegediende doses zijn (zie ook activiteit 2).
Vergelijk de toegediende doses met de waarden die in hoofdstuk 3 genoemd zijn. Denk er wel aan dat die waarden voor het hele lichaam gelden; de hier genoemde waarden gelden meestal maar voor één of enkele organen.
- Zou er bij de bestraling rekening gehouden moeten worden met het optreden van late effecten? En van genetische effecten?
- Welke veiligheidsmaatregelen zijn er genomen voor het personeel? Behoort het personeel tot de radiologische werkers? Vinden ze dat gevaarlijk? Hoe wordt hun dosis bewaakt?



Het bewaren van I-131.

interview

5. DE AFDELING NUCLEAIRE GENEESKUNDE – LOKALE THERAPIE

Bij een bezoek aan de afdeling nucleaire geneeskunde kun je gebruik maken van de onderstaande suggesties voor vragen. Ook de vragen bij activiteit 4 zijn bruikbaar bij zo'n bezoek.

- Bij welke kankersoorten wordt *lokale therapie* toegepast? Welke voordelen biedt lokale therapie boven een bestraling met röntgen- of grote γ-bronnen? Heeft men een voorkeur voor α-, β- of γ-stralers? Waarom?
- Zoek een voorbeeld uit van een dergelijke behandeling, en ga precies na hoe deze verloopt en waarom in dit geval lokale therapie wordt toegepast.
- Waarom vindt de lokale therapie op de afdeling nucleaire geneeskunde plaats en niet bij de afdeling voor radiotherapie?

literatuuronderzoek

6. STRALINGSTHERAPIE

Ga voor één kankersoort na welke mogelijkheden stralingstherapie biedt voor genezing.

- Hoe verloopt de ziekte?
- Welke behandelingsmethoden zijn gebruikelijk?
- Hoe groot is de kans op een succesvolle behandeling?

literatuuronderzoek

7. NEUTRONENSTRALING

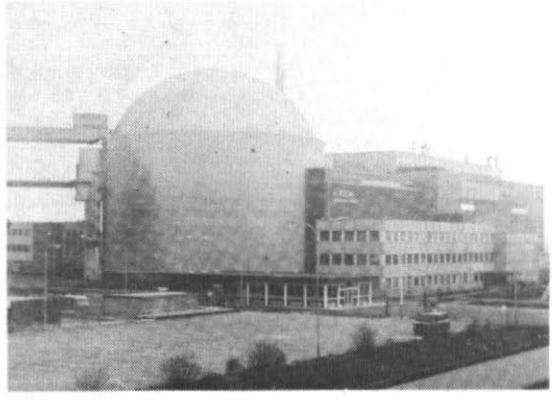
Er wordt veel onderzoek gedaan naar het gebruik van neutronenstraling bij de kankertherapie. Zoek aan de hand van literatuur uit welke bijzondere eigenschappen neutronenstraling heeft en wat de toekomstverwachtingen over het gebruik ervan zijn.

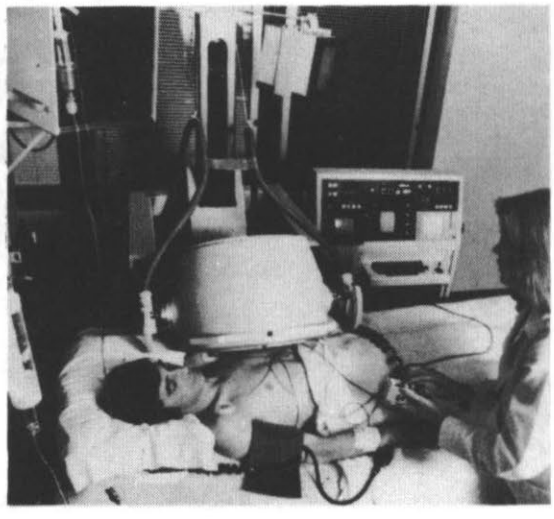
hoofdstuk 8

RISICO'S EN VEILIGHEID

inhoud blz.

8.1 risico-evaluatie 78
8.2 persoonlijke risico's en veiligheid 79
8.3 maatschappelijke risico's en veiligheid 80





risico's en veiligheid

Toepassingen van ioniserende straling zijn vaak omstreden. De één noemt een bepaalde toepassing 'levensgevaarlijk en onverantwoordelijk', de ander 'zo veilig als een huis en hoogst verantwoord'. Wie heeft dan gelijk? De een? De ander? Of allebei een beetje? In dit hoofdstuk zul je geen definitief antwoord op deze vragen vinden.

Wel besteden we aandacht aan manieren om zelf tot een afweging te komen. Daartoe bekijken we risico en veiligheid in een aantal situaties van verschillende kanten. Het gaat meer om dat bekijken van verschillende kanten, dan om de uiteindelijke afweging die je maakt.

We maken daarbij onderscheid tussen situaties waarbij je eigen veiligheid direkt in het geding is en situaties waarbij het gaat om risico's voor grote bevolkingsgroepen. In het tweede geval heb je het meestal niet zelf voor het zeggen, maar kun je soms wel invloed uitoefenen op de besluitvorming.

8.1 RISICO-EVALUATIE

Goedbeschouwd is ioniserende straling een hoogst merkwaardig verschijnsel. Je kunt er mensen mee genezen, maar mensen kunnen er ook ziek van worden. Bij normaal gebruik heeft een kerncentrale weinig direkte milieu-effecten, maar op langere termijn zijn de gevolgen voor het milieu niet te overzien. Kernwapens kunnen bijdragen aan het voorkómen van oorlogen, ze kunnen ook de vernietiging van de mensheid tot gevolg hebben. Geen wonder dat dit soort tegenstrijdigheden tot geweldige tegenstellingen aanleiding geeft.
Deze tegenstellingen leiden vaak tot verwarrende discussies. Er wordt met informatie gesmeten, of informatie wordt juist achtergehouden.
Doodsbange mensen voelen zich in hun veiligheid bedreigd door kille, gewetenloze en opportunistische technocraten. Verantwoordelijke politici denken dat de veiligheid juist wordt bedreigd door heethoofdige, ongeïnformeerde en gemanipuleerde demonstranten.

Demonstratie tegen kernwapens.

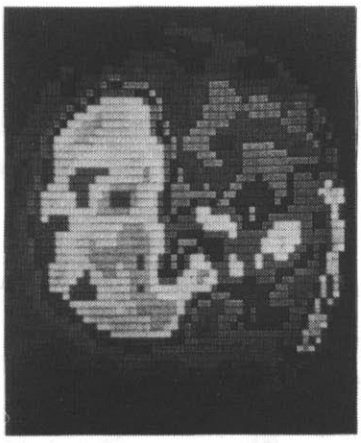
Allerlei belangen lopen door elkaar: belangen van de industrie, van politici, van volksgezondheid en van milieubehoud. Het valt niet mee om door de bomen het bos nog te zien. In dit hoofdstuk wordt geprobeerd de knoop wat te ontwarren, zodat duidelijk kan worden waar het uiteindelijk om gaat.

In hoofdstuk 1 hebben we met dit ontwarren al een begin gemaakt. Ter beantwoording van de vraag of een risico aanvaardbaar is, werden een aantal deelvragen gesteld:
- waarom wordt een bepaalde toepassing gebruikt;
- wat kan er allemaal misgaan;
- hoe waarschijnlijk is elk van deze gebeurtenissen;
- wat zijn de gevolgen van elke gebeurtenis;
- hoe erg vinden we deze gevolgen;
- wegen de risico's op tegen de voordelen?

De laatste vraag krijgt in dit hoofdstuk de meeste aandacht. We noemen dat *risico-evaluatie*. In de volgende paragrafen bespreken we de evaluatie van risico's van persoonlijke en maatschappelijke aard.

8.2 PERSOONLIJKE RISICO'S EN VEILIGHEID

1. EEN HERSENSCAN LATEN MAKEN: JA OF NEE?


Een hersenscan.

Je hebt de laatste tijd nogal last van zware hoofdpijn. Je huisarts kan niets vinden. Ze stuurt je door naar een specialist in het Academisch Ziekenhuis. Deze hoort je klachten aan en kruist op een formulier vervolgens een aantal onderzoeken aan die zij bij je wil laten uitvoeren. Je ziet dat één van de onderzoeken een *hersenscan* betreft. Je zou dan op verschillende manieren kunnen reageren, bijvoorbeeld:

– je zegt niets en gaat eerst thuis en in de bibliotheek na met hoeveel straling het onderzoek gepaard gaat;
– je zegt onmiddellijk dat je weigert een onderzoek met kernstraling te ondergaan;
– je belt je huisarts en vraagt of het doel niet zónder straling bereikt kan worden;
– je denkt 'het zal wel veilig zijn' en maakt je verder geen zorgen;
– je vertrouwt het niet zo, maar je wilt ook geen heisa maken, dus je ondergaat het onderzoek;
– je belt de specialist nog eens op en je zegt dat je met het onderzoek accoord gaat tot een bepaalde dosis.

Bespreek de voor- en nadelen van bovenstaande reacties met elkaar. Aan welke informatie zou je behoefte hebben?

In bovenstaand voorbeeld zijn drie soorten reacties te onderscheiden:
– weigeren mee te werken aan het onderzoek;
– gewillig meewerken;
– pas na rijp beraad meewerken of weigeren.

Uit een onderzoek onder 5-HAVO leerlingen is gebleken dat de meeste leerlingen de voorkeur hebben voor de laatstgenoemde soort reactie.
Als steun bij het 'rijp beraad' in deze en andere situaties zou de volgende vragenserie kunnen dienen.

1. Welk voordeel heb je bij de toepassing van ioniserende straling?
2. Welk voordeel hebben anderen er bij?
3. Welk risico loop je op korte of lange termijn met en zonder de toepassing?
4. Welk risico lopen anderen?
5. Kan het stralingsrisico worden verminderd?
6. Zijn er alternatieven voor stralingsgebruik denkbaar die met minder risico hetzelfde doel bereiken?

2. EVALUATIE VAN PERSOONLIJKE RISICO'S

In onderstaande situaties is sprake van een persoonlijk risico. Kies een van de situaties uit en evalueer deze volgens de vragenserie 1 t/m 6. Probeer of je op grond van de antwoorden tot een standpunt over de aanvaardbaarheid van het risico kunt komen. Wat zou je doen in zo'n situatie?

a. Je woont in de buurt van een kerncentrale.
b. Je kunt als bezoeker in een kerncentrale worden rondgeleid.
c. Je hebt je been gebroken. Er moet een röntgenfoto gemaakt worden.
d. De tandarts vindt het nodig jaarlijks röntgenfoto's van je gebit te maken.
e. Voor een onderzoek naar je schildklier moet je van de verpleegster een radioactief drankje innemen.
f. Om een hersentumor te bestrijden wil de specialist je laten bestralen.
g. Als bewoner van een nieuwbouwhuis hoor je dat gipsplaten radongas kunnen afgeven.
h. Als leerling moet je het practicum ioniserende straling doen.
i. In de supermarkt tref je een pak voedsel aan dat langdurig houdbaar is gemaakt door bestraling.
j. Als dienstplichtige moet je een opslagplaats bewaken waar mogelijk kernwapens opgeslagen liggen.

3. RISICO'S IN DE BEROEPSSFEER

Mensen die in hun beroep met radioactieve stoffen of met röntgenstraling te maken hebben, zullen ook wel hun gedachten hebben over persoonlijk risico en veiligheid. Probeer zo iemand te interviewen of uit te nodigen in de les. Leg haar of hem de vragenserie 1 t/m 6 voor en vraag naar hun standpunten.

Mensen die je zou kunnen benaderen:

- verpleegkundig personeel
- laborant
- tandarts
- medewerker kerncentrale
- technicus die met bronnen werkt
- medewerker rijdend ioniserende stralingspracticum
- medewerker Arbeidsinspectie
- radioloog of röntgenoloog
- stralingsfysicus

8.3 MAATSCHAPPELIJKE RISICO'S EN VEILIGHEID

1. KERNCENTRALES BOUWEN: JA OF NEE?

Tijdens een verjaardag komt het gesprek toevallig op kernenergie. Het gezelschap is nogal gemengd van samenstelling, dus na korte tijd loopt de discussie hoog op. Op een zeker moment gaat het over de vraag of in Nederland nieuwe kerncentrales moeten worden gebouwd. Met welke van de volgende uitspraken ben je het eens en waarom?

a. 'Er is al tientallen jaren ervaring met kerncentrales; ze weten heus wel wat ze doen.'

b. 'Als we allemaal een beetje zuiniger zijn met energie is zo'n ding toch niet nodig.'

c. 'Er is wel wat belangrijkers om me druk over te maken.'

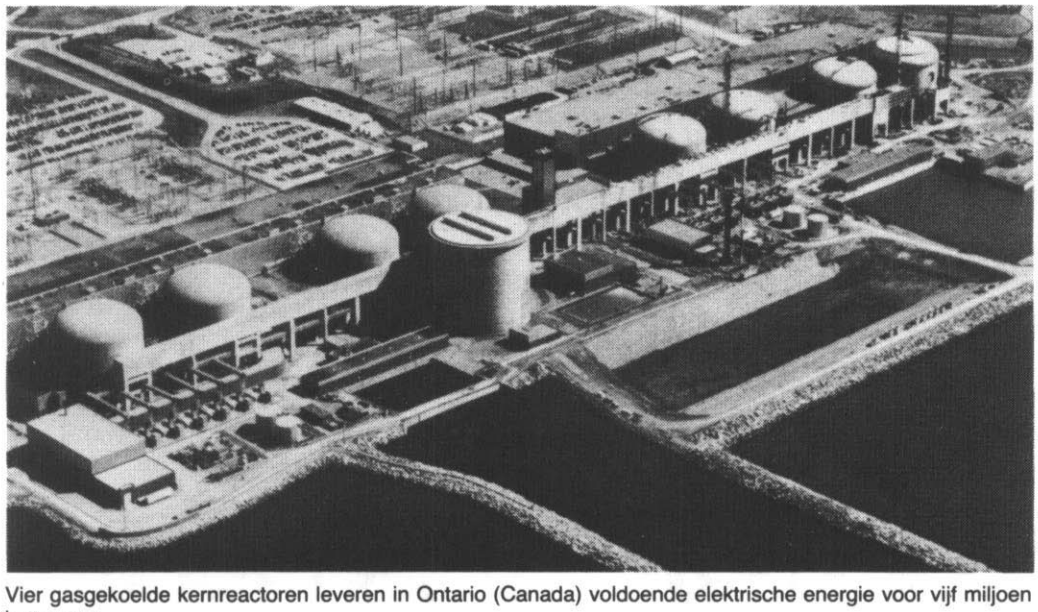
d. 'Er zijn types kerncentrales die niet zo gevaarlijk zijn.'

e. 'Kernenergie, nee bedankt.'

f. 'Voor mijn leven is dit niet zo belangrijk, maar mijn kinderen zitten met de rommel.'

g. 'Hij mag er alleen komen als alle mogelijke veiligheidsmaatregelen genomen zijn.'

h. 'Liever kerncentrales dan zure regen.'



Vier gasgekoelde kernreactoren leveren in Ontario (Canada) voldoende elektrische energie voor vijf miljoen bewoners.

Besluiten over de bouw van kerncentrales worden niet op verjaardagen genomen. Gelukkig maar. Bij dit soort besluiten gaat het om grote bedragen, die op de ene dan wel op de andere manier kunnen worden uitgegeven. De effecten van deze besluiten zijn verder van belang voor grote groepen mensen, een volk of zelfs de mensheid. Meestal worden dit soort besluiten dan ook genomen door instanties die grote groepen mensen, een volk of de mensheid vertegenwoordigen zoals een gemeenteraad, een parlement of de Verenigde Naties.

Alleen of samen met anderen kun je invloed uitoefenen op dit soort besluiten, al zijn de effecten van dat wat je doet vaak niet zo direct te merken. Mogelijkheden om invloed uit te oefenen zijn bijv.: stemmen bij verkiezingen, praten met en dus beïnvloeden van anderen, ingezonden brieven schrijven, vragen stellen op bijeenkomsten aan politici of demonstreren. Als je het onderwerp niet belangrijk vindt, kun je ook afwachten welk besluit er uit de bus komt en de gevolgen accepteren.
Nog méér dan in situaties met persoonlijke risico's, geldt voor maatschappelijke situaties dat andere dan natuurwetenschappelijke aspecten een rol spelen. Deze andere aspecten kunnen van economische, sociale of politieke aard zijn. Bij kernenergie zijn bijv. van belang de kosten, de mening van grote groepen van de bevolking en het in stand houden van een bepaalde regeringscoalitie. In de volgende activiteit gaat het daarom niet om volledigheid bij standpuntbepalingen, maar om dát deel van de kwestie dat gaat over risico's en veiligheid van ioniserende straling.

2. AANVAARDBARE RISICO'S?
Kies één van de volgende stellingen uit. Becommentarieer deze stelling door een evaluatie te maken van de risico's. Geef aan onder welke voorwaarden je het met de stelling eens kunt zijn.

a. Jaarlijks zouden alle Nederlanders moeten worden doorgelicht om verborgen ziektes op te sporen.

b. In mijn woonplaats moeten voldoende schuilkelders voor de bevolking komen.

c. Radioactief afval mag niet in zee worden gestort.

d. Proefboringen naar mogelijke plaatsen om radioactief afval op te slaan moeten mogelijk worden gemaakt.

e. Nederland mag kernenergie niet als mogelijkheid afwijzen.

f. In West-Europa mogen geen nieuwe kernwapens worden geplaatst.

g. Voedselbestraling mag in Nederland niet worden toegestaan.

h. De volksgezondheid is gediend met goed uitgeruste stralingsafdelingen van ziekenhuizen.

i. De Arbeidsinspectie moet radioactieve brandmelders verbieden.

INDEX

achtergrondstraling 5, 31
activiteit 14
α-straling 11
ALARA-principe 26
angiografie 66
atoomnummer 13

becquerel (Bq) 14
beeldversterker 65
beenmergsyndroom 22
bestralingsmethoden 74
  (γ-bron –) 74
  (lokale –) 74
  (röntgen –) 74
bestralingsplan 73
β-straling 11

centrale-zenuwstelselsyndroom 23
cep (circular error probable) 55
computertomografie (CT) 66
contrastvloeistof 66
curie (Ci) 14

darmsyndroom 22
diagnose 32
directe straling 39
dodelijk gebied 58
doorlichten 32, 65
dosis 15
dosisequivalent 19
dosislimiet 27
dracht 15
drempeldosis 24
drukgolf 57
dynamisch onderzoek 64, 70

effect
  (macro–) 7
  (meso–) 7
  (micro–) 7
elektromagnetische puls 57
ertsverwerking 44

fallout 39, 59
filmbadge 16
functie-onderzoek 64, 70
fusiebom 38

gammacamera 70
γ-straling 12
gasdiffusie 44
geiger-müller-teller 16
gen 25
gonade 19
gray (Gy) 15

halveringstijd 14
  (biologische –) 70
  (effectieve –) 70
hittestraling 57
hoog-actief vast afval (HAVA) 45

instabiele kern 14
in vitro onderzoek 71
in vivo onderzoek 71
inwendige straling 19
ion 5
ioniseren 5
isotoop 13

kerncentrale 44, 46
kernoorlog 60
kernsplijtingsafval (KSA) 45
kernstraling 5, 11
  (α–) 11
  (β–) 11
  (γ–) 12
kosmische straling 5, 31
kritiek (zijn van kernreactor) 36

laag-actief vast afval (LAVA) 45
latentietijd 21
leukemie 24
lichaamsdosis 20, 64
lokale dosis 20, 64

massadefect 35
massagetal 13
metastase 73
middel-actief vast afval (MAVA) 45
moderator 36, 47
mutatie 25
  (spontane –) 25

natuurlijke straling 5, 31
nucleaire geneeskunde 33
nucleaire winter 60
nuclide 13
  (moeder–) 34
  (dochter–) 34

opwerking 45
orgaangevoeligheid 19

palliatieve behandeling 64
PWR (pressurised water reactor) 47

rad 15
radioactief verval 12
radioactieve bron
  (gesloten –) 34
  (open –) 34
radiofarmacon 72
radiologisch werker 27
radiotherapie 72
reactorjaar 46
regelstaaf 36, 47
rem 19
risico 6, 7
risico-evaluatie 78
röntgenbuis 10
röntgenfoto 32, 65
röntgenstraling 10
  (harde –) 10
  (zachte –) 10

scan 70
schuilkelder 61
scintigram 70
sievert (Sv) 19
splijtingsbom 37
splijtstofcyclus 43
splijtstofelement 44
splijtstofstaaf 44
stamcel 22
steriliteit 22
straling
  (kern–) 5, 11
  (kosmische –) 5
  (kunstmatige –) 5
  (natuurlijke – of achtergrond–) 5, 31
stralingsabsorberend middel 66
stralingseffecten
  (acute –) 21
  (genetische –) 25
  (laat somatische –) 24
stralingsnormen 26
superkritieke massa 38

therapeutische slok 74
therapie 32
ton TNT 38
tumorvorming 19, 24

uitwendige straling 19
ultracentrifuge 44

verdubbelingsdosis 25
verrijking 44
vervalreeks 14

Begeleidingscommissie S.V.O.-project 0213 (vooronderzoek voor het PLON, 1972-1974)

F. van de Maesen (voorzitter tot 1973); hoogleraar natuurkunde Technische Hogeschool Eindhoven
N.J. Heijkoop (voorzitter 1973-1974); inspecteur voortgezet onderwijs
W.P.J. Lignac (secr.); secretaris Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde
S. Auer, algemeen didacticus Universiteit van Amsterdam
F. Balkema, inspecteur voortgezet onderwijs
H.P. Hooymayers, lector natuurkundedidactiek Rijks Universiteit Utrecht
H.J.L. Jongbloed (1972-1973), mediadeskundige NIAM
J. Schweers, leraar natuurkunde havo/vwo
J. Smit, inspecteur voortgezet onderwijs
E. Warries, hoogleraar onderwijskunde Technische Hogeschool Twente
M. van Wieringen (1973-1974), mediadeskundige NIAM

Stuurgroep PLON (1974-heden)

H.P. Hooymayers (voorzitter), hoogleraar natuurkundedidactiek Rijks Universiteit Utrecht
W.P.J. Lignac (secr. tot 1978), secretaris Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde
A.A.M. Agterberg (secr. sedert 1978), secretaris Advies Commissie voor de Leerplan Ontwikkeling Natuurkunde in oprichting
P. Broekman (sedert 1980), hoofd afdeling Bèta en Gammavakken CITO
F. Dekkers (sedert 1979), hoofddocent natuurkunde Moller Instituut
J. van Galen (sedert 1984), leraar natuurkunde havo, namens de NVON
J. de Jong (sedert 1984), leraar natuurkunde havo/vwo
J.W. Lackamp (sedert 1984), leraar natuurkunde havo/vwo
H. Lengkeek (tot 1977), leraar natuurkunde mavo
D.A. Lockhorst (tot 1978), leraar natuurkunde havo/vwo
J. Schipper (sedert 1980), medewerker A.P.S.
M. Sjamaar (sedert 1982), rector Niels Stensen College te Utrecht
A. Snater (tot 1980), hoofddocent natuurkunde Stichting Opleiding Leraren
F.J. Steenbrink (tot 1978), leraar natuurkunde vwo
J.M.F. Teunissen (tot 1975), onderwijskundige Rijks Universiteit Utrecht
W.C. Vink (tot 1979), directeur Christelijke Mavo te Putten
R. de Vries 1980-1984, leraar natuurkunde havo/vwo, namens de NVON
E. Warries (tot 1975), hoogleraar onderwijskunde Technische Hogeschool Twente
S.A. Wouthuysen (tot 1976), hoogleraar natuurkunde Universiteit van Amsterdam

Kerngroep PLON havo-bovenbouw

G. Buisman (sedert 1978), leraar natuurkunde hts
P.G. Hogenbirk (1981-1982), leraar natuurkunde havo/vwo
E. Holl (1982-1983), leraar natuurkunde havo/vwo
J. de Jong (sedert 1983), leraar natuurkunde havo/vwo
E. Maarschall (1978-1981), leraar natuurkunde hts
H. Poorthuis (1978-1981), leraar natuurkunde havo-top pedagogische academie
J. Scherrenburg (sedert 1978), hoofddocent natuurkunde Stichting Opleiding Leraren
W.J.G. Schraven (1978-1983), leraar natuurkunde havo/vwo
M. van Woerkom (sedert 1982), leraar natuurkunde havo/vwo

PLON-team havo-bovenbouw

H.M.C. Eijkelhof (sedert 1981)
R. van Eyck (1981-1982)
A.C.L. van Gameren (sedert 1977)
D. van Genderen, Rijks Universiteit Utrecht
F.L. Gravenberch (1978-1983)
P.G. Hogenbirk (1981-1983)
E. Holl (sedert 1983)
T. Jörg (sedert 1982)
W.H. Kamphuis (sedert 1978)
P.T. Kloek (sedert 1983)
J. Kortland (sedert 1982)
P.L. Lijnse, Rijks Universiteit Utrecht
F.A. v.d. Loo, Rijks Universiteit Utrecht
B. Pelupessy (sedert 1978)
T. Römgens (1979-1981)
P. Verhagen (sedert 1983)
H. Vermeulen (1981-1983)
R.F.A. Wierstra (sedert 1978)

PLON-administratie

E. van den Broek (1976-1979)
R. Lindeman (1977-1980)
M. Rolff van den Baumen (1974-1979)
N. Rotteveel (sedert 1982)
A.G. Schwering (1980-1982)
B. Schillert (sedert 1980)
H. Veurink (tot 1974)

Tekeningen

A. Lurvink (Onderwijs Media Instituut, Rijks Universiteit Utrecht)
H. de Waal (Onderwijs Media Instituut, Rijks Universiteit Utrecht)

Foto's

A.C.L. van Gameren (PLON)
W.H. Kamphuis (PLON)

PLON-CITO (namens CITO)

F. Boessenkool
P. Broekman
C. Hellingman
T. Heuvelmans
H. Vonken

Proefscholen 1983-1984

Ashram College te Alphen a/d Rijn
S.G. Nijmegen Oost te Nijmegen
Chr. S.G. Revius te Deventer
S.G. Oost Betuwe te Bemmel
Hertog Jan College te Valkenswaard
Marnix College te Ede
Niels Stensen College te Utrecht
Eemland College Noord te Amersfoort
Chr. S.G. Jan van Arkel te Hardenberg
S.G. Huizermaat te Huizen
Chr. Lyceum en Havo te Veenendaal

Overzicht van PLON-thema's voor havo-bovenbouw

VOOR DE 4e KLAS

- Vergelijken
- Weersveranderingen
- Muziek
- Verkeer
- Elektrische Machines
- Energie en Kwaliteit

VOOR DE 5e KLAS

- Materie
- Lichtbronnen
- Ioniserende Straling
- Elektronica
- Repeteerthema

Tevens zijn beschikbaar:

- docentenhandleidingen (AVOL's) en apparatuurgidsen bij elk thema