



Aantekeningen voor de leerkracht en Apparatuurgids

Ioniserende Straling



Een lessenserie waarin de leerlingen:

- leren hoe ioniserende straling ontstaat en hoe het gemeten wordt
- de eigenschappen van ioniserende straling leren kennen
- kennis maken met het effect van ioniserende straling op het menselijk lichaam
- enkele toepassingen van ioniserende straling bestuderen
- proberen te komen tot een afweging van de voor- en nadelen van deze toepassingen.

Experimentele uitgave voor de vijfde klas HAVO.



© 1984 Rijksuniversiteit Utrecht

Deze AVOL maakt deel uit van experimenteel lesmateriaal. Overname of referentie uitsluitend na toestemming van de medewerkers van het PLON, Lab.Vaste Stof, Postbus 80.008, 3508 TA Utrecht, tel. 030-532717.

INHOUD

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

VOORWOORD

Het thema Ioniserende Straling is het negende thema in het PLON-curriculum voor HAVO-bovenbouw. Het wordt bovendien gebruikt in het VWO-bovenbouw-project in 5 VWO (incl. een aanvullend VWO-hoofdstuk). Evenals de voorgaande thema's is dit thema herschreven nadat ervaring is opgedaan met een vorige versie.

Deze AVOL is geschreven voor docenten die met het thema "Ioniserende Straling" werken. Hij bevat daartoe suggesties voor een lessenplan, voor experimenten en andere werkvormen. Ook de achtergronden van het thema komen ter sprake.

Praktijkervaringen met deze versie van "Ioniserende Straling" zijn er op dit moment nog niet. We hopen deze ervaringen in een volgende versie van deze AVOL te kunnen verwerken. Opmerkingen en aanvullingen over zowel het thema als deze AVOL stellen we dan ook zeer op prijs.

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

september 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 • Weersveranderingen • Muziek • Verkeer • Elektrische Machines • Energie en Kwaliteit	• Materie • Lichtbronnen • Ioniserende Straling • Elektronica • Examen Doen

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 gezien van de gebruikerskant. Deze keuze behoeft enige toelichting.

Leerlingen hebben nu en in de toekomst, direct en indirect, 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 reacties oproept bij het publiek. Dit wordt geïllustreerd 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

PLAATS EN KARAKTER VAN HET THEMA

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 aspecten in het curriculum al veel aandacht krijgen. De uitvoerige aandacht voor medische toepassingen gebeurt met de bedoeling leerlingen te oriënteren 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.

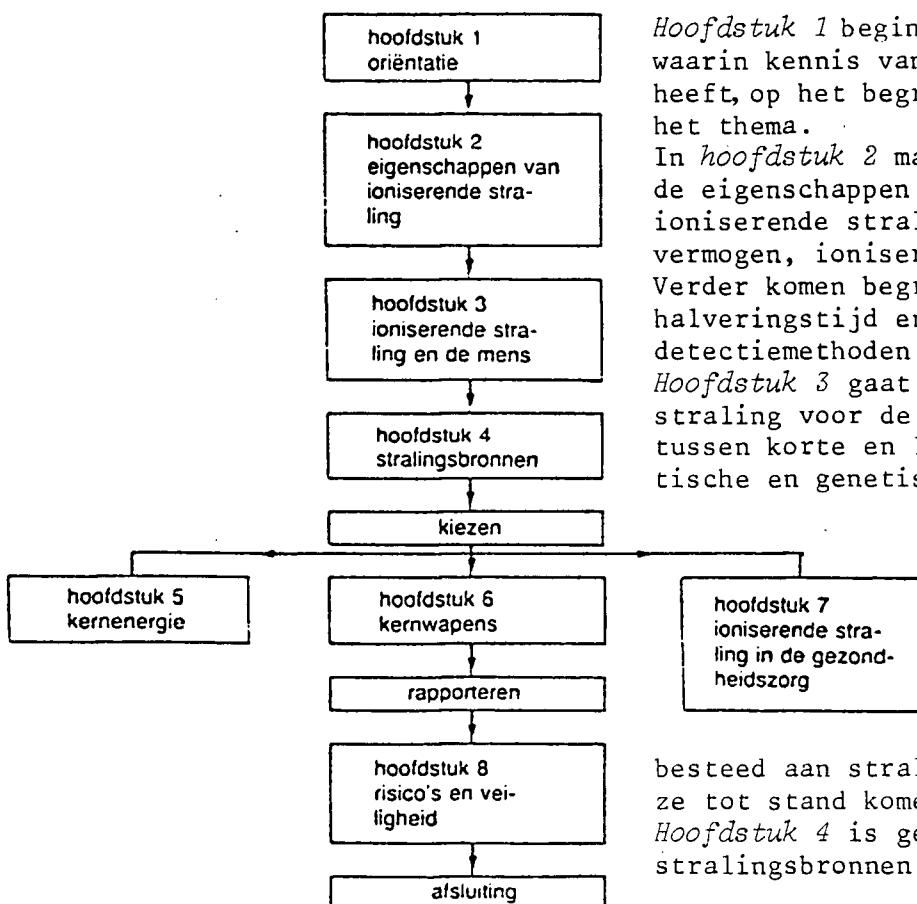
PLAATS EN KARAKTER VAN HET THEMA

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 reacties 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 didactische opbouw;
- meer leerlingactiviteiten;
- leerstof uit de keuzehoofdstukken 5, 6 en 7, die door alle leerlingen gekend moet worden, verwerken in hoofdstuk 4 dat hiermee een oriënterend 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 oriëntatie 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

PLAATS EN KARAKTER VAN HET THEMA

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 activiteiten 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 stralingspracticum. De nadruk in dit thema ligt dan ook niet op experimenteervaardigheden.

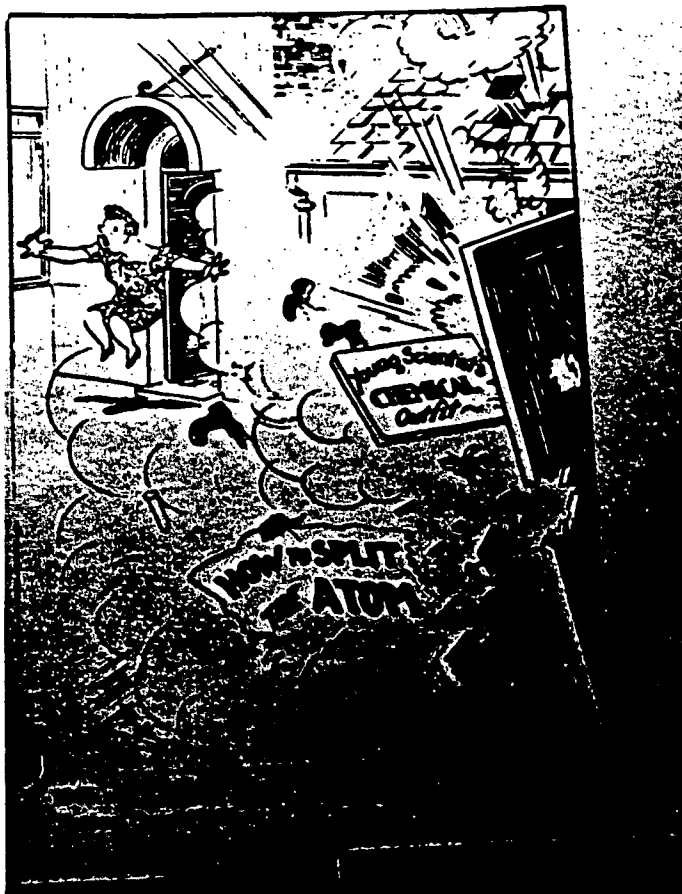
De volgende vaardigheden komen aan de orde in dit thema:

- de waarde van een grootte 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 kernreactievergelijking 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.

LEERSTOF, VAARDIGHEDEN, BEGINSITUATIE

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 atoommodellen 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
Stralingspracticum	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.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

HOOFDSTUK 1: ORIENTATIE

<i>Uitwerking lessenplan</i>	
lesnr	onderdeel
1	orientatie op het begrip risico orientatie op het thema "Ioniserende Straling"

Bedoeling

- orientatie op het begrip ioniserende straling
- orientatie op het begrip risico
- orientatie op de opzet van het thema

leerlingactiviteiten

- beschrijven van situaties waarin leerlingen met ioniserende straling in aanraking zijn geweest
- opgaven over risico (kans en gevolg) maken
- teksten bestuderen
- associëren bij het begrip straling

Didaktische aanwijzingen

- 1.1 - In plaats van opgave 1 zouden de leerlingen gevraagd kunnen worden te associëren op het begrip straling. Wat voor ideeën, gevoelens, opvattingen, ervaringen roept dat begrip bij hen op?
De leraar kan hiervoor verschillende methoden gebruiken:
 - leerlingen vullen een korte vragenlijst in
 - opmerkingen in klassediscussie worden op bord geschreven
 Ook kan men de behoefte bij leerlingen om informatie te krijgen, peilen.
 - Opdracht 1 kan kort in groepjes worden uitgevoerd met rapportage in een klasseggesprek, bijv. via flappen. Een totaaloverzicht van de gewenste kennis kan worden gemaakt.
 - Een actueel krantestukje kan ook dienen om benodigde kennis te inventariseren.
- 1.2 - Voornaamste doel is het inzicht dat risico's een kans- en gevolg-kant hebben. Laat mogelijke berekeningswijzen aan bod komen maar relativeer die ook. Naar deze paragraaf kan in de loop van het thema worden terugverwezen.
- 1.3 - Ga na of de subthemavragen overeenkomen met de kennis die de leerlingen wilden vergaren (activiteiten bij 1.1).
 - Wellicht kan de leerlingen nu al gevraagd worden een keuze te maken uit de hoofdstukken 5 t/m 7 met het oog op het tijdig vergaren van informatie of het maken van afspraken.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

Toelichting bij enkele opgaven

- 1.1 1. Ook andere situaties mogen natuurlijk aan bod komen. Bij meerdere situaties de meest recente laten kiezen of de meest aangrijpende.
- 1.2 1. a. Hoe vaak wordt er gecontroleerd?
b. Boete + kaartje dat alsnog moet worden gekocht.
c. Vergelijk kans $\times$ (boete + kaartje) met kosten kaartje:
bijv. $\frac{10}{100} \times f26,- = f2,60$: nooit doen!
of $\frac{2}{100} \times f26,- = f0,52$: loont de moeite!
- d. Bijv. voor schut zitten in de bus bij gepakt worden, boze reacties van ouders, nervositeit bij elke rit, leuke spanning (soort loterij), principiële opvatting dat openbaar vervoer gratis hoort te zijn of dat je behoort te betalen voor het gebruik van openbare diensten.
2. a. Aantal fiets ongevallen per jaar (N_{ong}), totaal aantal fietskm per jaar in Nederland (S_{tot}), aantal persoonlijke fietskm per jaar (S_p). $\text{Kans} = \frac{S_p}{S_{\text{tot}}} \times N_{\text{ong}}$.
Verwaarloosd zijn dan factoren zoals leeftijd, stad/platteland, voorzichtigheid, staat van de fiets.
- b. Als gevolg wordt dan alleen gekeken naar overlijden. Bepaalde verwondingen (soms leidend tot invaliditeit) worden dan over het hoofd gezien.
3. a. Voorbeelden zijn resp.:
- uitglijden over een banaan, ramen breken bij doorbreken van geluidsbarriere, bekeurd worden voor rijden zonder achterlicht
- vogelpoep op je kleren krijgen, lekke band krijgen, een trein missen
- watersnoodramp in Zeeland, ontploffing van LPG-opslagtank, passagier zijn van neerstortend vliegtuig
- aan kanker lijden, hart- en vaatziekte krijgen, stervende bossen als gevolg van zure regen.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

HOOFDSTUK 2: EIGENSCHAPPEN VAN IONISERENDE STRALING

<i>Uitwerking lessenplan</i>	
lesnr	onderdeel
2	2.1 (röntgenstraling)
3	2.2 (kernstraling)
4	2.3 (radioactief verval)
5	2.4 + 2.5 (hoeveelheden + meting)

Bedoeling

- inzicht verschaffen in de aard van röntgen- en kernstraling
- inzicht verschaffen in de oorsprong van röntgen- en kernstraling
- leren nucleaire reactie-vergelijkingen kloppend te maken
- vertrouwd raken met het gebruik van de begrippen activiteit en halveringstijd
- kennismaken met het begrip stralingsdosis en met factoren die op de grootte van de ontvangen dosis van invloed zijn
- een tweetal detectie-methoden kennen die in de stralingsbescherming een rol spelen.

Leerlingactiviteiten

- bestuderen van informatieve teksten
- rekenen aan röntgenstraling
- bestuderen van de bouw van een röntgenbuis
- verschillende soorten straling met elkaar vergelijken
- nucleaire reactievergelijkingen opstellen
- rekenen aan activiteit als functie van de halveringstijd
- dosisberekeningen maken als functie van de afstand
- diverse andere opgaven maken

Didaktische aanwijzingen

- 2.1 - In deze paragraaf wordt gebruik gemaakt van kennis opgedaan in de thema's "Materie" (ontdekking en eigenschappen röntgenstraling) en "Lichtbronnen" (Bohr-model van het atoom).
 - Remstraling wordt alleen in de marge genoemd. In het VWO-hoofdstuk wordt hierop verder gegaan. Voor de HAVO kan worden volstaan met de röntgenlijnen.
 - Bij de werking van de röntgenbuis is vooral de relatie tussen beide spanningen en de uitgezonden röntgenstraling van belang.
- 2.2 - Deze paragraaf bevat zeer beknopt veel informatie die echter niet al te moeilijk is. We bevelen aan de leerlingen zelfstandig de informatie te laten verwerken met behulp van de opgaven.

- 2.1
1. a. overeenkomsten: elektromagnetische straling, fotonen, lichtsnelheid, straling afkomstig van elektronenenergieniveaus.
verschillen: detectie door oog, energie van fotonen zeer verschillend, oorsprong uit "buitenste"-en "binnenste" elektronenniveaus.
 - b. λ kleiner en c gelijk, dus f groter en ook hf (energie van foton) groter
 - c. zichtbaar licht $2,48 \cdot 10^{-19} < hf < 4,95 \cdot 10^{-19}$ J
 of 1,55 $< hf < 3,10$ eV
röntgenstraling $1,98 \cdot 10^{-17} < hf < 1,98 \cdot 10^{-14}$ J
 of 0,124 $< hf < 124$ keV
2. a. om energieverlies te voorkomen
 - b. hoog smeltpunt (3650 K)
 - c. productie van elektronenbundel en versnelling van elektronen
 - d. hogere energie van röntgenstraling
 - e. intensievere bundel röntgenstraling (meer fotonen van zelfde energie) omdat meer elektronen ter versnelling vrijkomen bij kathode
3. tenminste 124 keV (zie opgave 1)

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

2.2 1. a.

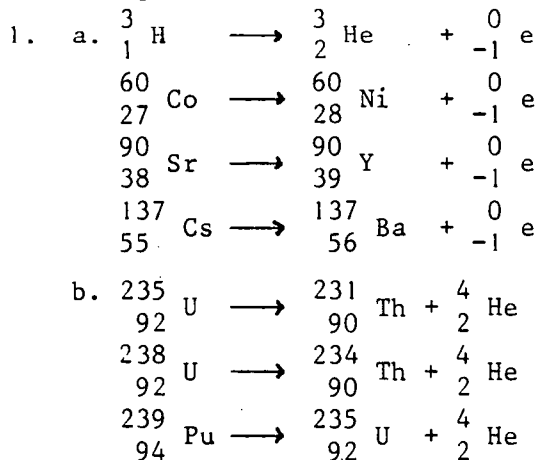
soort eigenschappen	α	β	γ
lading	+2	-1	-
massa	+7400 e	1e	-
max. snelheid	0,1c	0,9c	c
doordringings- vermogen	gering	vrij groot	zeer groot
ioniserend effect	groot	vrij groot	gering

- b. γ : geen afbuiging in magnetisch veld
 β : grote afbuiging in magnetisch veld
 α : geringe afbuiging in magnetisch veld

2. a. ioniserend vermogen
 b. γ -straling: ook e.m. straling
 c. α en β -straling: doordringingsvermogen niet erg groot
 3. Met verwaarlozing van relativistisch effect:

$$E = \frac{1}{2} mv^2 = 3 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 19 \text{ MeV}$$

2.3



2. $\alpha, \alpha, \alpha, \alpha, \beta, \beta, \alpha$.
 3. 3 halveringstijden = 15,6 jaar
 4. b. 25 min., 25 min.
 c. 25 min.
 d. 50 min.

2.4

1. a. 980 J
 b. 540 MJ
 2. activiteit van bron, energie van de straling, soort straling, afstand van bron tot gezwel, diepte van het gezwel onder de huid, soort weefsel van het gezwel, omvang van het gezwel.
 3. a. γ -straling
 b. 100 mGy; 4 mGy; 0,25 mGy; 0,01 mGy
 c. hoger, want in de dosis op 10 meter zat de absorptie al verrekend.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

- 2.5
 - 1.
 - a. Het omhulsel van de film zal al veel α -deeltjes tegenhouden; niet zo erg want α -straling is uitwendig niet zo'n probleem.
 - b.
 - meting achteraf, dus kwaad is reeds geschied bij ontwikkelen van film,
 - bij ontwikkelen kan wel blijken dat er een te hoge dosis is ontvangen maar niet waardoor en wanneer.
 - 2.
 - a. ioniserend vermogen
 - b. om absorptie van straling te voorkomen
 - c. α -straling

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

HOOFDSTUK 3: IONISERENDE STRALING EN DE MENS

<i>uitwerking lessenplan</i>	
lesnr	onderdeel
6	par. 3.1 en 3.2
7	par. 3.3 t/m 3.5

Bedoeling

- verschaffen van de benodigde voorkennis die noodzakelijk is bij de te maken afwegingen in de rest van het thema
- inzicht in de samenstelling van het gemiddelde dosisequivalent dat elke Nederlander jaarlijks ontvangt
- inzicht in de rol van de stralingsbescherming en enkele principes die daaraan ten grondslag liggen, met name de stralingsnormen.

Leerlingactiviteiten

- lezen
- opdrachten maken
- luisteren naar de leerkracht
- bespreken en bediscussieren.

Didaktische aanwijzingen

Dit hoofdstuk zou bij de traditionele vakkenindeling bij biologie worden ingedeeld. We hebben gemeend dit hoofdstuk toch te moeten opnemen in dit thema vanwege de nauwe samenhang met het risico-aspect van ioniserende straling.

Bovendien krijgt volgens onze informatiebronnen dit onderwerp in de meeste biologiecursussen weinig aandacht, zodat hierop niet kan worden gerekend.

In het hoofdstuk komen enkele onderscheidingen voor die van belang zijn:

- geabsorbeerde dosis/dosisequivalent
- lokale dosis/lichaamsdosis
- inwendige/uitwendige bestraling
- acute/late effecten
- somatische/genetische effecten
- risico voor radiologische werkers/risico voor bevolking

In de lessentabel zijn voor dit hoofdstuk twee lessen uitgetrokken en dat is niet veel voor een zo complex geheel. Bij de behandeling zal de nadruk moeten liggen op par. 1 en 5, terwijl een globale kennis van de tussenliggende paragrafen voldoende is. Bij het werken aan de keuzeonderwerpen kunnen leerlingen dan eventueel daarop terugrijpen.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

- 3.1 Een aantal van de bovenstaande belangrijke verschillen komt hier aan de orde waardoor een grondige behandeling van deze paragraaf aan te bevelen is.
Bij de tabel zou erop gewezen kunnen worden dat onderzoeken in gebieden met een sterke achtergrondstraling geen hogere percentages van kanker of geboortefwijkingen aan het licht gebracht hebben.
De opdrachten 1,2 en 4 zijn verwerkingsvragen.
- 3.2 Aan de onmiddellijke effecten wordt in de tekst niet zoveel aandacht besteed. In bijlage is daarover meer te vinden.
De opdrachten 1 en 2 zijn verwerkingsvragen.
- 3.3 In deze paragraaf staat de strijd over de schadelijkheid van kleine doses centraal. In tegenstelling tot vele chemische stoffen gaat men er bij straling vanuit dat de onschadelijkheid bewezen dient te worden, waardoor de meest pessimistische schatting tot norm wordt gekozen.
Opdracht 1 en 2 zijn verwerkingsvragen.
- 3.4 Er zijn waarschijnlijk maar weinig leerlingen in de klas die iets van genetica weten. Bij biologie wordt dit onderdeel meestal pas later in de 5 HAVO cursus behandeld of komt het helemaal niet aan de orde.
Het gaat hierbij ook niet om een precieze kennis over genen, mutaties, DNA, chromosomen enz. maar om het resultaat van de straling voor het nageslacht.
- 3.5 Sommigen stellendat het ALARA-principe beide andere principes omvat. Dit is niet juist. Volgens het ALARA principe dient men, ook als de balans al in het voordeel van de toepassing is doorgeslagen, te streven naar een minimale dosis. De normen stellen daarbij de grenzen van wat nog toelaatbaar is. De naam "norm" is tegenwoordig vervangen door het woord "dosislimiet" om aan te geven dat het hier echt een limiet betreft.
Opdracht 1 en 2 zijn verwerkingsvragen.
In opdracht 3 komen vele aspecten van de afgelopen hoofdstukken aan de orde, daardoor is het een goede opdracht als afsluiting van dit hoofdstuk.

Toelichting bij enkele opgaven

- 3.1
1. K-40: β ; C-14: β ; Ra-226: α, γ ; Rn-222: α
 2. In de ongeboren vrucht vinden zeer veel celdelingen plaats waardoor deze zeer gevoelig is voor ioniserende straling.
 3. In elke cel bevinden zich chromosomen. Deze zijn als het ware de informatieopslagplaats van de cel. Bij een celdeling splitsen de chromosomen zich, waardoor na de celdeling beide cellen over een identiek pakket informatie beschikken. Deze genetische (= erfelijke) informatie wordt gebruikt voor het vervaardigen van vele soorten eiwitten waarmee het functioneren van de cel geregeld wordt. Elk chromosoom bestaat uit genen, elke gen bestaat uit desoxyribonucleïnezuur (DNA). Ionisaties in een DNA molecuul kunnen leiden tot een veranderde chemische samenstelling en daarmee tot een verandering in de genetische informatie (een mutatie).
 4. De omrekeningsfactor is voor β - en γ -straling gelijk aan 1. De α -straling heeft wel een hoge omrekeningsfactor (kwaliteitsfactor genoemd) maar deze is alleen van belang bij inwendige bestraling. Bij uitwendige bestraling vinden de ionisaties plaats in de dode cellen van de hoornlaag van de opperhuid.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

5. Laten we aannemen dat een piloot twee intercontinentale vluchten per week maakt, die elk zes uur duren. Als de piloot 6 weken vakantie per jaar heeft maakt hij ongeveer 90 vluchten per jaar, ofwel 540 uur. Dat komt overeen met $540 \cdot 0,005 \text{ mSv} = 2,7 \text{ mSv}$. Dat is aanzienlijk in vergelijking met de achtergrondstraling, dus een verhoogd risico (vergelijk ook met pag. 27).
- 3.2
 1. Zie pag. 22
 2. Meercellige organismen kunnen zich, door celdeling, nog herstellen als een deel van de cellen beschadigd is. Als het percentage beschadigde cellen te hoog wordt daalt de overlevingskans vrij snel. De grafiek heeft dan ook een "schouder".
 3. -
- 3.3
 1.
 - a. voor het eerst na 4 jaar, voor het laatst na 43 jaar.
 - b. leukemie 10 jaar en tumorvorming 25 jaar
 2.
 - a. - experimenten kunnen alleen met dieren gedaan worden.
- bij mensen zijn er alleen gegevens bekend na ongevallen. De precieze dosis is dan vaak niet bekend. Bovendien is deze vaak onregelmatig over het lichaam verdeeld.
 - b. De effecten komen zonder een extra stralingsdosis ook voor. Bij een lage dosis is de toename ten gevolge van de dosis zo klein dat een grootschalig onderzoek nodig is.
 - c. diagram c
 - d. diagram a; diagram b is pessimistischer
- 3.5
 1. Binnen de limieten is een dergelijke behandeling niet mogelijk. Het voordeel van de bestraalde persoon is zo groot, dat deze moet kunnen besluiten toch de behandeling te ondergaan. Vele lange-termijneffecten spelen bijv. een minder belangrijke rol. Het ALARA principe houdt de dosis zo laag mogelijk.
 2.
 - a. Dat blijkt niet zo heel duidelijk uit de getalswaarden. De verschillen zitten in de voetnoten.
 - b. Werkgevers van radiologische werkers zoals bijv. de kernenergieproducenten. Bij reparaties benaderen werknemers regelmatig de jaarlijkse dosislimiet, waardoor ze niet meer bij een volgende reparatie ingezet kunnen worden. Ook de veiligheidsmaatregelen moeten strenger zijn bij hoge normen, en ook dat is kostbaar.
 - c. Ze komen aardig overeen. De ICRP noemt geen norm voor borsten. De ooglenzen wordt in de tabel niet genoemd. Gonaden en bloedvormende organen (rode beenmerg) zijn in beide lijsten gevoelig. Handen enz. hebben een vrij hoge dosislimiet, hetgeen overeenkomt met de waarde in de tabel. De overige organen zijn gevoeliger.
 3. De tekst van het kranteartikel was op het moment van schrijven van deze AVOL niet beschikbaar.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

HOOFDSTUK 4: STRALINGSBRONNEN

<i>uitwerking lessenplan</i>	
lesnr	onderdeel
8	4.1 (natuurlijke straling)
9	4.2 (gezondheidszorg)
10	4.3 (kernenergie)
11	4.4 (kernwapens)
12	4.5 (overige toepassingen)
	keuze uit hoofdstukken 5, 6, 7

Bedoeling

- overzicht geven van uiteenlopende toepassingen van straling
- verduidelijken van verschil natuurlijke - kunstmatige straling
- verwerken van kennis uit hoofdstukken 2 en 3 in reële toepassingssituaties
- inzicht verschaffen in de herkomst van splijtings- en fusieenergie
- de orde van grootte laten inzien van de eigen stralingsbelasting
- oriëntatie op keuzehoofdstukken (5, 6, 7)

Leerlingactiviteiten

- berekeningen over stralingsbelasting maken
- overige opgaven maken (verklaren, berekenen, uitleggen)
- teksten bestuderen

Didaktische aanwijzingen

- 4.1 De nadruk ligt op het onderscheid natuurlijke - kunstmatige straling en op factoren die van invloed zijn op de natuurlijke stralingsdosis. Het gaat daarbij niet om precieze cijfers, bronnen spreken elkaar tegen. Zo is de margetabel niet in overeenstemming met de tekst. In deze tabel moet dan ook meer gelet worden op de veranderingen ten gevolge van hoogte en breedtegraad dan op de nauwkeurigheid van de opgegeven waarden.
- 4.2 Belangrijke punten in deze paragraaf:
- onderscheid diagnostisch - therapeutisch gebruik
 - uiteenlopende doses, afhankelijk van doel toepassing
 - inleiding tot nucleaire geneeskunde
 - onderscheid open - gesloten bronnen
- De bespreking van de generator is facultatief.
- 4.3 In dit stuk gaat het om het principe van kernsplijting. Belangrijke punten zijn verder de oorsprong en de vorm van de energie die beschikbaar komt en het kritiek worden van een reactor. Fysisch gezien zijn we niet helemaal nauwkeurig in de beschrijving van het energieproces bij de splijting van een kern. De indruk zou kunnen worden gewekt dat massa wordt omgezet in energie, al hebben we vermeden dat te zeggen.

Beter zou zijn geweest te schrijven dat massa wordt behouden en dat dit ook voor energie geldt omdat alle massa's in energie en vice versa kunnen worden uitgedrukt. Dat brengt ons echter op relativistisch terrein en dat lijkt ons te ver voeren. Voor wie er meer over wil weten onderstaand een stukje uit een artikel van Robert Lehrman in The Physics Teacher van januari 1973.

It is sometimes stated that Albert Einstein found an exception to the law of conservation of energy by showing that mass can be converted into energy. While it would be possible to compose a consistent picture of the universe on this basis, it is not convenient to do so.⁷ Such a picture would require us to define mass as an invariant, equivalent to what is now called rest mass. This in turn would make new definitions of momentum necessary, and would confuse tremendously the relationship between mass and temperature. Einstein's method was to define relativistic mass, which is a function of the frame of reference. Using this approach, energy and mass are merely two different ways of expressing a certain property of a system—and that property is a conserved quantity.

The equation $E = mc^2$ does not state that mass can be converted into energy. What it says is that the total energy of a system can be found by multiplying its mass

by a universal constant. In a frame of reference affixed to the object, multiplying its mass by c^2 yields a quantity called rest mass energy. If the object is in motion, it has additional energy (kinetic energy) which is equal to $mv^2/2$ plus some other terms which are negligible unless v is near the speed of light. It also has additional mass, and the amount of this extra mass can be found by dividing the kinetic energy by c^2 . Similarly, an increase in temperature results in increase in mass. The extra mass is found by dividing the increased kinetic energy of the molecules by c^2 . In short, any sort of energy has mass, and any mass has energy. The universal constant c^2 is no more than a factor for converting to a different set of units.

The rest mass of an object may include all sorts of energy. It surely includes the kinetic energy of the molecules, electrons, and nucleons, and various forms of potential energy. The high energy physicists will have

to find out just how the internal structure of subnucleonic particles contributes to the total energy, and whether there is any residue of rest mass energy when all forms of kinetic and potential energy have been accounted for. Thermodynamics introduced the concept of internal energy, a quantity whose absolute magnitude was never defined, but whose changes are considered in many relationships. It now appears that the best expression for total internal energy is the rest mass energy, m_0c^2 .

But is it not true that in a nuclear explosion the mass is converted into energy? Not really. The energy equation of such an event might be written something like this:

rest mass energy of fuel =
 rest mass energy of fission products
 + kinetic energy of fission products
 + increased kinetic energy of other objects
 + radiant energy

where the kinetic energy terms include both a random component (thermal energy) and an organized component (blast). By dividing this whole equation by c^2 , we get another equation which expresses the same event in terms of conservation of mass:

rest mass of fuel =
 rest mass of fission products
 + relativistic mass increase of fission products
 + relativistic mass increase of other objects
 + mass of photons produced.

Precisely the same pair of equations could be applied to a chemical explosion; there is nothing different about the mass and energy relationships involved except in amount. Relativity has not changed the fact that energy is conserved. It has merely shown that this law is identical with an older one: the conservation of mass. Energy is conserved, or it is nothing.

- 4.4 In het eerste deel gaat het om het gebruik van splijtings- en fusieprocessen in kernwapens. Het tweede deel behandelt alleen de stralings-effecten (directe en latere) van de explosie van kernwapens. De andere effecten komen in hoofdstuk 6 aan bod.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

- 4.5 Voor de volledigheid zijn deze toepassingen toegevoegd.
Bij de bepaling van de eigen stralingsbelasting gaat het niet om nauwkeurige berekeningen maar om de relatieve grootte van de diverse bijdragen en om een indruk te geven van de totale jaarlijkse dosis vergeleken met de geldende normen in ons land.

Toelichting bij enkele opgaven

- 4.1
1. a. breedtegraad en hoogte
b. in de buurt van de polen het hoogst, bij de evenaar minder
c. ca. 6 uur vlucht, dus $+ 30 \mu\text{Sv}$
d. kortere duur van de vlucht
 2. a. andere nucliden zijn reeds vervallen
b. thorium-234, calcium-40 en radium-228 (vergelijk par. 2.3)
c. radon is een gas en inademing leidt tot inwendige bestraling, uranium-erts is een α -straler en uitwendig is dit niet zo gevaarlijk.
 3. a. $900-1200 \mu\text{Sv}$
b. dicht bij de evenaar en op zeeniveau wonen, invloed van diverse bouwmaterialen nagaan en dit mee laten wegen bij de keuze van woning.
c. bouwmaterialen bevatten in meer of mindere mate radioactieve stoffen; bepaalde vervalprodukten zijn gasvormig (bijv. radon) en slechte ventilatie maakt de kans op inwendige bestraling groter. Sommige gipsplaten en -blokken zijn in dit verband berucht.
- 4.2
1. a. Kortere tijdsduur bij foto (moment-opname)
b. minder gevoelige films, meer strooi-straling door gebrekkige apparatuur en afscherming
c. tijdsduur, afstand, hoogspanning
 2. a. γ -straling, groter doordringingsvermogen, minder ionisaties in weefsel.
b. gering doordringingsvermogen, veel ionisaties in weefsel
c. injectiespuiten, injectienaalden, urine, ontlasting, kleding (transpiratie), rubber handschoenen, handdoeken.
 3. a. door korte halveringstijd neemt de activiteit snel af
b.
$${}_{42}^{99}\text{Mo} \longrightarrow {}_{43}^{99\text{m}}\text{Tc} + {}_0^{-1}\text{e}$$

c. $4 \times 167 = 668 \text{ uur} = 28 \text{ dagen}$
 4. a. de bronnen zijn lang bruikbaar en hebben een vrijwel constante activiteit
b. leeftijd; beschikbaarheid van andere methoden; grootte, diepte en plaats van de tumor.
- 4.3
1. a. zie p. 35
b. $160 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 2,6 \cdot 10^{-11} \text{ J}$
c. $m = E/c^2 = 2,9 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$
d. 17%
e. $2,56 \cdot 10^{21}$ kernen
f. $6,7 \cdot 10^{10} \text{ J}$
g. 2600 kg
 2. a. 3 neutronen
b. ze worden geabsorbeerd door materialen in de reactor die hierdoor radioactief worden.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

3. a. $^{90}_{37}\text{Rb}$, $^{90}_{39}\text{Y}$ en $^{143}_{57}\text{La}$, $^{143}_{59}\text{Pr}$.
b. Strontium-90 vanwege de relatief lange halveringstijd
- 4.4 1. a. 59 kg
b. $1,5 \cdot 10^{26} \cdot 180 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 4,2 \cdot 10^{15} \text{ J}$
c. - splijtingsprodukten zoals Kr-90, Ba-143, Sr-94, Xe-140
- neutronen
2. a. - splijtingsbom is logisch vervolg op kernreaktor (superkritieke massa in plaats van kritieke)
- voor fusiebom is splijtingsbom noodzakelijk om de hoge T te bereiken
b. - energie komt vrij uit kernen
- zeer veel energie komt vrij
- beide gebruiken splijtingsprincipe
c. - de een kan niet zonder de ander, maar niet andersom
- fusiebommen kunnen krachtiger zijn
- splijtingsbommen leveren meer radioactieve bijprodukten na explosie
3. a. uitwendig: met name γ -straling
inwendig: alle soorten radioactieve produkten via voedsel, water en lucht
b. veel kortlevende radioactieve produkten leveren in het begin een hoge bijdrage, radioactieve stoffen met een grote halveringstijd hebben een lagere activiteit.
c. windrichting, windsnelheid, hoogte van explosie, kracht van de explosie, type bom
d. veel grotere hoeveelheid radioactieve stoffen komt in de atmosfeer.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

HOOFDSTUK 5: KERNENERGIE

<i>lessenplan</i>	
lesnr.	onderdeel
13	par. 5.1 t/m 5.3
14, 15	par. 5.4 + activiteit kiezen Presentatie voorbereiden
16, 17	Presentatie

Bedoeling

- laten zien dat bij de studie van de risico's van kernenergie de gehele splijtstofcyclus meegenomen moet worden.
- globale kennis verkrijgen van de bewerkingen in de verschillende fasen van de splijtstofcyclus.
- inzicht verkrijgen in de manier waarop een verhoogde stralingsbelasting van de omgeving op kan treden.
- kennis maken met enkele beveiligingsprincipes
- het bestuderen van een situatie waarin de kans op een ongeval erg klein is en de gevolgen ervan erg groot zijn.

Leerlingactiviteiten

- literatuurstudie
- lezen + opdrachten maken
- kiezen
- presentatie voorbereiden en uitvoeren

Didaktische aanwijzingen

In dit hoofdstuk ligt de nadruk niet zozeer op de technische aspecten van de kernenergie. Voor de bouw van de kernreactor is dan ook maar een beperkte plaats ingeruimd. Centraal staan risico en veiligheid in de gehele splijtstofcyclus. Daarbij wordt de kerncentrale vaak als voorbeeld aangevoerd bijv. ter illustratie van de wegen waarlangs radioactieve besmetting op kan treden. Par. 5.2 en 5.4 staan dan ook centraal in het hoofdstuk. Het is de bedoeling dat er een les besteed wordt aan kernenergie in het algemeen en twee lessen aan het werken aan de uitgekozen opdracht. Dat kan alleen als er in les 12 vast wat leeswerk opgegeven wordt. In les 13 kan dan de nadruk op het schema van de splijtstofcyclus (pag. 43) en dat van de besmettingswegen (pag. 48) gelegd worden. Bij par. 5.4 staan een aantal opdrachten waaruit de leerlingen kunnen kiezen; het zijn alle literatuuronderzoeken omdat er maar weinig scholen hun leerlingen in staat kunnen stellen een kerncentrale of verrijkingsfabriek te bezoeken.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

- 5.1 Een inleidende paragraaf waarin de hete hangijzers op een rij worden gezet.
- 5.2 Het schema van de splijtstofcyclus staat centraal. Leerlingen moeten weten wat er bij elke stap gebeurt. Bij de bespreking kan een verdere bestudering ingeperkt worden tot de kernreactor, de verwerkingsfabriek en het afval, omdat die de meeste problemen leveren vanuit het oogpunt van veiligheid en stralingsbelasting. De opdrachten 1, 2 en 3 zijn verwerkingsopdrachten.
- 5.3 Het principe van de kernreactor staat in het EPEP vermeld. De inhoud van par. 4.3 en van de samenvatting (zie bijlage) is daarvoor voldoende.
- 5.4 Het is de bedoeling dat de leerlingen bij de opdrachten niet al te detaillistisch te werk gaan. Sommige leerlingen hebben de neiging een klein onderdeel zeer diepgaand uit te graven, zoals bijv. de bouw van een snelle kweekreactor. Een dergelijke bijdrage in de presentatie zal waarschijnlijk niet passen binnen het geheel en slechts een kleine bijdrage leveren aan de beeldvorming ten aanzien van de themavragen.

Toelichting bij enkele opgaven

- 5.2
 1. a. Na de ertsverwerking 0,17%. Het valt niet mee om een verder percentage te berekenen, omdat er ook een grondstofstroom van de opwerkingsfabriek binnenkomt. Deze opgave beperkt zich tot de uraniummijn.
 - b. De massa van 300.000 ton heeft een volume van 150000 m^3 . Op het veld wordt dat een laag van 14 m dik (bij afronden wijzen op ca. 300000 ton).
 2. a.

$$\begin{array}{l} {}^{238}_{92}\text{U} \longrightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He} \\ {}^{234}_{90}\text{Th} \longrightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + {}^0_{-1}\text{e} \\ {}^{234}_{91}\text{Pa} \longrightarrow {}^{234}_{92}\text{U} + {}^0_{-1}\text{e} \\ {}^{234}_{92}\text{U} \longrightarrow {}^{230}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He} \\ {}^{230}_{90}\text{Th} \longrightarrow {}^{226}_{88}\text{Ra} + {}^4_2\text{He} \end{array}$$
 - b. Rn-222 is een α -straler. Bij inwendige bestraling na inademing kan dat longkanker veroorzaken.
 - c. Ten opzichte van de variatie in de natuurlijke achtergrondstraling is dat zeer gering. Het blijft ver onder de ICRP-normen. Hetgeen niet betekent dat het ongevaarlijk is (zie ook b.).
 3. a.

$${}^{238}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \longrightarrow {}^{239}_{92}\text{U} \longrightarrow {}^{239}_{94}\text{Pu} + 2 {}^0_{-1}\text{e}$$
 - b. Pu is een α -straler met een halveringstijd van 24000 jaar

$${}^{239}_{92}\text{Pu} \longrightarrow {}^{235}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He} + \gamma$$
 - c. zie vraag 2 b.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

d. Plutonium is een van de gevaarlijkste stoffen die er zijn. Al in zeer kleine hoeveelheden veroorzaakt het tumoren, o.a. doordat het in het lichaam opgeslagen wordt. Als plutonium in het milieu terecht komt zal dat zeer ernstige consequenties hebben. Uiteraard dient ook de veiligheid van de werknemers voorop te staan.

4. $3500 \text{ MWe} = 3,5 \cdot 10^9 \text{ W} = 3,5 \cdot 10^9 \text{ J/s}$

Per jaar $3,5 \cdot 10^9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 1,1 \cdot 10^{17} \text{ J}$.

We gaan daarbij uit van een bedrijfstijd van 100%, in de praktijk is dat ongeveer 80%.

b. 96 ton
c. $1,2 \cdot 10^{-15} \text{ J}$

d. $29 \cdot 10^6 \cdot 1000 \cdot 0,35 = 1,0 \cdot 10^{10} \text{ J}$

e. het verschil is zeer groot en ligt in de orde van 10^7 .



Tom Boch

HOOFDSTUK 6: KERNWAPENS

<i>uitwerking lessenplan</i>	
lesnr	onderdeel
13	teksten bestuderen en enkele opdrachten maken, bijv. 6.1.3, 6.2.1, 6.3.1 en 6.4.1.
14 en 15	uitvoeren van grote opdracht en voorbereiden van presentatie
16 en 17	presentatie

Bedoeling

- inzicht verschaffen in het bijzondere karakter van kernwapens
- duidelijk maken wat de korte en lange-termijn effecten zijn van de explosie van kernwapens
- evaluatie mogelijk maken van schuilmogelijkheden in regio en van nut hiervan
- zelfstandig opdrachten uitvoeren en presentatie verzorgen.

Didaktische aanwijzingen

Het is de bedoeling dat de leerlingen die dit onderwerp hebben gekozen de nieuwe informatie hierover verwerken en vervolgens gebruiken bij het uitvoeren van een zelfstandige opdracht. Een belangrijk deel (informatie verzamelen, schuilkelder bezoeken) zal wel buiten schooltijd moeten gebeuren.

We hebben hier bewust maar een deel van het kernwapenvraagstuk aan de orde gesteld, nl. dat deel waar fysische kennis kan leiden tot een beter inzicht in een deel van het vraagstuk. Dat verdient ons inziens de voorkeur boven een globale behandeling van het totale vraagstuk.

Ook is afgezien van waarheidsgetrouwe beschrijvingen à la The Day After, over de gevolgen van kernexplosies. Die komen in de pers al vaak aan bod. Het themaboek gaat op een rationelere wijze met de gevolgen om. Het lijkt ons wel goed om aan irrationele reacties van leerlingen aandacht te besteden. Wij verwachten dat die bij een dergelijk onderwerp toch wel zullen bovenkomen.

Het is verstandig in de klas extra literatuur ter beschikking te hebben (zie bijlage).

Naast het maken van enkele kleine opdrachten (zie lessenplan) verdient het aanbeveling de leerlingen aan één grotere opdracht te laten werken en hierover een rapportage te laten verzorgen. Het is dus niet de bedoeling dat alle leerlingen die kozen voor dit hoofdstuk alle opdrachten te laten maken of allen dezelfde opdracht te laten uitvoeren.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

- 6.1 1 en 2 Zie de literatuurlijst. Met name de bronnen: Natuurkunde in de Samenleving (VU), In de ban van de bom (NIVV) en literatuur van vredesinstituten.
3. ● het maakt het uitdelen van een effectieve eerste klap (first-strike) aantrekkelijker omdat zo de raketten en strategisch belangrijke centra doeltreffend kunnen worden vernietigd.
- - kleiner omdat er scherper op militaire doelen kan worden gericht
 - groter omdat het de drempel van een kernoorlog kan verlagen
- 6.2 1. a. hitte effect
b. absorptie van straling in de atmosfeer
c. 1 kt: 1,54/1,33/3,14 km²
1 Mt: 69,5/394/21,2 km²
factoren: 45/296/6,8
- 6.3 1. Zie bijv. de bijlage van VN, artikel in Natuur en Techniek (lit. lijst).
- 6.4 2. Zie overzicht

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

HOOFDSTUK 7: STRALING IN DE GEZONDHEIDSZORG

<i>uitwerking lessenplan</i>	
lesnr.	onderdeel
13	Bespreken par. 71 Keuzes maken en groepjes vormen Starten met keuzeonderwerp
14, 15	Werken aan keuzeonderwerp Presentatie voorbereiden
16, 17	Presentaties

Bedoeling

- vertrouwd raken met enkele medische toepassingen van ioniserende straling
- een relatie leggen tussen de fysische eigenschappen van straling en de aard van de toepassing
- kennis maken met de voordelen en de risico's voor patient en personeel en deze relateren aan de fysische eigenschappen van de gebruikte straling
- een orientatie op een beroepsgroep waarin een niet onbelangrijk deel van de leerlingen werkzaam zal zijn.

Leerlingactiviteiten

- lezen en opdrachten maken
- eventueel een bezoek brengen buiten de school inclusief voorbereiding en verwerking
- een presentatie voorbereiden en uitvoeren
- bespreken en bediscussieren.

Didaktische aanwijzingen

De ervaring heeft ons geleerd dat veel leerlingen aan dit onderwerp willen werken. Het hoofdstuk is dan ook zo gestructureerd dat meerdere groepen er tegelijk aan kunnen werken, terwijl ze toch alle iets heel anders doen. Dat laatste brengt de nodige variatie in de presentatie aan. Na de bestudering van par. 7.1 kiezen de leerlingen een van de volgende drie toepassingen: röntgendiagnostiek, nucleaire geneeskunde of radiotherapie. Aan elk onderwerp is een aparte paragraaf besteed. Door de verschillende opdrachten kunnen ook meerdere groepen aan een zelfde paragraaf werken. Natuurlijk kan een groep ook besluiten meerdere onderling samenhangende opdrachten te nemen.

Een bezoek buiten de school is bij de meeste opdrachten onmisbaar. Daartoe dient wel tijdig een afspraak gemaakt te worden. De ervaringen daarmee zijn in het algemeen gunstig te noemen, maar de afspraken moeten wel ruim van tevoren gemaakt worden. Het kan ook verstandig zijn de betrokkenen in het

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

begin van het cursusjaar een exemplaar van het thema op te sturen met de aankondiging dat er wellicht een beroep op hen gedaan zal worden. Met name de radiotherapie kan bij sommige leerlingen sterke emoties oproepen, in wat mindere mate geldt dat overigens voor alle leerlingen. Het zal sterk van de persoon van de leraar afhangen in hoeverre dat in de klas aan de orde gesteld wordt. Het lijkt ons wel noodzakelijk de leerlingen bij het maken van hun keuze op dat aspect te wijzen.

Bij het werken aan dit hoofdstuk kan de diaserie die het PLON heeft samengesteld uit opnamen van het Academisch Ziekenhuis van Utrecht een rol spelen. Deze diaserie is beschreven in bijlage en is bij het PLON verkrijgbaar.

Een aantal onderscheidingen is in dit hoofdstuk van belang.

- diagnostische/therapeutische/palliatieve behandeling
 - open/gesloten bronnen
 - statische/dynamische diagnoses
 - gamma/röntgenstraling
 - risico voor patient/personeel
 - lichaams/lokale dosis
 - kans op genezing/schade door straling
- 7.1 Orientatieparagraaf. Op grond van deze paragraaf moeten de leerlingen een keuze maken. Bij de medische toepassingen is het verschil tussen een lokale dosis en de lichaamsdosis van zeer groot belang.
 - 7.2 De opdrachten richten zich alle op het stellen van een diagnose met röntgenstraling. Een groot aantal vragen met betrekking tot de röntgeninstallatie zijn dan ook voor alle opdrachten gelijk. Deze zijn in een apart kader opgenomen.
 - 7.3 Alleen de ziekenhuizen in de grote steden beschikken over een dergelijke afdeling. Voor veel scholen kan in dit hoofdstuk geen bezoek ingepast worden. Wel is literatuuronderzoek mogelijk. Ook kan de diaserie (bijlage) hierbij gebruikt worden.
 - 7.4 Opdracht 1 is een verwerkingsvraag, de andere opdrachten zijn keuzeopdrachten. Daarbij zal opdracht 5 niet altijd uitgevoerd kunnen worden.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

HOOFDSTUK 8: RISICO'S EN VEILIGHEID

<i>uitwerking lessenplan</i>	
lesnr	onderdeel
18	8.1 (risico-evaluatie)
	8.2 (persoonlijke risico's)
19	8.3 (maatschappelijke risico's)

Bedoeling

- leren gebruiken van procedures om risico's af te kunnen wegen
- onderscheid leren maken tussen persoonlijke en maatschappelijke risico's
- kennis van ioniserende straling leren gebruiken in controversiële situaties.

Leerlingactiviteiten

- afwegen van diverse risico's tegen voordelen
- interviewen van stralingswerkers
- stellingen becommentariëren
- krantenstukjes analyseren en becommentariëren.

Didaktische aanwijzingen

Dit hoofdstuk heeft een afsluitende functie. Er wordt teruggegrepen naar hoofdstuk 1 wat betreft risico's. Nu gaat het echter speciaal over risico's met het gebruik van ioniserende straling.

Naast bovenstaande leerlingactiviteiten kan in een klassediscussie ook gepraat worden over het nut van risicoafweging (ook in andere situaties) en welk soort kennis daarvoor nodig is. Ook kan worden stilgestaan bij overeenkomsten en verschillen tussen persoonlijke en maatschappelijke risico's.

Wellicht zijn recente kranteberichten te gebruiken zodat de actualiteit een rol kan spelen in de motivatie van leerlingen.

BIJLAGE D1

SAMENVATTING

1. Inleiding

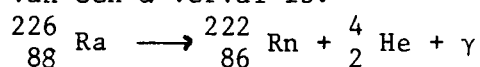
In dit thema gaat het om het afwegen van de risico's en de voordelen van enkele toepassingen van ioniserende straling. Bij het bepalen van de grootte van het risico moet er onderscheid gemaakt worden tussen de *kans* dat het gebeurt en de *gevolgen* die het zal hebben. Het risico is in ieder geval klein als zowel kans als gevolg klein zijn en groot als beide groot zijn. Als kans en gevolg gemakkelijk te berekenen zijn kan het risico berekend worden met: $\text{risico} = \text{kans} \times \text{gevolg}$ en kunnen risico's eenvoudig met elkaar vergeleken worden. Vaak is het niet zo eenvoudig. Bij een kerncentrale bijv. is de kans op een ongeluk zeer klein en zijn de gevolgen zeer ernstig. Bovendien zijn, door het ontbreken van ervaring met dergelijke ongevallen, zowel kans als gevolg alleen maar te schatten. In een dergelijk geval is het niet meer mogelijk de afweging van risico's en voordelen op een objectieve manier te doen, en spelen waardeoordelen een belangrijke rol.

2. Soorten straling

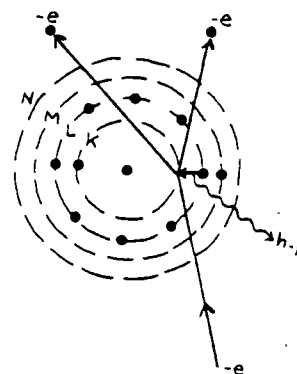
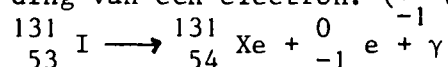
Er bestaan verschillende soorten ioniserende straling. De bekendste daarvan zijn α -, β -, γ - en röntgenstraling. Röntgen- en γ -straling zijn beide vormen van elektromagnetische straling net als licht en warmtestraling. Licht ontstaat als in de buitenste schil van het atoom een elektron van een hoger naar een lager energie-niveau gaat. Op dezelfde manier ontstaat röntgenstraling in de diepergelegen schillen. De vrijkomende energie is in dat laatste geval aanzienlijk hoger zodat een foton röntgenstraling een veel hogere energie heeft dan een lichtfoton. Naarmate men dieper in het atoom doordringt wordt de vrijkomende energie groter. De fotonen van γ -straling zijn nog energierijker, die ontstaan niet meer in de elektronenschillen maar in de kern zelf. Zowel een γ - als een röntgenfoton heeft daarvoor een hoge frequentie ($E = hf$) en een kleine golflengte ($\lambda = c/f$).

Ook α - en β -straling is afkomstig uit de kern, maar deze bestaat niet uit fotonen maar uit deeltjes. Een bundel α -stralen bestaat uit heliumkernen (${}^4_2\text{He}$), terwijl β -straling uit elektronen bestaat.

De α - en β -straling ontstaat door het vervallen van kernen. Veel kernen zijn niet stabiel, ze vervallen vroeger of later, en daarbij wordt dan een α - of een β -deeltje uitgezonden, terwijl er tegelijkertijd een γ -foton vrijkomt om het teveel aan energie af te voeren. Een voorbeeld van een α -verval is:



Bij β -verval gaat er in de kern een neutron over in een proton, onder uitzending van een elektron. (${}^0_{-1}\text{e}$ of ook vaak als β genoteerd)



De eigenschappen van de verschillende soorten straling zijn in onderstaande tabel weergegeven. Nieuwe eigenschappen zijn:

- het ioniserend vermogen.

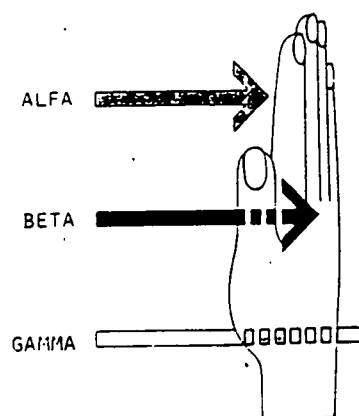
Het ioniserend vermogen geeft aan hoeveel ionisaties een deeltje of foton veroorzaakt over een afstand van 1 mm in bijv. lucht. Dan blijkt α -straling zeer veel atomen op haar weg te ioniseren, en γ -straling maar vrij weinig.

- het doordringingsvermogen.

Het doordringingsvermogen geeft aan in hoeverre de straling door een barriere kan dringen. Zo wordt α -straling al door een blad papier tegengehouden, is er bij β -straling al een aluminium plaat van enkele mm dik voor nodig en wordt γ -straling alleen maar verzwakt door een dikke loden plaat.

soort straling	aard	lading	massa	snelheid (c is licht-snelheid)	ioniserend vermogen	door-dringend vermogen	wat gebeurt er in het atoom
α	He-kern	+2e	zwaar	0,1c	hoog	laag	α -deeltje wordt uit kern gezonden
β	electron	-e	licht	0,9c	middel	middel	neutron gaat over in proton
röntgen	foton	-	-	c	laag	hoog	terugval electron in binnenschil
γ	foton	-	-	c	laag	zeer hoog	afvoer overschot energie van de kern

3. Ioniserende straling en de mens

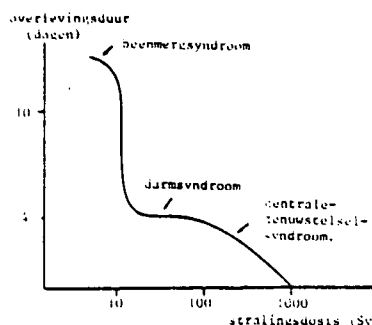


Het doordringend vermogen van straling.

De schade die ioniserende straling bij de mens toebrengt hangt af van de geabsorbeerde dosis, het soort straling en het soort weefsel dat getroffen wordt. Het dosisequivalent houdt rekening met de geabsorbeerde dosis en de soort straling (eenheid Sievert: Sv). Voor β - en γ -straling geldt dat 1 Gy = 1 Sv; voor α -straling is dat 1 Gy = 20 Sv). (α -straling veroorzaakt meer ionisaties per mm^3 en is daardoor schadelijker. Toch zal straling bij *uitwendige* bestraling weinig schade aanrichten, omdat het al tegengehouden wordt door de hoornlaag van de opperhuid. Anders ligt dat bij de *inwendige* bestraling; als een α -straler in het lichaam komt is dat juist erg gevaarlijk.

Men onderscheidt drie verschillende effecten van ioniserende straling bij de mens: de acute effecten,

BIJLAGE D1



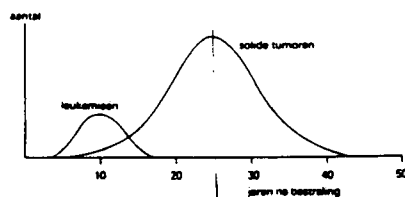
in plaats van opname juist verlies van voedingsstoffen, vocht en zouten plaats. Deze ontwijking van de stofwisseling kan dodelijk zijn.

• centrale zenuwstelselsyndroom.

Beschadiging van hersencellen veroorzaakt ernstige storing in allerlei belangrijke lichaamsfuncties.

late somatische effecten

Lange tijd na de bestraling is de kans op het optreden van leukemie en kanker aanzienlijk hoger. De *latentietijd* is de tijd die verloopt tussen de bestraling en het optreden van deze effecten.



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

genetische effecten

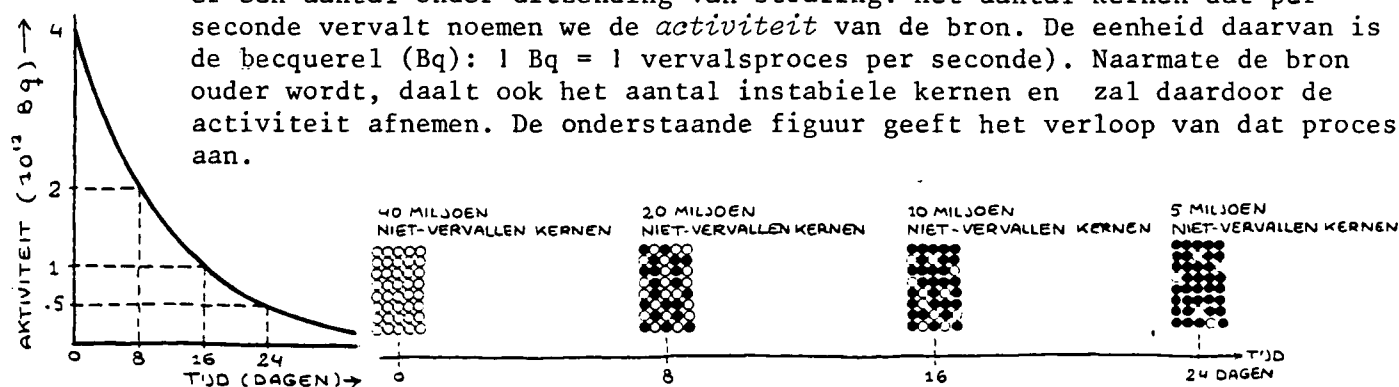
De straling kan veranderingen in de genen (mutaties) veroorzaken die doorgegeven worden naar het nageslacht. De dosis waarbij het aantal mutaties twee maal zo groot is als het aantal spontane mutaties noemen we de *verdubbelingsdosis*.

4. Stralingsbescherming.

Bij de stralingsbescherming is er altijd sprake van een stralingsbron, een medium (meestal lucht) en een ontvanger (meestal een mens). We zullen ze na elkaar bekijken.

de bron.

Een stralingsbron bevat een aantal instabiele kernen. Elke seconde vervallen er een aantal onder uitzending van straling. Het aantal kernen dat per seconde vervalst noemen we de *activiteit* van de bron. De eenheid daarvan is de becquerel (Bq): 1 Bq = 1 vervalsproces per seconde). Naarmate de bron ouder wordt, daalt ook het aantal instabiele kernen en zal daardoor de activiteit afnemen. De onderstaande figuur geeft het verloop van dat proces aan.



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.

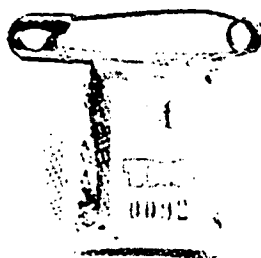
De tijd waarin de activiteit van de bron tot de helft is afgenomen noemen we de halveringstijd. Een kunstmatige bron kan gemaakt worden door een niet-radioactieve stof te beschieten met bijv. neutronen.

de ontvanger

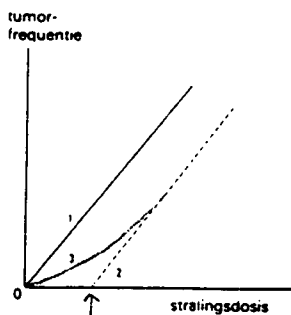
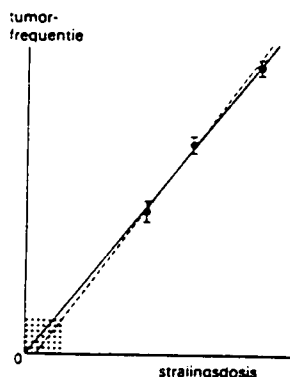
De gemiddelde Nederlander ontvangt jaarlijks een dosisequivalent tussen 1,30 en 2,15 mSv uit verschillende bronnen. Het leeuwendeel wordt veroorzaakt door de straling uit het heelal, uit de woonomgeving en uit het eigen lichaam (0,90 à 1,20 mSv). Dat deel wordt de *natuurlijke achtergrondstraling* genoemd. Het overblijvende deel (0,40 à 0,95 mSv) wordt veroorzaakt door de *kunstmatige straling*. De röntgen diagnostiek neemt daarvan het grootste deel voor zijn rekening (0,25 à 0,80 mSv).

het medium

Het medium bevindt zich tussen de bron en de ontvanger. Om de ontvangen dosis zo klein mogelijk te maken kun je de afstand zo groot mogelijk maken (kwadratenwet) of de bron afschermen met zware materialen zoals bijv. lood.



filmbadge.



drempel-dosis

detectie

Detectieapparatuur is noodzakelijk, omdat de mens geen zintuig voor het waarnemen van straling heeft. Mensen die veel met straling werken zijn verplicht een *badge* te dragen. Die badge bestaat uit een klein stukje fotografisch materiaal dat zwart wordt als er straling op valt. De badges worden regelmatig gecontroleerd. Daarnaast wordt ook de *Geiger-Müller buis* veel gebruikt. Het apparaat bestaat uit een telbuis, een versterker en een teller. Een deeltje dat de telbuis binnentreedt veroorzaakt ionisaties van de atomen van de gasvulling. Door het elektrisch veld in de telbuis ontstaat er een lawine van ionisaties, die groot genoeg is om, na versterking, geteld te worden.

stralingsnormen

Bij elke toepassing van ioniserende straling dient het voordeel ervan afgewogen te worden tegen de extra stralingsdosis. Bij deze afweging spelen drie kernpunten een rol:

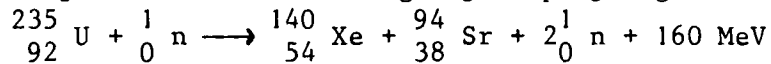
- rechtvaardiging. De afweging van voor- en nadelen moet positief uitvallen.
- ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Alles moet gedaan worden om, binnen de redelijkheid, de dosis zo laag mogelijk te houden.
- limietwaarden. De limietwaarden geven aan wat het absolute maximum is dat iemand aan kunstmatige straling mag ontvangen. Deze waarden zijn verschillend voor radiologische werkers en gewone burgers. Een van de overwegingen daartoe is het feit dat elk beroep zijn beroepsrisico heeft.

Er is lang gestreden over de vraag of een kleine dosis schadelijk is. Omdat de onderzoeksgegevens niet aantoonde dat er een onschadelijke stralingsdosis, de zg. *drempeldosis*, bestond, gaat men ervan uit dat elke dosis schadelijk is.

BIJLAGE D1

5. Kernenergie

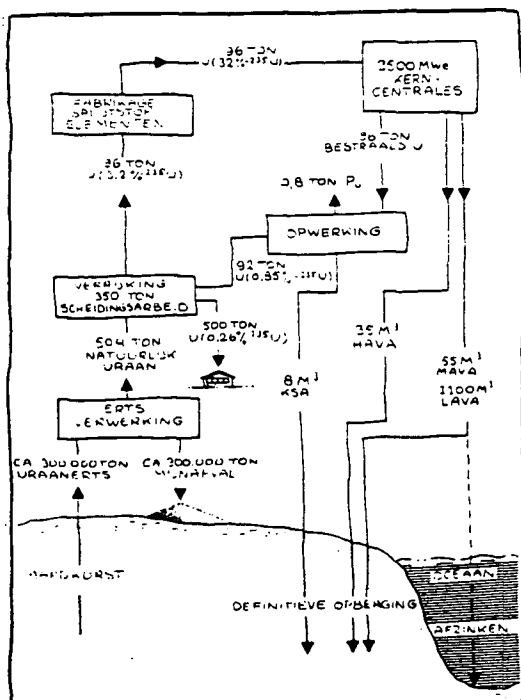
Bij het opwekken van electriciteit met kernenergie wordt gebruik gemaakt van de vrijkomende energie bij de splijting van een $^{235}_{92}\text{U}$ kern. Bij de botsing van deze kern met een neutron ontstaan de instabiele kern $^{236}_{92}\text{U}$, die snel uiteenvalt in twee brokstukken, waarbij meerdere neutronen vrijkomen. Een van de mogelijke splijtingsreacties is dan:



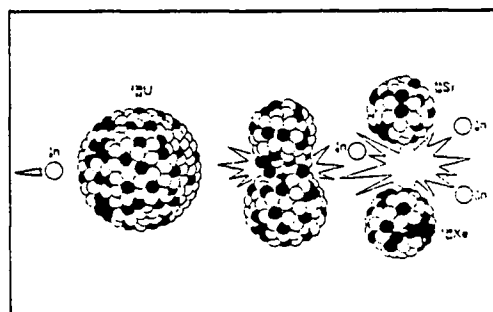
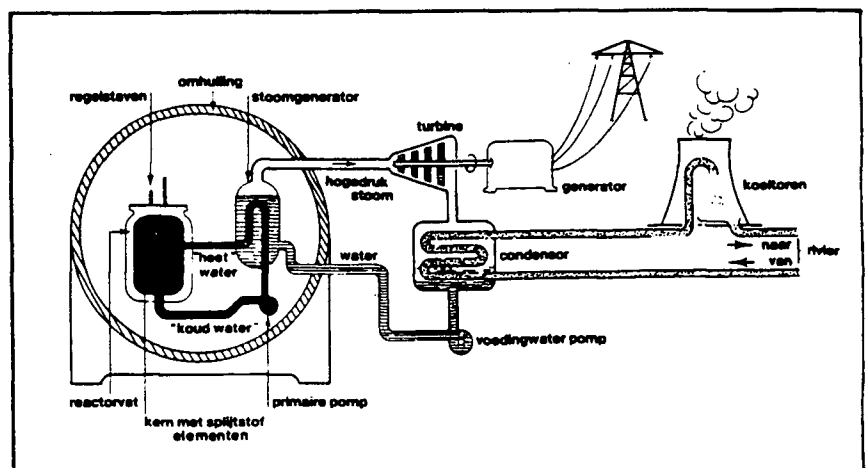
Kernreactor

De neutronen die bij de splijting vrijkomen kunnen een volgende splijting veroorzaken. Om dat effectief te kunnen doen moeten ze een lage snelheid hebben. In een kernreactor worden de neutronen afgeremd door ze te laten botsen met de kernen van de *moderator*. Het aantal splijtingen kan geregeld worden met de *regelstaven*. Deze staven absorberen neutronen en kunnen in de reactor op en neer bewogen worden. Als het aantal splijtingen constant is, en de reactor dus een constant vermogen levert, zeggen we dat de reactor kritiek is.

De energie die in het reactorvat in de vorm van warmte vrijkomt wordt door het *primaire koelsysteem* naar buiten gebracht. Met een tweede en een derde koelsysteem wordt deze energie vervolgens gebruikt om *turbines* te laten draaien.



De splijfstofcyclus.



Bij normaal bedrijf levert een kerncentrale weinig extra stralingsdoses (minder dan 10 Sv/jaar) op voor de omgeving. Deze dosis wordt vooral veroorzaakt door het koelwater van de centrale. Alhoewel de kans op een ongeluk in een kerncentrale erg klein is kunnen de gevolgen echter zeer groot zijn. Daardoor is de afweging van het risico tegen de voordelen niet eenvoudig. Bij deze afweging moet de hele *splijtstofcyclus* bekeken worden. Met name de opwerkingsfabriek levert nogal wat problemen op. Er gebeuren nogal wat ongevallen, waardoor een verhoogde stralingsbelasting voor de bevolking optreedt. Het afval van deze fabriek - het KSA of KernSplijtings-Afval - is vloeibaar, hoog radioactief en dient erg lang opgeslagen te worden.

De kerncentrale produceert nog andere soorten afval:

HAVA - Hoog Actief Vast Afval, meestal bestaande uit onderdelen van reactoren

MAVA - Middel Actief Vast Afval, bijv. radioactief vervuilde filters

LAVA - Laag Actief Vast Afval. Besmette kleding, schoonmaakmateriaal.

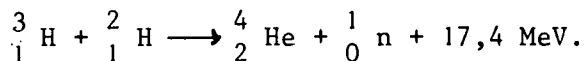
6. Kernwapens

Er zijn twee soorten kernwapens: *splijtings-* en *fusie*bommen.

Bij een splijtingsbom worden zware kernen (U-235 of Pu-239) gespleten.

Het is de bedoeling dat er in een korte tijd zoveel mogelijk kernen splijten. Daarvoor is een bepaalde minimum hoeveelheid splijtstof vereist. Dat wordt bereikt door twee kleine stukken splijtstof in elkaar te schieten door een gewone explosie.

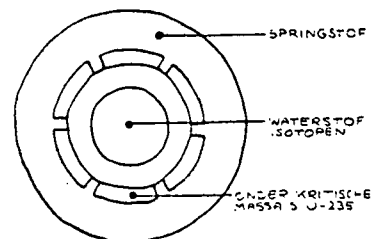
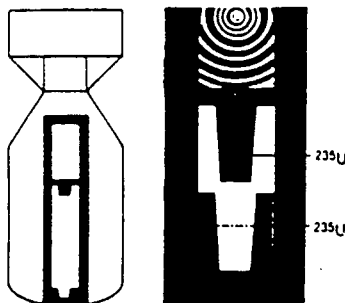
Bij een fusiebom smelten zeer lichte kernen samen. Ook bij die reactie komt energie vrij. Bij die samensmelting worden veelal waterstofisotopen gebruikt, vandaar de naam waterstofbom. Een voorbeeld van een dergelijke reactie is:



Door de sterke afstotende Coulombkrachten kunnen de kernen alleen samen-smelten als ze een zeer hoge snelheid hebben. De fusiereactie komt daardoor pas bij een zeer hoge temperatuur op gang. Deze hoge temperatuur wordt geleverd door een splijtingsbom.

De explosiekracht van een kernwapen wordt uitgedrukt in ton TNT, te vergelijken met de kracht van een chemisch explosief TNT.

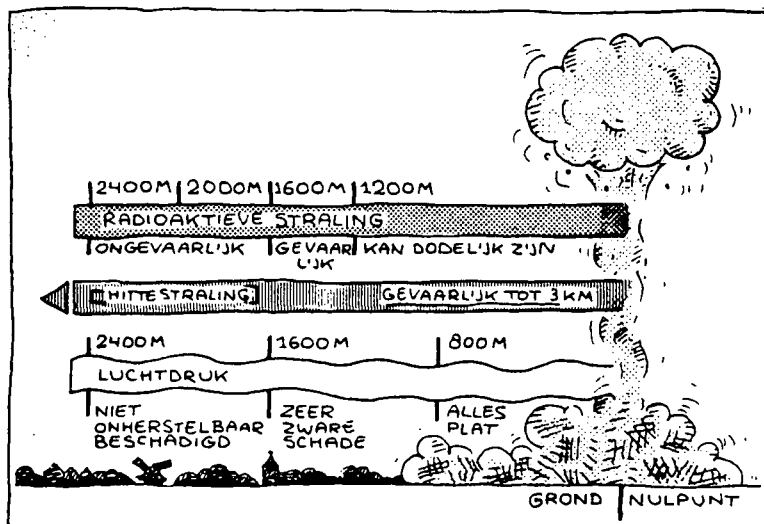
In de bom, die Hiroshima op 6 augustus 1945 verwoestte en die aangeduid werd met de afschuwelijke naam 'Little Boy', kwam de kern-explosie tot stand doordat een stuk uraan-235 door middel van een explosie met grote snelheid in een ander stuk uraan-235 werd geschoten, waarin het precies paste.



Principe van een waterstofbom.

BIJLAGE D1

Onmiddellijke effecten



De effecten van de Hiroshima-bom in beeld gebracht.

Dat zijn de effecten die binnen een minuut optreden. Daartoe rekenen we de hittestraling, een drukgolf, de elektromagnetische puls (EMP) en de direkte kernstraling. Deze laatste treedt op tijdens de explosie en neemt sterk met de afstand af zoals nevenstaande tabel laat zien. De EMP is een krachtig kortdurende elektromagnetisch veld dat alle elektronica in de omgeving beschadigt.

Effecten op langere termijn.

Van deze effecten is de latere optredende straling - de fallout - de belangrijkste.

Fallout bestaat uit twee soorten stoffen:

- splijtingsproducten. Deze zijn radioactief en hebben soms een lange halveringstijd. Gevaarlijk is bijv. Sr-90 met een halveringstijd van 28 jaar. Deze stof wordt in de botten opgenomen, hetgeen met name bij kinderen ernstige gevolgen heeft.
- nieuwe radioactieve stoffen. Bij een kernbomexplosie komen veel neutronen vrij. Deze worden door andere kernen ingevangen, waardoor deze radioactief worden. Dit speelt met name een rol bij bommen die vlak boven de grond ontploffen.

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

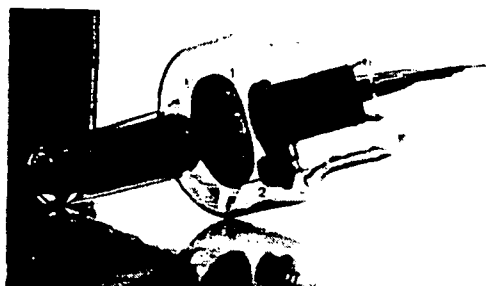
7. Straling in de gezondheidszorg

In de gezondheidszorg wordt onderscheid gemaakt tussen onderzoek (het stellen van een diagnose) en behandelen (therapie). Ioniserende straling wordt voor beide doeleinden gebruikt. Daarbij maakt men vooral gebruik van röntgen- en gammastraling. Voor therapeutische doelen wordt soms ook van β -straling gebruik gemaakt.

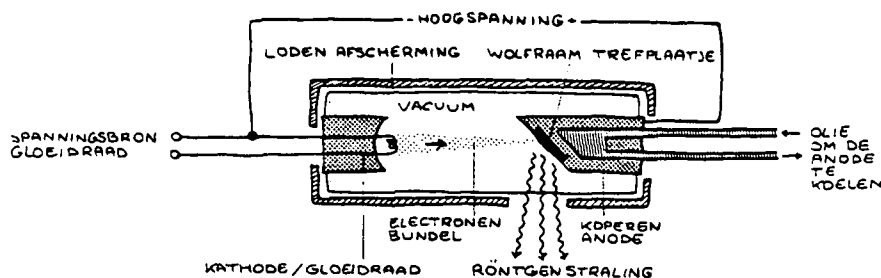
röntgenstraling

Röntgenapparatuur wordt vooral gebruikt door radiodiagnosten, maar ook door tandartsen, dierenartsen en cardiologen. Röntgenstraling ontstaat doordat elektronen in een röntgenbuis met hoge snelheid tegen een wolfram trefplaatje botsen. Hoe hoger de snelheid van de elektronen is, des te harder (energierijkere fotonen) is de straling. Soms wordt daarbij ook van een lineaire versneller gebruik gemaakt. Bij diagnoses worden vaak *röntgenfoto's* gemaakt. De door het lichaam vallende straling wordt in verschillende mate geabsorbeerd waardoor donkere en lichte plekken op de foto ontstaan. Een

geoeffend waarnemer kan uit deze foto's veel afleiden. Soms is een moment-opname niet voldoende. Dan wordt de straling gedurende langere tijd toegediend en kijkt de arts op een fluorescerend scherm (*doorlichten*). De ontvangen dosis kan sterk verschillen. Een normale borstfoto levert zo'n 0,1 mSv op; bij doorlichten kan dat oplopen tot 10 mSv. Tegenwoordig wordt dan veelal gebruik gemaakt van een *beeldversterker* waardoor de intensiteit van de straling veel kleiner kan zijn. Door gebruik te maken van een *contrastvloeistof* kunnen ook röntgenfoto's van bloedvaten en darmen gemaakt worden. Bij de computertomografie zijn de doses vrij hoog. Het lichaam wordt door een röntgenbundel doorgemeten, waarna de gegevens opgeslagen worden in een computer. Deze levert dan allerlei lichaamsdoorsneden die voor het stellen van een diagnose van belang zijn. Veel grotere doses en veel hardere röntgenstraling wordt er gebruikt bij de behandeling van kankerpatiënten. Daarbij gaat het erom de tumorcellen zwaar te beschadigen, terwijl het omringend weefsel zo weinig mogelijk schade oploopt. Bij de behandeling moet een afweging gemaakt worden tussen de ernst van de ziekte, mogelijke andere behandelwijzen en de risico's van de bestraling.



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



Doorsnede van een röntgenbuis.

radioactieve stoffen.

Grote ziekenhuizen hebben een afdeling *nucleaire geneeskunde*, waarin bij het stellen van diagnoses een radioactieve stof aan de patient toegediend wordt. De stof is zo gekozen dat het vrijwel alleen door het te onderzoeken orgaan opgenomen wordt. Na toediening wordt met een of meerdere tellers de verdeling van de radioactieve stof over het orgaan en het verloop daarvan in de tijd gemeten. Daarmee wordt het functioneren van dat orgaan onderzocht.

De radioactieve stof moet een korte halveringstijd hebben om het risico voor de patient en de schade voor het milieu zo klein mogelijk te maken. Ook voor behandelingen worden radioactieve stoffen gebruikt:

gesloten bronnen: Bij uitwendige bestraling wordt gebruik gemaakt van een γ -straler, meestal cobalt. Ook worden vaak kleine radioactieve bronnen in het lichaam vlak bij het te bestralen weefsel aangebracht.

open bronnen: Ook radioactieve vloeistoffen worden gebruikt (therapeutische slok).

BIJLAGE D2

IONISERENDE STRALING IN HET EPEP	ongewijzigd	gewijzigde interpretatie	vervallen	nieuw
- Aantallen nucleonen in afhankelijkheid van het atoomnummer; isotopen.	x			
- Stabiele en instabiele kernen; α , β , γ -straling, ontstaan van instabiele kernen door beschieting, halveringstijd.	x			
- Eigenschappen van röntgenstraling.				x ⁴⁾
- Stralingsactiviteit, stralingsdosis.				x ⁵⁾
- Biologische effecten van ioniserende straling.				x ⁵⁾
- Kosmische straling en andere vormen van natuurlijke straling.				x ⁵⁾
- Typen radioactief afval.				x ⁵⁾
- Stralingsbescherming.				x ⁵⁾
- Medische toepassing van ioniserende straling				x ⁶⁾
- Kernsplijting	x			
- Principe van een kernreactor	x			
- Splijtstofkringloop.				x ⁷⁾
- Kernfusie.				x ⁷⁾
- Kernwapens: fysische werking, effecten.				x ⁷⁾
- Aantallen van ioniserende straling met nevelvat en GM-telbuis.	x			
- Massaspectrometer.			x ⁸⁾	
- $E = \Delta mc^2$	x			

4) Toegevoegd vanwege medisch belang.

5) Toegevoegd met het oog op inzicht in grootte van risico's van toepassingen van straling.

6) Een toepassingsgebied waar veel leerlingen direkt of indirekt mee te maken krijgen.

7) Toegevoegd in verband met twee toepassingen die veel maatschappelijke aandacht krijgen.

8) Principe van afbuiging wel bij synchrotron behandeld.

TOETSVRAGEN BIJ IONISERENDE STRALING.

In deze bijlage zijn een aantal voorbeelden van toetsvragen opgenomen. Deze vragen zijn gemaakt door proefschoolleraars n.a.v. de eerste versie van het thema. Naast de complete toetsvragen is er ook een aantal kranteknipsels opgenomen.

DUMPING VAN RADIO-AKTIEF AFVAL IN DE ZEE.

Een van de methodes, die worden toegepast om laag radio-actief afval op te slaan, is dumping ervan in de zee. Nu is er nogal wat verschil van mening over de schade, die deze dumping aanricht aan het milieu. We zullen in deze opgave bekijken wat voor- en tegenstanders daarover hebben te zeggen.

a. Noem drie voorbeelden van situaties waarbij laag radioactief afval ontstaat.

Onderstaand fragment is een deel van een krantenartikel met de titel "De zee sterft niet door dumping van radio-actief afval". Lees dat fragment aandachtig door. Daarna moet je enkele kleine vragen over een paar zinnen uit het artikel beantwoorden.

1 De vraag rijst echter of de dumping van laag radio-actief afval al niet schadelijk is voor het milieu en voor de mens zelf. Wordt de zee inderdaad "vergiftigd" door deze vaten? Vaten die ongetwijfeld gaan lekken, zeker wanneer zij aan de hoge drukken op de oceanabodem worden blootgesteld.

11 Een misvatting hierover moet onmiddellijk worden opgeruimd: de vaten en het beton zijn bestemd niet bedoeld als min of meer permanente omhulling. Zij dienen alleen ter verhoging van het gewicht, zodat het afval de zeebodem inderdaad bereikt. In de risicoberekening gaat men ervan uit dat de radio-actieve elementen in het zeewater zullen oplossen.

2 Zeedumping van laag radioactief afval is dus vergelijkbaar met verdund lozen.

Wat is nu de bijdrage van de lading van de Scheldeborg aan de radio-activiteit van de zee? Voor de beantwoording van deze vraag is het noodzakelijk om enkele berekeningen te maken. Hoe radio-actief immers is de oceaan van nature, wat is er al gestort en wat komt erbij?

3 De lading van de Scheldeborg bevat de jaarproductie van laag radio-actief afval in Nederland. Omhoog afgerond heeft dit een activiteit van 1500 Curie (de eenheid van radio-activiteit). 4 Vervult het grootste deel daarvan is afkomstig van Kobalt-60 met een halfwaardetijd van 5,6 jaar. Dit betekent ruwweg dat de activiteit van het gedumpte materiaal na vijf jaar tot de helft, na tien jaar tot een kwart, na vijftien jaar tot een achtste en na twintig jaar tot een zestigste is teruggelopen.

5 Wat voegt deze zeedumping nu toe aan de natuurlijke radio-activiteit? Vrijwel niets. De na-

tuurlijke radio-activiteit van de diepzee (het oppervlak verschil wat door de kosmische straling) is ongeveer 300 Curie per kubieke kilometer, voornamelijk veroorzaakt door Kalium-40, een radio-actief element met een zeer lange halveringstijd (1,3 miljard jaar).

6 Het dumpingsgebied van de Scheldeborg bestrijkt ongeveer 60 maal 60 kilometer met een gemiddelde diepte van 4000 meter. Boven de gedumpte vaten bevindt zich dus 15.000 kubieke kilometer zeewater, die ongeveer 5 miljoen Curie bevat. Het gedumpte materiaal is verhoudingsgewijs dus weinig, bovendien vervalt het relatief snel.

b. In regel 8 wordt de hoge waterdruk als reden genoemd, waarom de vaten gaan lekken. Bereken de grootte van de waterdruk op 4000 m diepte.

c. In regel 19 wordt gesproken over een 'risicoberekening'.

Leg uit wat men bedoelt met een risicoberekening.

BIJLAGE D3

In regel 41 wordt de Curie gebruikt als maat voor de stralingsactiviteit (1 Curie = $3,7 \times 10^{10}$ desintegraties per s.).

Voor het risico is het ook van belang hoeveel energie er per vervalsreactie vrijkomt.

d1. Zoek de energie op, die vrijkomt bij het verval van Kobalt - 60 en bij Kalium - 40.

2. Makten deze gegevens over de vrijkomende energie de risico's van de dumping groter, kleiner of maakt dat niet uit?

Op dit krantenartikel kwamen talrijke ingezonden brieven. Een hiervan is hieronder afgedrukt. Lees ook deze reactie goed door. Daarna volgt een vraag over het verschil in benadering van de beide schrijvers.

Zeedumping (2)

Rob Biersma geeft in de krant van 28 augustus j.l. een quasi-wetenschappelijk pleidooi, dat de dumping van radioactief afval in zee rechtvaardigt. Zijn hele theorie rust op de aanname, dat het afval zich netjes zal verspreiden in een groot volume zeewater. Praktijkervaringen blijken echter het tegendeel te bewijzen. Een van de onderzoeken, die op dit gebied zijn gedaan, is weergegeven in "A Critical Analysis of the NEA Oceanic Radioactive Disposal Program" door prof. W. Jackson Davis van de University of California at Santa Cruz. Davis heeft twee Amerikaanse stortplaatsen onderzocht. De meest gebruikte dumpplaats (met een diepte van 2800 meter in de Atlantische Oceaan) ontving in totaal 75000 Curie in een periode van 20 jaar.

Uit het onderzoek van Davis bleek, dat het afval zich aan de bodem vasthecht en niet diffundeert. Het komt in de voedselketen terecht door opname in bodemdieren. De gebarsten vaten bieden beschermende holtes aan kleine zeedieren. Hierdoor komt op de dumpplaats extra veel leven voor, dat uiteraard besmet raakt. Ook een tweede onderzoek, van het Duitse Hydrologische Instituut, op 50 km afstand van de door Nederland gebruikte stortplaats, toonde verhoogde concentraties radioactieve stoffen aan in zeedieren. Het is te betreuren, dat de heer Biersma door middel van een onvoll edige beschouwing het dumpen in zee goedpraat. Dit is vooral zo jammer, daar het hier om het soort afval gaat dat zonder problemen in zoutmijnen opgeslagen kan worden. De laatste oplossing is aantoonbaar minder schadelijk voor het milieu.

e. De benadering in de twee bovenstaande artikels van het probleem van de zeedumping is geheel verschillend.

Leg in het kort uit waarom de ene schrijver tot de konklusie komt, dat de zeedumping geen kwaad kan en de andere tot het tegendeel.

T.V. STRALING

Hieronder is een krantebericht afgedrukt over de risico's van t.v. straling. Lees dat artikeltje rustig door.

- a. Om wat voor soort straling zal het hier gaan ?
- b. Bereken met welke faktor de stralingsdosis wordt vergroot, als de afstand tot het t.v.-scherm van 1,5 m afneemt naar 40 cm. Neem daarbij aan dat het scherm een puntvormige bron is.
- c. In werkelijkheid is het scherm natuurlijk niet puntvormig. Zou je antwoord bij b. in werkelijkheid groter of kleiner zijn ? Licht dit toe.
- d. Maak met behulp van de getallen uit het artikeltje een zo nauwkeurig mogelijke schatting van de hoeveelheid straling in rem die per seconde op een kind op 40 cm afstand van het scherm valt.

TV-straling

De opmars van de video-spelletjes en de kleine huiscomputer voor gebruik in combinatie met de (kleuren)-TV roept geheel eigen gezondheidskundige problemen op. Niet alleen de geestelijke gezondheid (spelletjesverslaving, ruzies in huiselijke kring), maar ook de lichamelijke gezondheid kan bedreigd worden. Zeker als het televisietoestel meer dan 10 jaar oud is.

Een drietal onderzoekers van het Veterans Administration Medical Center in Washington (VS) heeft nagerekend hoeveel

straling met name jongere kinderen jaarlijks ontvangen als gevolg van het gebruik van het TV-toestel voor computerspelletjes. Zij gingen er daarbij van uit, dat de afstand van waar naar het beeldscherm wordt gekeken, bij de video-spelletjes veel kleiner is dan normaal. En omdat afstand een

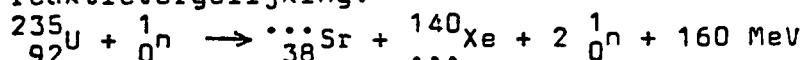
belangrijke factor is bij de hoeveelheid straling die wordt ontvangen, zou die kortere afstand de stralingsdoses wel eens aanzienlijk kunnen verhogen, zo veronderstelden zij.

In de berekening namen ze aan dat de Amerikaanse kindertjes ongeveer 2 uur per dag met video-spelletjes bezig waren en daarbij op een afstand van ongeveer 40 cm van het scherm zaten, in plaats van de gebruikelijke anderhalve meter. De jaarlijkse dosis straling die op die manier van de oudere typen kleuren-TV wordt ontvangen, bleek acht tot negen maal hoger dan wat in de Verenigde Staten nog acceptabel (100 millirem) wordt geacht. De onderzoekers menen dan ook dat het verstandig is met het video-spelletje meteen ook maar een nieuw TV-toestel, dat veel minder straling produceert dan de oudere type in huis te nemen.

BIJLAGE D3

Kernenergie

In een kernreaktor wordt $^{235}_{92}\text{U}$ onder andere gespleten volgens de reactievergelijking:



- Schrijf deze reactievergelijking volledig op (vul dus de ontbrekende getallen in) en geef aan wat de betekenis is van deze getallen.
- Leg kort uit hoe uit deze reactie een kettingreactie kan ontstaan.
- Leg duidelijk uit hoe een kernreaktor werkt. Ga daarbij in op:
 - de functie van de uraniumstaven
 - de functie van de regelstaven
 - de functie van de moderator
 - de functie van de koelvloeistof
 - de functie van de turbine
- In de bovenstaande reactie verdwijnt er massa. Deze massa wordt omgezet in energie (160 MeV). Bereken hoeveel massa er per reactie verdwijnt.
- Het $^{90}_{38}\text{Sr}$ dat ontstaat is een afvalprodukt, dat vervalst via β -straling. Schrijf de reactievergelijking van dit verval op.
- Noem twee nadelen van het energie opwekken door middel van kernreactors. Beargumenteer je keuze.

2. Detektors

Radio-actieve straling kan gedetekteerd worden via meetapparatuur. Twee apparaten daarvoor zijn de Geiger-Müller-buis en de scintillatiedetektor.

- Kies één van deze twee typen detektors en maak een doorsnedetekening van deze ene. Benoem in de tekening de onderdelen.
- Verklaar aan de hand van de tekening duidelijk de werking van de (ene) gekozen detektor.
- Van een radio-actieve bron is onbekend of die α , β of γ -straling uitzendt. Beschrijf duidelijk een proef waarmee je zou kunnen bepalen of de bron α , β of γ -stralen uitzendt.

Kernwapens

In een splijtingsbom wordt $^{235}_{92}\text{U}$ onder andere gesplitst volgens de reactievergelijking:



- Schrijf deze reactievergelijking volledig op (vul dus de ontbrekende getallen in) en geef aan wat de betekenis is van deze getallen.
- Leg kort uit hoe uit deze reactie een kettingreactie kan ontstaan.
- Leg duidelijk uit hoe een splijtingsbom werkt. Maak daarbij een tekening van een type splijtingsbom en ga in op:
 - de functie van het metalen schild rond de bom
 - de functie van de (conventionele) springstof
 - de vraag waarom de bom pas explodeert na samenvoeging van subkritieke massa's.

Men vermoedt, dat bij de eerste atoombom slechts 1 kg van de ongeveer 40 kg U gesplitst werd. Een uranium-atoom heeft een massa van ongeveer $3,9 \times 10^{-25}$ kg.

Laten we aannemen, dat het Uranium gesplitst werd via bovenstaande reactie, waarbij dus 160 MeV vrijkomt.

- Bereken hoeveel energie er in totaal bij de ontploffing van deze bom vrijkwam.

BIJLAGE D3

Medische toepassing van straling.

- a. Voor stralingstherapie wordt vaak Co-60 als γ -bron gebruikt. Schrijf de vervalsreactie van Co-60 op.

Voor de stralingsdosis van open γ -stralers geldt de volgende formule:

$$D = 0,56 \times \frac{C \times E \times t}{d^2} \quad \text{waarbij}$$

D = stralingsdosis in rad

C = aktiviteit in Ci (1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ desintegraties per s.)

E = energie die vrijkomt per desintegratie in MeV

d = afstand in m

t = tijd in uur

- b. Hoe groot is E voor de γ -straling van Co-60 ?

De aktiviteit van zo'n Co-60 preparaat is $5,0 \times 10^3$ Ci (vijfduizend!). Een stralingskuur bestaat b.v. uit zo'n 20 bestralingen van 200 rad/keer. ~~Alke~~ Dosis wordt in een $\frac{1}{2}$ minuut toegediend.

- c. Bereken de afstand tussen de patiënt en de Co-bron, die voor deze dosis nodig is.

Neem eens aan dat een verpleegkundige op 4 m afstand van de Co-bron staat.

- d. Hoeveel bestralingen van een $\frac{1}{2}$ minuut mag hij dan meemaken om beneden de maximum-dosis van 500 mrad/jaar te blijven?

- e. In werkelijkheid zal hij per keer veel minder straling ontvangen.

Noem twee maatregelen om de verpleegkundigen te beschermen.

- f. Zo'n γ -bron wordt na 2,3 jaar vernieuwd. Met welk percentage is de aktiviteit dan verminderd?

De splijtstofcyclus

In onderstaande figuur is een schema getekend van de splijtstofcyclus, zoals deze 'rond' de Nederlandse kerncentrales funktioneert. Bij verschillende installaties is de geografische plaats aangegeven.

- a. Omschrijf van elke installatie in de tekening de funktie in maximaal drie regels.

Sommige delen van de splijtstofkringloop zijn meer kwetsbaar voor illegale akties van bijvoorbeeld terroristen dan andere delen.

- b. Welke delen acht jij het meest kwetsbaar en waarom?

Het is duidelijk, dat tegen criminele aanvallen op installaties in de splijtstofkringloop veiligheidsmaatregelen getroffen moeten worden. Een probleem is dan wel, wat daarvan de konsekwenties zijn voor de samenleving.

Een Nederlands rapport van de regeringscommissie "Reactorveiligheid" uit 1975 zegt daarover:

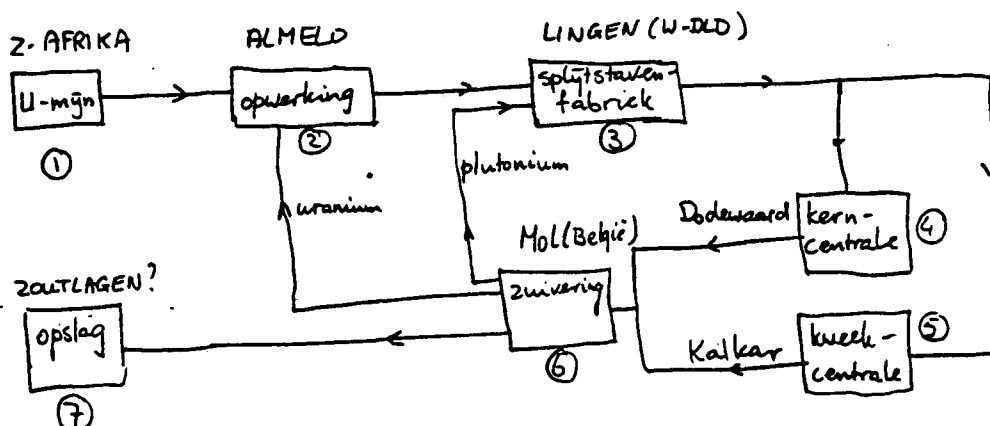
"De commissie wil er in dit verband op wijzen dat het zwaartepunt van de beveiliging ligt en behoort te liggen op konstruktieve en materiële maatregelen. Dit houdt tevens in dat doorvoering van alle beveiligingsmaatregelen in het voorgestelde kernenergieprogramma geenszins een ingrijpende beknotting van de persoonlijke vrijheden van de werknemers in de kernenergie-industrie betekent."

Daartegenover staat de mening van de fysicus Lovins:

"Uit gezaghebbende onderzoeken blijkt, dat de huidige veiligheidsmaatregelen misschien een incompetente dief afschrikken, maar verder de strategisch belangrijke transporten slechts extra in de aandacht brengen. Meer effectieve maatregelen zouden een ernstige inbreuk betekenen op de persoonlijke vrijheid van vrijwel iedereen."

- c. Beide sprekers zeggen iets over de persoonlijke vrijheid van werkers in de kernenergie-industrie. Geef de meningen van beide weer in je eigen woorden en geef aan waarin ze verschillen.

- d.. Geef je eigen mening over dit onderwerp in maximaal 6 regels.



BIJLAGE D3

Praktikumtoets

Een halveringsproces nagebootst

Zoals je weet zendt een radioactieve stof straling uit. De intensiteit van die straling wordt na verloop van tijd steeds kleiner. De tijd waarin de helft van een hoeveelheid radioactieve stof vervallen is, noemt men de halveringstijd of halfwaardetijd. Om het mechanisme achter zo'n halveringsproces te onderzoeken, bootsen we dat proces na - we "simuleren" het - met behulp van dobbelstenen!

We nemen aan dat we beginnen met 60 radioactieve kernen. Of een kern vervalst, wordt bepaald door het gooien met een dobbelsteen. Valt de dobbelsteen op 5 of 6, dan is de kern vervallen. Dat bootst de werkelijkheid in zoverre na, dat het vervallen van radioactieve kernen ook een toevalsproces is.

1. De eerste "ronde" van het vervalsproces bestaat uit het 10 x gooien van 6 dobbelstenen. Noteer in de tabel op het antwoordblad iedere keer hoeveel kernen nog niet vervallen zijn.
2. De tweede ronde bestaat uit het gooien van precies d t aantal dobbelstenen, dat na de eerste ronde nog overgebleven is. Noteer ook nu de overgebleven kernen.
Maak zo in totaal 6 ronden.
3. Geef in een diagram het aantal overgebleven kernen aan na elke ronde.
4. Neem als tijdmaat van dit halveringsproces de "ronde". Bepaal nu uit het diagram de halveringstijd van dit simulatieproces (in de eenheid "ronde").

Rapport ziet verband Britse kernfabriek en jeugdanker

LONDEN (UPI) - Er is op het eerste gezicht verband tussen radioactieve uitstoot van een fabriek voor de opwerking van kernafval in het noordwesten van Engeland en sterfgevallen van kinderen die in de omstreken van de fabriek woonden.

Een officiële commissie van onderzoek zegt dit een rapport dat zij in opdracht van de regering heeft opgesteld. Het rapport, waarvan bijzonderheden zijn uitgelekt, wordt volgende week gepubliceerd.

Het onderzoek begon eind vorig jaar nadat een televisiedocumentaire de aandacht had gevestigd op het abnormaal hoge sterftecijfer van kinderen in de omgeving van de Sellafield-fabriek, die op slechts enkele kilometers van het aan de Ierse zee gelegen dorp Seascale staat. De commissie bevestigt in haar rapport dat de makers van de documentaire niet hebben overdreven.

In Seascale overleden in de afgelopen 25 jaar elf kinderen beneden de 18 jaar aan bloed- of beenmergkanker. Dat is bijna 10 maal hoger dan het landelijk gemiddelde.

Een woordvoerder van het bedrijf verklaarde vrijdag dat er geen bewijs is voor een verband tussen de kankergevallen en de radioactieve lozingen van de fabriek in de Ierse zee. Ook elders in het land komen gebieden voor waar het percentage lijders aan diverse vormen van deze ziekte hoger is dan normaal, zei hij.

De installatie van Sellafield, voorheen bekend onder de naam Windscale, bewerkt verbruikt uranium van kernreactors tot plutonium, het hoofdbestanddeel van kernwapens. Bij de opwerking komt sterk radioactief afval vrij.

Vorig jaar waarschuwde de overheid het publiek het strand in de wijde omstreken van Seascale te mijden omdat door een fout bij Sellafield een hoeveelheid radioactief slib in zee terecht was gekomen.

VOLKSKRANT
21-7-84

Kerncentrales in VS worden niet afgebouwd

WASHINGTON (UPI) — Gigantisch opgelopen bouwkosten zijn er de oorzaak van dat er in de Verenigde Staten enkele half voltooide kerncentrales niet worden afgebouwd. Dinsdag werd bekend dat Tennessee Valley Authority (TVA), een semi-overheidsbedrijf, er van afziet vier kernreactoren af te bouwen en dat Consumer Power Company in Michigan het werk aan een centrale met twee reactoren stillegt.

De bouwkosten van de dubbele centrale werden oorspronkelijk op 267 miljoen dollar geraamd, maar na jaren van vertraging door acties van tegenstanders van kernenergie en door constructiefouten zijn de kosten opgelopen tot 4,12 miljard dollar. De bouw ging in 1967 van start. De centrale had al in 1974 klaar moeten zijn.

Twee van de centrales die TVA niet afbouwt staan bij Hartsville in Tennessee; de andere twee bij Yellow Creek in Mississippi. De totale bouwkosten werden oorspronkelijk op 3,5 miljard dollar begroot, maar vorig jaar werd voor de centrales in Tennessee al van vier miljard dollar uitgegaan en dit jaar werd een bedrag van vijf miljard dollar genoemd. Om de de twee reactoren in Mississippi af te bouwen is een bedrag van zeker tien miljard dollar nodig.

VOLKSKRANT
10-7-84

Overbestraling leidt tot complicaties bij acht kankerpatiënten

ENSCHDEDE (ANP) — Door overbestraling omstreeks eind 1982, begin 1983 hebben zich bij acht vrouwelijke kankerpatiënten in het Enschedese ziekenhuis Ziekenzorg ernstige complicaties voorgedaan. Twee van de vrouwen hebben hiervoor het ziekenhuis juridisch aansprakelijk gesteld.

Dit heeft de directie van het ziekenhuis donderdag meegedeeld. De vrouwen werden in Ziekenzorg bestraald voor kwalen aan de baarmoeder, eierstokken en vagina. Twee van de vrouwen zijn intussen aan deze ziekte overleden.

De complicaties bij de vrouwen kwamen medio 1983 aan het licht. Omdat het om een percentage ging dat aanmerkelijk boven het landelijk gemiddelde lag, meldde het ziekenhuis dit aan de inspectie voor de volksgezondheid in Overijssel en de officier van justitie in Almelo. Tegelijkertijd begon in samenwerking met het radio-therapeutisch instituut in Utrecht een onderzoek.

Over de uitkomsten daarvan is onlangs de inspectie voor de volksgezondheid geïnformeerd. Omdat de rapportage in behandeling is bij de inspectie wil het ziekenhuis op de inhoud ervan niet ingaan. Aan de hand van het onderzoek zal de inspectie voor de volksgezondheid vaststellen in hoeverre het ziekenhuis blaam treft en of een justitieel onderzoek noodzakelijk is. De bestralingsmethode, waardoor de acht vrouwen werden gedupeerd, is inmiddels gewijzigd, aldus de woordvoerder van Ziekenzorg.

VOLKSKRANT
10-5-84

Zeearm bij Windscale blijkt aanzienlijk radioactief vervuild

Van onze verslaggever
GERBRAND FEENSTRA

AMSTERDAM — Recente metingen van monsters zeewater en slib uit een zeearm van de Ierse Zee in de buurt van de nucleaire opwerkingsfabriek in Sellafield (Engeland) tonen aan dat nog steeds sprake is van aanzienlijke radioactieve vervuiling van het milieu. De monsters zijn verzameld door Greenpeace en voor analyse aangeboden aan het NIKHEF (Nederlands Instituut voor Kern- en Hogere Energie Fysica) in Amsterdam.

Uit de analyse van de monsters, die eind juni zijn genomen, blijkt dat de Ierse Zee op het punt waar de pijpleiding van de opwerkingsfabriek in de zee uitmondt, driehonderd maal zo radioactief is als de Noordzee. Het zeewater bevatte 2200 picoCurie (een maat voor straling) van een radioactief cesium-isotoop. Het vergelijkbare gehalte van de Noordzee, gemeten in 1980, bedroeg 6,4 picoCurie. Voor een ander radioactief cesium-isotoop waren de getallen respectievelijk 200 en 0,24 picoCurie.

Slib uit de Ravenglass Estuary, een arm van de Ierse Zee 25 kilometer ten zuiden van Sellafield, bevat nog veel meer radioactiviteit. Per kilogram droog slib werd 180 duizend picoCurie cesium-activiteit gemeten en 360 duizend picoCurie van een radioactief isotoop van ruthenium. Plutonium en americium werden niet bepaald.

Drs J. Visser, stralingsdeskundige van het NIKHEF, die de metingen verrichtte, noemt de radioactieve verontreiniging van het slib in de vrij toegankelijke Ravenglass-zeearm, „aanzienlijk”. „Er is sprake van duidelijk verhoogde radioactiviteit van de bodem”, aldus Visser.

VOLKSKRANT
25-7-84

BIJLAGE D3

Kustwateren bevatten radioactief afval opwerkingsfabrieken

Van onze verslaggever

RENESE — Radioactieve afvalstoffen van de Britse en Franse opwerkingsfabrieken Sellafield (vroeger Windscale) en La Hague zijn in geringe mate aanwezig in de Nederlandse kustwateren. Dit bleek tijdens een symposium over radioactieve stoffen in estuaria. Dat symposium wordt deze week in Renesse gehouden.

Bij een opwerkingsfabriek wordt het afval van kerncentrales opgewerkt tot bruikbare brandstof. Het afval van Borssele gaat naar La Hague. Bij het opwerkingsproces komt het zeer giftige plutonium-238 (Pu-238) vrij. Door stroming langs de kust is deze stof inmiddels tot de Zeeuwse wateren doorgedrongen. Ten opzichte van de altijd aanwezige achtergrondstraling is de Pu-238-straling in Zeeland 0,1 procent. Vlak bij de opwerkingsfabrieken is de situatie ernstiger. Daar is de straling van Pu-238 tienmaal zo sterk als de achtergrondstraling.

Daarnaast troffen de onderzoekers die vijf jaar aan de metingen werkten, Pu-238 aan bij de monding van de Rupel in de Schelde, ten zuiden van Antwerpen. In het stroomgebied van dit water ligt de Belgische fabriek Eurochemie waar hoogst waarschijnlijk — zij het in geringe mate — ook kernafval wordt opgewerkt.

Bij de opening van het symposium onderstreepte de afgevaardigde van de Europese Gemeenschap dr A. Ringoet, directeur van Euraton, de noodzaak voor een draaiboek bij kernrampen. Daarmee moet snel en goed kunnen worden opgetreden tegen de verspreiding van radio-activiteit in water en vooral in kwetsbare kustgebieden.

Radioactieve stoffen in riviermondingen gevaarloos voor milieu

YERSEKE (ANP) — De radioactieve vervuiling van de riviermondingen in Nederland, Frankrijk en België is veel minder dan aanvankelijk was gedacht. Dit is het resultaat van een vier jaar durend onderzoek, dat het Hydrobiologisch Instituut in Yerseke, het ITAL in Wageningen en een geologisch laboratorium in Parijs hebben ingesteld in het water en het slijk van de riviermondingen en de kustwateren.

Er zijn wel sporen gevonden van radioactieve stoffen afkomstig van Engelse en Franse opwerkingsfabrieken, maar deze zijn zo gering, dat ze geen gevaar opleveren voor het milieu, zo blijkt uit het onderzoek.

De resultaten daarvan vormen punt van bespreking op het congres over transportprocessen van radioactieve stoffen door het water en de effecten daarvan op het milieu, dat van 18 tot en met 21 september in Renesse zal worden gehouden.

Volgens dr E. Duursma van het Hydrobiologisch Instituut, die de leiding heeft gehad van het onderzoek, kan nu via het onderzoek de nulfase van de radioactieve vervuiling van de wateren worden vastgesteld. Dat is nodig om de toenemende vervuiling ten gevolge van de bouw van nieuwe kerncentrales en industrieën te kunnen vaststellen. Tijdens het symposium zal de Westduitse stralingdeskundige dr A. Bayer van het Atoomstudiecentrum in Karlsruhe een degelijk onderbouwde voorspelling bekendmaken van de stralingsdosis van het hele Maas- en Rijngebied in het jaar 2000.

Het stralingsonderzoek is voor dertig procent betaald door de Europese Gemeenschap.

President Zia ul-Haq: Pakistan kan nu ook uranium verrijken

ISLAMABAD (AP) — President Zia ul-Haq heeft deze week verklaard dat Pakistan nu in staat is uranium te verrijken, maar dat het die kennis nooit zal gebruiken voor militaire doeleinden. Voor kernenergie is er geen alternatief, aldus de president.

Pakistan is verplicht de nucleaire technologie te gebruiken om een ernstig gebrek aan energie in de toekomst te voorkomen en om een snelle industrialisering te bevorderen, aldus Zia. De president gaf niet aan wanneer de doorbraak in de kennis voor het verrijken van uranium heeft plaatsgevonden in Pakistan, noch noemde hij de mogelijke Chinese hulp bij de ontwikkeling, waarover onlangs in de Verenigde Staten berichten de ronde deden en waardoor de Amerikaanse hulp aan Pakistan in gevaar dreigt te komen.

VOLKSKRANT 12-7-84.

Opwerking

De Japanse kernenergie-industrie heeft besloten in de toekomst zelf opgebrande brandstofstaven uit kernreactoren op te werken. Op die manier probeert de Japanse industrie haar afhankelijkheid van de Engelse opwerkingsfabrieken in Sellafield te verkleinen. Verder is besloten tot de bouw van een eigen verrijkingsinstallatie en een opbergplaats voor laag radioactief afval. De Japanners hebben voor deze plannen 16 miljard gulden uitgetrokken. Ze moeten tegen 1995 zijn gerealiseerd.

Japan is één van de grootste klanten van de Britse opwerkingsfabrieken. Tot nu is 800 ton aan opgebrande kernbrandstofstaven vanuit Japan naar Engeland gebracht voor opwerking. Er is een contract tot 1989 voor de opwerking van nog eens 500 ton.

De Japanse opwerkingsfabriek moet tegen 1989 jaarlijks 800 ton kunnen opwerken. De opwerkingsfabriek wordt eigendom van Japan Nuclear Service Company, een firma die in 1980 werd opgericht door negen Japanse elektriciteitsmaatschappijen en ruim honderd bedrijven. De opwerkingsfabriek zal gebruik maken van Franse technologie, ontwikkeld door de firma Cogema, die zelf ook enkele opwerkingsfabrieken in het Franse Cap La Hague in bedrijf heeft. De Japanners vinden dat het Franse kernenergieprogramma zeer succesvol verloopt.

De opwerkingsfabriek komt bij Tokkasho, een dorp in de regio Iomori in het noorden van Japan. De bouw van de opwerkingsfabriek begint in 1986. Op hetzelfde terrein liggen nog twee andere kernenergie-installaties worden gebouwd. De bedoeling is een verrijkingsfabriek te

bouwen met een capaciteit van 1500 ton per jaar. In de fabriek zal uraniumerts — eerst omgezet in uraniumhexafluoride — worden verrijkt.

Verder komt er een gigantische opslagruimte voor laag-radioactief afval. In totaal moeten er 1 miljoen vaten van 200 liter kunnen worden opgeborgen. Tot voor kort werd dit laag-radioactieve materiaal in zee gedumpt. In Japan draaien nu 25 kerncentrales, die zorgen voor 20 procent van de elektriciteit. Voor de jaren negentig is uitbreiding gepland. De bedoeling is dat tegen het jaar 2000 veertig procent van de benodigde elektriciteit in kerncentrales wordt opgewekt.

Veel gevallen van leukemie rond Britse kerncentrale ontdekt

LONDEN, 21 juli — Volgens een Brits regeringsonderzoek is het aantal gevallen van leukemie in de buurt van een kerncentrale in Noord-Engeland ongeveer tien keer zo hoog als het nationale gemiddelde.

Er is op het eerste gezicht een verband tussen de radio-actieve uitstoot van de Sellafield opwerkinsfabriek en de sterfgevallen van kinderen die in de omgeving van de fabriek woonden, zo zegt het rapport van het onderzoek. Het rapport, van de vooraanstaande specialist sir Douglas Black, wordt volgende week gepubliceerd.

Het onderzoek, in opdracht van de regering, begon eind vorig jaar nadat een televisiedocumentaire de aandacht had gevestigd op het abnormaal hoge sterftecijfer van kinderen in de omgeving van de Sellafield-fabriek, die op slechts enkele kilometers van het aan de Ierse Zee gelegen dorp Seascale staat.

De commissie bevestigt in haar rapport dat de makers van de documentaire niet hebben overdreven. In Seascale overleden in de afgelopen 30 jaar elf kinderen beneden de 18 jaar aan bloed- of beenmergkanker. Dat is bijna tien maal zo hoog als het landelijk gemiddelde.

Sir Douglas Black, die voorzitter is van het Brits Medisch Ge-

nootschap, beveelt aan een diepgaand onderzoek in te stellen naar het gevaar van radio-actieve besmetting door de fabriek.

Reactie

Een woordvoerder van het bedrijf zei gisteren dat er geen bewijs is dat er verband bestaat tussen de kankergevallen en de radio-actieve lozingen van de fabriek in de Ierse Zee. Ook in andere delen van het land komen gebieden voor waar het percentage lijders aan diverse vormen van de ziekte hoger is dan normaal, zo werd gezegd.

De installatie van Sellafield, dat voorheen bekend was onder de naam Windscale, verwerkt verbruikt uranium van kernreactors tot plutonium. Dit uiterst giftige element, dat een zeer sterke radio-actieve straling heeft, kan weer door kerncentrales gebruikt worden, maar is ook het belangrijkste bestanddeel van kernwapens.

Bij de opwerking komt afval vrij dat sterk radioactief is. Sinds de jaren '50 heeft Sellafield dat afval in de Ierse Zee geloosd.

Waarschuwing Moskou tegen nucleaire winter

MOSKOU, 27 juli — De kernbewapening van één enkele onderzeeboot is al voldoende om na ontploffing voor een "nucleaire winter" van enkele maanden en daarmee voor de vernietiging van het leven op aarde te zorgen. Dat is in een Russisch computercentrum vastgesteld.

Nikita Moisejev, onderdirecteur van het computercentrum van de Russische Academie van Wetenschappen, zei gisteren tegen het persbureau Tass dat een verrassingsaanval met kernwapens, waarbij tien tot vijftien procent van het kernarsenaal in de wereld zou worden ingezet, voor een "nucleaire winter" van een vol jaar zou leiden. "Honderden tonnen omhooggeslingerde aarde en de rook van gigantische branden zullen het zonlicht van de aarde weghouden. In Centraal-Siberië en aan de oostkust van de VS zouden de temperaturen 40 tot 45 graden dalen," aldus Moisejev. "De wapens van één onderzeeboot zijn tegenwoordig voldoende om elk leven op onze planeet te vernietigen."

Moisejev zei dat zijn conclusies overeenkomen met die van Amerikaanse wetenschappers die bij een kernoorlog een "nucleaire winter" en het afsterven van elk leven hebben voorspeld, maar, aldus Moisejev, daarvoor is niet eens een globale kernoorlog nodig: de ontploffing van 100 tot 150 megaton nucleair materiaal is al voldoende. (Reuter)

NRC 21-7-84

NRC
20-7-84

Radioactief gehalte Maaswater wordt vaker gecontroleerd

Van onze verslaggever
MAASTRICHT — Rijkswaterstaat gaat het water van de Maas intensiever controleren op radioactieve verontreiniging. Het gevaar dat zo'n verontreiniging zich voordoet, is de laatste jaren toegenomen door het in gebruik nemen van kerncentrales in het Franse Chooz en het Belgische Tihange.

Tot nu toe controleerde Rijkswaterstaat het Maaswater bij Eijsden — waar het Nederland binnenkomt — één keer in de veertien dagen op de aanwezigheid van tritium, dat in het water terecht komt als kerncentrales radioactief afval lozen. In de toekomst zal de hoeveelheid tritium in het water bij Eijsden dagelijks worden gemeten.

De percentages die tot nu toe zijn aangetroffen zijn volgens Rijkswaterstaat nog niet verontrustend. Ze liggen rond de 650 pico-Curie (de eenheid waarin het radio-actief gehalte wordt gemeten per liter, terwijl vijftienduizend pico-Curie per liter de toegestane norm is).

VOLKSKRANT
10-5-84

Tabel 1 "Oude" en SI-Eenheden in stralingsbeschermingsprogramma's

Fysische grootheid	"Oude" Eenheden			SI eenheden			Opmerkingen
	Naam	Symbool	Definitie	Naam	Symbool	Definitie	
Expositie	Röntgen	R	$1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Ckg}^{-1}$ van lucht				Heeft alleen betrekking op γ -straling beneden 3 MeV. Geen SI eenheid
Geabsor- beerde dosis	rad	rad	$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ J.kg}^{-1}$ in elk medium	gray	Gy	$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$	Medium dient altijd vermeld te worden: indien niet ver- meld, dan wordt aangenomen dat het uit zacht weefsel bestaat. $1 \text{ Rad} = 10 \text{ mGy}$; $1 \text{ mrad} = 10 \text{ } \mu\text{Gy}$; $1 \text{ Gy} =$ 100 rad , $1 \text{ mGy} = 0,1 \text{ rad}$.
Dosis equiva- lent	rem	rem	$1 \text{ rem} = \frac{0,01}{Q} \text{ J.kg}^{-1}$ van straling met een kwaliteitsfactor Q	sievert	Sv	$1 \text{ Sv} = \frac{1}{Q} \text{ J.kg}^{-1}$ van straling met een kwaliteitsfactor Q	Een gewogen geabsorbeerde dosis; alleen gebruikt bij stralingsbescherming. De kwaliteitsfactor Q hangt af van de straling en kan waar- den hebben tussen 1 en 20.
Activiteit	curie	Ci	$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$	becquerel	Bq	$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$	$1 \text{ Ci} = 37 \text{ G Bq}$; $1 \text{ } \mu\text{Ci} =$ 37 k Bq . $1 \text{ Bq} = 27 \text{ p Ci}$; $1 \text{ MBq} = 27 \text{ } \mu\text{Ci}$.

Ontleend aan: Central Electricity Generating Board. Fundamentals of Radiological Protection. RD/B/N 4282 HPM 472, p. 18.

Zoals hierboven reeds enige malen is aangeduid, kunnen na bestraling vroege en late verschijnselen aan de dag treden.

1. Vroege verschijnselen

a. Akute stralingsziekte

De vroege verschijnselen vormen een ziektebeeld, dat bekend is geworden onder de naam "acute stralingsziekte". Schematisch verloopt dit ziektebeeld als volgt:

(1) Voorafgaande (= prodromale) verschijnselen

Eén of meer uren na de bestraling krijgt de getroffene maagklachten: gebrek aan eetlust, misselijkheid en braken.

Daarbij komt een gevoel van lusteloosheid, slaperigheid en moeheid, dat in ernstige gevallen kan verergeren tot volkomen uitputting. Sommige slachtoffers hebben diarree. (In dit stadium heeft dit symptoom niet de grotere betekenis, die er in een latere fase van de ziekte aan moet worden gehecht.) Deze verschijnselen duren hoogstens twee dagen.

De hevigheid en vooral het begintijdstip van de prodromi zijn volgens de huidige inzichten van betekenis voor de prognose: hoe eerder zij beginnen, hoe hoger de ontvangen stralingsdosis is geweest en hoe ernstiger de stralingsziekte zal verlopen. Het ontbreken van deze verschijnselen is ook van belang: met grote waarschijnlijkheid kan dan worden aangenomen dat

- de ontvangen stralingsdosis kleiner was dan 100R
- het verder beloop zeer gunstig zal zijn
- de getroffene niet in een ziekenhuis behoeft te worden opgenomen.

(2) Latente periode

De derde dag na de bestraling zijn alle verschijnselen verdwenen, behalve na een zeer hoge stralingsdosis. Deze uitzondering daargelaten, voelt de getroffene zich op de derde dag weer goed en in staat tot werken. Dit is het begin van een klachtenvrije fase, die

wordt aangeduid als "latente periode".

In gunstige gevallen duurt deze periode 19 dagen, na hogere stralingsdoses korter: na zeer hoge doses is er geen latente periode.

(3) Verschijnselen van de stralingsziekte

Na het verstrijken van de latente periode ontwikkelen zich nieuwe verschijnselen. Dit is het eigenlijke begin van de stralingsziekte, die zich in drie vormen kan voordoen:

(a) beschadiging van de bloedbereidende organen (lymfklieren, milt, beenmerg)

drempelwaarde: 100 rad

Symptomen : - vermindering van het aantal witte bloedlichaampjes (gevolg: infecties, koorts);
- vermindering van het aantal bloedplaatjes (gevolg: bloedingen);
- vermindering van het aantal rode bloedlichaampjes (gevolg: uitputting).

prognose : bij lagere doses gunstig, bij 400 rad 50% kans op overlijden binnen 2 maanden.

(b) beschadiging van het maagdarmslijmvlies drempelwaarde: 500 rad

symptomen : diarree, sterk vochtverlies, shock, stoornis elektrolyten evenwicht, infecties, koorts.

prognose : slecht, 94% kans op overlijden binnen 2 weken.

(N.B. In dit stadium van de ziekte heeft diarree dus een veel ernstiger betekenis dan in het begin).

(c) beschadiging van de hersenen

drempelwaarde: 2000 rad

symptomen : uitputting, sufheid, bewusteloosheid.

prognose : door binnen 2 dagen.

De neiging bestaat, de akute stralingsziekte uitsluitend toe te schrijven aan de radioactieve straling van uit de vuurbol. Dit is niet juist, stralingsziekte kan evengoed het gevolg zijn van bestraling vanuit fallout. Wel kan men stellen dat de akute stralingsziekte altijd het vroege gevolg is van een behoorlijke dosis akute gammastraling (minstens 100 rad binnen 5 dagen ontvangen) en niet van een chronische straling.

hebben. Degenen, die hun personeel aan dit stralingsrisiko blootstellen, moeten weten welke grens niet mag worden overschreden. Dit betekent echter niet dat zonder meer kan worden doorgewerkt tot die grens is bereikt. Op ieder kommandant rust de plicht alles in het werk te stellen om door tijdige aflossing de ontvangen dosis straling voor zijn personeel zo laag mogelijk te houden.

Bij het vaststellen van een te aanvaarden risico moet de betekenis van de in het besmette gebied te verrichten werkzaamheden worden afgewogen tegen het lichamelijk welzijn van het hulpverlenend personeel.

Op advies van de Gezondheidsraad, dat gelijkluidend was aan het advies van het NATO Medical Committee, is het te aanvaarden stralingsrisiko voor B.B.-personeel in oorlogstijd gesteld op: 75 rad voor een enkele dosis, onder voorwaarde dat degene, die deze dosis heeft ontvangen, daarna zo mogelijk één maand geen werkzaamheden behoeft te verrichten, waarbij hij aan ioniserende straling wordt blootgesteld;
200 rad voor de gekumuleerde dosis gedurende het gehele leven.
 Voor een akute dosis is de grens op 75 rad gesteld met het oog op de vroege verschijnselen; de limiet van 200 rad voor de gekumuleerde dosis heeft betrekking op de late gevolgen. Een blik op het in punt I.C.1.b. gegeven overzicht van de afwijkingen, die verschillende doses akute gammastraling bij de mens kunnen teweegbrengen, leert dat een dosis van 75 rad geen vroege verschijnselen geeft en de fitheid van het hulpbiedend personeel niet benadeelt.
 De limiet van 200 rad geeft een redelijke waarborg dat ook later zich geen gevolgen van de radiatie voordoen, behalve ten aanzien van de erfelijke afwijkingen bij het nageslacht.

2. De operationele dosis

Ofschoon bij chronische bestraling de effectieve dosis, voor wat betreft de vroege verschijnselen, wegens de regeneratie van de weefsels (zie punt I.B.2.) kleiner is dan de som van de ontvangen doses, wordt in de praktijk dit verschil verwaarloosd.

Daarom is zowel voor de chronische als voor de eenmalige bestraling de operationele dosis op 75 rad gesteld, waarbij nogmaals er op wordt gewezen dat het invoeren van deze maximaaldosis niet ontslaat van de plicht er naar te streven het stralingsrisiko voor het ingezette personeel door tijdige aflossing zo laag mogelijk te houden.

Het HBB heeft de bevoegdheid om het tot de kring behorende potentieel in te zetten in gebieden waar radioactieve straling heerst, met dien verstande dat daarbij de operationele dosis van 75 rad niet wordt overschreden.

Deze bevoegdheid heeft het HBB ook ten aanzien van bijstandspotentieel.

3. Overschrijding van de operationele dosis

Er kunnen zich situaties voordoen, waarin het noodzakelijk is het ingezette B.B.-personeel ook na het bereiken van de

75 rad-drempel te laten doorwerken.

Deze beslissing kan door het HBB ten aanzien van zijn eigen potentieel worden genomen na bekomen machtiging van het bevoegd gezag, d.w.z. van de Voorzitter van de Kringraad. Indien de omstandigheden er toe nopen om bijstandspotentieel de operationele dosis te doen overschrijden, moet het HBB daarvoor via de PC machtiging vragen aan de Kommissaris der Koningin dan wel aan de NC.

Indien een B.B.-autoriteit, door de nood gedwongen, besluit de operationele dosis te doen overschrijden, dient hij wel te beseffen dat tot een dosis van 150 rad de ziekteverschijnselen in vrij geringe mate toenemen, doch dat daarboven het beeld in snel tempo veel ernstiger wordt.

De op het spel staande belangen bepalen, hoe ver men boven de operationele dosis zal uitgaan; het in punt I.C.1.b. gegeven overzicht geeft aan welk ziektepercentage kan worden verwacht, indien men gedwongen is zelfs een dosis van 150 rad te doen overschrijden.

4. Registratie van ontvangen stralingsdoses

Uit het vorenstaande blijkt de noodzaak, nauwkeurig aantekening te doen houden van de stralingsdoses, die het personeel van de hulpverleningseenheden heeft ondergaan en bij elke nieuwe inzet de verantwoordelijke B.B.-autoriteit hieromtrent in te lichten.

De dosisregistratie is beschreven in bijlage 12.

b. Overzicht van de vroege verschijnselen, die verschillende doses akute gammastraling bij de mens kunnen teweegbrengen

Akute doses:	Te verwachten effect:
0 - 75 rad	Geen aantoonbare afwijkingen.
100 rad	Bij 2% van de getroffen personen misselijkheid gedurende één dag; geen arbeidsongeschiktheid (braken treedt pas op bij overschrijding van deze dosis).
150 rad	25% van de getroffen personen krijgt stralingsziekte, is arbeidsongeschikt, opname in een ziekenhuis echter niet nodig.
200 rad	50% van de getroffen personen krijgt stralingsziekte, ziekenhuisopname noodzakelijk, geen doden.
300 rad	100% ziek, 20% overlijdt binnen 3 maanden.
400 rad	100% ziek, 50% overlijdt binnen 2 maanden.
600 rad	100% overlijdt binnen 2 weken.

2. Late gevolgen van blootstelling aan ioniserende straling.

a. Kwaadaardige gezwellen

Sinds tientallen jaren is bekend dat chronische bestraling met kleine doses kwaadaardige woekeringen kan doen ontstaan.

Stralingsartsen hebben een sterftecijfer aan leukaemie (woekering van de bloedbereidende organen), dat 9 x zo hoog is als dat van andere artsen en ook een hogere kankerfrekwentie.

Een kwaadaardig gezwel, uitgaande van de beenderen, was een van de voornaamste dooroorzaken voor een groep fabrieksmisjes, die omstreeks 1918-1922 radium uit lichtgevend verf in het lichaam kreeg.

Volgens de berichten uit Japan blijkt de frekwentie van leukaemie ook na éénmalige bestraling verhoogd te zijn, vooral na hogere doses.

Dit geldt ook voor andere kwaadaardige woekeringen; onder de overlevenden van de atoombomaanvallen op Hiroshima en Nagasaki is het aantal gevallen van schildklierkanker beduidend hoger dan bij andere bevolkingsgroepen.

b. Troebeling van de ooglenzen

Dieper doordringende ioniserende stralen (röntgen- en gammastralen, neutronen) kunnen na een jarenlange latente periode troebeling van de ooglenzen (staar) veroorzaken, vooral na herhaalde bestraling.

Onder de atoombom-slachtoffers in Japan, die dus een akute dosis hebben gehad, zijn thans verscheidene staarpatiënten.

De drempelwaarde is hoog.

c. Verkorting van de levensduur

Bij proefdieren is gekonstateerd dat bestraling met een dosis, welke niet dodelijk is, uiteindelijk toch een verkorting van het leven tengevolge heeft. Het is nog niet zeker of dit bij de mens ook het geval is, doch waarschijnlijk is het wel.

d. Erfelijke afwijkingen

De eigenschappen, die het nageslacht van de ouders erft zijn gebonden aan bepaalde onderdelen van de celkernen der geslachtscellen.

Deze dragers van de erfelijke eigenschappen, genen genaamd, kunnen door elektromagnetische stralen met korte golflengte (dus röntgen- en gammastralen) worden beschadigd. Door de meeste onderzoekers wordt aangenomen, dat beschadiging van de genen wordt veroorzaakt door kumulatie van alle röntgen- en gammabestralingen, die de ouders tevoren in hun leven hebben ondergaan. Beschadiging van de genen kan leiden tot verandering van de erfelijke eigenschappen bij het nageslacht; deze veranderingen duidt men aan als "mutaties". Een mutatie betekent dus een afwijking bij de nakomelingen, uiteraard kan die gunstig of ongunstig zijn. Helaas is een mutatie tengevolge van ioniserende straling meestal een achteruitgang, die zich kan uiten op lichamelijk of geestelijk gebied.

Een gunstige faktor is, dat een mutatie tengevolge van straling in het algemeen pas tot uiting komt, als bij beide ouders het betrokken geen is beschadigd. De stralingsdosis, die als drempelwaarde voor de genetische beschadiging geldt, blijkt zeer laag te zijn. De proeven van H.J. Muller bij de bananenvlieg vormen de basis voor de stelling, dat eigenlijk elke dosis ioniserende straling, hoe klein ook, mutaties kan opwekken, waarbij een lineair verband tussen stralingsdosis en mutatiefrekwentie wordt aangenomen.

Uit meer recente onderzoekingen van W.L. Russell op zoogdieren is echter af te leiden dat de kans op mutaties vermindert, naarmate tussen de bestraling en het ontstaan van nakomelingen een langere tijdsperiode is gelegen.

II. Risico van een aktie in falloutgebied:

1. Hette aanvaarden risico

Bij een hulpverleningsaktie in radioactief besmet gebied doet zich onmiddellijk de vraag voor, hoe lang de ingezette eenheden daar mogen blijven. Het is bekend dat de voornaamste bedreiging in een falloutgebied de uitwendige straling is, in het bijzonder het aandeel, dat de gammastralen daarin

Toen viel de bom op Rotterdam

KERNOORLOG

Nederland was op één dag tien eeuwen teruggezet

In Europa is het Oost-West conflict uitgebroken. Russische troepen lopen de Navo-stellingen onder de voet. Amerika gebruikt zijn neutronenwapen. Rusland slaat terug met een atombom op Rotterdam; dit blijkt het voorspel tot de totale vernietiging van Nederland (en Europa). Science fiction? Jazeker, maar dan wel gebaseerd op harde feiten. Als we er niet in slagen de kernbewapening fors terug te dringen kan het 'morgen' gebeuren: zó... of heel anders, maar in ieder geval minstens even erg als hier staat beschreven. Een scenario.

Als het de Bescherming Bevolking op een realistische manier om het welzijn van de mensen ging, had zij alleen dit kunnen doen: elf miljoen gilecapsules uitroeken, met een slok radioactief water in te nemen bij het uitbreken van de oorlog.

(Harry Mulisch: *Wenken voor de Jongste Dag*, 1961)

"Of er nog leven is na een kernoorlog?" Ach, ik zie dat niet zo somber in. Je breekt tegenwoordig je nek over de Japanse autootjes. Die zijn toch ook allemaal gebouwd na de atombommen op Hiroshima en Nagasaki?

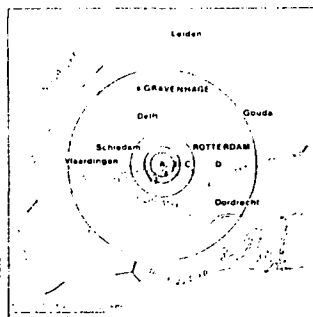
(H. Dijkstra, voorzitter landelijk contact BB-hoofden *Volkskrant*, augustus 1981)

Het einde kwam toch nog onverwachts. Een verblindend wit schijnsel, 'heller dan duizend zonnen', verlichtte plotseling secondenlang de hemel. Gelijktijdig schoot een enorme vuurbal omhoog en daalde als een vlammend tapijt kilometers breed neer over de woestijnstad. Auto's en trams, lantaarnpalen en telefooncellen - alles

Ton Crijnen

smolt weg als was het chocola.

De hitte bleek zo intens dat duizenden mensen op straat het moment van hun verassing nauwelijks beleefden; in een oogwenk werden ze verpulverd, opgelost in de gloeiende massa van



wat een paar tellen eerder nog het trottoir was geweest. Van al die levende wezens - moeders met kinderen, werklied, bejaarden, honden, katten - bleef zelfs geen schaduw over.

Binnen tien seconden na de explosie overdekten dikke wolken de hele stad; daaruit steeg massief en statig, als een huiveringwekkend grafteken, de nucleaire paddestoel. Met z'n doorsnee van twintig kilometer verduisterde hij de zomerse middagzon: het werd nacht.

Een loeiende storm stak op. Flatgebouwen en kerktorens werden van hun fundamenteën gerukt en opgezogen door de ziedende wervelwind die met een snelheid van zeshonderd kilometer per uur over de geteisterde vlakke giede, van zuid naar noord, dan een paar seconden afzwakkend om vervolgens in tegenovergestelde

Overzicht van de kernaanval op Rotterdam. Ring A: dodelijke straling; ring B: totale verwoesting; ring C: brandzone; ring D: grens voor de zwaarste schade - ruiten gesneuveld, dakpannen gebroken.

richting terug te razen. Het leek alsof de hemel neerstortte.

Tienduizenden inwoners kwamen hierbij om; bedolven onder neerstortend puin, dodelijk gewond door springende ruiten, eenvoudig verpletterd door de schokgolf.

Massale vuurzee

Enkele minuten nadat de kernbom boven de stad was ontploft, resteerde van Rotterdam slechts een rokende puinhoop: honderdtachtig kilometer in het vierkant. Van de vijfhonderdachtigduizend inwoners was ruim de helft dood of ernstig gewond. Niemand had tijd gehad de openbare schuilkelders te bereiken; alle medische zorg was uitgewist, het civiele verdedigingsapparaat bestond niet meer.

Tot in de verste buitenwijken woeden enorme branden, aangewakkerd door gesprongen gasleidingen en de exploderende olietanks van Pernis. Vuurballen schoten aanhoudend door de lucht, vliegende steekvlammen die alles verteerden wat ze aanraakten: bomen, huizen, mensen. De individuele brandhaarden verenigden zich al spoedig tot één gigantische vuurzee die de hele stad aantastte, het havengebied vernietigde en als een infernale vloedgolf voortraasde richting Schiedam en Vlaardingen.

Het wegdek werd zo heet dat de asfaltlaag begon te borrelen en honden hun poten niet meer konden los krijgen. Hun gilend gejamr ging verloren in het geloei van de snel naderende vuurstorm. Talloze mensen stortten zich als levende fakkels in de Maas. Er dreven honderden lijken. De huid van veel doden was roodachtig-paars en hevig opgezwollen, alsof de zon hen had opgevreten.

Langs de oever lag het verstijfde lichaam van een jonge vrouw, haar dode baby dicht tegen zich aangedrukt, het ene been omhoog alsof ze nog rende. Een paar honderd meter verder het verkoelde lijke van een kind, de handen en vingers klawden naar de hemel. Een jongetje of een meisje? Het viel niet te zien.

Vreselijke blaren

De inwoners van de oudere wijken die gek van angst blindelings een goed heenkomen zochten, maakten voor het merendeel geen schijn van kans. De kleren van het lijf gescheurd, hun lichamen overdekt met gruwelijke brandwonden worstelden ze voort over metershoog puin, langs duizenden lijken en kadavers. Er hing een verpestende geur van schroeiend vlees.

Mensen strompelden over straat, hun huid in slarden achter hen aansliërend. Velen hadden vreselijke blaren op rug of borst. Ze liepen zwijgend verder; in hun zwartgeblakerde gezichten keken de ogen star voor zich uit als in trance. De meesten stierven onderweg. Zoals die jongen; ineengehurkt zat hij tegen een half omgevalen muur en riep klaaglijk om water: niemand hielp.



Een kleine, vrijwel naakte man knielde bij de resten van wat eens zijn winkel was geweest. Onder het beton lagen zijn vrouw en vijfjarig dochtertje. Het kind leefde niet meer, de vrouw wel. Haar man probeerde telkens opnieuw de zware brokstukken op te tillen; het lukte hem niet. Plotse-

Enkele minuten nadat de kernbom was ontploft resteerde van Rotterdam slechts een rokende puinhoop.



ling kroop hij overeind en rende weg; kort daarna kwamen de vlammen.

Niet alleen mens en dier werden geteisterd, ook de natuur was aangetast. Het gras in de perken zag rood, alsof een onzichtbare hand het had geverfd. Bomen en struiken bleken verdwenen, evenals de vogels; alleen de insecten waren gebleven, plotseling krioelde het ervan.

De genadeslag

Kort na de aanval begon boven het centrum een vreemd soort regen te vallen. De druppels waren zo groot als knikkers en gitzwart. Dit angstaanjagend verschijnsel had te maken met condens dat uit het helse vuur omhoogsteeg. Naast vocht en gruis bevatte de neerslag een dodelijke hoeveelheid radio-actieve fall-out die in een straal van zo'n drie kilometer elk levend wezen dat ermee in aanraking kwam de genadeslag gaf.

Het waren er overigens niet veel die dit overkwam; negentig procent van de mensen in dit gebied bleek al te zijn omgekomen door de schokgolf of het vuur. De rest stierf nu binnen enkele uren de stralingsdood.

Tegen het einde van de dag telde Rotterdam ruim tweehonderdduizend doden; nog eens honderdvijftigduizend inwoners hadden zware kwetsuren opgelopen waarvan velen de komende dagen en uren zouden sterven. Honderdduizend anderen bleken minder ernstig gewond; samen met de rest van de bevolking vluchtten ze de stad uit.

Een vrouw leunde even tegen de geblakerde leuning van een brug. Toen ze weer verder liep bleef haar huid aan het metaal hangen; gelig vocht droop uit de enorme wond op haar rug, het rode vlees lag volkomen bloot. Zo waren er honderden. Ze kregen aanvankelijk nauwelijks hulp, ver-

zagden elkaar, strekten met vroege over woorden waaruit soms al de maanden kropen.

Op grote stapels

Inmiddels stonden ook delen van Schiedam, een stad met 'n kleine tachtigduizend inwoners, in lichterlaaie. Tientallen mensen lagen dood op straat en tussen de ruïnes van hun huizen; slachtoffers van rondliggend puin en van de lichtflits die hen de huid letterlijk van het lichaam had gescheurd. Vele anderen zouden omkomen bij de branden die nu woeddenn.

Politie en militairen gooiden de lijken op grote stapels, gaten er benzine overheen en staken ze aan. Overal in de stad zag je dit soort brandende pyramides van menselijk vlees en gebente. Men hoopte zo epidemieën te voorkomen; een valse hoop naar later bleek.

In Vlaardingen, Delft en Capelle aan de IJssel brak eveneens het vuur los, al was de schade hier minder groot. Mensen zochten tasterend hun weg door de met glasscherven en dakpannen bezaaide straten; over een afstand van dertien kilometer had de flits velen tijdelijk verblind, sommigen zelfs voorgoed.

De Sovjetdefensieraad nam zelf het besluit Rotterdam met een kernbom te bestoken. Dit was een te belangrijke

aangelegenheid om over te laten aan de opgevoerde militaire raad; de partij diende hier het laatste woord te hebben. Drie dagen waren nu verstreken sinds het begin van de oorlog. Tot gisteren leek er goede hoop dat men een nucleaire confrontatie zou kunnen vermijden; daarin was inmiddels abrupt verandering gekomen.

De sfeer binnen de bunker, diep onder het Kremlin, was zakelijk; er heerste geen paniek. De minister van defensie nam het woord. Hij schetste in sobere bewoordingen de militaire stand van zaken. De leden van het Politburo, hoge officieren van leger, luchtmacht en vloot, de chefs van KGB en MVD - allemaal luisterden ze gespannen naar het nasale stemgeluid van de kameraad-bewindsman.

„Eenheden van het zestiende lucht-leger hebben Kassel vast in handen; ze krijgen daarbij flankdekking van drie Oostduitse divisies en een Poolse brigade. Onze troepen maken zich gereed om via Fulda op te rukken naar Frankfurt. Het eerste garde-tankleger staat al bij Aschaffenburg. De Amerikaanse en Westduitse eenheden zijn in het hele centrale frontgebied op de terughocht. Ze worden ernstig in hun bewegingsvrijheid belemmerd door stromen vluchtelingen vanuit het noorden en oosten.

Eenzelfde beeld biedt de situatie in het zuiden, tussen Mannheim en München. Het achtste garde-leger heeft daar de vijand - Canadezen, Fransen en Westduitsers - teruggedrongen tot

aan de Rijn en de Lech. Tsjechische en Hongaarse troepen rekenen af met verspreide groepjes die zich niet aan onze langbeweging hebben weten te onttrekken. Er zijn hevige luchtgevechten aan de gang.”

Het 'incident'

De minister fronste het voorhoofd en vervolgde: „De toestand aan het noordelijk front leek aanvankelijk nog gunstiger. Hier hebben we op de lijn Bremen-Kassel zo'n veertig divisies ontplooid, waarvan vijftien pantsereenheden. De NAVO heeft daar elf divisies tegenover staan: voornamelijk Westduitsers en Amerikanen die worden ondersteund door Britse, Nederlandse en Belgische brigades. Onze troepen zijn al voorbij Bremen en Hannover; ze maakten zich een etmaal geleden op voor de beslissende slag die hen over de Weser moest brengen.”

De maarschalk pauzeerde even, zei toen: „Er heeft zich echter gistermorgen een zeer ernstig 'incident' voorgedaan. In het gebied van het tweede garde-tankleger zijn door de vijand neutronengranaten afgevuurd. Kennelijk bedoeld als schot voor de boeg. De laatste berichten luiden dat een terrein van honderd vierkante kilometer radioactief is besmet; achttien tankbataljons en zeven pantserinfanterieregimenten, in totaal ruim twintigduizend man, zijn uitgeschakeld. Ons offensief stagneert.”

Hij keek op van zijn papieren. „Kameraladen, wat moeten we doen? Het is duidelijk dat de NAVO overweegt haar tactisch kernwapensarsenaal tegen ons af te vuren; als dit gebeurt kunnen we een 'schone' oorlog wel vergeten. We worden dan eveneens gedwongen onze atoomraketten in te zetten en wat daarvan het gevolg zal zijn, hoef ik in dit gezelschap niet te vertellen.”

Een 'gepast' antwoord

Er volgde een verhitte discussie. Iedereen besefte de dodelijke ernst van het moment. Haviken en duiven praatten heftig op elkaar in. De Sovjetpartijleider die het overleg voorzat, hakte ten slotte de knoop door. Men zou een 'gepast' antwoord geven: één kernwapen van beperkte kracht op één kapitalistisch doelwit. Amerika moest beseffen dat de Sovjet-Unie zo'n neutronenaanval niet over haar kant kon laten gaan.

Het leek echter van levensbelang Washington duidelijk te maken dat het hier ging om een eenmalige actie, bedoeld als waarschuwing, en dat ze niet het voorspel vormde van een totale atoomoorlog. Amerikaans of Canadees grondgebied was daarom uit den boze. Zo kwam men op het Nederlandse Europroot; dat doelwit had als bijkomend voordeel dat de aanvoer van Amerikaanse olie en troepen via Rotterdam voorgoed zou worden lamgelegd.

Artuur/Gamma



De plannen werden tot in detail uitgewerkt. Het Ballistic Missile Early Warning System zou de NAVO waarschuwen, een paar minuten voordat de atoomkop zijn doelwit bereikte. Inmiddels had men dan de Amerikanen via de hot-line laten weten wat er op handen was en waarom; overigens te laat voor Washington om nog iets te doen.

En zo dook op die zonnige augustusdag, precies om één uur 's middags, een SS-4 raket gierend de dampkring binnen en bracht op drie kilometer hoogte zijn duivelse lading van één megaton, tachtig maal de Hiroshimabom, tot ontploffing. Het wapen veroorzaakte veel meer schade dan militair noodzakelijk was, maar het ging de Russen vooral om het psychologisch effect.

De raket was overigens een fractie te scherp afgesield; in plaats van boven Europroot explodeerde de kernbom recht boven het centrum van Rotterdam. Niet dat het veel verschil maakte...

In Den Haag, 22 kilometer verderop, waren op dat moment de straten vol mensen. Veel militairen, daarnaast vrouwen en bejaarden die tussen het luchtalarm door nog wat probeerden te hamsteren voor de slechte tijd die

...Ditmaal deed een SS-20 het vuile werk...

De harde feiten achter de fictie

Het verhaal dat op deze pagina's staat afgedrukt is fictief; de beschreven gebeurtenissen hebben zich nooit voorgedaan, althans niet in Nederland. De kans op een kernaanval tegen ons land lijkt nog altijd klein, recente verbale chantage vanuit Moskou ten spijt.

De theorie van de automatische afschrikking - geen van beide partijen zal kernwapens gebruiken omdat ze allebei weten, dat de andere in staat is vernietigend terug te slaan - blijkt tot dusver in de praktijk goed te werken. Ze heeft de wereld, die sinds 1945 tientallen conventionele oorlogen met honderdduizenden doden kende, het Armageddon van een atoomconflict bespaard.

Desondanks groeit de angst. De laatste tien jaar hebben alle pogingen tot verdere kernwapenbeheersing gefaald. In de internationale politiek nemen spanning en onzekerheid toe. Politie en militairen spelen met het waanidee dat een beperkte kernoorlog mogelijk is. En intussen stijgt het aantal kernwapens; van enkele honderden in 1950 tot ruim zestigduizend nu.

Om de Nederlandse polemoloog professor Hylke Tromp te citeren: 'Er

heeft zich de afgelopen jaren een even merkwaardig als beangstigend proces van psychologische aanpassing aan het bestaan en het mogelijk gebruik van kernwapens voltrokken. In plaats van te constateren dat kernwapens niet bruikbaar zijn (wat op grond van alle beschikbare feiten de enige mogelijke conclusie is) is de reactie eerder pogingen te doen de onaanvaardbare consequenties te verzachten.'

Tegen deze achtergrond krijgt de eventualiteit van een kernaanval op Nederland, als onderdeel van een Europees conflict, plotseling reliëf.

Geen melodramatiek

Dit verhaal wil stelling nemen tegen alle vormen van struisvogelpolitiek, zonder te vervallen in het soort steriele doedendenken dat een derde wereldoorlog als onontkoombaar beschouwt. Er wordt in het Tijd-scenario zoveel mogelijk aansluiting gezocht bij tastbare feitenmateriaal en weerstand geboden aan de verleiding tot 'overactivering' en melodramatiek; dit om bij de lezer elke neiging tot escapisme (zie je wel, allemaal blauwekul!) de pas af te snijden.

Zo zijn alle sfeerbeschrijvingen ont-

leend aan ooggetuigenverslagen van de aanval op Hiroshima, deze week precies 37 jaar geleden, en wordt in het militaire scenario weergegeven wat westerse deskundigen waarschijnlijk achten. Hetzelfde geldt voor het type kernwapens, hun gebruik, en de uitwerking ervan op mens en milieu: bij ontploffing in de lucht vooral brand- en luchtdrukschade, bij een grondexplosie meer radio-activiteit.

Naast het gebruik van veel ander materiaal is vooral geput uit Peter Goodwins recent en zeer informatief boek *Nuclear War: facts on our survival* (Nederlandse vertaling 'Als de bom valt...') en uit het veelbesproken *The Fate of the Earth* van de Amerikaanse journalist Jonathan Schell. Wat dit laatste werk betreft; je hoeft Schells irrealistische politiek ('wereldregering') en strategische ('afschrikking') direct overboord) aanbevelingen niet te onderschrijven om toch diep te worden geraakt door zijn huiveringwekkende beschrijving van een mogelijke kernoorlog. Hij laat je absoluut geen illusies.

Voornaam doelwit

Het Sovjetpersbureau Novosti gaf

Nederland begin vorige week te verstaan dat ons land tijdens een nucleair conflict volledig van de kaart kan worden geveegd, als het plaatsing van kernraketten op zijn grondgebied toelaat. Nu heeft niemand ooit getwijfeld aan het Russische vermogen dit te doen; ook in het Tijd-scenario komt de situatie voor. Alleen zal een dergelijke vernietiging waarschijnlijk niet het sluitstuk maar juist het begin van een Europese oorlog vormen.

Besleidend dat de NAVO haar conventionele minderheidspositie in geval van een conflict wel nucleair zal moeten compenseren, zou Moskou heel goed kunnen proberen de vijand voor te zijn door in één klap alle westerse kruisraketten en Pershing 2's uit te schakelen. Nederland wordt dan een voornaam doelwit.

De regeringcommissie *Schuilgelegenheid* gaat er sinds 1970 van uit dat in zo'n situatie tegen ons land 21 kernkoppen (totale kracht acht megaton) worden gebruikt. Men neemt tevens aan dat het hierbij zal gaan om bommen van klein en middelgroot kaliber; overigens ruim voldoende om onvoorstelbare ellende te veroorzaken.

Een dergelijke totale confrontatie - het is onwaarschijnlijk dat Amerika

apathisch blijft toekijken - zou Europa nauwelijks overleven; wie praat over het winnen van beperkte atoomoorlogen weet niet waarover hij het heeft. Nog afgezien van de vraag of je een beperkte kernoorlog, waarvan de oorsprong niet in Europa hoeft te liggen, ooit beperkt kunt houden.

Vals veiligheidsgevoel

De eerder genoemde *Commissie Schuilgelegenheid* constateert dat Nederland zich niet kan beschermen tegen een massale kernoorlog maar wel tegen beperkte aanvallen. Velen ontkenen dit laatste. Ze verwijten de regering dat die een vals gevoel van veiligheid creëert; alsof zo'n kernaanval een onweersbui is waarvoor je kunt schuilen.

De critici - IKV, Vereniging van Medische Polenologen, PSP, enkele geleerden - komen met de volgende feiten:

- atoomschuilkelders hebben alleen enige zin in dunbevolkte gebieden en tegen kernexplosies op grote afstand; in een klein, dicht bewoond land als het onze hebben ze geen enkel nut;
- de noodgezondheidszorg - 13.000 geneeskundigen, 733 ambulances, 55.000

bedden, 50 magazijnen met verband- en geneesmiddelen - zal zelfs de gevolgen van één nucleaire bom (bijvoorbeeld op Rotterdam) nooit kunnen opvangen, zeker niet als daarbij grote aantallen mensen brandwonden oplopen en aan stralingsziekte lijden.

• Ons civiele verdedigingsapparaat (elfduizend man) heeft minimaal 36 uur nodig om goed te draaien.

Voorstanders van het overheidsstandpunt - „je beschermen heeft zin” - zijn evenmin tevreden. Ze vragen zich af waarom het nog twintig jaar moet duren voordat een kwart van de bevolking onderdak kan vinden in openbare schuilkelders; nu is er amper ruimte voor drie procent. De rest moet zichzelf zien te redden; in souterrains van flatgebouwen. In zelf aangelegde schuilplaatsen of gewoon in de kelderkast. Niet bepaald een optimale bescherming tegen de gevolgen van kernexplosies.

In ieder geval moet de vijand ons land niet voor het jaar 2000 aanvallen en dient hij zijn plannen ruim van tevoren bekend te maken.

Het lijkt toch maar beter te zorgen dat er nooit een kernoorlog komt.

ging komen. Er heerste een verbeten stemming: de berichten van het front waren slecht. Scheveningen was de ochtend voor de tweede maal gebombardeerd, geruchten over Sovjetspionnen deden alom de ronde.

Het koninklijk gezin had geweigerd de Hofstad te verlaten; men zat in een atoomschuilkelder achter Huis ten Bosch. Het kabinet bevond zich eveneens ondergronds, evenals de ministeries en het provinciale bestuur. Hun schuilplaatsen waren echter niet bekend, evenmin als die van de NS, PTT, Rijkswaterstaat en het KNMI. Radio en TV gaven regelmatig aanwijzingen hoe je je het beste kon beschermen tegen een kernaanval. Het deed de angst alleen maar toenemen, iedereen vroeg zich af: Wanneer?

Uit de krant wist men dat er slechts voor tien procent van de vierhonderdvijftigduizend Hagenaars ruimte was in een openbare schuilplaats, de rest moest zichzelf zien te helpen. Er kwam een run op tochtstrips, plak-

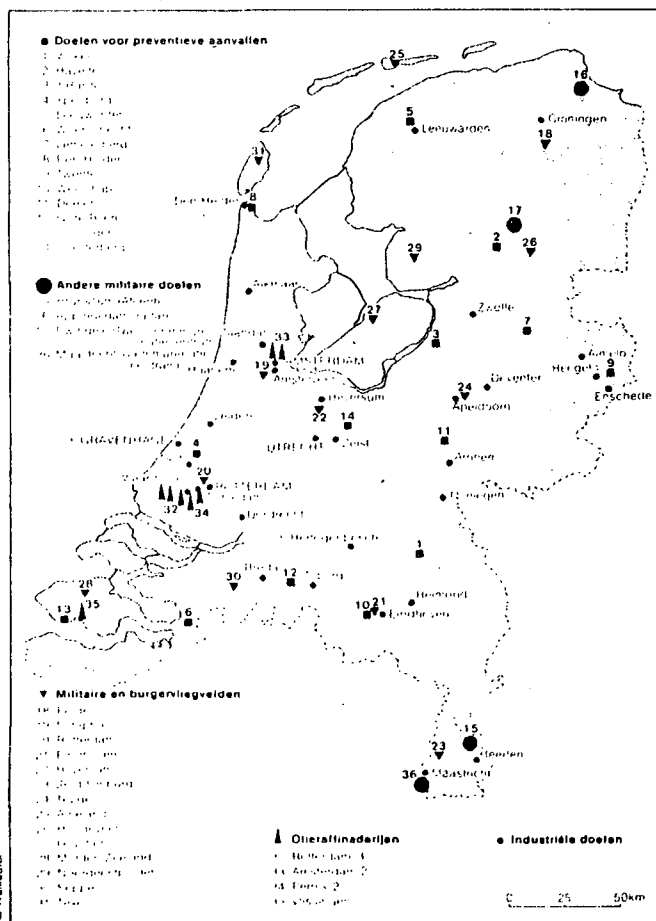
band, verf en plastic; voedsel in blik, verbandmiddelen, kaarsen en batterijen waren eveneens in een mum van tijd uitverkocht. Overal lagen zandzakken.

Panische angst

Plotseling leek de zon naar de aarde te komen. Seconden later steeg uit de richting Rotterdam een enorme wolkenzuil op, die uitwaaiende tot een gigantische paddestoel. Enkele ogenblikken was het doofstijl, dan hoorde men gedreun als van naderend onweer. Zware windstoten deden de ruiten knappen, dakpannen kwamen ratelend naar beneden en maakten de eerste slachtoffers.

In paniek zocht iedereen een goed heenkomen. Bij de grote parkeerga-

Toen de 24 kernbommen waren neergekomen, was vrijwel alles tot één brandende puinhoop gereduceerd.



ge op het Plein, midden in de stad, speelden zich waanzinnige infernen af. Een grote menigte drong duwend, vechtend en schreeuwend naar binnen. Wachters probeerden enige orde in de chaos te scheppen; tevergeefs, ze werden opzijgestompt door mensen die uitzinnig van angst de veilig geachte schuilplaats probeerden te bereiken. Had de radio niet gezegd dat je binnen het uur de eerste radioactieve neerslag kon verwachten?

Een bewaker verloor zijn kalmte, drukte op de knop en sloot daarmee de garage hermetisch af. In plaats van de toegestane twintigduizend bevonden zich nu maar enkele honderden mensen in het ondergrondse gewelf. Voor men de stalen deuren weer kon openen, viel plotseling het licht uit. Kinderen begonnen te huilen, een oudere man kreeg 'n hartaanval. Er was geen arts.

De radio, met meldingen over de toestand buiten, begon te kraken en zweeg even later helemaal. De leiders van de schuilkelder - een groep van vijf, door de burgemeester aangesteld - keken elkaar veelbetekenend aan. Dit was de elektromagnetische puls, ontstaan door de kernexplosie; geen computer, telefoon- of zendapparatuur kon die overleven. Heel Den Haag zat nu gegarandeerd zonder stroom.

Uren later werd duidelijk dat er geen stralingsgevaar te duchten viel. Toen men de garage verliet, bleek dat drie mensen waren overleden aan de doorstane emoties; twee anderen hadden een shock opgelopen. Op straat heerste chaos; er was geplunderd.

Levende doden

Zo gauw het bericht over de kernbom op Rotterdam binnenkwam, gingen vanuit Amsterdam, Utrecht en Den Haag vooruitgeschoven hulpcolonnies op pad om te proberen overlevenden te redden. Men kwam niet ver; die uit Den Haag strandden even buiten Delft. Het puin, de branden en een steeds groter wordende stroom vluchtelingen beletten elke doortocht.

Er viel overigens ook hier genoeg te doen; lijken moesten verbrand, gewonden verzorgd worden, en onder het puin lagen mensen te stikken. De helpers hadden veel last van loslopen: de honden en katten; in groepen rondtrekkend, begeleid door zwermen vliegen en anderen insecten, vochten ze om elk kadaver. Sommige beesten, dol van de pijnlijke brandwonden, vielen mensen aan: kinderen werden doodgebeten.

En steeds kwamen nieuwe gewonden binnen. Hun aantal liep al snel in de honderden; driekwart had brandwonden (stralingsziekten kwamen relatief weinig voor) waarvan veel derdegraads. In lange rijen werden de mensen op straat neergelegd. Er heerste een luguber zwijgen; voorzover de zwaar vermistte slachtoffers niet in coma lagen, konden ze geen enkel geluid uitbrengen, ze bleken volkomen verlamd.

De hulpploegen konden voor de gekwetsten weinig doen; hun aantal was

vele malen groter dan men ooit had meegemaakt. Het enorm hoge percentage mensen met brandwonden maakte alles nog hopelozier. De weinige brandwondencentra lagen al vol slachtoffers van conventionele bombardementen die de afgelopen dagen waren uitgevoerd op Den Helder, Velsen, Eindhoven en Vlissingen.

Leden van de inmiddels ook gearriveerde geneeskundige diensten, het Rode Kruis en de mobiele colonnes van de landmacht sorteerden de minder ernstige gevallen en brachten ze met alles wat maar kon rijden over naar ziekenhuizen in de Haagse, Amsterdamse en Utrechtse regio's. Die waren al snel tjokvol - men sloeg zelfs bedden in de gangen op - en daarom week men uit naar verpleegtehuizen, inrichtingen en zelfs scholen.

De rest van de gewonden - een meerderheid - bleef op straat achter en stierf.

Toen kwam het bericht over een nieuwe bom.

Washington reageerde niet zoals de Russen hadden gehoopt. Een uur nadat Rotterdam was vernietigd legden twee kernbommen van Amerikaanse makelij Leipzig en Gdansk in de as. Het signaal was duidelijk: nog één stap en de Sovjet-Unie is aan de beurt.

Het Kremlin aarzelde. In tegenstelling tot de NAVO hadden de Russen geen enkel belang bij het gebruik van atoomwapens. Hun conventionele strijdkrachten konden het werk heel goed alleen af, al deed de betere uitrusting van het westen een deel van de kwantitatieve Sovjetovermacht teniet. Moskou besloot opnieuw tot een 'beheerste' reactie: een kernaanval op het Westduitse Minden, waar men een concentratie Pershing 2-raketten vermoedde.

Ditmaal deed een SS-20 het vuile werk. De raket was uitgerust met drie kernkoppen van elk honderdvijftig kiloton, ruim tien keer krachtiger dan de Hiroshima-bom. Twee ladingen troffen het doel, de derde schoot er overheen en plofte 270 kilometer westelijker neer, precies op het verkeersknooppunt Oudenrijn bij Utrecht. De gevolgen waren rampzalig.

Het projectiel sloeg een krater van veertig meter diep en verwoestte alles in een straal van twee kilometer. West-Utrecht, De Meern en Nieuwegein vatten vlam; IJsselstein kort daarna. De explosieve luchtverplaatsing wakkerde het vuur aan en spoedig stond ook de binnenstad van Utrecht in lichterlaaie. Blussen had geen zin, er stond amper druk op de (trouwen voor het grootste deel gesprongen) leidingen. Duizenden doden en een tienvoud aan gewonden waren het gevolg.

Een deel van de nog levende slachtoffers had ernstige brandwonden, maar er kwamen ook veel breuken, diepe snijwonden en bloedingen voor. Sommige mensen zouden met snelle geneeskundige hulp nog te redden zijn geweest, maar er was niemand om ze



...Slechts voor tien procent van de Hagenaars was er ruimte in een openbare schuilplaats, de rest moest zichzelf zien te helpen...

die te geven. Het Academisch Ziekenhuis brandde als een fakkel, de rest van de gezondheidszorg lag letterlijk in puin.

Ambulance-eenheden durfden niet tot het gebied door te dringen; vanuit het explosiepunt naderde langzaam een grote radioactieve wolk. Binnen enkele uren zou het hele gebied tussen Oudenrijn en Bussum, een afstand van zo'n dertig kilometer, zwaar zijn besmet; tenzij men zich voldoende wist te beschermen, stierf hier vrijwel iedereen.

Flak vóór de hoofdstad werden ze opgevangen. Bewoners van de buitenwijken die hen zagen aankomen dachten eerst dat het negers waren, zo verbrand was hun huid. De vluchtelingen konden niet vertellen. „We zagen een flits“, zeiden ze, „en toen gebeurde dit“. Ze schenen volkomen apathisch, praatte als in een droom. Het waren levende geesten die van dichtbij hadden meegemaakt hoe de wereld verging.

Sommigen leken ongedeerd, ze klaagden alleen over misselijkheid en hadden last van diarree. Het waren de eerste symptomen van stralingsziekte. Een deel van deze mensen zou binnen twee tot zeven dagen sterven, de anderen zouden zich geleidelijk weer wat beter gaan voelen, ofschoon erg vermoeid en zonder veel euforie. Twee weken later zou de ziekte terugkomen met haaruitval, bloedend tandvlees, plekken op de huid, sterke vermagering en hoge koorts.

Een maand na de radio-actieve besmetting zouden veel slachtoffers alsnog doodgaan; de rest zou moeizaam

herstellen maar zelfs dan nog kunnen overlijden en zijn hele verdere leven een sterk verhoogde kans op kanker hebben.

De meesten van de voorbijstrompelende ongelukkigen beseften dit alles momenteel nog niet.

De oorlog in Europa begint in snel tempo uit de hand te lopen. Aan weerskanten werd nu massaal gebruik gemaakt van tactische kernwapens. De Westduitse bevolking leerde ten volle de verschrikkingen van een beperkte atoomoorlog kennen. Nadat tien procent van alle nucleaire veldwapens was afgevuurd had de Bondsrepubliek opgehouden een moderne, levensvatbare staat te zijn; de DDR en Polen trouwens ook.

En alsof het nog niet voldoende was, bestoot Moskou tot een grootscheepse kernaanval op de westerse batterijen kruisraketten en Pershing 2's die in een aantal NAVO-landen stonden opgesteld. Dit betekende ook voor Nederland het einde: 24 kernkoppen met een totaal vermogen van acht megaton (640 Hiroshima-bommen) ontploften op of boven zijn grondgebied.

In enkele uren stierven achthonderdduizend Nederlanders. Eenzelfde aantal raakte gewond. Dodelijke stralingsvelden trokken over het land en vernietigden de levens van nog eens anderhalf miljoen mannen, vrouwen en kinderen; een miljoen anderen bleef weken ziek.

Grote gebieden bleken in een woestentij herschapen; de hele kuststrook stond onder water (één bom was bij IJmuiden in zee terechtgekomen); miljoenen kadavers bedekten bossen en velden; er braken geweldige epidemieën uit die duizenden slachtoffers eisten; de vertrouwde infrastructuur bestond niet meer; het natuurlijk evenwicht was ernstig verstoord. Nederland was op één dag tien eeuwen teruggezet.

Geraadpleegde literatuur:
Jonathan Schell: *The Fate of the Earth*. Avon Books, 1982
Peter Goodwin: *Als de bom valt*. Rostrum, 1982
Ruth Adams Susan Cullen: *De Faate Epidemie*. Meulenhof, 1982
H.V. Tromp G.R. La Rocque: *Nuclear War in Europe*. University Press Groningen, 1982
Yevgeni L. Chazyn: *Leonid A. Ilyin: Angelina K. Guskova: The Danger of Nuclear War. Soviet physician's viewpoint*. Novosti Press Agency, 1982
J. Brun: *De Pijn van het Overleven*. Tiebosch, 1982
Hiroshima and Nagasaki, the physical, medical, and social effects of the atomic bombings. Hutchinson, 1982
Shelford Bidwell: *V.O. III, dossier derde wereldoorlog*. Rostrum, 1980
Sir John Hackitt e.a.: *De Dente Wereldoorlog, augustus 1985, geschiedenis van de toekomst*. Elsevier, 1978

Landelijk borstkankeronderzoek wacht op meer proefonderzoeken

Twee maanden geleden maakten Nijmeegse onderzoekers via een persbericht bekend dat „vroeg opsporing van borstkanker d.m.v. bevolkingsonderzoek de sterftekans als gevolg van deze ziekte met de helft doet dalen”. Een nadere toelichting wilden ze niet geven. Eerst moest er in het gezaghebbende vaktijdschrift *The Lancet* over worden gepubliceerd. Begin juni was het zover. Theo van Emden las het artikel vindt dat de indertijd gedane beweringen wat overtrokken zijn geweest. De tijd is nog niet rijp om te pleiten voor een landelijk bevolkingsonderzoek.



Borstkankeronderzoek met röntgenapparatuur.

Borstkanker is de meest voorkomende kanker bij vrouwen. In ons land sterven jaarlijks bijna 3000 vrouwen aan deze ziekte. Voorkomen is met de huidige medische kennis niet mogelijk. Alleen vroeg opsporing kan helpen om de sterfte terug te dringen. Zelfonderzoek van de borsten is een methode om eventueel kwaadaardige knobbeltjes vroeg op het spoor te komen. Gezwollen kleiner dan 1 cm doorsnede kan men daarmee echter moeilijk ontdekken. Dat is wel mogelijk met behulp van röntgen-doorlichting van de borsten (*mammografie*). Met de nieuwste mammografie technieken kan men zelfs microscopisch kleine tumoren opsporen. De genezingskansen zijn beter naar mate men de ziekte in een vroeger stadium ontdekt en behandelt, en bovendien is tegenwoordig bij kleine gezwellen een *borstsparende* behandeling mogelijk.

Tien jaar geleden werden met behulp van subsidie van het Preventiefonds twee experimentele bevolkingsonderzoeken op borstkanker gestart, één bij het Preventicon in Utrecht (het DOM-project) en één in Nijmegen, om te bestuderen of bevolkingsonderzoek de vroegtijdige opsporing van borstkanker verbetert. In Utrecht konden alle vrouwen tussen 50 en 65 jaar zich laten onderzoeken door middel van mammografie en lichamelijk onderzoek. In Nijmegen ging het om alle vrouwen van 35 jaar en ouder, en maakte men alleen gebruik van mammografie.

Inmiddels zijn er vier onderzoeksron- den geweest, met tussenpozen van een

tot twee jaar. In de eerste screeningsronde werd in Nijmegen bij 4 op de 1000 onderzochte vrouwen een (beginnende) kwaadaardige afwijking gevonden. In Utrecht (waar het ging om wat oudere vrouwen) bleek dit bij 6 à 7 van de 1000 vrouwen het geval te zijn. In *The Lancet* van 2 juni geven beide groepen onderzoekers een analyse van de resultaten wat betreft de vermindering van sterfte aan borstkanker.

De beste methode om te meten in hoeverre invoering van een bevolkingsonderzoek de sterfte aan de ziekte kan terugdringen is door middel van een *gerandomiseerd* onderzoek. De te onderzoeken bevolking wordt daartoe op grond van toeval (*random*) in twee groepen verdeeld: de ene helft krijgt bevolkingsonderzoek aangeboden, de andere helft niet. Men vergelijkt na verloop van tijd de sterfte aan de ziekte in beide groepen, en kan hieruit afleiden hoe effectief het bevolkingsonderzoek is.

In de jaren zestig werd dit in New York gedaan voor borstkanker. Daar waren zestigduizend vrouwen tussen 40 en 65 jaar, verzekerd krachtens het Health Insurance Plan (zgn. *HIP-studie*), bij betrokken. Na een periode van tien jaar bleek de sterfte aan borstkanker in de onderzoeksgroep 30 procent lager te liggen dan in de controlegroep. En ook nu na twintig jaar blijkt er sprake te zijn van een gunstiger prognose voor de onderzoeksgroep. Soortgelijke gerandomiseerde studies zijn inmiddels opgezet in

Zweden, in Canada en in Groot-Brittannië.

In Utrecht en Nijmegen heeft men niet gewerkt met controlegroepen. Om op vrij korte termijn iets te kunnen zeggen over de effecten van de proefonderzoeken op de sterfte aan borstkanker moest gebruik worden gemaakt van een andere onderzoeksmethode. In overleg met een biostatisticus van het Internationaal Kanker Centrum te Lyon ontwierp men een *patient-controle* onderzoek. Bij elk geval van sterfte aan borstkanker na de start van het bevolkingsonderzoek werd, met gebruikmaking van het bevolkingsregister in beide steden, een aantal controlepersonen gezocht, die even oud waren als de betreffende borstkankerpatiënte. Van de patiënte en controlepersonen werd nagegaan of, en zo ja hoe vaak, ze gescreeend waren. Het verschil in deelname aan het bevolkingsonderzoek tussen de overledene en de controlepersonen vormde de basis voor de berekening van het effect van het bevolkingsonderzoek.

Zowel in Utrecht als in Nijmegen ging het om 46 sterfgevallen. Deze vrouwen bleken *statistisch significant* minder vaak gescreeend te zijn dan de controlepersonen. Men berekende vervolgens hoe groot het *relatieve risico* was om te overlijden aan borstkanker wanneer men wel of niet had meegedaan aan het bevolkingsonderzoek. Voor het Nijmeegse onderzoek bedroeg dit relatieve risico 0,5 en voor Utrecht 0,3 en de

onderzoekers concluderen hieruit dat screening een tweevoudige, respectievelijk drievoudige bescherming biedt tegen het overlijden aan borstkanker. Wel voegen zij daar in hun artikel aan toe dat een langere periode van studie nodig is om te bepalen of het gaat om een werkelijke reductie van sterfte of slechts om uitstel.

De gebruikte berekening van relatieve risico's is een vrij grove onderzoeksmethode, en het is misleidend om op grond van deze cijfers te zeggen dat de sterftekans aan borstkanker door bevolkingsonderzoek gehalveerd wordt. Bij een langer na-onderzoek zouden de cijfers wel eens heel anders kunnen komen te liggen. Op grond van de onderzoeksresultaten kan men geen uitspraken doen over het aantal gewonnen levensjaren, en evenmin valt te zeggen op welke leeftijd men vrouwen het beste kan onderzoeken en met welke tussenpozen.

Naast de onmiskenbare voordelen van vroeg opsporing zijn er ook duidelijke nadelen verbonden aan screeningsonderzoek, zoals het gevaar voor *overdiagnostiek* en *overbehandeling*. Bij het DOM-project heeft men 373 destijds als afwijkend beoordeelde stukjes borstweefsel door zes patholoog-anatomen laten herbeoordelen. Bij 12 weefselpreparaten twijfelde men nu ernstig aan de destijds gestelde diagnose. In 5 gevallen was bij de patiënt, achteraf gezien mogelijk onnodig, een borstamputatie verricht. Er is ook nog weinig bekend over het natuurlijk verloop van microscopisch kleine tumoren. Moeten deze microtumoren, bijvoorbeeld bij oudere vrouwen, wel behandeld worden?

Het wachten is daarom op meer gegevens van deze twee proefonderzoeken, en op de resultaten van gerandomiseerde studies in andere landen. De resultaten van de proefonderzoeken op borstkanker in Nijmegen en Utrecht bevestigen wat al in ander studies was gevonden, namelijk dat deelname aan bevolkingsonderzoek vrouwen beschermt tegen sterfte aan borstkanker. Maar het is nog te vroeg om te zeggen om welke mate van bescherming het gaat, en of het gaat om een grotere genezingskans of om uitstel van sterfte. Voortzetting van proefonderzoeken is noodzakelijk om een antwoord op deze vragen te krijgen. Er zijn op dit moment onvoldoende gegevens om te komen tot een advies over de wenselijkheid van het invoeren van een landelijk bevolkingsonderzoek.

THEA VAN EMDEN

BIJLAGE I4

HET (REIZEND) STRALINGSPRAKTIKUM

Het practicum van het Ioniserende Stralings Project, projectleider drs. Th. Heij, bestaat uit een aantal experimenten met radio-actieve bronnen en met röntgenstraling. Scholen kunnen op twee manieren gebruik maken van dit project van de vakgroep Didactiek van de Natuurkunde, Rijksuniversiteit Utrecht:

- een bezoek brengen aan het Fysisch Laboratorium te Utrecht, waar leerlingen aan een aantal vaste opstellingen metingen en waarnemingen kunnen doen
- bezoek ontvangen van een van de medewerkers van het Ioniserende Stralings Project, die een aantal opstellingen meebrengt, waarmee leerlingen metingen en waarnemingen kunnen doen.

In principe bestaat er geen verschil tussen de vaste opstellingen te Utrecht en de opstellingen waarmee de medewerkers van het Ioniserende Stralings Project op pad worden gestuurd. Er zijn voor de school geen kosten verbonden aan het gebruik maken van de faciliteiten van dit project. Scholen kunnen zich telefonisch aanmelden bij:

Drs. Th. Heij	030-531176
J.C. Kastrop	030-531178
C.J. van Koeveringe	030-531178.

Het is aan te bevelen dit zo vroeg mogelijk in de cursus te doen. Vooral in de periode rond Kerst, wordt er veelvuldig een beroep gedaan op de medewerkers van het Ioniserende Stralings Project. Vooral de reizende medewerkers hebben bij de scholen de voorkeur in deze periode. Voor een enkele school betekent dit dat ze niet kunnen beschikken over het reizende practicum. Als alternatief is een bezoek aan het Fysisch Laboratorium te Utrecht beschikbaar.

Welke experimenten van het Ioniserende Stralings Project sluiten aan bij het PLON-thema "Ioniserende Straling"?

De medewerkers van het Ioniserende Stralings Project hebben voor het natuurkunde-onderwijs een boekje ontwikkeld, getiteld: "Experimenten met radio-actieve bronnen en röntgenstraling". In dit boekje staan beschrijvingen van een achttiental experimenten. Bij ieder experiment wordt een korte fysische inleiding en een overzicht van de opstelling gegeven. Het doel van het experiment wordt vermeld en de toepassing van de betreffende stralingssoort wordt genoemd. Bovendien zijn er voor alle experimenten werkbladen aanwezig. In deze experimenten worden de experimenten met behulp van gesloten opdrachten, voorgedrukte tabellen en grafieken, etc. aan de leerlingen aangeboden.

Voor PLON-scholen is een selectie gemaakt uit deze achttien experimenten (zie tabel A). Ook de opzet van het practicum is aangepast. Het practicum wordt onderverdeeld in twee blokken. Tijdens het eerste blok doen leerlingen circuspracticum aan enkele essentiële opstellingen. In het tweede blok gaan leerlingen gedifferentieerd aan de gang met andere opstellingen. De andere werkbladen voor deze opstellingen zullen minder gesloten van karakter zijn.

TABEL A RELATIE EXPERIMENTEN VAN HET IONISERENDE STRALINGSPROJECT
EN HET PLON-THEMA "IONISERENDE STRALING"

Naam experiment van Ioniserende Stralings Project	Past dit binnen het PLON-thema "Ioniserende Straling"?
1) Dracht van α -deeltjes in de lucht	ja, alleen kwantitatief
2) Radio-actief verval van ^{220}Rn	ja
3) Statistische spreiding	nee
4) Terugstrooiing β -deeltjes	nee
5) Absorptie β -deeltjes in aluminium en perspex	ja
6) Geiger-Müller telbuis	ja
7) Energie van β -deeltjes	nee
8) De quadratenwet	ja
9) Wilson-vat	ja
10) Gebruik minigenerator (barium-koe)	ja
11) Het opsporen van lood	nee
12) Absorptie γ -straling door lood	nee
13) Kwalitatieve identificatie van radio-actieve preparaten	ja
14) Het röntgen-apparaat	ja
15) Ionisatie van lucht door R-straling	nee
16) Braggreflectie	nee
17) De γ -spectrometrie	nee
18) Bestralen van zilver met neutronen	nee

Over een andere selectie kan altijd overlegd worden met de medewerkers van het Ioniserende Stralings Project, dit in verband met de benodigde apparatuur. De werkbladen met de aangepaste instructies zijn ontwikkeld door medewerkers van het Stralings Project en het PLON. Deze aangepaste werkbladen zijn op aanvraag beschikbaar bij het PLON.

BIJLAGE 15

SIMULATIE-EXPERIMENTEN

A Halveringstijd

Voor de simulatie van radio-actief verval van een actieve stof geven we een drietal voorbeelden.

a1) Dobbelstenen-experiment

200 dobbelstenen stellen evenveel radio-actieve kernen voor (in plaats van dobbelstenen kan ook worden volstaan met houten kubusjes, met één gekleurd vlak). Deze 200 dobbelstenen worden op hetzelfde moment in een grote bak gegooid. Een dobbelsteen waarvan de 6 bovenligt, noemen we een radio-actieve kern die onder uitzending van ioniserende straling vervallen is. Het aantal vervallen kernen wordt verwijderd. Met de overgebleven dobbelstenen die wel geteld worden, wordt opnieuw gegooid. Deze procedure wordt zo'n 20 maal herhaald. Theoretisch zouden er dan nog vijf radio-actieve kernen over moeten zijn. Uit dit experiment kunnen leerlingen leren dat:

- het aantal kernen dat vervalt evenredig is met het overgebleven aantal kernen
 - de helft van het aantal kernen vervalt in 4,2 worpen; dit aantal worpen is onafhankelijk van het aantal radio-actieve kernen. Door hierna dit experiment te herhalen met een "hogere" activiteit (haal nu na iedere worp alle zessen en vijven eruit), wordt duidelijk dat dit ook bij een andere activiteit geldt. Maar bovendien, dat geldt: halfwaarde is een maat voor de activiteit
 - een herhaling van dit experiment levert, ten gevolge van de statistische spreiding, andere waarnemingen op. Dit kan een aanzet zijn voor het begrip statistische spreiding.
- Radio-actief verval is immers ook een statistisch proces.

a2) Leeglopen van een waterbuis

De firma Leybold heeft een perspex buis ontwikkeld met aan de onderkant een regelbaar filter. Dit filter is voorzien van sponzen en een metalen plaatje met openingen (zie ook blz. 66). Het filter blijft tijdens een bepaalde waarneming constant. Omdat de uitstroomsnelheid van een hoeveelheid water, in dit geval, evenredig is met de lengte van de waterkolom, zal een lengte waterkolom - tijddiagram een exponentiële kromme opleveren. Met andere woorden: het aantal waterdeeltjes dat per tijdseenheid de buis uitstroomt, is afhankelijk van het op dat moment aanwezige aantal waterdeeltjes in de buis.

Uit dit experiment kunnen leerlingen leren dat:

- het aantal kernen dat vervalft evenredig is met het aantal overgebleven radio-actieve kernen
- de tijd waarin de helft van het aantal deeltjes vervalft, hangt niet af van de hoeveelheid radio-actieve deeltjes. Immers, halveringstijd is alleen afhankelijk van het filter. Door het filter in een andere stand te zetten, kan de activiteit gesimuleerd worden. Hieruit kunnen leerlingen leren, dat iedere activiteit zijn eigen halveringstijd heeft.

Op blz. 66 staat een werktekening van een door het PLON ontwikkelde perspexbuis met bijbehorend regelbaar filter. Dit alternatief levert geen grote productieproblemen op. De totale kosten zullen ongeveer f 30,-- bedragen. Bij de firma Leybold is een complete set te koop voor ongeveer f 90,--.

a3) Bierschuimexperiment

De hoogte van de schuimkraag in een glas bier neemt exponentieel af met de tijd. Met een beetje fantasie komen we tot de volgende simulatie: de radio-actieve deeltjes (schuimkernen) vervallen tot stabiele kernen (vloeibare bierdeeltjes).

Als alternatief kunnen via de sectie Scheikunde ook andere schuimhoudende oplossingen betrokken worden.

Door deze twee te combineren kan men weer het verschil in activiteit simuleren.

Leerwinst met betrekking tot begrip activiteit:

- zie a1) en a2).

B Vervalreeks

Voor de simulatie van een vervalreeks van radio-actieve stoffen kunnen we drie mogelijkheden aanbieden:

b1) Dice atom educational game

Dit spel is verkrijgbaar bij de firma Sargent-Welch Scientific of Canada. Het spel bestaat uit:

- | | |
|-------------------------|---------------------------------|
| 160 moederkernen | (die ieder 20 vlakken bezitten) |
| 80 dochterkernen | (die ieder 8 vlakken bezitten) |
| 160 stabiele eindkernen | (dit zijn bolletjes). |

De werking van het spel wordt in b2) (het PLON-alternatief) toegelicht.

BIJLAGE 15

De kosten van dit spel zullen ongeveer f 200,-- bedragen. Het spel is te bestellen bij:

Sargent-Welch Scientific of Canada, Ltd.
International Division
7300 North Linder Avenue
Skokie, Illinois 60076 USA
Tel. - Area code 312677.0600
Cable - SAR WELCH
TWX - 910 2234541.

Men kan dit spel ook zelf namaken met behulp van kartonnen en achthoekjes. Op blz. 68 staan bouwtekeningen voor deze veelvlakken.

b2) Dobbelsteen-munt-knikker-spel

Voor dit spel is nodig:

200 dobbelstenen (of houten kubussen)
100 munten (of aan één zijde gekleurde fiches)
200 knikkers (of andere kleine voorwerpen, zoals erwten).

De 200 dobbelstenen vervallen langzamerhand tot munten. (Het gooien van een 6 heeft tot gevolg dat de dobbelsteen uit het spel verdwijnt en dat een munt de plaats inneemt). Er ontstaan dus over het hele spel gemeten 200 munten. Deze munten vervallen vrij snel na hun ontstaan tot (stabiele) knikkers (het gooien van "kop" heeft tot gevolg dat de munt uit het spel verdwijnt en een knikker de plaats inneemt).

In principe is het spel afgelopen als alle munten zijn vervallen tot knikkers. Tabel B geeft het theoretische verloop van deze vervalreeks. De bijbehorende grafiek is ook op deze berekeningen gebaseerd.

Men kan het spel variëren door de volgorde van dobbelsteen en munt te verwisselen (munt wordt moederkern; dobbelsteen wordt dochterkern).

Een andere variatie is de gesimuleerde activiteit van de dobbelsteen (neem in plaats van alle zessen eruit, ook alle vijven eruit).

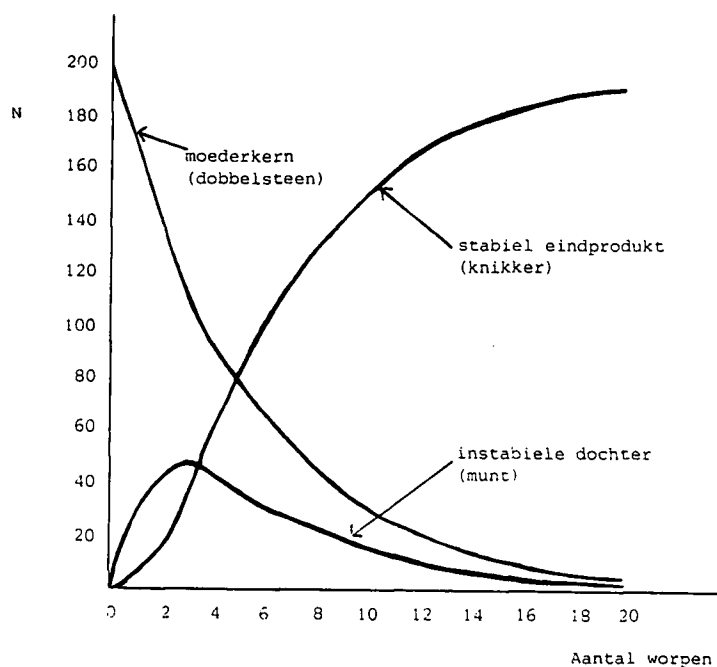
Een derde variant is het aantal moederkernen te variëren (neem bijvoorbeeld bij de aanvang 300 dobbelstenen of 25).

TABEL B THEORETISCH VERLOOP VAN HET DOBBELSTEEN-MUNT-KNIKKERSPEL

worpen	dobbel- stenen	munten	knikkers	totaal d+m+k
0	200	0	0	200
1	167	33	0	200
2	139	44	17	200
3	115	46	39	200
4	96	42	62	200
5	80	37	83	200
6	67	31	102	200
7	55	27	118	200
8	46	22	132	200
9	38	19	143	200
10	31	16	153	200
11	26	13	161	200
12	22	10	168	200
13	18	9	173	200
14	15	7	178	200
15	12	6	182	200
16	10	5	185	200
17	9	3	188	200
18	7	3	190	200
19	6	2	192	200
20	5	2	193	200

(Principe: na elke worp worden alle dobbelstenen met de 6 boven vervangen door een munt en de munten met de kop boven door een knikker).

GRAFIEK BIJ HET DOBBELSTEEN-MUNT-KNIKKERSPEL



BIJLAGE 15

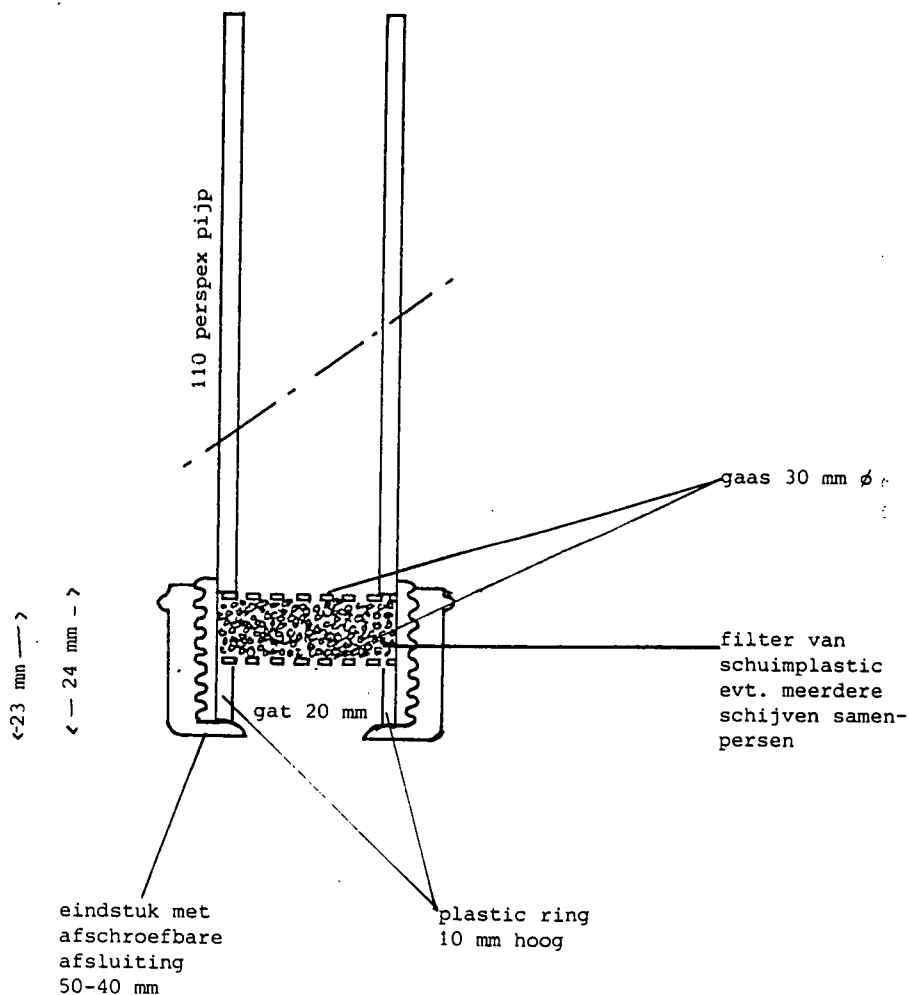
b3) Het melken van een koe

Het waterbuis-experiment (a2) kan met een tweede waterbuis worden uitgebreid. Het water uit de eerste buis stroomt in de tweede buis. Deze opstelling kunnen we voorstellen als een simulatie van de mini-generator (zie hoofdstukken 4 en 7 van het themaboek). De bovenste buis is in dit geval de "te melken koe", de onderste buis is de instabiele dochter.

Door manipulatie van de filtergrootte (die de uitstroomsnelheid regelt) kunnen zich twee extreme situaties voordoen:

- bovenste buis stroomt snel leeg; onderste buis heel langzaam → onderste buis (die korter is) stroomt over
- bovenste buis stroomt langzaam leeg; onderste buis heel snel → onderste buis staat steeds leeg.

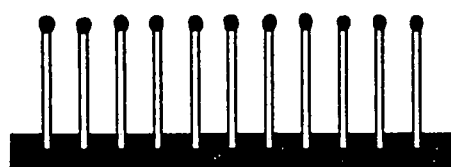
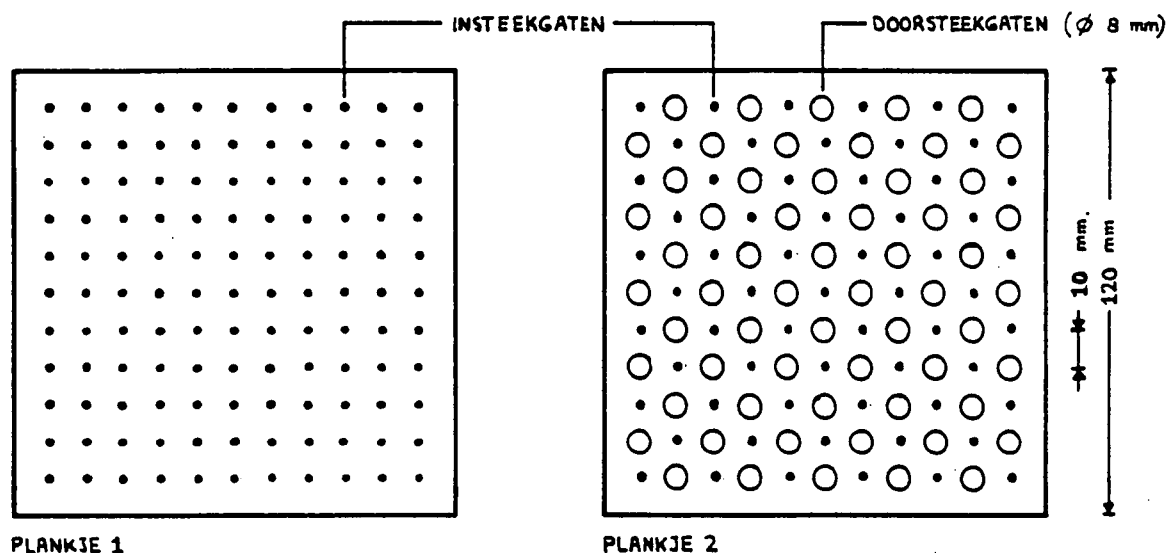
WERKTEKENING WATERBUIS (halveringstijd waterkolom)



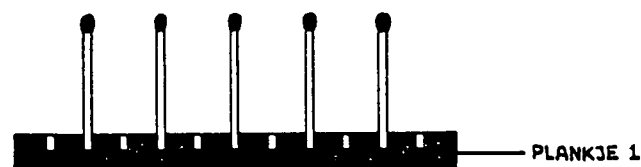
LUCIFERMODELLEN

Met behulp van plankje 1 kan een lucifermodel van een beheerste en van een onbeheerste kettingreactie gemaakt worden. De afstand tussen de gaten voor de lucifers kan afhangen van het gebruikte soort lucifers. Even uitproberen dus.

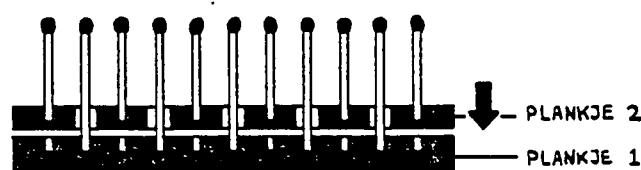
Plankje 1 gecombineerd met plankje 2 geeft het lucifermodel van 'kritische massa'. Ook hier geldt dat de luciferafstand mogelijk afhangt van de soort lucifers. De lucifers in plankje 2 moeten zodanig ingekort worden dat de koppen op gelijke hoogte komen met die op plankje 1, als beide plankjes op elkaar geplaatst worden.



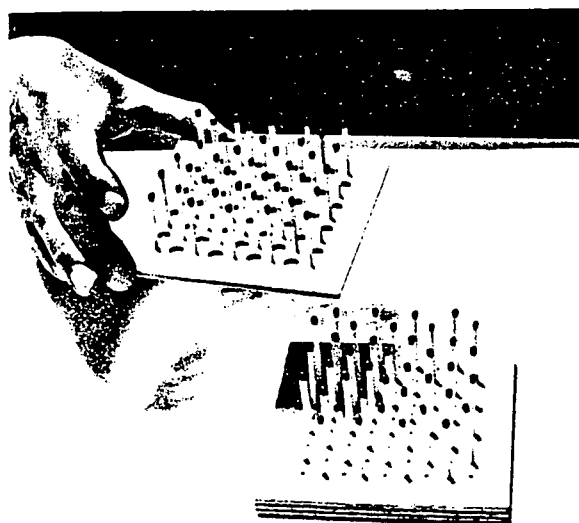
MODEL BEHEERSTE/ONBEHEERSTE
KETTINGREACTIE

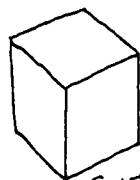


MODEL TWEE SUBKRITISCHE MASSA'S



MODEL SUPERKRITISCHE MASSA

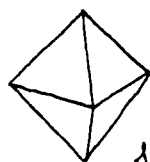




6-vlak



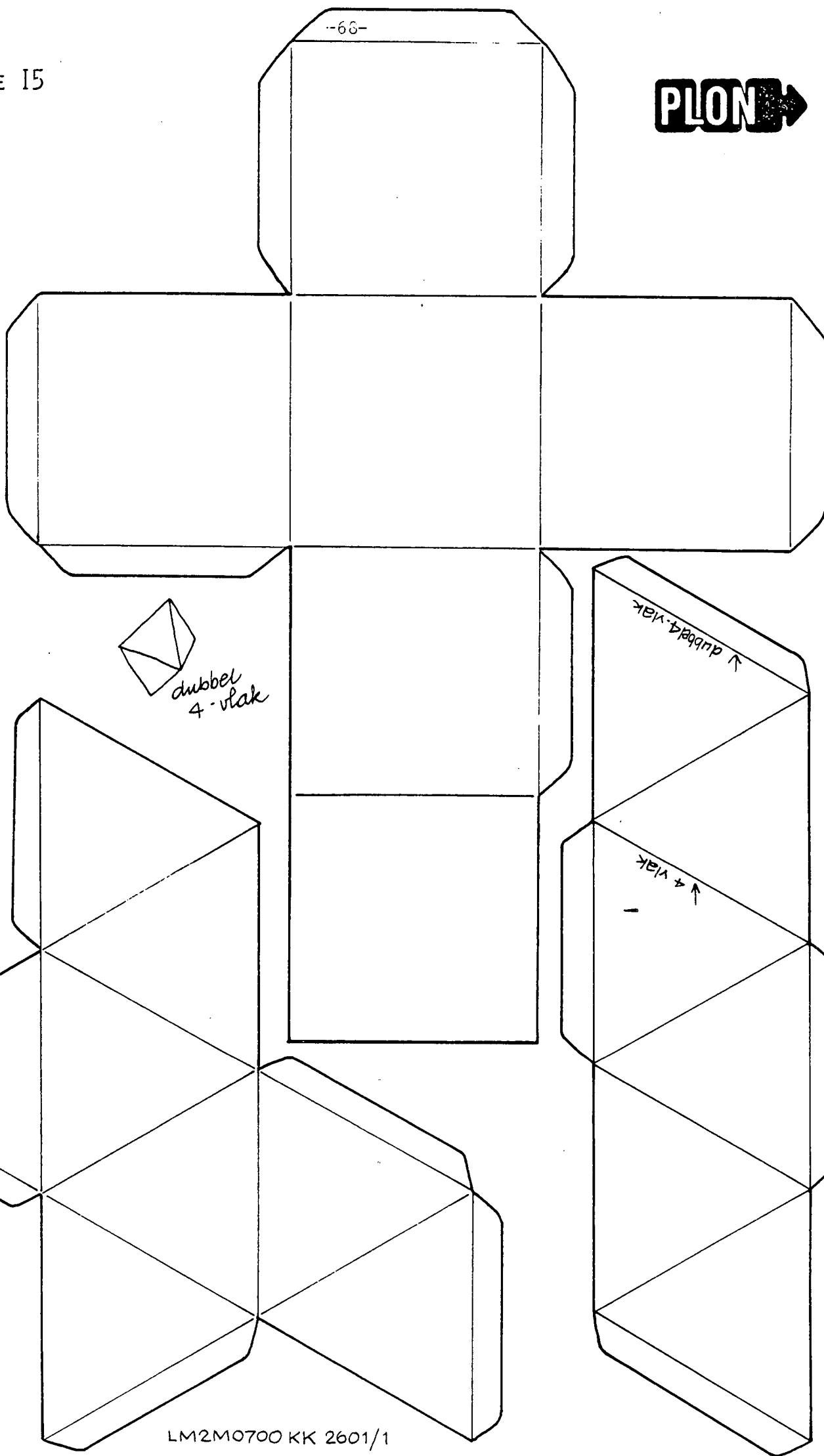
4 vlak



8-vlak



dubbel
4-vlak



Het demonstreren van enige experimenten met radioactieve bronnen

Het Ioniserend Stralen Project stelt leerlingen van de bovenbouw havo-vwo in staat zelf kennis te maken met radioactieve verschijnselen en enige eigenschappen van ioniserende straling. Voor de leerlingen waarvoor natuurkunde geen eindonderwijs is bestaat deze mogelijkheid niet.

Met behulp van enkele zwakke bronnen en wat basisapparatuur is het mogelijk enige verschijnselen te demonstreren.

In dit artikel geven we een overzicht van de uit te voeren experimenten met de daarbij benodigde radioactieve bronnen en meetapparatuur.

1. Radioactieve bronnen

Enkele bruikbare radioactieve bronnen waarvoor geen vergunning nodig is

1. thorium gloeikousje
2. kalium zouten (K^{40} is β -actief met $\tau_{1/2} = 1,310^9$ jaar)
3. oude lichtgevende wijzerplaten
4. uraan- of thoriumhoudende gesteenten

Ook voor het continue Wilsonvat waarin een radium naaldje is aangebracht met een activiteit $< 0,1 \mu\text{Ci}$ ($3,7 \cdot 10^3$ Bq) is geen vergunning nodig.

Met dit Wilsonvat (f 120,-) kan men duidelijk de sporen van α - en β -deeltjes in lucht aantonen. Wel moet men de beschikking hebben over een koud makend mengsel of vast koolzuur (uit oude brandblusser) waarmee een onverzadigde damp wordt verkregen.

Voor de bronnen die te koop zijn in de prijsklasse van f 250,- $\rightarrow$ f 350,- zoals Co-60 ($5 \mu\text{Ci}$), Ra-226 ($5 \mu\text{Ci}$), Ba-Cs (minigenerator, Sr-90 ($5 \mu\text{Ci}$) en het goedkopere thoriumflesje (f 180,-) dient men wel een vergunning te bezitten. Deze dient te worden aangevraagd bij het Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne sectie Stralingshygiëne, Dr. Reyersstraat 10, Leidschendam.

Een eenvoudig ijzeren kistje die in een afsluitbare kast kan worden opgeslagen kan zeer goed als bergplaats dienst doen voor de bronnen. Andere bronnen zoals Po-210 hebben een te korte halfwaarde tijd om lang genoeg aan te beleven.

2. Apparatuur

Om de allerzwakste bronnen aan te tonen is een g-m buis met houder nodig (f 370,-). Een geschikte keuze is een g-m buis die voor β - en γ -straling gevoelig is. Een eenvoudige teller met ingebouwde voeding voor de g-m buis is voor iets meer dan f 500,- te koop.

BIJLAGE 16

Als de school over een gecombineerde frequentiemeter/tijdmeter beschikt kan de teller achterwege blijven. Om de halfwaarde tijd van thorium te bepalen is de aanschaf van een ionisatiekamer (f 150,=) noodzakelijk. Een bijpassende gelijkstroom versterker is reeds voor f 450,= verkrijgbaar. Andere benodigdheden zoals absorberende materialen b.v. hout, plexiglas, lood, ijzer en aluminium behoren tot ieder schoolinstrumentarium. We komen zo tot een overzicht zoals hieronder is weergegeven.

g.m-buis met houder	f 370,=
pulsteller	f 520,=
ionisatiekamer	f 150,=
gelijkstroom versterker	f 450,=
absorptie materialen	
magneet	
wilsonvat	f 120,=

Met een aantal zwakke bronnen zal men afhankelijk van wat reeds op school aanwezig is en de wensen, tussen f 1000,= en f 2000,= moeten besteden om enkele proeven te kunnen uitvoeren betreffende radioactiviteit.

3. Experimenten

Ook met zwakke radioactieve bronnen is het mogelijk de leerlingen enige verschijnselen en eigenschappen van ioniserende straling te tonen. Het tikken van de g.m-opstelling in de klas is voor vele leerlingen nieuw en opzienbarend. Radioactiviteit is een natuurverschijnsel en is alom aanwezig. We zullen nu summier aangeven welke experimenten gedaan kunnen worden bij de verschillende opstellingen uit diverse bronnen.

3.1. Het Wilsonvat

In een werkend Wilsonvat is de korte dracht van de rechte α -sporen duidelijk waarneembaar. Een dun folie houdt de α -straling al tegen. Bij 0,2 mm aluminium-folie worden de α -deeltjes wel tegengehouden maar de β -straling niet. Deze zijn als grillige dunne sporen goed waarneembaar. Het gebruik van een magneet om de afbuiging van deze β -sporen aan te tonen is bij ons nooit gelukt. Als men de beschikking heeft over een thoronflesje kan men voorzichtig een beetje gas in de kamer spuiten. De optredende α -sporen treden spontaan in de gehele kamer op. Het aantal sporen ziet men minder worden na verloop van tijd.

Ook kan men door een stuk uraan- of thoriumhoudende steen in het Wilsonvat te plaatsen de uittredende α -deeltjes laten zien. Weliswaar veel minder in aantal dan bij het radiumnaaldje; de bron is ook veel zwakker. Met een beetje geduld

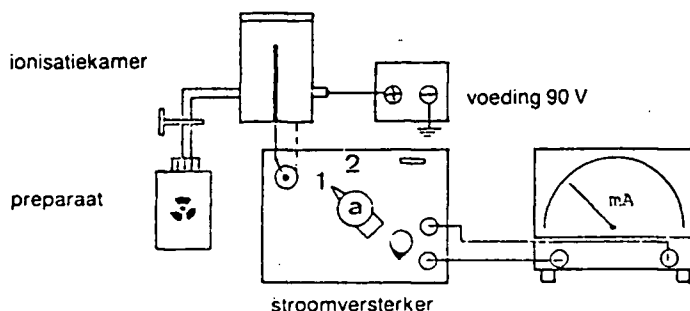
zijn de sporen afkomstig van de natuurlijke straling waar te nemen. Schijnbaar uit het niets ziet men plotseling op willekeurige plaatsen lichte sporen ontstaan.

3.2. Elektroscoop

Een eenvoudige elektroscoop is geschikt om het ioniserend vermogen van α -straling aan te tonen. Als men een α -bron vlakbij een geladen elektroscoop houdt, wordt deze snel ontladen. Bij β -straling en γ -straling duurt dit veel langer. Plaatst men een blaadje papier tussen de α -bron en de elektroscoop dan gebeurt er niets. Door papier gaan geen α -deeltjes. Ook als de afstand meer dan 5 cm. bedraagt ziet men aan de elektroscoop niets ontladen. De dracht in lucht is dus een paar cm. De juiste waarde hangt van de energie af van de uitgezonden α -deeltjes. Ruwweg geldt hiervoor 1 cm. lucht voor 1 MeV energie. Als men een paar cm. verwijderd blijft van een zuivere α -straler ontvangt men hiervan geen straling. De α -deeltjes kunnen zelfs niet door de opperhuid heen dringen, zodat uitwendig gevaar niet aanwezig is, daarentegen is, vanwege de korte dracht, het inwendige gevaar wel aanwezig. De energie van het α -deeltje wordt dan over een kleine afstand in het weefsel afgegeven. Voorkomen moet worden dat radioactieve stof in het lichaam komt.

3.3. Ionisatiekamer

Met een ionisatiekamer, bijpassende voeding, stroomversterker en stroommeter kan een aantal experimenten uitgevoerd worden waarvan we er enkele summier aangeven. Het schema van de proefopstelling is hieronder waergegeven.



BIJLAGE I6

- a. Ionisatiestroom als functie van de aangelegde spanning bij een α - en een β -bron.
- b. Bepaling halfwaarde tijd van het vrijkomende radongas Rn-220, een dochterproduct van Th-232. Door wat gas in de kamer te spuiten is na stroomversterking de stroomsterkte te meten als functie van de tijd. De uitkomst komt goed overeen met de literatuurwaarde 55,6s.

Met dit experiment kan op het begrip halfwaarde tijd goed toegelicht worden. Radioactieve stoffen met een korte halfwaarde tijd zijn goed bruikbaar voor medische doeleinden, zowel diagnostisch als therapeutisch.

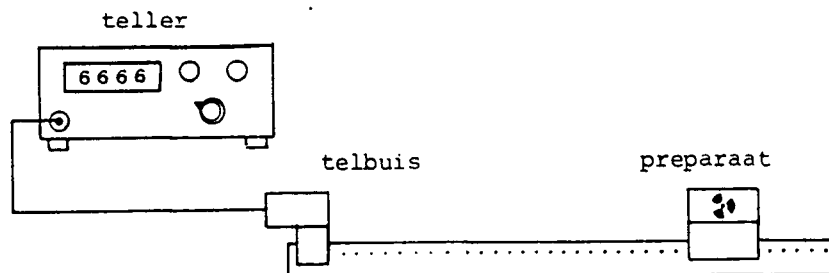
In ons voorbeeld vervalt het thorium met een halfwaarde tijd van $1,4 \cdot 10^{10}$ jaar via vele dochterproducten met een zeer lange of korte halfwaarde tijd naar Rn-220 dat een goed meetbare waarde heeft.

Strikt genomen meet met niet het aantal kernen Rn-220 in de tijd, maar het verval ervan, dus $\frac{dN}{dt}$ i.p.v. N_t .

Maar vanwege $\frac{dN}{dt} = -\lambda N_t$ is het gemeten verband een maat voor voor aanwezige aantal Rn-220 kernen.

3.4. De g.m. opstelling

Als we de beschikking hebben over een eenvoudige g.m. opstelling met pulsteller, zoals hieronder schematisch aangegeven, kunnen we een aantal eenvoudige experimenten uitvoeren.



Met deze opstelling zijn vele demonstraties te verrichten die we zullen rangschikken naar de soort bron.

3.4.1. Natuurlijke bronnen

Willen we de leerlingen laten kennismaken met de radioactieve wereld om hen heen dan zijn hiervoor als bronnen zeer geschikt: camping gaz, gloeikousje (waarin radioactief thorium), wijzerplaten van oude uurwerken, uraan- of thoriumzouten uit de scheikunde voorraad, gesteenten.

Ook is KCl bruikbaar, hierin bevindt zich 0,0119% K-40 hetgeen instabiel is met een halfwaarde tijd van $1,410^9$ jaar. Met veel geduld is de radioactiviteit van ons lichaam aan te tonen, middels een urinemonster. Voor de meeste leerlingen is het nieuw waar te nemen dat de teller eveneens "pulsjes" telt als er niets in de buurt is. De natuur om hen heen evenals zij zelf, eveneens radioactief is. Enthousiaste leerlingen kunnen proberen aan te tonen dat b.v. beton, steen, meer radioactiviteit bevat dan b.v. hout. Men kan nog denken aan de radioactiviteit van de lucht en regenwater. Door langdurig stof te zuigen of regenwater te verdampen zouden de diverse radioactieve stoffen kunnen worden aangetoond. Bevredigende resultaten hebben wij nooit verkregen. Los van deze natuurlijke aktiviteit kan het statistische karakter aangetoond worden met deze opstelling. Een wetmatigheid die veelal als "vreemd" ervaren wordt.

3.4.2. α -bron

De α -bron als radioactieve bron bij een g.m. buis opstelling vergt een g.m. buis die gevoelig is voor deze soort straling. Een zeer dun venster waar doorheen de α -deeltjes dringen is noodzakelijk. Is een dergelijke buis aanwezig dan kunnen dezelfde experimenten uitgevoerd worden als genoemd bij de elektroscoop.

3.4.3. β -bron

Een geschikte bron voor detectie met een g.m. buis is een β -bron. Met behulp van deze bron kunnen vele typen experimenten gedemonstreerd worden. Ook zijn hier allerlei varianten te bedenken. Om enigszins de gedachten te bepalen waaraan we denken, geven we hieronder enkele voorbeelden.

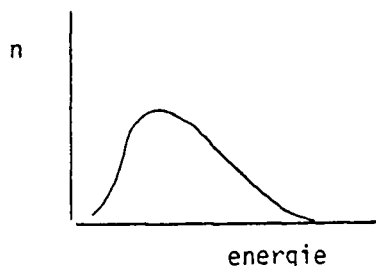
a. kwadratenwet. Hoe verder de bron weg staat, des te minder is de stralingsintensiteit. Voor niet te grote afstanden geldt de z.g. kwadratenwet.

De β -deeltjes, die uitgezonden worden bezitten niet alleen dezelfde energie.

De energie, die opgegeven worden bij een bepaalde overgang is de maximale energie.

Veelal is de werkelijke energieverdeling zoals hiernaast kwalitatief is weergegeven.

De dracht in lucht bedraagt voor de β -deeltjes ruwweg 4 m per MeV. Het kwantitatief aantonen van de kwadratenwet kan tot ongeveer 1 m goed gedemonstreerd worden. Op grotere afstand gaat de luchtabSORPTIE een storende factor vormen.

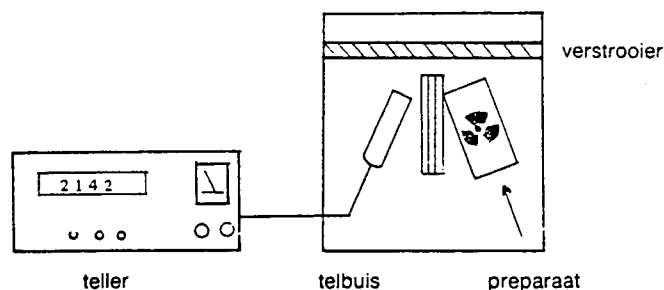


BIJLAGE 16

- b. absorptie experimenten. Om gebruik te maken van allerlei absorberende materialen kan men erg goed demonstreren dat β -straling eenvoudig afgeschermd kan worden. Kwantitatieve experimenten geven een redelijke uitkomst voor de dracht van β -deeltjes waarvoor als vuistregel gehanteerd wordt $R\rho = 0,5 E$ waarbij R de dracht in cm, ρ de dichtheid in g/cm^3 en E de energie van de β -deeltjes in MeV.

Voor het menselijk lichaam vinden we als dracht van de β -deeltjes uit een Sr-90 bron $R.1 = 0,5.2,2 = 1,1$ cm. Lang genoeg om beschermende maatregelen te treffen door de bron van zich af te houden of de ogen te beschermen met een bril, en er zeker niet in kijken (men ziet toch niets!). Als variant hierop kan men met een β -bron dichtheids metingen verrichten, hetgeen in de praktijk ook gedaan wordt. Het vullen van b.v. flessen is een veel gebruikte toepassing.

- c. terugstrooi experimenten. Aan verschillende materialen kan men de terugstrooi van β -deeltjes meten. Een geschikte opstelling is hieronder weergegeven.

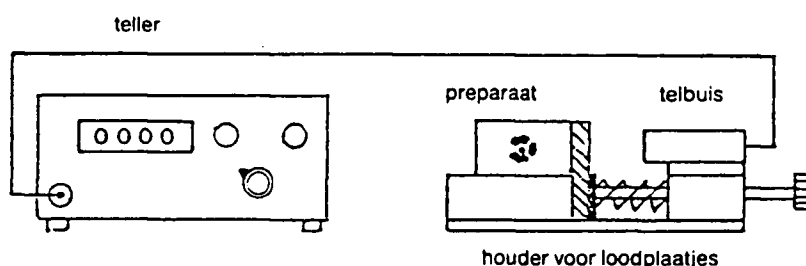


Als het terugstrooiende materiaal weggehaald wordt, ziet men de straling die op de g.m. buis valt afnemen. Men kan hiermee ook de dikte van een opgebracht laagje meten. Vóór een plaat lood kan men verschillende aluminium folies aanbrengen waarmee een folie van onbekende dikte kan worden bepaald. Een toepassing hiervan vindt men b.v. bij het bepalen van de dikte van een vinyl laag op een houten of betonnen vloer of van een asfalt laag op het wegdek.

- d. afbuiging in magnetisch veld. Met een magneet kunnen we eenvoudig aantonen dat β -deeltjes geladen deeltjes zijn. Een magneetveld buigt de β -deeltjes af gelijk een stroom van elektronen, dit in tegenstelling tot γ -straling, waarop het magneetveld geen invloed heeft.

3.4.4. γ -bron

Hoewel de g.m. buis minder gevoelig is voor γ -straling dan voor β -straling is deze zeer geschikt om enige proeven mee te doen. Als men gebruik maakt van een redelijk rechte γ -bundel door goede afscherming, mag met van de hieronder weergegeven opstelling kwantitatief redelijke resultaten verwachten.



a. absorptie experimenten. Opvallend hierbij zal zijn dat γ -straling zich niet laat tegenhouden. Een hand (ongevaarlijk) tussen bron en dedector geeft geen noemenswaardige vermindering. Wil men wel verzwakking waarnemen, dan zal men zwaardere materialen dienen te gebruiken. Zo vindt men in lood bij een Co-60 bron voor de halveringsdikte ca. 1 cm. Dezelfde verzwakking vindt men bij een 11 x dikkere waterlaag. In ons voorbeeld dus 11 cm.

Ruwweg kan men zeggen dat de halveringsdikte evenredig is met het omgekeerde van de dichtheid: Als dit gevonden is kan men de onbekende dikte van een stuk lood, dat in een doos verborgen is bepalen. De verkregen nauwkeurigheid neemt toe naarmate men langer meet. Wil men dus een γ -bron goed afschermen dan is hierom een redelijk dikke loodpot nodig.

b. kwadratenwet. Juist een β -bron is zeer geschikt om de kwadratenwet aan te tonen. De absorptie in de lucht is waarneembaar zodat hierbij de uitkomsten goed te noemen zijn.

c. varia. Met de γ -bron is het goed mogelijk om een statistisch spreidings-element uit te voeren. Ook is duidelijk waarneembaar dat een magneetveld geen invloed heeft op de richting van de γ -straling.

3.4.5. Neutronen bron

Het gebruik van neutronen of andere deeltjes als radioactieve bron is op school niet toegestaan. In dit bestek zullen we er dan ook geen nadere aandacht aan besteden.

BIJLAGE I6

3.5. Samenvatting experimenten

opstelling	bron	experimenten
Wilsonvat	Ra-226 Th-232	kosmische straling
		dracht α -deeltjes
		dracht β -deeltjes
		halfwaarde tijd
Elektroscoop	α -bron	dracht α -deeltjes absorptie exp. ioniserend vermogen
Ionisatiekamer (gesloten)	α -bron	ionisatiestroom
	Th-232	halfwaarde tijd
	β -bron	ionisatiestroom
Ionisatiekamer (open)	α -bron	dracht van α -deeltjes
g.m. buis + pulsteller	natuurlijke bronnen	natuurlijke radio- aktiviteit
	gloeikousje KCl (K-40)	statistische spreiding
	α -bron	dracht α -deeltjes absorptie exp.
	β -bron	kwadratenwet absorptie exp. (dikte metingen) terugstrooi (oppervlaktelaag) afbuiging magneetveld statistische spreiding
	γ -bron	kwadratenwet absorptie exp. (dikte meting) statistische spreiding

3.6. Veiligheidsmaatregelen

Zoals reeds eerder vermeld behoeft voor het Wilsonvat niet altijd een vergunning te worden aangevraagd. Alleen als de radium bron een aktiviteit heeft die groter is dan $0,1 \mu\text{Ci}$ ($3,7 \cdot 10^3 \text{ Bq}$) dient men in het bezit te zijn van een vergunning. Voor de andere bronnen dient de school een vergunning te bezitten en enige maatregelen te nemen om de bronnen veilig op te bergen. Zo moeten de bronnen na gebruik in een ijzeren kistje worden opgeborgen in een afsluitbare kast. Het exposietempo mag nergens meer bedragen dan $0,1 \text{ mR/uur}$ op 10 cm van enig punt van de bergplaats. De kast dient te zijn voorzien van een waarschuwingsteken volgens de N.E.N. -3011 (zie voorbeeld). Daarnaast dienen de bronnen op mogelijke radioactieve besmetting te worden gecontroleerd zoals aangegeven in de verkregen vergunning. De medewerkers van het Ioniserend Stralen Project zijn bevoegd om deze controle uit te voeren. Daarnaast zijn er artikelen in de Kernenergie wet terug te vinden waarin staat dat voorkomen moet worden dat de leerlingen tijdens de lessen blootgesteld worden aan een hogere stralingsbelasting per 52 opeenvolgende weken dan:

- a. 50 mrem bij algehele bestraling
- b. 50 mrem op de bloedvormende organen
- c. 750 mrem op de handen, onderarmen en voeten
- d. 300 mrem plaatselijk op de huid
- e. 150 mrem op de schildklier
- f. 150 mrem bij andere niet genoemde organen en weefsels.

Als we de normen van 50 mrem aanhouden dan wordt aan het bovenstaande voldaan, hoewel op de armen en handen een hogere stralingsbelasting is toegestaan.

In artikel 25c vinden we dat geen enkele eenmalige bestralingsbelasting toegestaan wordt van 10% van de bovengenoemde normen, dus eenmalig niet meer dan 5 mrem. Wat betekent dat men in de praktijk als we de genoemde demonstraties uitvoeren? Hoe hoog is dan de stralingsbelasting op de leerlingen en op de docent?

Alvorens dit voor de diverse bronnen aan te geven, zullen we summier de gebruikte grootheid voor stralingsbelasting nader beschouwen. De grootheid aktiviteit zijn we al tegengekomen. Hieronder wordt het aantal desintegraties van de betrokken atoomsoort begrepen, uitgedrukt in curie (Ci) of becquerel (Bq). Historisch is de aktiviteit van 1 gram radium op 1 curie gesteld, dat betekent $3,7 \cdot 10^{10}$ desintegraties per seconde. Tegenwoordig wordt naast deze oude eenheid de becquerel gehanteerd, waarbij 1 Bq overeenkomt met 1 desintegraties/s. Zo betekent $5 \mu\text{Ci}$ Sr-90 $1,85 \cdot 10^5$ desintegraties per seconde oftewel $1,85 \cdot 10^5 \text{ Bq}$.

BIJLAGE 16

De eenheid van dosis was de rad overeenkomende met 0,01 J/kg. Tegenwoordig vervangen door de gray (Gy) overeenkomende met 1J/kg. Willen we de invloed op het menselijke organisme bekijken dan drukken we dit voor verschillende stralingssoorten uit in het dosisequivalent. De dosis wordt dan vermenigvuldigd met een factor, die de kwaliteit van de straling aangeeft. Het dosisequivalent wordt uitgedrukt in de eenheid rem (radiator equivalent man) of met voorkeur de sievert (Sv). Hoe hoog nu het opgelopen dosisequivalent bedraagt van diverse stralingssoorten kunnen we uitrekenen. In onze summiere opzet zullen we volstaan met de vuistregels te vermelden om snel het dosisequivalent te berekenen.

Voor uitwendige α -bestraling is deze nul, vanwege de geringe dracht van de α -straling. Inwendig ligt dat veel ingewikkelder; we dienen daarom te zorgen geen radioactieve besmetting inwendig op te lopen. Met de vaste ingekapselde bronnen, die op school gehanteerd worden, is dit ook geen reëel gevaar.

Voor de β -bronnen geldt voor de opgelopen dosis als veilige benadering

$H = \frac{30A}{d^2} t$ (rem), waarbij A de aktiviteit in curie, d de afstand tot de bron in meter en t de bestralingstijd in uur.

Voorbeeld: $5\mu\text{Ci Sr-90}$ op 10 cm gedurende 1 uur $H = \frac{30 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{(0,1)^2} \cdot 1 = 15 \text{ mrem.}$

Hierbij moet men wel bedenken dat deze bron alleen aan de voorkant straling uitzendt. Uit de zijkant komt, vanwege absorptie in het omhullende metaal, geen β -straling en bij de organen komt het ook niet. Alleen de ogen zijn gevoelig. Voor de γ -bronnen geldt een soortgelijke uitdrukking voor het dosisequivalent .H. $H = \frac{0,6AE}{d^2} .t$ (rem), waarbij A in curie, E de energie van

de uitgezonden factoren in MeV, d in m en t in uur. Voor Co-60 dat per desintegratie 2 fotonen uitzendt van 1.77 MeV en 1.33 MeV, geldt voor

$E 1.17 + 1.33 = 2,50 \text{ MeV}$ en voor Cs 0,66 MeV., zodat $5\mu\text{Ci Co-60}$ op 10 cm

gedurende 1 uur een stralingsbelasting oplevert van $\frac{0,6 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5}{(1,1)^2} = 0,75 \text{ mrem}$

en voor $5\mu\text{Ci Cs}$ 0,18 mrem.

Deze waarden liggen ver beneden de gestelde normen als de afstand niet te klein genomen wordt. In de praktijk zal dit moeilijk gaan door de combinatie van de bronnen. Het werken met een pincet wordt daarom aangeraden. Als het manipuleren ermee in een opstelling zo onhandig verloopt dat de faktor tijd ongunstig gaat werken dient men te oefenen met een dummy.

Het berekenen van het dosisequivalent van de radiumbronnen en het thoriumflesje is omslachtiger vanwege de dochterprodukten. Voor het radiumnaaldje van $1,3\mu\text{Ci}$ is de γ -dosis op 10 cm gedurende 1 uur ongeveer 0,1 mrem.

De γ -dosis van de diverse bronnen hebben we hieronder samengevat.

bron	aktiviteit	γ -dosis per uur op 10 cm afstand in mrem	γ -dosis per uur aan het oppervlak in mrem
spin-tharoscoop	0,01 μ Ci	0,001	
Ra-naaldje (expansie Wilsonkamer)	1,3 μ Ci	0,1	~ 5
Ra-naaldje (continue Wilsonkamer)	0,1 μ Ci	< 0,01	< 1
Ra-226	10 μ Ci	1	100
Sr-90	5 μ Ci	< 0,01	< 0,1
Cs-137	9 μ Ci	0,36	< 0,1
Th-232	1 μ Ci	0,1	< 0,5
Am-241	5 μ Ci	0,5	5
Co-60	5 μ Ci	0,75	100

Uit de tabel kan men concluderen dat bij de demonstraties leerlingen geen ontoelaatbare dosisequivalent oplopen.

De extra opgelopen stralingsbelasting valt binnen de variatie van de natuurlijke stralingsbelasting. In Nederland bedraagt deze stralingsbelasting ongeveer 125 mrem per jaar.

Uit metingen in de praktijk bij de medewerkers van het Ioniserend Stralen Project is gebleken dat ze geen hoger dosisequivalent oplopen dan 1 mrem per praktikum. Per maand hebben ze nog nooit meer dan 20 mrem ontvangen. Maar niemand heeft dan ooit een bron ingeslikt.

Oktober 1982
Th.Heij

BIJLAGE I7

Kursus Stralingsbescherming

In AVO 73-56 betreffende het gebruik van radioactieve stoffen en röntgen-toestellen voor onderwijsdoeleinden op scholen voor voortgezet onderwijs wordt gesteld dat op de school iemand aanwezig dient te zijn met een specifieke deskundigheid voor deze materie. Docenten die reeds in het bezit zijn van een vergunning kunnen deze verlengd krijgen, als ze tonen deze deskundigheid te bezitten.

Na gezamenlijk overleg met de betrokken ministeries is een kursusdiktaat geschreven en een bijbehorend praktikum voor natuurkundedocenten opgezet waarmee de vereiste deskundigheid verkregen kan worden.

Na het bestuderen van het kursusdiktaat zal de cursus 2 dagen duren. Deze dagen worden gevuld met het oplossen van enkele problemen, het verrichten van enkele experimenten uit een stralingspraktikum en een afsluitend tentamen.

Na een gunstige afsluiting van de cursus wordt het bijbehorende diploma toegekend, dat aangeeft dat men de noodzakelijke deskundigheid bezit.

Het kursusdiktaat met het bijbehorende oefenmateriaal is te bestellen door f 25,-- over te maken op postrekening 3990924 t.n.v. Ioniserend Stralings Projekt te Utrecht.

Aan het volgen van de cursus zijn vooralsnog geen kosten verbonden. Ruim 300 kursisten zijn U voorgegaan. Om een indruk te krijgen van de benodigde onderwijskapaciteit, verzoeken wij degenen, die in principe deze cursus wensen te volgen, zich voorlopig op te geven bij het projekt.

Adres: Projekt Ioniserende Stralen

Laboratorium voor Vaste Stof

Princetonplein 1,

3584 CC Utrecht.

Voor nadere informatie: Drs.Th.Heij, 030-531176/531179.

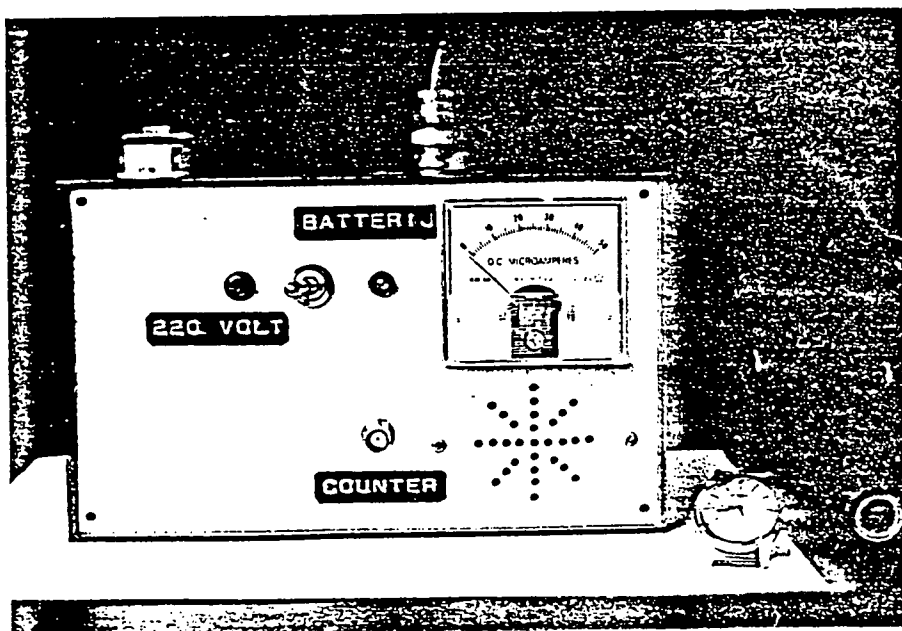
EEN ZELF TE BOUWEN GEIGER-MULLER TELLER

J.C.van Koeveringe
Th.Heij
Ioniserend Stralen Project
Vakgroep Natuurkunde-Didaktiek
Rijksuniversiteit Utrecht

Proeven met radioactieve bronnen worden door de meeste natuurkundeleraren 'uitbesteed' aan de reizende of vaste centra van het Ioniserend Stralen Project. Voor de leerlingen is deze kennismaking, hoe nuttig ook, wel erg kort en eenmalig. Daarom verdient het aanbeveling dat de school ook zelf beschikt over enkele radioactieve bronnen en een geschikte detector.

Wat de bronnen betreft: gloeikousjes, wijzers van oude uurwerken, brokjes van een bepaald erts kunnen als radioactieve bron dienen. Een geschikte detectoropstelling kost al gauw f 2.000,--.

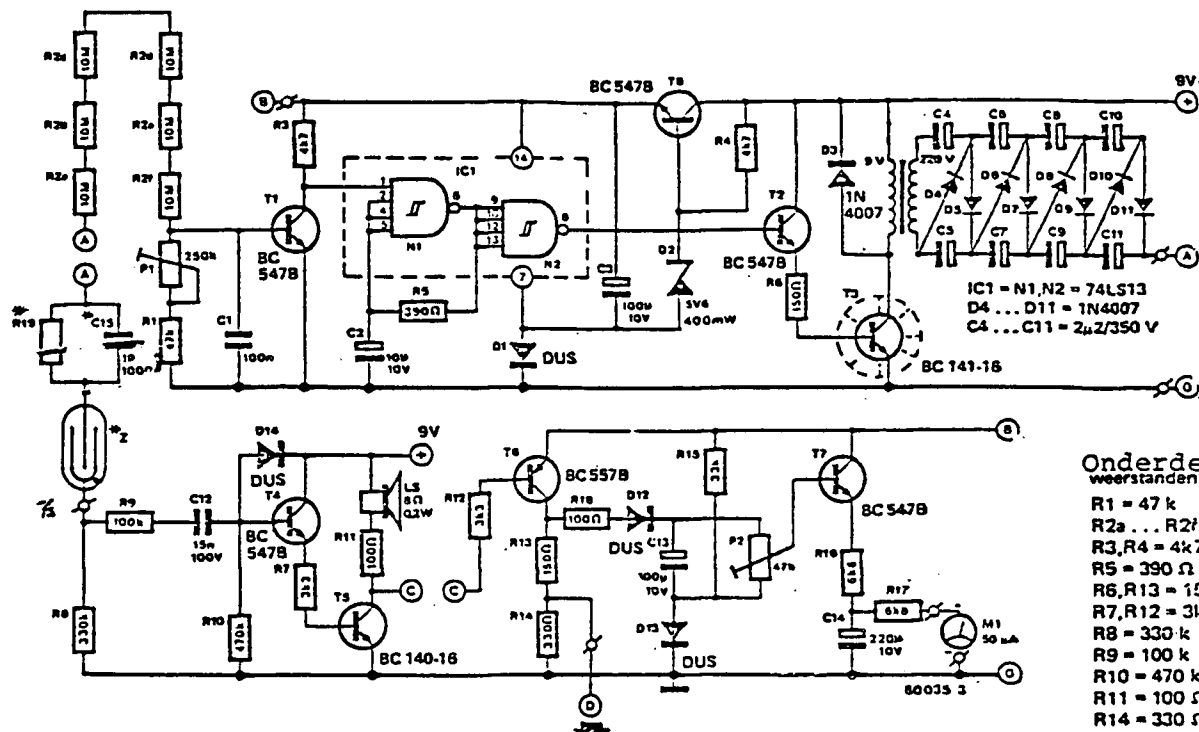
Daarom willen we hier een veel goedkopere mogelijkheid aangeven. Met behulp van een schema uit Elektuur (januari 1980) hebben we voor ongeveer f 200,-- een telsnelheidsmeter (zie figuur 1) gebouwd, waarmee we in het Ioniserend Stralen Project al bijna twee jaar tot onze tevredenheid hebben gewerkt.



BIJLAGE I8

Schema

Hieronder is in figuur 2 het schema weergegeven met de bijbehorende onderdelenlijst.



Figuur 2

Alle componenten zijn in een goede elektronicawinkel te verkrijgen. Wel moet men er op letten de juiste trafo te nemen i.v.m. een grote collectorstroom van T₃. Deze T₃ moet voorzien worden van een koelvin om de ontstane warmte af te voeren. De weerstand R₁₉ = 1MΩ wordt zo dicht mogelijk bij de anoden van de telbuis gemonteerd. Men lette er op dat deze pen niet verbogen of verhit wordt.

Onderdelenlijst

weerstanden

R1 = 47 k
 R2a ... R2f = 10 M
 R3, R4 = 4k7
 R5 = 390 Ω
 R6, R13 = 150 Ω
 R7, R12 = 3k3
 R8 = 330 k
 R9 = 100 k
 R10 = 470 k
 R11 = 100 Ω
 R14 = 330 Ω
 R15 = 33 k
 R16, R17 = 6k8
 R18 = 100 Ω
 R19 = R_A (typ.)

kondensatoren

C1 = 100 n
 C2 = 10 μ/10 V
 C3, C13 = 100 μ/10 V
 C4 ... C11 = 2μ2/350 V
 C12 = 15 n/100 V
 C14 = 220 μ/10 V
 C15 = 1 p/1000 V (kan even vervallen)

potmeters

P1 = 250 k trimpot
 P2 = 47 k (50 k) trimpot

halfgeleiders

T1, T2, T4, T7, T8 = BC 547B.
 BC 107B
 T3 = BC 141-16
 T5 = BC 140-16, BC 141-16
 T6 = BC 557B, BC 177B
 D1, D12, D13, D14 = DUS
 D2 = zener 5V6/0,4 W
 D3 ... D11 = 1N4007
 IC1 = 74LS13

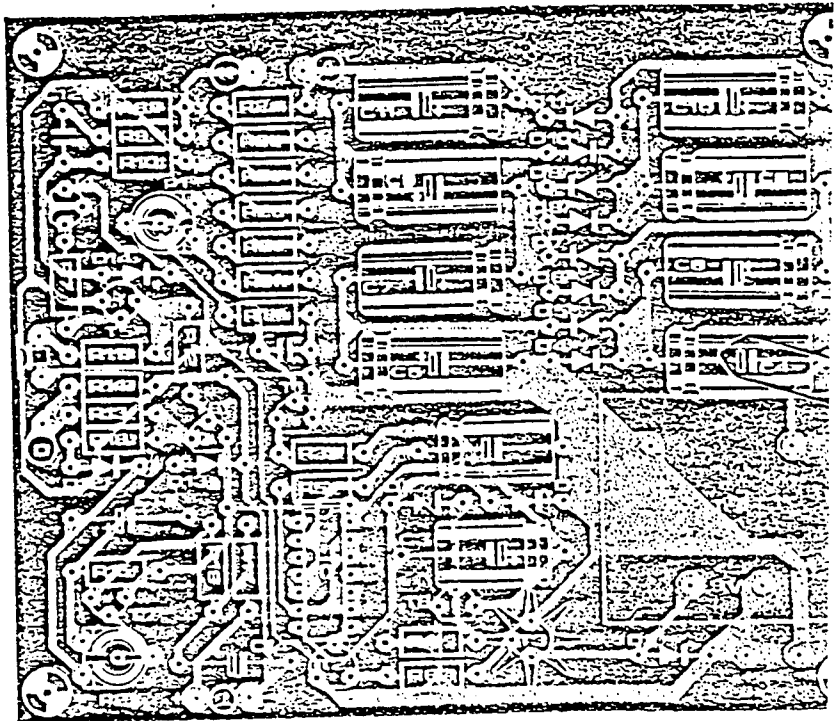
diversen

nettrafo: prim. 220 V, sek.
 9 V/180 mA (1,8 VA)
 printmont., ingegoten, pro
 spanning 6kV
 M1 = draaispoelmeter 50 μA
 LS = luidspreker 8 Ω/0,2 W

Printplaat

Figuur 3 geeft de lay-out van printplaat weer.

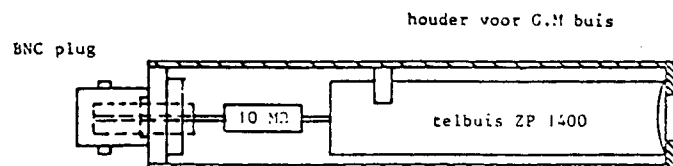
Deze print is voor
f 13,= bij Elektuur
te bestellen
printnummer 80035
Op deze lay-out
zijn de plaatsen
aangegeven waarop
de componenten ge-
soldeerd moeten
worden. Om bescha-
degingen aan de
transistoren te
voorkomen is het
gebruik van een
pincet bij het sol-
deren noodzakelijk.



Figuur 3

G.M.-buis

De telbuis is van het type ZP 1410 en voor ca. f 115,= incl. B.T.W. bij Philips Eindhoven te verkrijgen. Omdat het om een kale telbuis gaat is een houder erom noodzakelijk. Een plastic houder met een BNC-aansluiting hebben wij er in gemaakt.



Figuur 4

BIJLAGE 18

Het afregelen

Hieronder is het afregelen vermeld. De telsnelheidsmeter geeft dan impulsen per seconde aan. Daarmee is de achtergrondstraling aan te tonen. Wil men de opstelling ijken in R/h dan kan men dat het eenvoudigst doen m.h.v. een Co-60 bron op een bepaalde afstand te plaatsen. Voor het exposietempo $\dot{X}$ geldt bij benadering:

$$\dot{X} = \frac{1,5 A}{d^2} \text{ R/h, waarbij } A \text{ de aktiviteit in Ci en } d \text{ de afstand tot de bron in m is.}$$

het afregelen

Als het apparaat voor de eerste maal wordt ingeschakeld, mag de telbuis nog niet zijn aangesloten. Potmeter P1 wordt naar "minimum-spanning" gedraaid, de looper ligt dan aan de kant van R1. Na het inschakelen duurt het enkele seconden tot de kaskade is opgeladen. Daarna wordt de oscillator telkens slechts kortstondig ingeschakeld voor het bijladen van de kaskade. Dit kan worden gecontroleerd door meting van de opgenomen stroom; deze bedraagt in het inschakelstadium ongeveer 120 mA en daalt daarna tot minder dan

10 mA. Vervolgens sluit men een multimeter (meetbereik 1 kV) aan op de kaskade-uitgang en stelt met P1 de hoogspanning in op de voor de buis gewenste bedrijfsspanning (Ug typ.), waarbij geldt:

Voorzichtig met hoogspanning! Bij het meten goed-geïsoleerde meetpennen of meetklemmen gebruiken. Aanraking van hoogspanningvoerende delen absoluut vermijden. Pas op: de hoogspanning blijft ook na het uitschakelen nog enige tijd staan.

Voor versneld ontladen mag de kaskade nooit worden kortgesloten, maar moet over een weerstand van enkele kilo-ohms worden ontladen.

Voor de afregeling heeft men een impulsgenerator nodig, bijvoorbeeld een functiegenerator met blokspannings-uitgang, welke impulsen met minstens 5 V amplitude in een frekwentiegebied

van 5 Hz tot ongeveer 20 Hz kan leveren. De waarde voor de volle uitslag van de meter kan men zelf kiezen. De indikatorschakeling is zodanig gedimensioneerd dat bij maximale gevoeligheid (loper van P2 aan de pluspool van C13) een 50 μ A-meter volle uitslag heeft bij ca. 7 impulsen per seconde. Een 100 μ A-meter geeft volle uitslag bij ongeveer 15 imp./s. Bij gebruik van een telbuis type ZP 1310 krijgt men (met een 50 μ A-meter) dan een gevoeligste meetbereik van ca. 4 mR/h, bij het type ZP 1400 is de maximale gevoeligheid een faktor 10 groter, dus ca. 0,4 mR/h. Bij de afregeling gaat men het doelmatigste als volgt te werk:

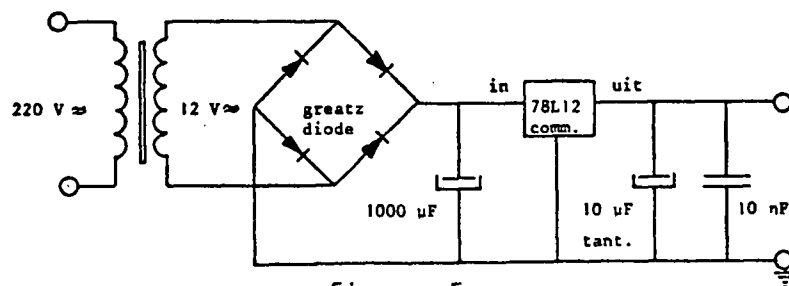
1) Op het datablad van de telbuis de impulssnelheid voor het gewenste aanwijzingsgebied van de doseringssnelheid opzoeken (bijv. 20 imp./s voor een doseringssnelheid van 1 mR/h bij de

telbuis ZP 1410, zie ook figuur 4b).
2) De "frekwentie" (in ons voorbeeld dus 20 Hz) op de impulsgenerator instellen en deze op de ingang van de tel-schakeling, dus parallel aan R6 aansluiten.

3) Potmeter P2 afregelen op volle uitslag van de draaispoelmeter (M1). Ter controle van de ingestelde impuls-frekwentie kan op punt D een frekwentieteller worden aangesloten. De gmteller is nu afgeregeld en bedrijfsklaar zodra de telbuis is aangesloten. Hoe kan men echter controleren of het zaakje als geheel wel werkt? Wel: in de eerste plaats geeft het nuleffekt uitsluitsel over het al of niet werken van de teller. De luidspreker laat zo nu en dan een "tik" horen.

Voeding

De benodigde 9V voeding kan door een batterij b.v. pp9 geleverd worden. Wil men een geschikte voeding maken dan kan dit zoals in het schema dat in figuur 5 is weergegeven.



figuur 5

De component, die er een mooie gelijkspanning van maakt is een positieve regulator (78L12). Vanwege de vrijgekomen warmte moet deze wel op het chassis gemonteerd worden. Geleidingspasta tussen chassis en de regulator zorgt voor een goede warmteafvoer.

RADIO- AKTIVITEIT

Een uitdaging voor
zelfdoeners

in... een yoghurtbakje

DJO nr. 4 - april 1981

Radioactieve stralen zijn onzichtbaar en kunnen alleen met vrij ingewikkelde en dus kostbare apparaten worden aangetoond. Op eenvoudige wijze kunnen wij met behulp van een yoghurtbakje deze stralen toch zichtbaar maken. We maken daarbij gebruik van het principe van de nevelkamer of het wilsonvat.

Het principe

Bij een hogere temperatuur kan lucht veel meer waterdamp bevatten dan bij een lagere temperatuur. Is de lucht bij een bepaalde temperatuur met waterdamp verzadigd, dan zal als de temperatuur lager wordt een teveel aan waterdamp in die lucht ontstaan. Dat overschot condenseert in de vorm van kleine waterdruppeltjes. We zien dit dagelijks om ons heen gebeuren. Door de lagere luchttemperatuur 's nachts condenseert het water in de lucht en wordt als dauw zichtbaar. Maar ook mist ontstaat op deze manier. Deze zogenaamde oververzadigde waterdamp condenseert niet zomaar. Hij doet dit bij voorkeur op kleine stofdeeltjes en op elektrisch geladen deeltjes, zoals ionen. We noemen deze deeltjes *condensatiekernen*. In lucht en andere gassen kunnen ionen ontstaan door elektrische ontladingen of door bestraling met radioactieve stralen, zoals alfa, beta en gamma-

deeltjes, maar ook door röntgenstralen. Door deze stralen worden één of meer elektronen van de gasmoleculen weggeslagen en ontstaan de ionen. De baan die een radioactief deeltje of zogenaamde ioniserende straling volgt, is dan ook gemarkeerd door sporen van geïoniseerde gasmoleculen. Laten we zo'n spoor trekken in met waterdamp verzadigde lucht, dan condenseert de waterdamp op dit spoor en wordt het zichtbaar voor het blote oog. Door deze sporen te fotograferen kunnen we sporen van ioniserende stralen op de voet volgen en ze op ons gemak bestuderen. Voor dit doel zijn zeer ingewikkelde en dus kostbare apparaten ontwikkeld om de sporen zo nauwkeurig mogelijk vast te leggen en er later nauwkeurige berekeningen aan uit te kunnen voeren.

Wij volstaan met het zichtbaar maken van de radioactieve stralen. Hiervoor is een heel eenvoudig zelf te maken instrumentje voldoende. Zelfs iemand die niet zo handig is, kan dit apparaatje bouwen!

De nevelkamer

De natuurkundige Wilson maakt voor zijn wilsonkamer gebruik van het principe, dat verzadigde lucht door afkoeling met waterdamp oververzadigd raakt, omdat lucht bij een lagere temperatuur minder waterdamp kan bevatten dan bij een hogere. Hij nam een glazen vat dat hij van onderen sterk afkoelde door de bodem op een blok koolzuurijs te plaatsen. Boven in het vat, waar het dus veel warmer was, verdampte hij een beetje water waardoor de lucht bovenin met waterdamp verzadigd was. Onder in het vat raakte de lucht sterk oververzadigd. Daar

condenseerde het water zelfs en bevroor het op de bodem van het vat (door het koolzuurijs). Ongeveer in het midden van het vat bevond zich een zone met oververzadigde lucht. Door daar radioactieve stralen doorheen te sturen ontstonden condensatiesporen van waterdruppels die met het oog konden worden waargenomen of met de camera gefotografeerd.

Met behulp van een doorzichtig plastic yoghurtbakje of een doorzichtige plastic voorraadbuis kunnen we zelf zo'n wilsonvat maken, om zo op eenvoudige wijze de radioactieve stralen zichtbaar te maken en te bestuderen. We kunnen ze als we dat zouden willen zelfs fotograferen.

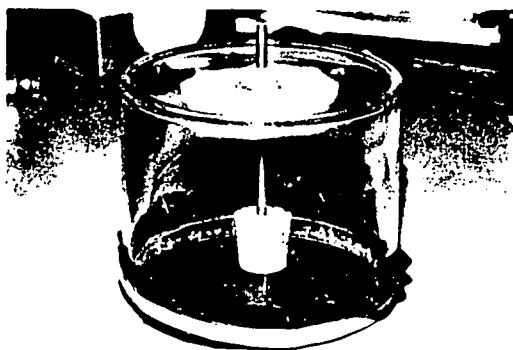
Ons eigen wilsonvat

Behalve ons yoghurtbakje of doorzichtige plastic voorraadbuis hebben we nog nodig: een lange schroef of een stuk schroefdraad ter lengte van ongeveer een decimeter en twee passende moertjes, een stuk dik filterpapier of een bierviltje (eventueel een schijfje dun schuimplastic), een kurk van een fles, een lichtgevende wijzer van een oude wekker, een stukje zwart plastic folie (uit een doos fotopapier), een buis Kältespray Kontakt 75 (verkrijgbaar bij de radio-onderdelenhandelaar) en een beetje brandspiritus.

In de bodem van ons yoghurtbakje of plastic voorraadbuisje boren we een gaatje waar doorheen de schroefstang past. Deze schroefstang zetten we voorlopig met twee moertjes vast. Op het uiteinde van de schroefstang wordt een stukje kurk geschoven. In deze kurk wordt de lichtgevende wijzer van een oude wekker gestoken. Deze lichtgevende wijzers zijn geleverd met

door Hans Schouten

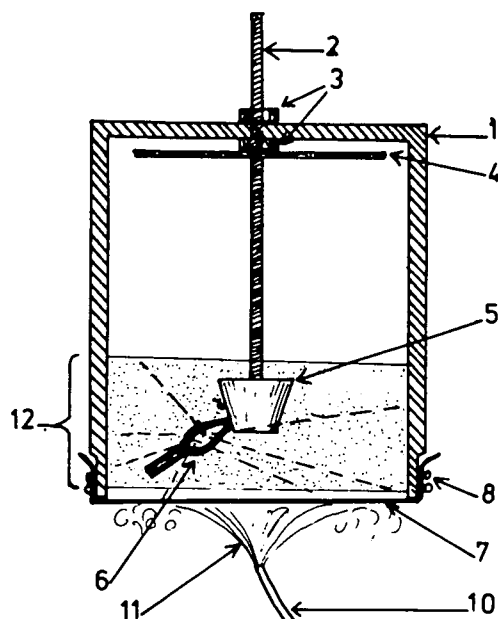
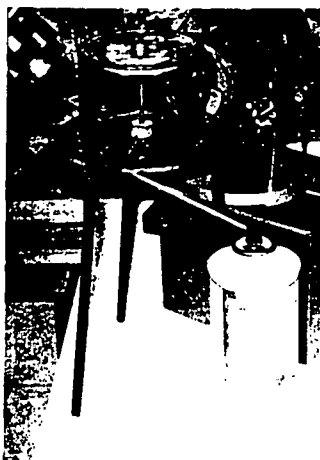
* Dit apparaat is niet door ons uitgetoetst.



1
Een wilson- of nevelkamer, gemaakt van een doorzichtige plastic voorraadbuis. In plaats van een bierviltje is hier een dun stukje schuimplastic gebruikt om voor de verdamping van het nodige water te zorgen. Vergelijk deze foto verder met de tekening

2
Dat ook van yoghurtbakjes leuke nevelkamers gemaakt kunnen worden, blijkt wel uit deze foto. Let vooral op de lichtgevende wijzer uit een oude sloopwekker die in het kurkje onderaan de schroefstang is gestoken

3
De nevelkamer, vervaardigd uit een plastic voorraadbuis in bedrijf. Rechts op de voorgrond de bus Kältespray, met het bijgeleverde slangetje waarmee de bodem van het vat, zwart plastic folie, sterk wordt afgekoeld. Rechts op de achtergrond een spotlight om de stralen en hun sporen te verlichten. De nevelkamer is opgesteld op een laboratoriumdriepoot



Van een voorraadbuis uit doorzichtig plastic is vrij eenvoudig een nevelkamer volgens Wilson te maken. Op deze figuur is te zien, hoe je alle in de tekst genoemde benodigdheden moet monteren:
1 = de voorraadbuis uit doorzichtig plastic
2 = de schroefstang van 10 cm lengte en 3 tot 4 mm dikte
3 = op de schroefstang passen de moeren die de stang en het kurkje op de juiste hoogte boven de bodem (plastic folie) brengen
4 = een bierviltje gedrenkt in brandspiritus-water mengsel
5 = een flessekkurk op het einde van de schroefstang
6 = lichtgevende wijzer van een oude wekker, in het kurkje gestoken
7 = zwart plastic folie strak over de opening van het vat gespannen
8 = elastiek om er het plastic folie mee strak te spannen
9 = bus Kältespray met een slangetje waarmee de spray tegen de onderkant van de plastic folie wordt gespoten om dit af te koelen.

10 = slangetje om te spuiten
11 = de Kältespray die tegen het folie gespoten wordt en waardoor de temperatuur van de folie tot -40°C daalt

Vergelijk deze figuur met de foto's 1 tot en met 4

BIJLAGE 19

een beetje radioactieve verf waardoor deze, behalve licht, ook radioactieve stralen uitzenden. Bovenaan de schroefstang, vlak onder de bodem van de plastic bus, wordt het bierviltje geschoven, dat vervolgens goed bevochtigd wordt met een mengsel van brandspiritus en water (gelijke delen). De opening van het bakje of de voorraadbuis wordt tenslotte afgesloten door er het zwarte plastic folie met behulp van een stevig elastiek strak overheen te spannen.

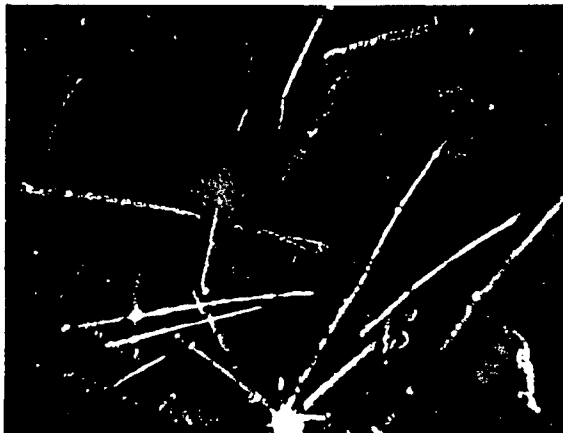
Het geheel moet nu ongeveer een half uur in evenwicht komen om de waterdamp uit het bierviltje de gelegenheid te geven te verdampen. Onze wilsonkamer wordt vervolgens in of op een statief geplaatst met het plastic folie naar omlaag. Met de bus Kältespray wordt de onderzijde gedurende een minuut bespoten. Het plastic folie krijgt hierdoor een temperatuur van ruim 40 °C beneden het vriespunt. Al spoedig zien we de condenssporen van de banen die de radioactieve deeltjes in het vat gevolgd hebben. Door het bakje van opzij met bijv. een diaprojector sterk te verlichten worden deze condenssporen heel duidelijk

zichtbaar tegen de zwarte achtergrond van het plastic folie.

In plaats van een diaprojector kunnen we het bakje ook verlichten met een elektronenflitser en kunnen we de sporen fotograferen. Dat hiermee interessante foto's gemaakt kunnen worden, blijkt wel uit de plaatjes in dit artikel. Krijgen we van jullie ook zulke, of nog mooiere foto's???



4
Het yoghurtbakje als nevelkamer, opgesteld op een laboratoriumdriepoot. Links staat een fotocamera opgesteld om de sporen in de kamer te kunnen fotograferen. Onder de driepoot staat de bus Kältespray waarmee de bodem van de nevelkamer sterk wordt afgekoeld



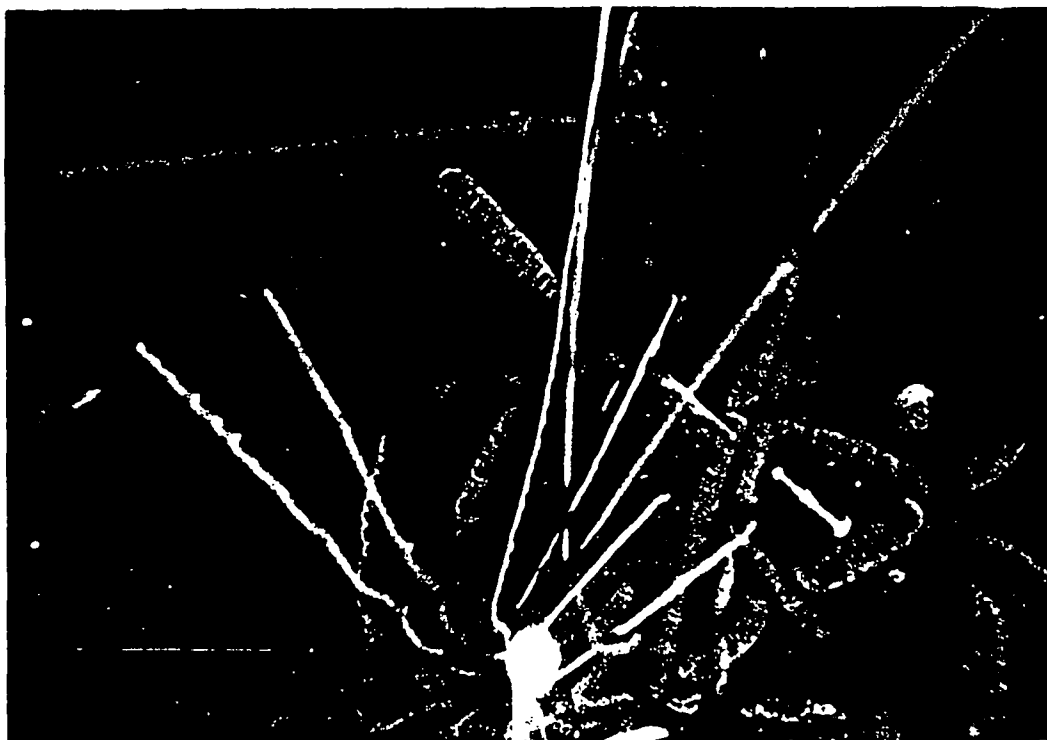
5

De sporen van de radioactieve stralen, gefotografeerd in een yoghurtbakje. In de kurk is een bolvormig lichtgevend puntje uit een sloopwekker gestoken. De kurk zelf wordt weerspiegeld in het water dat op de bodem van het vaatje is gecondenseerd. Alleen de verse sporen zijn scherp afgetekend. De andere sporen zijn snel verwaaid door luchtwervelingen in het bakje

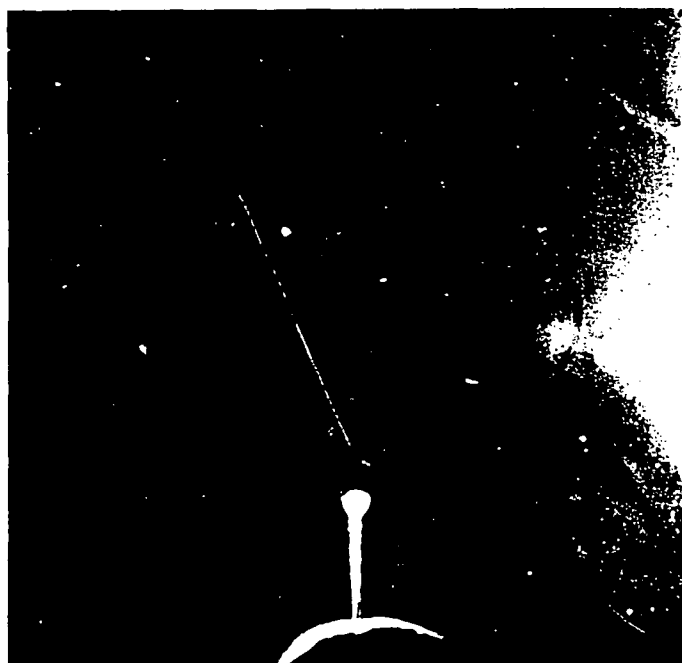


6

Een goed geslaagde foto van de sporen die verschillende radioactieve stralen en deeltjes door het nevelvat hebben getrokken. Ook hier weer zijn de verse sporen scherp afgetekend, terwijl de oudere sporen vervaagd zijn. Vergelijk het verschijnsel maar eens met de condenssporen van een straalvliegtuig



7
Een andere geslaagde nevelfoto van radioactieve stralen. De bron is een punt uit een oude wekker. Hij bevindt zich midden onder de foto; grote ronde witte vlek



8
Op deze foto is een spoor te vinden van een radioactief deeltje dat een kernsplijting op zijn geweten heeft. We herkennen dit aan het vorkje aan het einde van het spoor. Dit soort opnames zijn in normale omstandigheden zuivere toevalstreffeers. De sporen vervagen te snel om dit soort kenmerkende onderdelen van sporen te kunnen ontdekken. Voor de natuurkundigen een reden te meer om steeds foto's van de nevelkamer te maken

KENNIS & VERNUFT

- KERNENERGIE EN TAAL

Vermogensexcursie, is dat kapitaalvlucht naar belastingparadijzen; kernramp in een kweekreactor; rondleiding voor aandeelhouders op de effectenbeurs; of een woord volgens Orwells 'Newspeak'?

Persoonlijk kwam ik het woord voor het eerst tegen in mei 1974. De vaderlandse atoomlobby had een DC-9 gecharterd om enige tientallen journalisten met het evangelie van de kweekreactor in Kalkar te indoctrineren. Lezingen, ladingen technische documenten, constante chaperonnering door de beste vaklieden, en ter compensatie ruim drank en eten.

Te midden van de informatielawine zat ook dat ene neutrale woord verstopt: vermogensexcursie. Formules en technutenpraat verhuulden de ware betekenis van dat verschijnsel: in onderdelen van een seconde kan de kweekreactie zo uit de hand lopen dat een explosie onvermijdelijk is. De knal heeft niet de kracht van een atoombom, maar rampzalige schade is vrijwel onvermijdelijk. Bij een gewone kerncentrale (Borssele, Dodewaard) is het gevaar van zo'n excursie beperkt door een soort natuurlijke rem. *Bij een kweekreactor is die rem geheel afwezig.*

Vermogensexcursie behoort tot de taal *Nukespeak*, onlangs in kaart gebracht in een gelijknamig boek. Voor alle onaangename kanten van het nucleaire bedrijf kent *nukespeak* verhullende drogwoorden. Een ander voorbeeld. In maart 1975 beschadigden technici met een kaars een aantal essentiële leidingen in de kerncentrale Brown's Ferry. Gevolg: een gigantisch ongeluk, met een schade van ver over de honderd miljoen dollar, maar nog net geen ramp. Latere officiële rapporten spreken over 'het gebeuren' in de centrale. De brand werd veroorzaakt door een 'onwenselijke combinatie van makkelijk ontvlambaar materiaal en een onnodige vuurbron'. Het is de methode waarbij kanker de 'gevreemde ziekte' of 'nieuwvorming' gaat heten en levensgevaar de 'kans op negatieve gevolgen'.

Het gebruik van drogwoorden kan voor een groot deel verklaard worden uit de liefst verloochende militaire komaf van de kernenergie. Zodra het om bommen en granaten gaat slaat *nukespeak* nog steeds wild toe. Nato-voorman Luns weigert over 'neutronenbom' te spreken,

Drogtaal



Rob Sijmons

het gaat immers om een 'wapen met verhoogde straling'. De Indiase kernbom heet een 'vreedzaam nucleair toestel'.

Nukespeak is meer dan een taal, het is een geesteshouding, systematisch gericht op misleiding van het publiek, met als ingrediënten: leugen, bedrog en geheimhouding. *David Lilienthal*, de eerste voorzitter van de Amerikaanse commissie voor atoomenergie AEC, sprak in een kritische terugblik ooit van een systeem van 'wishful thinking', waarbij tegen de stroom in het publiek moest worden overtuigd van 'the sunny side of the atom'.

Twee voorbeelden van bedrog en misleiding:

■ Bij bovengrondse kernproeven in Nevada was de bevolking in de jaren vijftig bang voor *fall out*. De AEC verspreidde een folder met als strekking: niets aan de hand. Op een plaatje kijkt een cowboy rustig naar een paddestoelwolk. Er is speciale aandacht voor mensen met ei-

gen geigertellers. Die apparaten kunnen best als gekken radioactiviteit meten, maar geen zorg, het gaat dan om *fall out* die 'verre van gevaarlijk' is.

■ In oktober 1975 verscheen het zogenaamde *Rasmussen-rapport*, door de opvolger van de AEC aangeduid als 'een objectieve en zinvolle schatting van het risico voor het publiek' van kerncentrales. Vier jaar later wordt het rapport als beleidsbasis weer teruggetrokken: in een aantal opzichten zijn de berekeningen onjuist of zinloos, en objectief is de studie al helemaal niet. De overheidscontroleurs moeten toegeven dat het Rasmussen-rapport vooral misbruikt is 'voor propagandadoeleinden'.

Amerika is de bakermat van nucleaire technologie; samen met kernenergie is het virus van de *nukespeak* verspreid. Ook naar ons land. Het systeem beschermt zich zelf door het *Kalt stellen* van interne critici en dissidenten: dat over-

kwam *Theo van Waas*, stralingsbeschermmer bij Dodewaard. Het systeem liegt over de gevaren: zie de affaire van het *Kema-afval*. Het systeem wentelt zich in geheimhouding: Nederlandse 'opwerkingscontracten' zijn zo geheim dat zelfs het parlement er niet openbaar over mag praten; ongelukken in Nederlandse kerncentrales worden slechts in uiterst vage *nukespeak* aan de openbaarheid prijsgegeven.

Het drogsysteem marcheert onverbeterlijk verder. Recentelijk, in een boek van prof. Heertjes publicatie-imperium *De echte kern bv*, demonstreerde prof. ir. P. Mostert zijn kunde in *nukespeak*. Zijn verhandeling over *Reactorveiligheid* prijst bij voorbeeld het Rasmussen-rapport: de gebruikte methode van risicoberekening schakelt immers het 'subjectieve element' uit. Helaas: 'De acceptatie van deze methodiek door de vergunning verlenende autoriteiten zal nog wel enige tijd op zich laten wachten.' Ook de vermogensexcursie treffen we bij Mostert: die is bij de gewone kerncentrales door de natuurlijke rem niet belangrijk. 'In dit opzicht is de reactor dus inherent veilig.' Volgens dezelfde criteria is de kweekreactor dus inherent onveilig — maar dat wordt passend verzwegen.

In het voorwoord tot *Kernenergie in beweging* schrijven Heertje en zijn mederedacteur: 'Het is de — misschien verwaarloosde — plicht van onderzoekers om de feiten van kernenergie, waarover men het eens is, aan een breed publiek bekend te maken.' Het is Heertje kennelijk ontgaan dat *feit* in dit kader tot drogwoord is gedegradeerd. *Onderzoekers* die, zoals het merendeel van zijn auteurs, bij de atoomlobby werken, hebben na enige decennia *nukespeak* het etiket *ongeloofwaardig* verdiend. De enige zinvolle Brede Maatschappelijke Discussie zou kortom over *nukespeak* moeten gaan: de Nederlandse bijdrage aan het Orwell-jaar 1984.

Stephen Hilgartner, Richard Bell, Rory O'Connor: *Nukespeak*: Sierra Club Books, San Francisco; f 48,75. C.D. Andriess, A. Heertje (red.): *Kernenergie in Beweging*, verspr. Keesing Boeken, Amsterdam, f 39,50

In de aflevering 'Is innovatie erger dan God' ontbraken gegevens over het besproken boek. Het ging om: Marlies ter Borg, *Innovatie tot in eeuwigheid*, De Horstink, Amersfoort, f 22,50

LITERATUUR

In deze literatuurlijst zijn drie boeken wat uitgebreider besproken. Twee daarvan, Fast en Aten, zijn door ons intensief geraadpleegd tijdens het schrijven van dit thema. Het ziet ernaar uit dat het derde, Acceptable risk, een goede achtergrond geeft bij de essentie van dit thema nl. het afwegen van risico's.

De overige literatuurverwijzingen zijn helaas lang niet altijd compleet. In de tweede versie van deze AVOL zal dat verbeterd worden.

STRALING IN DE SAMENLEVING

Dr. J.B.Th. Aten e.a.

In dit boek wordt vanuit een medisch-biologische invalshoek een overzichtelijke beschrijving gegeven van bronnen, effecten en toepassingen van ioniserende straling. De structuur van het boek is eenvoudig.

In het eerste deel wordt ingegaan op de fysische aspecten van ioniserende straling. In het tweede deel worden de biologische effecten van ioniserende straling behandeld. Zowel genetische als somatische effecten komen hierbij aan bod. In het laatste deel komen twee aspecten aan de orde: de toepassing van ioniserende straling en de bescherming tegen ioniserende straling. Bij de toepassing van ioniserende straling ontbreekt het gebruik van kernwapens. Er wordt wel ingegaan op de medische toepassingen; kernenergie-productie en wetenschappelijke/technische toepassingen.

Bij de bescherming tegen ioniserende straling komen de volgende aspecten aan bod: historische ontwikkeling van normen, doel van stralingshygiëne, internationale afspraken, recente ontwikkelingen met betrekking tot stralingsdoses/normen, risico's van lage stralingsdoses, genetische risico's en dergelijke.

Dit boek is een uitgave in de reeks Medisch Biologisch Perspectief (deel 4). Het is verkrijgbaar in een wetenschappelijke boekhandel en/of bij:

Stafleu's Wetenschappelijke Uitgeversmaatschappij BV
Alphen aan de Rijn/Brussel.

Kosten (+ f 45,--).

ENERGIE UIT ATOOMKERNEN

Prof. Dr. J.D. Fast

In dit boek wordt een brede beschrijving gegeven van de fysische principes en technisch/wetenschappelijke toepassingen van ioniserende straling. Dit alles vanuit een technisch/wetenschappelijke invalshoek.

In het eerste deel komen alle belangrijke kernfysische begrippen aan de orde, waarbij het accent op de kernsplijting ligt. Als toepassingen van kernsplijting gaat de auteur in op de splijtingsbommen (Hiroshima, Naga-

BIJLAGE III

saki) en de kerncentrales. Alle stappen van de zogenaamde splijtings-cyclus komen hierbij aan de orde. Risico's en problemen met betrekking tot deze toepassingen worden toegelicht (onder andere Harrisburg, hoog-radio-actief-afvalprobleem).

In een apart hoofdstuk wordt ingegaan op de ontwikkeling van de kernfusie. Fast maakt hierbij een onderscheid tussen fusiebommen (en neutronenbommen) en vreedzame toepassingen (= fusiereactoren). In het boek wordt ook uitvoerig aandacht besteed aan wetenschappelijke toepassingen (en hun principes), zoals: ouderdomsbepaling en kernfusie in de sterren. In de laatste hoofdstukken wordt ingegaan op toepassing van radio-nucliden binnen de geneeskunde en de diverse toepassingen in de techniek (onder andere dikten en dichtheden metingen, landbouw, bereiding van staal, slijtage, gamma- en neutronenradiografie).

De populaire stijl van schrijven maakt dit boek ook voor leerlingen toegankelijk. Vooral als ondersteuning bij het werken aan de hoofdstukken 5, 6 en 7 uit het themaboek "Ioniserende Straling".

Dit boek is een uitgave van Natuur & Techniek. Het is ook in de boekhandel verkrijgbaar (+ f 45,-).

Wat is een aanvaardbaar risico?

Acceptable risk. Baruch Fischhoff, Sara Lichtenstein, Paul Slovic, Stephen L. Derby, Ralph L. Keeney. Cambridge University Press ISBN 0-521-27892-9, f 34,10.

Acceptable Risk is een monument voor de bijdrage van besliskunde en psychologie aan de beantwoording van de vraag wat in de techniek aanvaardbare risico's zijn.

In zekere zin is het boek gedateerd. Het vraagstuk van aanvaardbare risico's, en meer in het algemeen technology assessment, is in het Nederlands technologiebeleid sterk naar de achtergrond gedrongen. Thans staan in het vaderlandse technologiebeleid begrippen als marktconform centraal. De huidige blij-dat-ik-innoveer-ideologie is wars van het treurige thema risico's, en het veiligheidsbeleid van de overheid bestaat nog wel, maar lijkt voorschans primair een bezwerende functie te hebben gekregen.

Dit wil niet zeggen dat *Acceptable Risk* een nu al historisch monument is. Het nieuwe beleidsdenken over technologie en veiligheid lijkt niet opgewassen tegen de feiten. Een aardige illustratie daarvan levert de recent verschenen Integrale Nota L.P.G. Dit regeringsstuk stelt 'dat onder omstan-

digheden die redelijkerwijs in particuliere garages mogen worden verwacht, LPG-uitstrooming uit een personenauto geen reëel gevaar oplevert'.

Vrijwel tegelijk met het uitbrengen van deze Integrale Nota ontploft in het Gelderse Scherpenzeel een particuliere garage door LPG-uitstrooming uit een personenauto. Schade vele kapotte ruiten, drie verwoeste auto's, twee weggevaagde garages en één kaduke motorfiets. Voeg daaraan toe dat marktconform zoveel betekent als dat wat minister Van Ardenne leuk vindt, en het lijkt aannemelijk dat het huidige beleidsdenken op afzienbare termijn als waan van de dag ter aarde kan worden besteld zodat de boodschap van *Acceptable Risk* ook in Haagse kringen kan herleven.

Acceptable Risk levert niet 'de gehele waarheid'. Zowel de sociologisch/cultuur-antropologische — als de rechts-filosofische invalshoek worden verwaarloosd. Niettemin zou men zich wensen dat een ieder die zich wil bemoeien met vraagstukken van technologie en veiligheid dit boek als verplichte kost zou beschouwen. Al was het maar omdat het inzichtelijk maakt waarom brede of smalle maatschappelijke discussies over riskante activiteiten veelal weinig hebben van be-

schaafde, ongedwongen gesprekken. Er blijkt weinig zo vreemd aan deze discussies te zijn, dat er geen logica achter steekt.

De drie voornaamste gangbare benaderingen van aanvaardbare risico's: de professionele beoordeling, het door-trekken van de geschiedenis en de formele analyse worden in *Acceptable Risk* op een heldere manier gepresenteerd. De voor- en nadelen van de diverse benaderingen worden uiteengezet. En hoewel de formele analyse — de hobby van de auteurs — conform de verwachting de beste cijfers krijgt is de waardering ervan verre van onkritisch. Trouwens, het hele boek is zeer evenwichtig. 'Iedereen', van milieugroepen en Ralph Nader tot natuurwetenschappers en leken-haters, krijgt tenminste één terechte veeg uit de pan.

Voor een groot aantal punten die van belang zijn voor het beoordelen van risico's en het ingrijpen van wilde al dan niet brede maatschappelijke discussies over risico's van technieken, vormt *Acceptable Risk* een goudmijn, van empirisch gefundeerde informatie. Interessant zijn bijvoorbeeld de beschouwingen over de moeite die ook goed getrainde wetenschappers en technici hebben bij het hanteren van

concepten als waarschijnlijkheid en onzekerheid. Wetenschappers zijn veelal niet de goede statistici waarvoor zij zichzelf graag houden. En juist als het gaat om risicobeoordelingen kan gebrekkige statistiek levensgevaarlijk zijn.

Empirisch onderzoek wijst uit, ondanks alle colleges, dat statistische fenomenen als regressie naar het gemiddelde door wetenschappers niet worden herkend, en vaak verwachte patronen of signalen worden waargenomen waar slechts 'ruis' is. Toevalsvariaties in uitkomsten krijgen ook van wetenschappers niet zelden causale interpretaties en er is onder hen vaak een overdreven vertrouwen in vroege

trends in de gegevens. En - zo blijkt empirisch - net als vele anderen vertrouwen wetenschappers in het algemeen ongefundeerd sterk in het eigen oordeel.

Een ander punt waarop *Acceptable Risk* nuttige eye-openers levert is de deelname van experts aan publieke debatten. Daarbij verdwijnt in de regel flink wat onder de tafel. Een eerste reden daarvoor is, aldus de schrijvers, dat deskundigen veelal bang zijn dat de hele waarheid onnodige, dan wel onwenselijke, onrust zal veroorzaken. Een tweede reden is dat op experts van buiten af vaak sterke druk wordt uitgeoefend om zich onomwonden uit

te spreken, en met feiten en niet met kansen of enerzijdsanderzijds verhalen te komen.

Het boek wordt door de schrijvers afgesloten met een fikse hoeveelheid wijze raad. Eén van hun aanbevelingen, vijftien procent van het budget voor risicoanalyses moet worden gereserveerd voor een grondige externe beoordeling, mag van mij bij wet worden vastgelegd.

En tenslotte, hoewel de prijs niet het hele bewijs is, vormen de bescheiden kosten van deze paperback-uitgave een extra aansporing om *Acceptable Risk* aan te schaffen.

Lucas Reijnders

Het zelf bouwen van een GM-teller, De Jonge Onderzoeker aug. 1983.

Prof.Dr. G.W. Barendsen. Ioniserende straling, radioactiviteit en hun biologische gevolgen. Verslag Woudschotenconferentie 1983, verkrijgbaar bij de Vakgroep Natuurkunde Didactiek t.a.v. Jenny Andriese, tel. 030-531179.

Dateringsmethoden, Archimedes jan. 1981.

Straling uit de muur - hoe gevaarlijk is radongas voor de volksgezondheid, Intermediair 21-5-1982.

Een driedimensionale blik in het menselijk lichaam, Kijk jan. 1982.

Radiologisch onderzoek bij paarden, Natuur en Techniek nov. 1979.

Kankerbestrijding met snelle neutronen, Natuur en Techniek, juli 1976.

Computertomografie, nieuwe mogelijkheden in de diagnostiek van hersenaandoeningen, Natuur en Techniek febr. 1979.

De ICRP en de laagwaardige ioniserende straling, Milieudefensie aug. 1979.

H.W. Lewis. The safety of fission reactors, Sc. Am. maart 1980.

Fred M. Kaplan Enhanced radiation weapons, Sc. Am. mei 1978.

David J. Rose a.o. Nuclear power, nuclear weapons and international stability, Sc. Am. april 1978.

Bernard T. Feld a.o. Land-based intercontinental missiles, Sc. Am. nov. 1979.

Kevin N. Lewis. The prompt and delayed effects of nuclear war, Sc. Am. juli 1979.

EMP; geen reden voor paniek, Intermediair sept. 1982.

De electromagnetische puls - onderzoek onder hoogspanning, Natuur en Techniek 1982 (8)

A ban on the production of fissionable material for weapons, Sc. Am. juli 1980.

A.A. Baev a.o. Is er leven na de bom, Natuur en Techniek 52 (84).

C. Schuurin. De nucleaire winter, Intermediair 1984 nr. 34.

Carl M. Sagan. De aarde na de kernoorlog, Bijlage Vrij Nederland 11-2-1984.

(de bijlage is ook afgedrukt in de AVOL van het thema 'Kernwapens en/of Veiligheid')

In de ban van de bom - Een VN-rapport over kernwapens, NIVV Den Haag 1981.

BIJLAGE 112

FILMS EN VIDEO

De atoomsoldaten

VNFI, Hilversum

Voorwaarden: huur

30 min. - kleur - opt. geluid

Kommentaar: Engels, Nederlandse ondertiteling

Waren er voldoende voorzorgsmaatregelen getroffen bij de Amerikaanse proeven met atoombommen in de Nevada-woestijn in 1957? Twee Amerikaanse soldaten vertellen over hun bittere ervaringen.

Atomen en hun isotopen II (Kunstmatige isotopen)

NIAM, Den Haag, bestelnummer: VC-1634

Voorwaarden: abonnement

18 min. - kleur - type: VCR-standaard. Handleiding

Kommentaar: Nederlands

De splijtingsprodukten van een kernreaktor. De tabel van de nucliden. Neutronenreacties. Protonenreacties. Positron-veral.

Energie uit materie

NIAM, Den Haag, bestelnummer: 1559

Voorwaarden: abonnement

18 min. - zwart/wit - opt. geluid. Handleiding

Kommentaar: Nederlands

Deze film heeft tot doel de leerlingen een beter inzicht te geven in opbouw en bewegingen van de verschillende atomen. De grondbeginselen van de atoomsplijting komen ter sprake.

Paul Jacobs en de atoom-maffia

Cineclub, Amsterdam

Voorwaarden: huur

55 min. - kleur - opt. geluid

Kommentaar: Engels, Nederlandse ondertiteling

Dokumentaire over de kernwapenindustrie in de Verenigde Staten. Tijdens de kernproeven werden honderdduizenden Amerikanen blootgesteld aan straling, wat o.a. haaruitval, duizeligheid e.d. ten gevolge had. Men ging vermoeden dat er verband bestond tussen de gevallen van leukemie en de atoomproeven.

Kernenergie, wat weet jij daar nou van?

St. Open Studio, Amsterdam

Voorwaarden: huur

1 cassette - 40 min. - kleur - type: verschillende types.

Handleiding

Kommentaar: Nederlands

In het eerste deel wordt besproken wat energie is en hoe we daar aan komen, wat kernenergie is, hoe kernenergie geproduceerd wordt en de problemen rond het radio-actief afval. In deel twee komt de relatie tussen kernenergie en kernbewapening aan de orde, de verrijkingsfabriek in Almelo, hoe kernenergie democratie kan aantasten en er wordt gesproken over een toekomst zonder kernenergie.

Kernenergie

NIAM, Den Haag, bestelnummer: VC-1647

Voorwaarden: abonnement

25 min. - kleur - type: VCR-standaard. Handleiding

Kommentaar: Nederlands

Naast energie uit water en uit steenkool kan ook uit atoomkernen energie onttrokken worden. Op eenvoudige visuele wijze d.m.v. tekenfilm wordt een beeld gegeven van de kernfysika.

Atomen en hun isotopen I (Natuurlijke isotopen)

NIAM, Den Haag, bestelnummer: VC-1633

Voorwaarden: abonnement

24 min. - kleur - type: VCR-standaard. Handleiding

Kommentaar: Nederlands

De bouw van atomen en kernen. De kernkracht. Isotopen en de tabel van de natuurlijke nucliden. Bètaverval, elektronenvangst en alfa-veral.

Koot & Bie en de 3e Wereldoorlog

HJR/LCGJ, Driebergen

Voorwaarden: huur

1 cassette - ± 45 min. - kleur - type: verschillende types

Kommentaar: Nederlands

Dit programma kan in het kader van de oorlog- en vredesproblematiek gebruikt worden. Koot en Bie stellen het absurde denken aan de orde over schuilkelders, emigreren vanwege de dreiging van een 3e Wereldoorlog en het doemdenken.



stichting nederlands instituut
voor audio-visuele media

postbus 63420, 2502 JC 's-Gravenhage, tel. (070) - 60 09 24.

BIJLAGE I13

ADRESSEN

- Ministerie van Economische Zaken, afdeling Voorlichting,
Bezuidenhoutseweg 30, 2594 AV Den Haag, 070-814011.

Folders:

- a) *3500 MWe Kerncentrales in Nederland. Hoe werken ze en wat zijn de risico's (mei 1977)*
- b) *Plaatsen voor kernenergie / en wat u daarover te zeggen hebt (maart 1977)*
(in samenwerking met Volkshuisvesting & Ruimtelijke Ordening).

- Energie Onderzoek Centrum Nederland,
Scheveningse weg 112, 2584 AE Den Haag, 070-514581.

Diverse folders over centrales, afval en dergelijke.

- Urenco Nederland Operations BV,
Planthofsweg 81, 7601 PJ Almelo, 05490-10463.

Folder: Ultra-Centrifuges & UCN (Ultra-Centrifuge Nederland).

- NV Gemeenschappelijke Kernenergie-centrale Nederland (GKN),
Utrechtseweg 310, 6812 AR Arnhem, 085-457057.

Diverse folders, onder andere:

- a) *Kernenergie en elektriciteit (1972)*
- b) *Kernenergie*
- c) *De snelle kweekreactor Kalkar.*

- Alarmgroep Atoomplannen,
Radesingel 3, 9711 ED Groningen, 050-124587.

Deze groep houdt zich vooral bezig met de opslag van radio-actief afval in Noord-Nederland.

- Stroomgroep Stop Kernenergie,
Oude Gracht 42, Utrecht, 030-314314.

BIJLAGE I13

- Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne (VoMil), afdeling Voorlichting,
Dr. Reijersstraat 12, 2265 BA Leidschendam, 070-209260.

Folder(krantje) onder andere: radio-actief afval gedumpt.

- Vereniging Milieudefensie,
Tweede Weteringplantsoen 9, 1017 ZD Amsterdam, 020-221366.

- Stichting "Energie Anders",
Stationsweg 91, 3151 HR Hoek van Holland, 01747-5242/5241.

Tentoonstelling over andere energievormen.

- Natuur en Techniek,
Postbus 415, 6200 AK Maastricht, 043-54044.

In diverse nummers wordt aandacht besteed aan de verschillende toepassingen (en risico's) van ioniserende straling.

- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, afdeling Voorlichting,
Plesmanweg 1-6, 2797 JG Den Haag, 070-747474.

Info over transport gevaarlijke stoffen.

- Ministerie van Defensie, afdeling Voorlichting,
Spui 32, 2511 BS Den Haag, 070-722722.

- Nederlands Instituut voor Vredesvraagstukken (NIVV),
Alexanderstraat 7, Postbus 1781, 2508 CG Den Haag, 070-469412.

- Polemologisch Instituut,
Herensingel 13, 9711 ER Groningen, 050-115578.

- Interkerkelijk Vredesberaad (IKV),
Postbus 85627, Den Haag, 070-631931.

Folders over onder andere kernwapens en medische gevolgen.

- Pax Christi Nederland,
Postbus 85627, Den Haag, 070-631931.

BIJLAGE I13

- Energie Centrum Nederland (ECN),
Westerduinweg 3, Petten, 02246-6262.
- Greenpeace,
Damrak 83, Amsterdam, 020-236545/231843.
- Dodewaard Gaat Dicht,
Postbus 1357, Nijmegen, 080-220960.
- Ministerie van Binnenlandse Zaken, afdeling Voorlichting,
Postbus 20011, 2500 EA 's-Gravenhage, 070-716030.
*Voorlichtingsfolder over schuilgelegenheid voor de bevolking
(september 1980).*
- Tijdschrift: De Paladijn (11x per jaar).
Redactie-adres: Nassau Odijkstraat 4, 2596 AH Den Haag, 070-249918.
Informatie over schuilkelders.
- Academisch Ziekenhuis Utrecht, afdeling Voorlichting,
Catharijnesingel 101, 3511 GV Utrecht, 030-372563.
- *Overleven? Doe het zelf! Een serie overlevingscartoons van Stefan Verweij (+ f 10,--); verkrijgbaar bij de boekhandel.*
- Voorlichtingsburo voor de voeding,
Laan Copes van Cattenburch 44, 's-Gravenhage.
Folder: Bestralen van levensmiddelen.
- Provinciaal Elektriciteitsbedrijf.
*In voorlichtingsblad Stroom wordt regelmatig aandacht besteed aan
ioniserende straling.*
- AVOLS van de PLON-NAS-thema's:
 - Energie in de Toekomst
 - Kernwapens en/of Veiligheid
(onder andere overzicht van literatuur, adressen met betrekking tot
kernwapens; energie-instellingen).

BIJLAGE I13

- Philips Medical Systems Best,
Afd. Publiciteit, de heer Vermeulen, 040-784830.

- Agfa Gevaert,
Med. Röntgen, de heer J. Bouwen, 070-110591.

- 3M Trimax - röntgencassettes,
de heer P. Janssen, 071-769330.

- Gammaster,
Morsestraat 3, 6716 AH Ede, 08380-37476.

Sterilisatie medische artikelen

1.3 MODERNE BEELDVORMENDE TECHNIEKEN IN DE MEDISCHE DIAGNOSTIEK

Dr. H.W. Venema

De ontdekking in 1896 door Röntgen van de naar hem genoemde straling markeert een essentiële stap in de ontwikkeling van afbeeldingstechnieken in de medische diagnostiek. Voor het eerst was het mogelijk om structuren binnen het menselijk lichaam zichtbaar te maken. In deze eeuw is het aantal beeldvormende technieken aanzienlijk uitgebreid. In tabel 1 staan de belangrijkste methoden vermeld waarmee informatie over structuren binnen het menselijk lichaam kan worden verzameld en worden weergegeven in de vorm van afbeeldingen. Tot ca. 1970 werden alleen afbeeldingstechnieken gebruikt waarbij de verzamelde informatie rechtstreeks als een plaatje wordt weergegeven (conventionele technieken). Bij onderzoek met behulp van röntgenstraling b.v. bestaat deze informatie uit de verschillen tussen de diverse weefsels en het lichaam in doorlatend vermogen voor röntgenstraling; bij conventionele röntgenfotografie worden deze verschillen rechtstreeks in een beeld omgezet, n.l. in verschillen in zwarting op een fotografische film. De introductie rond 1970 van CT (computerized tomography) met behulp van röntgenstraling, waarmee een doorsnede beeld door het menselijk lichaam vervaardigd kan worden, is een uiterst belangrijke stap geweest. Naast het grote praktische belang van deze onderzoeks-



Dr. H.W. Venema.

<u>gebruikte straling</u>	<u>principe</u>	<u>ioniserende straling</u>	<u>conventioneel</u>	<u>reconstructie (CT, vanaf 1970)</u>
röntgenstraling	transmissie	ja	ja	ja
gammastraling (radioactieve nucliden)	emissie	ja	ja	ja
ultrageluid	reflectie (transmissie)	nee	ja	ja
IR - straling (thermografie)	emissie	nee	ja	nee
RF - straling	kernspin- resonantie	nee	nee	ja

Tabel 1

Belangrijkste afbeeldingstechnieken

BIJLAGE I14

techniek, is de ontwikkeling van röntgen CT ook van groot fundamenteel belang geweest, omdat voor het eerst het informatie verzamelen van een object werd losgekoppeld van het reconstrueren van een plaatje uit deze informatie (reconstructie technieken). Zo is deze ontwikkeling een belangrijke impuls geweest om reconstructietechnieken ook op andere modaliteiten toe te passen. b.v. in het geval van de recent ontwikkelde afbeeldingstechniek gebaseerd op kernspinresonantie (nuclear magnetic resonance, NMR).

De nadruk van dit verhaal ligt op toepassingen van röntgenstraling zowel in klassieke vorm als in de vorm van röntgen CT. Hiernaast zullen in het kort de andere beeldvormende technieken van tabel 1 besproken worden. Tenslotte zal -heel in het kort- enige aandacht aan CT met behulp van NMR worden geschonken.

Conventionele technieken.

a) röntgenfotografie en- doorlichting (fig.1.)

In een röntgenbuis wordt röntgenstraling opgewekt door de anode te beschieten met hoogenergetische electronen. In de medische röntgendiagnostiek ligt de kinetische energie van deze electronen tussen de 25 en 150 keV; deze energieën corresponderen met de maximale fotonenergieën in het röntgenspectrum. Röntgenfotografie berust op het feit dat röntgenstraling in staat is door een object heen te dringen; materie is echter niet compleet transparant voor röntgenstraling. Een groot gedeelte van de röntgenfotonen ondergaat wisselwerkingen in het object (foto elektrische absorptie, compton verstrooiing en coherente verstrooiing), en slechts een klein gedeelte afhankelijk van de dikte en de samenstelling van het object en de

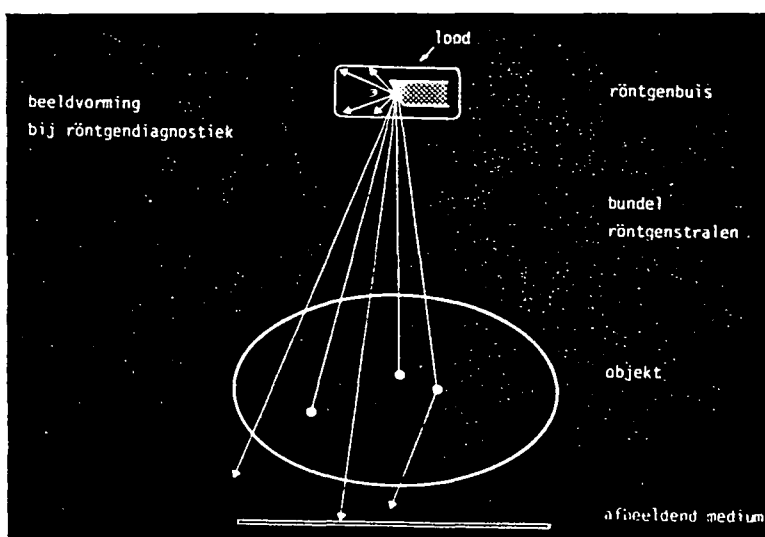


Fig.1. Beeldvorming
röntgendiagnostiek

energie van de fotonen - gaat ongehinderd door. Bij het vervaardigen van een röntgenopname valt de, door een klein oppervlak van de anode (focus) uitgezonden, röntgenstraling op het af te beelden lichaamsdeel, en de verschillen in doorgelaten intensiteit worden zichtbaargemaakt als verschillen in zwarting (contrasten) op een röntgenfoto, of als verschillen in helderheid op een doorlichtingsscherm. De contrasten in de röntgenafbeelding worden, vooral bij afbeeldingen van dikkere objecten, aanzienlijk verminderd door de aanwezigheid van strooi- straling (fig. 2), die als een vrij egaal waas over het beeld is gesuperponeerd.

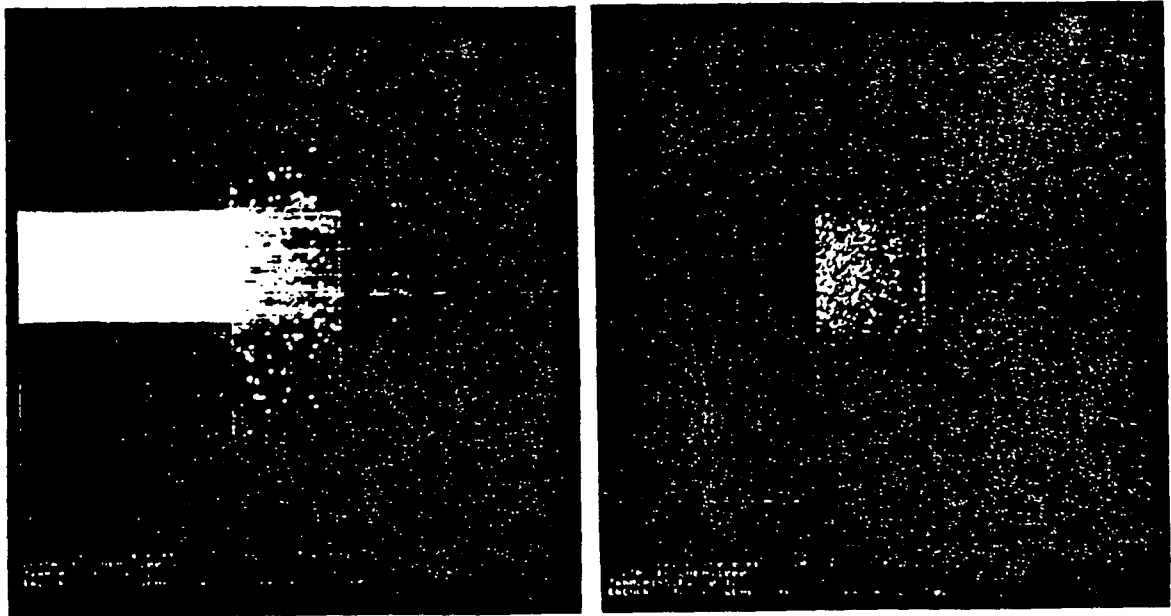


Fig.2. Computersimulatie van wisselwerkingen van röntgenstraling (foton- energie (50 keV) en een laag water van 10 cm dikte. Links: de banen van 100 invallende fotonen, door het beeldvlak (verti- cale stippellijn rechts) gaan zowel primaire als verstrooide fotonen. Rechts: verdeling geabsorbeerde energie (1000 invallende fotonen).

Een belangrijk facet van röntgenfotografie is het gebruik van ioniserende straling. Bij de meeste wisselwerkingen (foto elektrische absorptie en compton verstrooiing) wordt energie afgegeven, hetgeen beschadigingen op celniveau kan teweegbrengen (stralenbelasting). Een belangrijk streven is deze stralenbelasting zo klein mogelijk te houden. Een van de manieren om dit te doen is doormiddel van de keuze van een gevoelig afbeeldend medium (tabel 2). Het blijkt echter dat in het algemeen een afweging tussen gevoeligheid en beeldkwaliteit gemaakt moet worden. Een röntgenfilm alléén is zeer ongevoelig en wordt alleen nog gebruikt bij fotografie van dunne objecten. (vingers, tandheelkundige röntgen- fotografie). Een veel grotere gevoeligheid wordt bereikt door een film te gebruiken in combinatie met één of twee *scintillatoren*.

BIJLAGE 114

	<u>(exposie in mR)</u>	<u>onscherpte (mm)</u>
röntgenfilm	50	≤ 0.1
film/scherm combinatie	10 -- 0.25	0.15 -- 0.7
beeldversterker/ TV of 100 mm camera	0.1 en kleiner	ca. 0.7
bewegende rij van detectoren (ca. 500)	0.1 en kleiner	0.8

Tabel 2

Afbeeldende media in
de röntgendiagnostiek

De gevoeligheid wordt gekarakteriseerd met de exposie in lucht (vrij-gemaakte lading/massa-eenheid) ter plaatse van het afbeeldend medium. Bij de röntgenfilm en de film/scherm combinatie wordt bij de vermelde exposie een zwarting $D = 1$ verkregen. De gevoeligheid is energie afhankelijk; de vermelde waarden gelden voor gefilterde spectra gegenereerd met een buisspanning van ca. 70 kV.

(versterkingsschermen); de zwarting van de film komt dan niet rechtstreeks tot stand maar via het luminescentielicht. De grotere gevoeligheid wordt wel gekocht met een grotere onscherpte t.g.v. lichtverstrooiing in de schermen. Dikkere schermen geven een gevoeliger afbeeldend systeem (meer absorptie van de röntgenstraling) maar ook meer onscherpte. Een fundamentele ondergrens voor de benodigde hoeveelheid röntgenstraling wordt gesteld door het geprononceerde kwanteuze karakter van deze straling. Bij fotografische beeldregistratie heeft men daar nog niet zoveel last van, omdat een bepaalde intensiteit vereist is om de film voldoende te zwarten. Bij gebruik van een luminescerend scherm met elektronische helderheidsversterking (beeldversterker), of van een rij met een groot

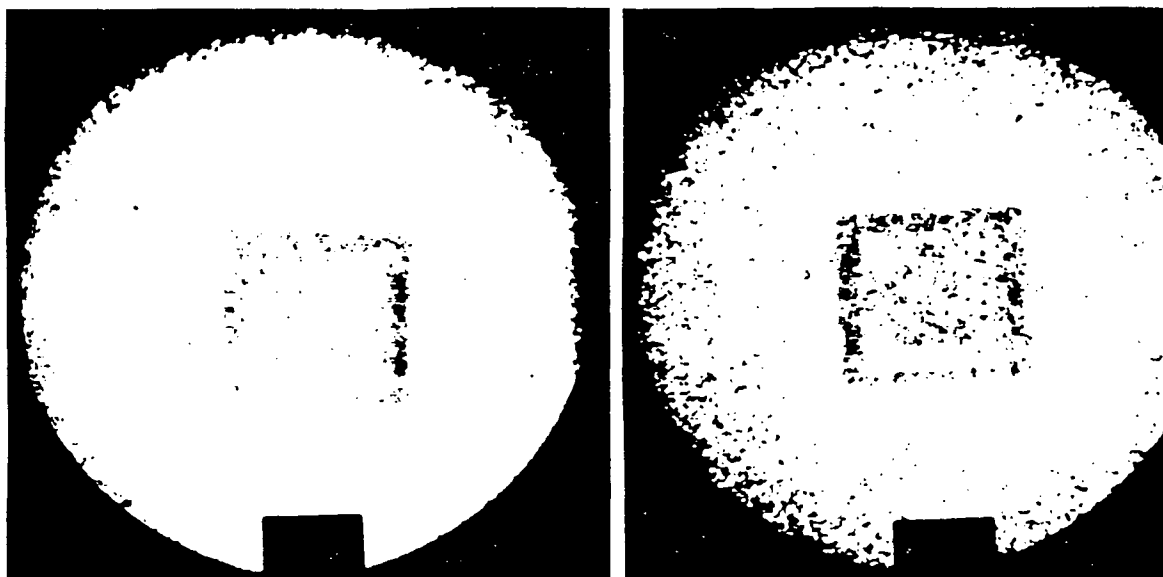


Fig.3. Kwantumruis. Opnamen van een raster van dun loodfolie m.b.v. een beeldversterker/TV combinatie; exposie resp. 6 en 1,5 μ R.

aantal kleine detectoren waarmee het beeldvlak afgescand wordt, kan men in principe beelden met een zéér kleine hoeveelheid straling vervaardigen; te weinig straling geeft echter een onbruikbaar beeld vanwege het te hoge ruisniveau (kwantumruis, zie fig. 3).

b) afbeeldingen met behulp van radioactieve nucliden.

Bij dit type onderzoek wordt radioactief materiaal ingespoten in de patiënt; dit materiaal kan zich op verschillende plaatsen in het lichaam ophopen. Doel van deze afbeeldingstechniek is om de verdeling van het radioactieve materiaal over het lichaam in kaart te brengen. Daartoe wordt een afbeelding gemaakt met behulp van de gammastraling die uitgezonden wordt door de radioactieve nucliden; tegenwoordig gebruikt men hiervoor meestal een gammacamera (fig. 4). Door middel van een collimator (een loden schijf waarin zich een groot aantal nauwe kanalen bevinden, veel meer dan in fig. 4 zijn aangegeven) wordt een afbeelding gevormd op een groot NaI kristal. Elk invallend foton veroorzaakt een lichtflitsje in dit kristal; de plaats van elk flitsje wordt vastgesteld dmv. een aantal fotomultipliers die achter het kristal geplaatst zijn. Fig. 5 geeft een voorbeeld van een afbeelding die op deze wijze is vervaardigd.

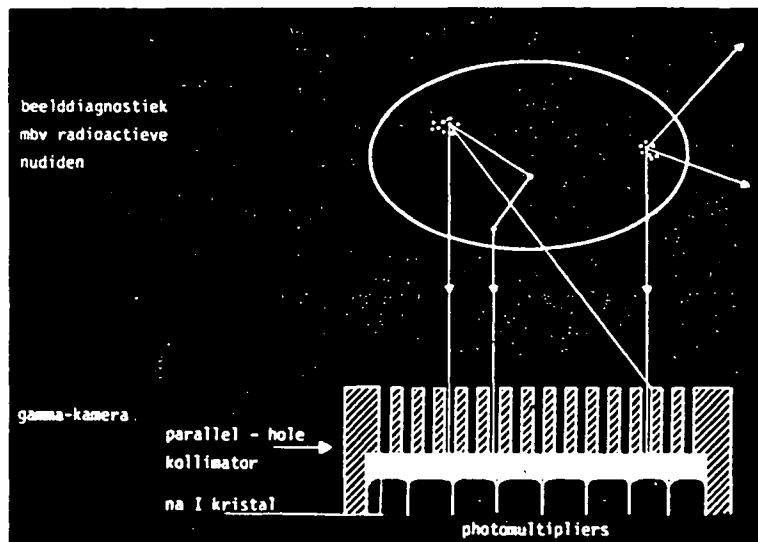


Fig. 4. Gammacamera.

Fig. 5. Een met een gammacamera vervaardigde opname van het hoofd in voor- en zijaanzicht met pathologische activiteitsophopingen.



BIJLAGE I14

c) afbeeldingen met behulp van ultrageluid.

In een piezo-electrisch kristal (transducer) worden ultrageluids-trillingen opgewekt met een frekwentie in de orde van 1 tot 5 MHz. Deze transducer wordt in contact gebracht met de huid. Enige honderden malen per seconde worden geluidspulsen uitgezonden, waarmee telkens de echo van acoustische overgangen in het lichaam wordt opgevangen. De richting waaruit de echo's komen is bekend uit de stand van de transducer; de tijdsduur tussen impuls en echo bepaalt de diepte waarop de echo is ontstaan. Aldus is het mogelijk om de lokalisatie van de echo's in beeld te brengen, waardoor een doorsnede beeld van het lichaamsdeel wordt verkregen.

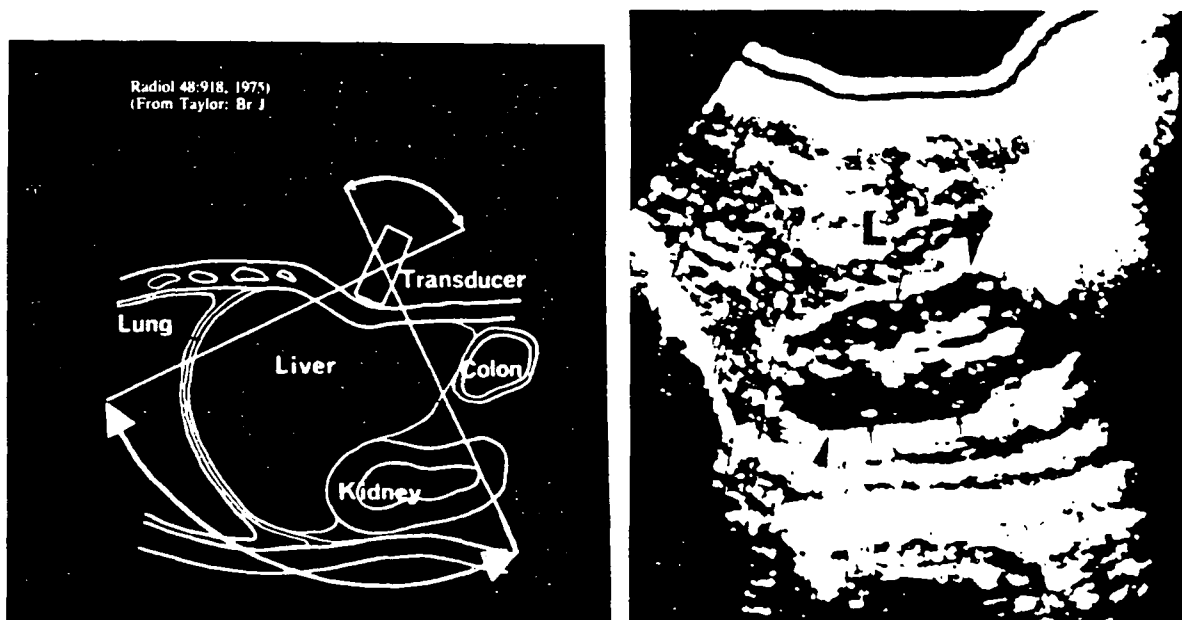


Fig.6. Beeldvorming met ultrageluid.
Links: schema; rechts: afbeelding van een deel van de buik.

d) thermografie

Bij thermografie worden afbeeldingen gemaakt van de temperatuurs-verdeling van de huid en onmiddellijk onder de huid liggende weefsels. Deze techniek wordt slechts weinig toegepast bij enkele speciale toepassingsgebieden.

Beperkingen van conventioneel röntgenonderzoek.

Voor een groot aantal indicaties geven conventionele röntgenfoto's voldoende informatie. Er zijn echter twee belangrijke beperkingen van röntgenfotografie te noemen.

In de eerste plaats worden bij het vervaardigen van een röntgenopname structuren in het menselijk lichaam over elkaar heen geprojecteerd, d.w.z. er is sprake van superpositie. Een tweede nadeel is dat de mogelijkheid tot afbeelden van structuren met een laag contrast beperkt is. Oorzaken hiervan zijn onder meer het contrastbedervende effect van strooistraling (te reduceren door gebruik van speciale collimatoren: strooistralenroosters) en het beperkte dynamische bereik van de conventionele afbeeldende media.

Tengevolge van bovenstaande beperkingen is het b.v. onmogelijk om met een conventionele schedelopname (fig. 14a) enig detail binnen de hersenen (ventrikels, bloedingen, tumoren) zichtbaar te maken. In feite zijn binnen het lichaam slechts 4 verschillende substanties op een röntgenfoto van elkaar te onderscheiden: lucht en luchthoudende weefsels, vet, overige weke delen (spierweefsel, tumorweefsel e.d.) en bot.

Een aantal oplossingen voor bovengenoemde problemen is in de loop der jaren aangedragen. Rond 1930 is door een aantal onderzoekers, waaronder onze landgenoten Ziedses des Plantes en Bortelink, een methode ontwikkeld waarmee het mogelijk is - door gebruik te maken van een bewegende röntgenbuis en een bewegende film/versterkingsschema combinatie - één bepaald vlak in het objekt met maximale scherpheid af te beelden,

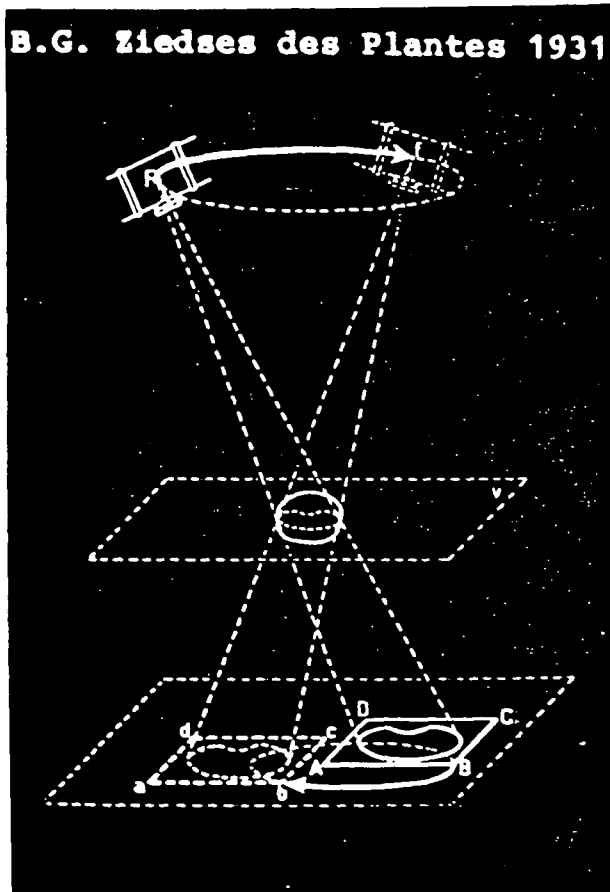


Fig.7. Schema conventionele tomografie.

Zowel de röntgenbuis als de film beweegt; slechts één vlak wordt scherp afgebeeld.

BIJLAGE I14

terwijl de structuren boven en onder het instelvlak vervaagd worden (conventionele tomografie, fig. 7). Een probleem is echter dat rest-schaduwen aanwezig blijven; bovendien verbetert de zichtbaarheid van details met gering contrast niet.

Computertomografie (CT)

Met behulp van een CT scanner -waarvan het eerste klinisch bruikbare exemplaar ruim tien jaar geleden werd ontwikkeld door Hounsfield - werd het voor het eerst mogelijk om doorsnede beelden van het menselijk lichaam te vervaardigen, waarbij ook zéér geringe contrasten in het vlak van afbeelding zichtbaar zijn.

De geometrie van een CT scanner kan gezien worden als limietgeval van de geometrie van een conventionele tomograaf (fig. 8). Bij een CT-scanner wordt alleen de plak die afgebeeld moet worden doorstraald. Rechtstreekse afbeelding vindt nu niet meer plaats; de intensiteit van de doorgelaten straling wordt gemeten met één of meer detectoren.

Vanwege de geometrie kan géén superpositie meer plaats vinden van buiten de plak gelegen structuren. Wél vindt natuurlijk superpositie in de af te beelden plak plaats (langs de bundel); het is daarom noodzakelijk uit de verkregen informatie de verzwakking voor röntgenstraling van elk volume element te reconstrueren.

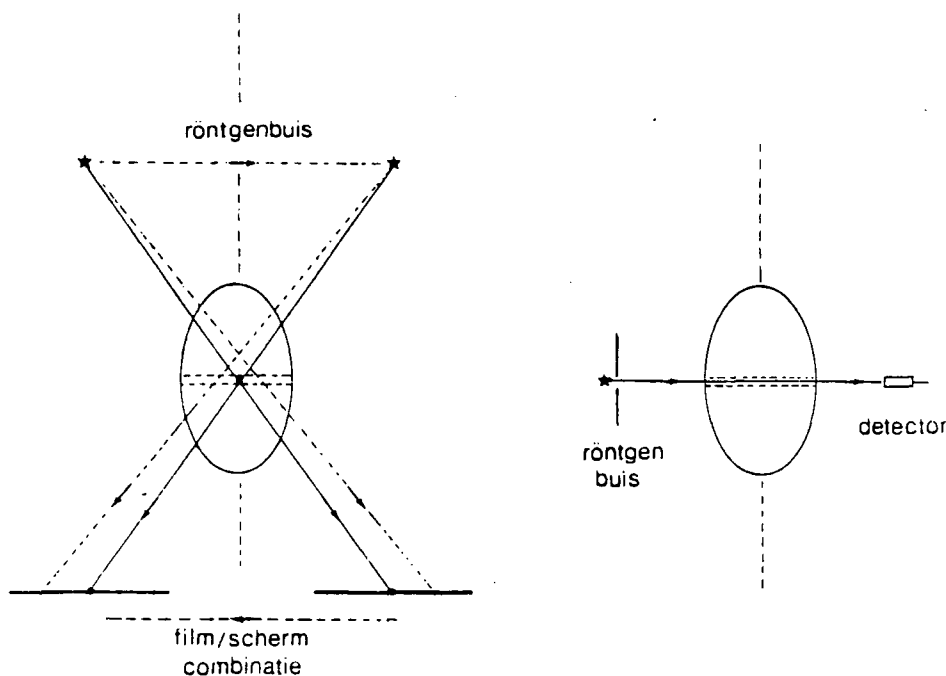
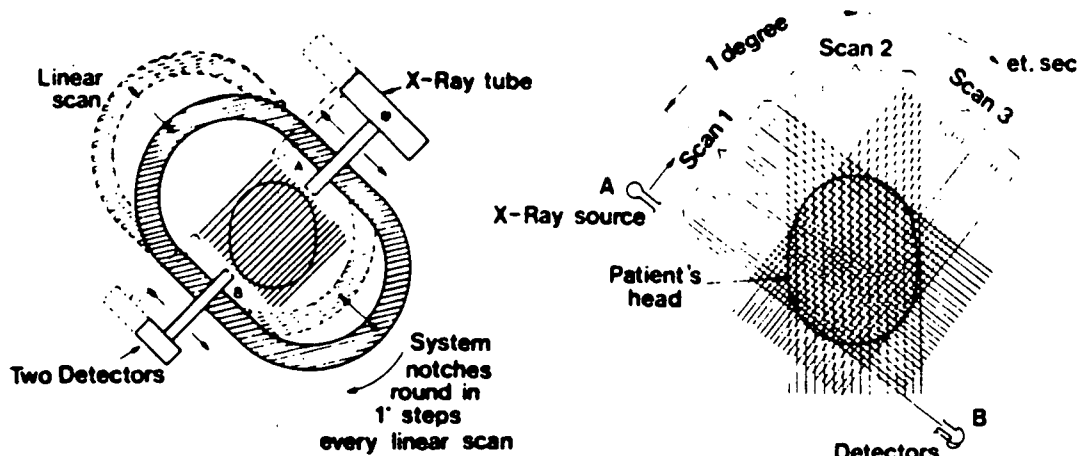


Fig. 8. Geometrie conventionele tomografie (links) en computertomografie (rechts). In beide gevallen beschrijft de centrale straal van de röntgenbundel een kegeloppervlak; bij conventionele tomografie worden openingshoeken van de kegel gebruikt tussen 5° en 60° ; bij CT is de kegel ontaan (openingshoek 90°).

In de eenvoudigste uitvoering bestaat een CT-scanner uit een röntgenbron en één detector. De bundel van de röntgenbron -vrijwel altijd een röntgenbuis- wordt gekollimeerd zodat een smalle bundel overblijft, met een hoogte van b.v. 10 mm -de dikte van de af te beelden plak- en een breedte van b.v. 1 mm. Door translatie en rotatie van de combinatie röntgenbron-detector wordt een groot aantal transmissie metingen verricht uit vele richtingen (fig. 9).



MECHANICAL SCANNING FRAME

SCANNING SEQUENCE

Fig.9. Schema van de eerste CT-scanner (EMI Mark 1, 1972)

Per vlak wordt slechts één detector gebruikt; de tweede detector maakte het mogelijk gelijktijdig een aangrenzende plak op te meten.

Ten behoeve van de reconstructie wordt de af te beelden plak onderverdeeld in een matrix van volumeelementjes (b.v. een matrix van 512×512 of 256×256 volumeelementjes, elk van b.v. $1 \times 1 \times 10 \text{ mm}^3$), waarvan de verzwakkingscoëfficiënt constant wordt verondersteld. Een transmissiemeting levert de lijnintegraal op van de verzwakkingscoëfficiënten, gemiddeld over de bundel doorsnede, of in de discrete vorm, de som van de verzwakkingscoëfficiënten van de volumeelementjes langs de bundeldoorsnede (fig. 10). We hebben dan dus één vergelijking met b.v. 256 onbekenden. Alle transmissiemetingen tezamen leveren een groot aantal onbekenden. Het probleem is nu deze vergelijkingen op te lossen; de verzwakkingscoëfficiënten kunnen dan afgebeeld worden als verschillende grijswaarden in een beeldmatrix. In de eerste commerciële CT-scanner (EMI Mark 1) werd het reconstructie probleem op alternatieve wijze opgelost (fig. 11). Tegenwoordig wordt meestal een andere methode gebruikt, n.l. gefilterde terugprojectie. Het idee om door terugprojecteren een benadering van een doorsnede beeld te verkrijgen bestond al veel langer. In 1938 kreeg Gabriel Frank patent op deze methode. Bij dit "gewone" terugprojecteren wordt een beeld van de

BIJLAGE I14

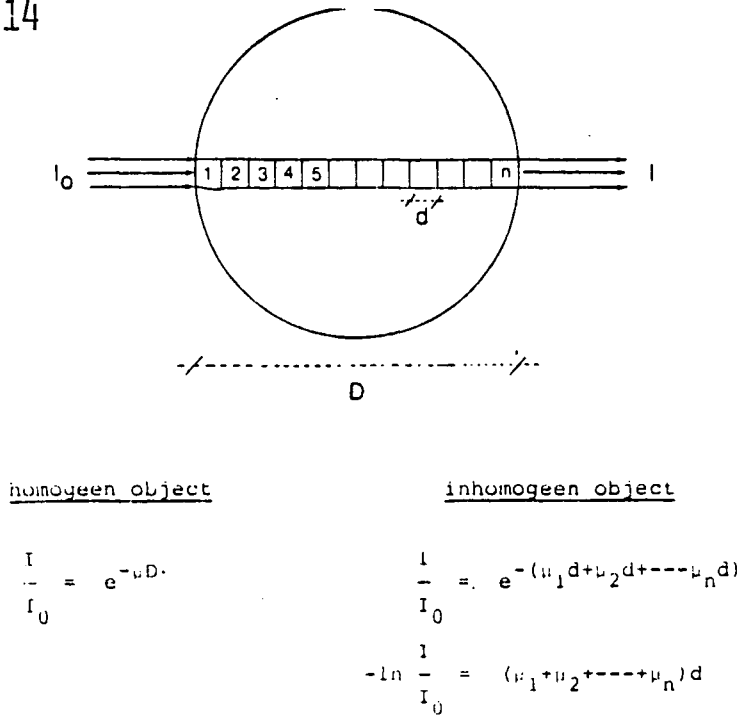


Fig. 10. Verzwakking van een bundel röntgenstraling. Voor monoenergetische röntgenstraling en een homogeen object is de verzwakking exponentieel, met verzwakkingscoëfficiënt μ_1 . Voor water en weefsel is bij de gemiddelde fotonenergie die bij CT-scanners wordt gebruikt (ca. 70 keV) $\mu \approx 0,2 \text{ cm}^{-1}$

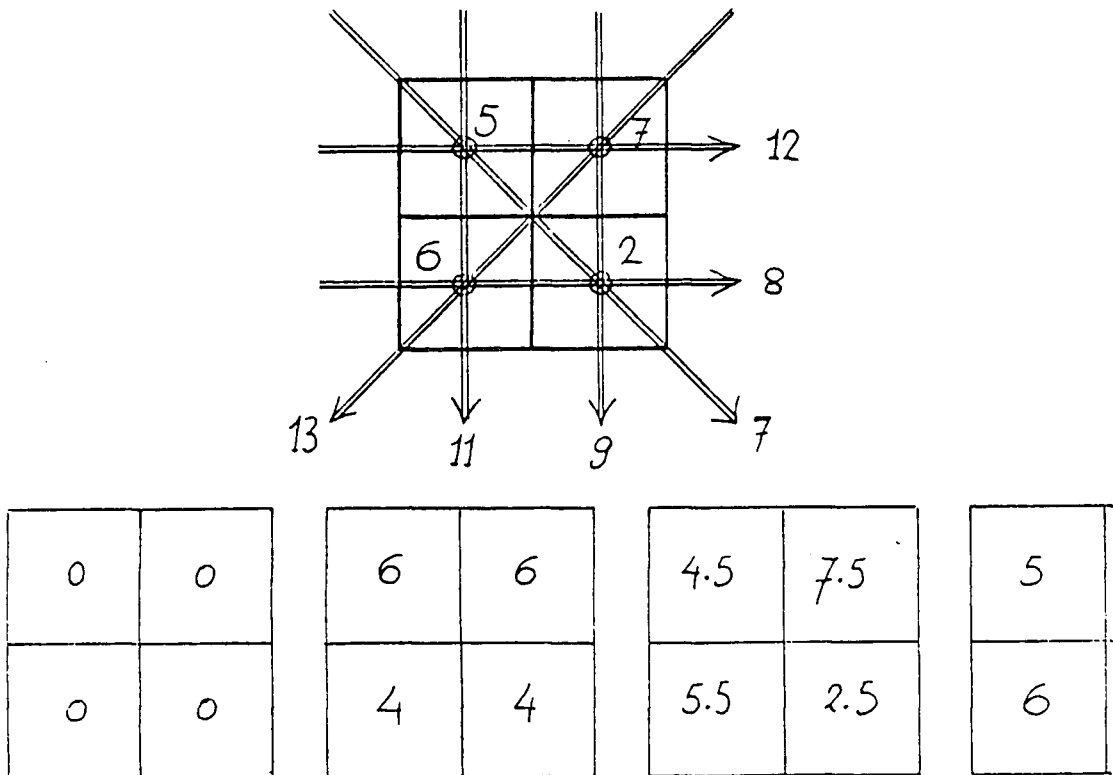
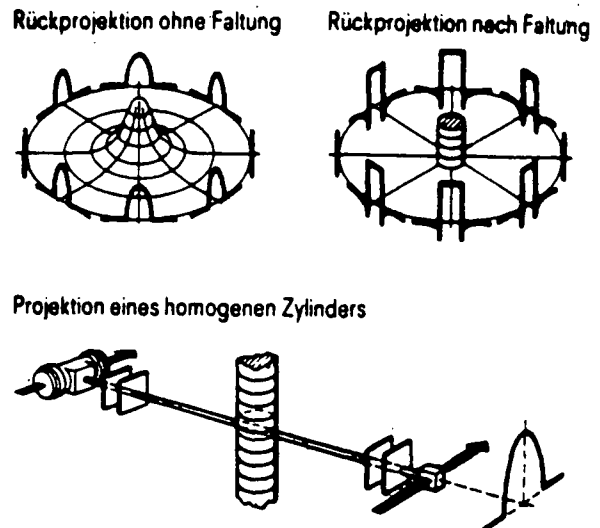


Fig. 11. Eenvoudig voorbeeld van iteratieve reconstructie. Boven: "meting", onder "reconstructie". Aanvankelijk worden alle waarden ondersteld. Achtereenvolgens worden de horizontale, diagonale en vert metingen verwerkt. Telkens worden de waarden langs een lijn zoveel verkleind dat de som van de waarden langs de lijn gelijk worden aan de gemiddelde waarden. In dit voorbeeld is al convergentie bereikt na alle metingen te hebben gebruikt; in de praktijk moet de reconstructie cyclus een aantal keren doorlopen worden.

integraal "uitgesmeerd" over het beeldvlak, dwz. de waarde van elk beeldelement langs de lijn wordt opgehoogd met een waarde die evenredig is met de waarde van de lijn integraal. Een belangrijk nadeel is echter dat de details in de opname uitgesmeerd worden (fig. 12 linksboven). Wanneer echter elke lijnintegraal eerst geconvolueerd wordt met een speciale filterfunctie kan met behulp van terugprojecteren wél een correcte reconstructie verkregen worden (fig. 12 rechtsboven). Deze methode - die rechtstreeks of via fouriertransformaties gerealiseerd

Fig.12. Een profiel, bestaande uit lijnintegralen van de verzwakkingscoëfficiënt van een homogene cylinder (onder), wordt teruggeprojecteerd (boven). Vanwege de cirkelsymmetrie zijn de profielen uit alle richtingen gelijk. Rechtstreeks terugprojecteren levert een 'uitgesmeerd' beeld op (linksboven); terugprojecteren van gefilterde profielen (rechtsboven) levert wel een correct beeld op.



kan worden- heeft het grote voordeel met behulp van speciale hardware zeer snel uitgevoerd te kunnen worden. Zo is het tegenwoordig mogelijk dat het reconstructieproces plaats vindt tijdens de scan, zodat vrijwel onmiddellijk na afloop van de scantijd de beeldreconstructie klaar is. Met een CT-scanner worden doorsnede beelden verkregen zonder superpositie, waarmee veel geringere contrasten zichtbaar gemaakt kunnen worden dan met conventionele röntgentechnieken mogelijk was (fig. 13 en 14). Verschillen in verzwakkingscoëfficiënt van slechts enkele promilles worden duidelijk zichtbaar.

De technische ontwikkeling van CT-scanners is de afgelopen tien jaar bijzonder snel gegaan. Niet alleen de beeldkwaliteit is aanzienlijk verbeterd (vgl. fig. 14 en 15), ook de scansnelheid is veel kleiner geworden. Zo duurde het vervaardigen van een opname van het hoofd in 1972 (EMI Mark 1) 5 minuten, waarna nog 5 minuten reconstructie volgden. Een huidige CT-scanner kan opnamen vervaardigen in 5 seconden of minder, waarbij in deze tijd b.v. 720 profielen worden opgemeten met elk b.v. 512 meetpunten, dwz. ruim 350000 transmissiemetingen!

BIJLAGE 114

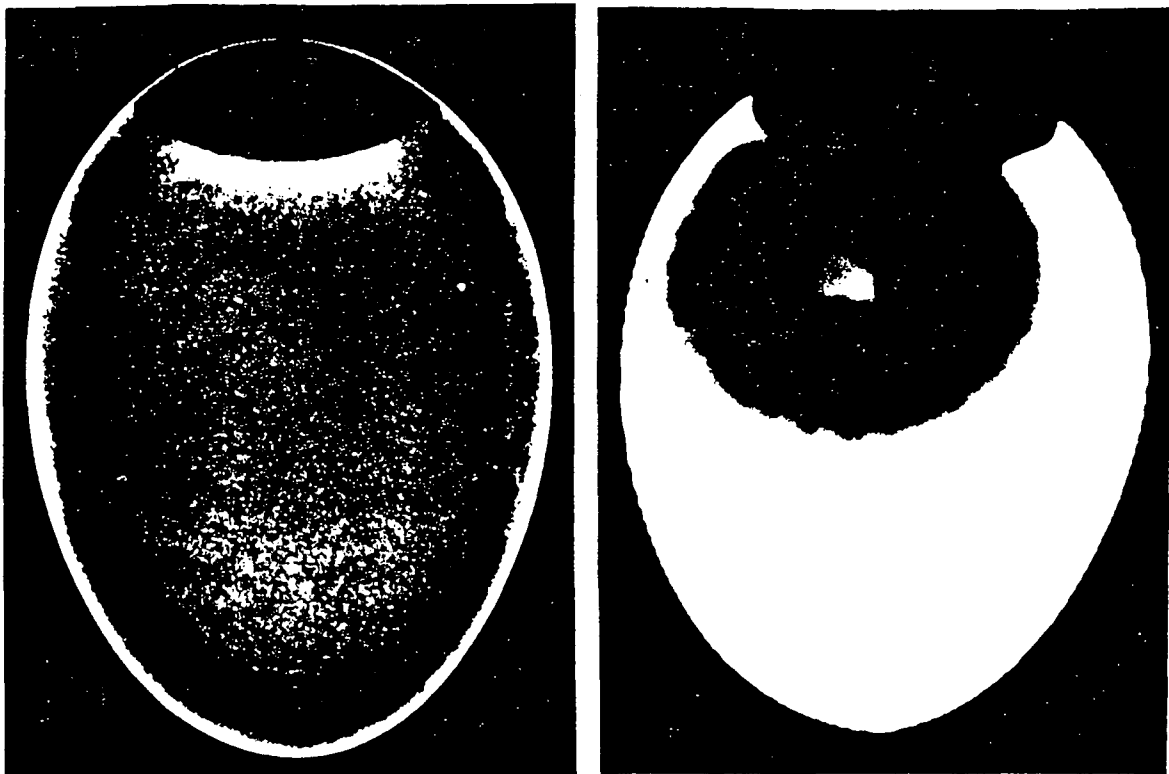


Fig.13. Röntgenfoto (links) en CT-scan (rechts) van een ei.
Op de CT-scan is de dooier duidelijk zichtbaar. Het deel van de dop boven de luchtkamer is op de CT-scan wel aanwezig, maar is niet zichtbaar op de foto vanwege de gekozen contrastinstelling (afbeelding van verzwakkingscoëfficiënten op grijstinten).

De grote scansnelheid is mogelijk geworden door gebruik te maken van een om de patiënt roterende röntgenbuis die röntgenstraling uitzendt in een waaivormige bundel (fanbeam) met een dikte die gelijk is aan de dikte van de af te beelden plak, en een groot aantal detectoren. De meeste CT-scanners zijn tegenwoordig van de 3e en 4e generatie. Het verschil tussen beide types is dat de röntgenstraling hetzij wordt gedetecteerd met behulp van een groot aantal (b.v. 512) meedraaiende detectoren (3e generatie, fig. 15), hetzij met behulp van een ring met een meestal nog groter aantal (b.v. 1200) stilstaande detectoren (4e generatie, fig. 17).

Alhoewel CT-scanners gebouwd zijn met een minimale scantijd van 1,5 seconde voor 360° rotatie, zijn vanwege mechanische factoren niet veel kortere scantijden te verwachten. Een zeer korte tijd is wel te realiseren met het nieuwste apparaat op dit gebied (fig. 18), met een speciale röntgenbuis waarvan de anode in een halve cirkel om de patiënt heen staat. Een kortste scantijd van 33 ms is aangekondigd, kort genoeg om een kloppend hart af te beelden zonder bewegingsonscherpte.

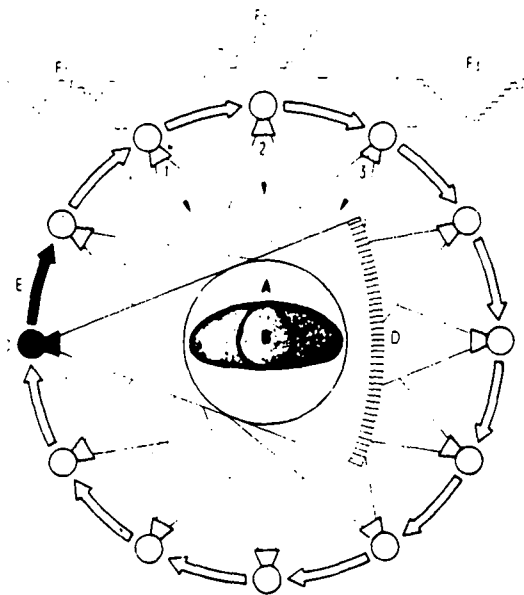
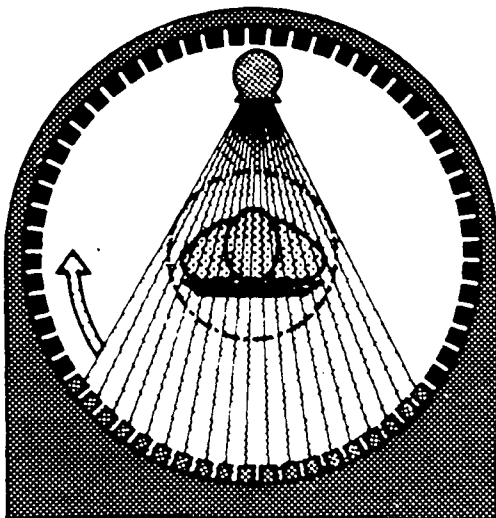


Fig.16. Principe 3^e generatie scanner. Roterende röntgenbuis en stationaire detectoren.

rotation with stationary
circular detector array



principle of
the inverse fan beam

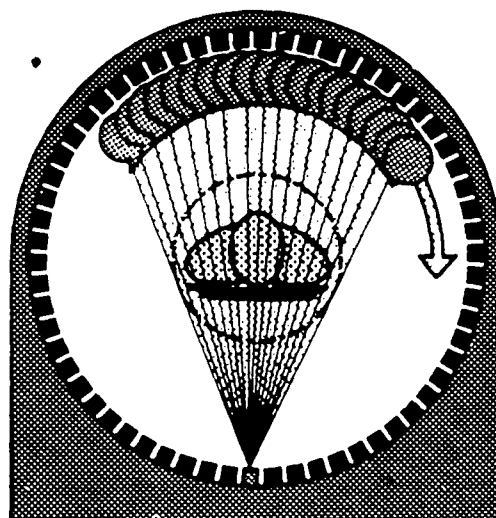


Fig.17. Principe 4^e generatie scanner. Roterende röntgenbuis en stationaire detectoren.

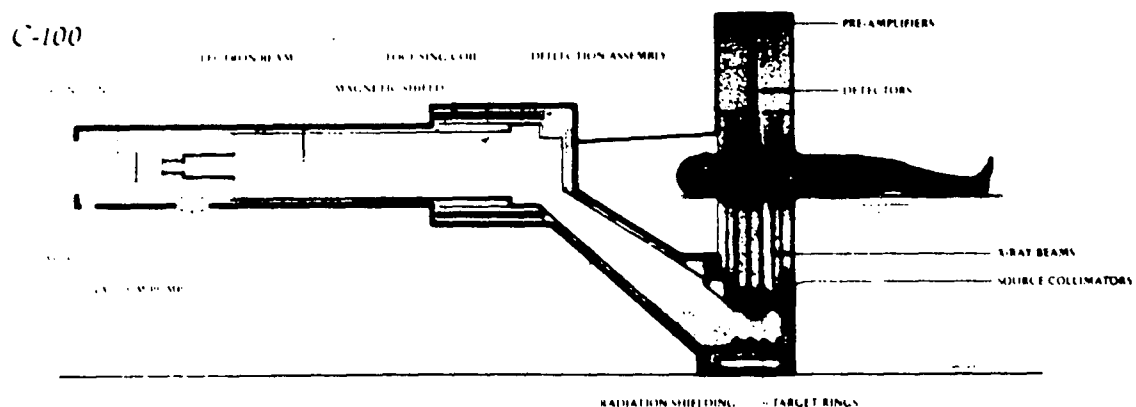


Fig.18. CT-scanner met een speciale röntgenbuis: de anode bevindt zich in een halve cirkel om de patient heen. Kortste scantijd: 33 ms!

BIJLAGE I14



Fig.14. Conventionele röntgen-
foto van het hoofd (links)
2 doorsnede beelden van het
hoofd op verschillende niveau's,
verkregen met een röntgen CT-
scanner (onder)

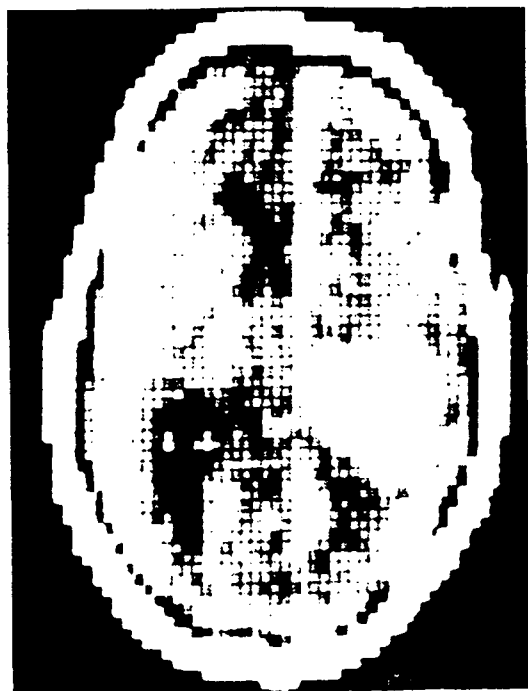
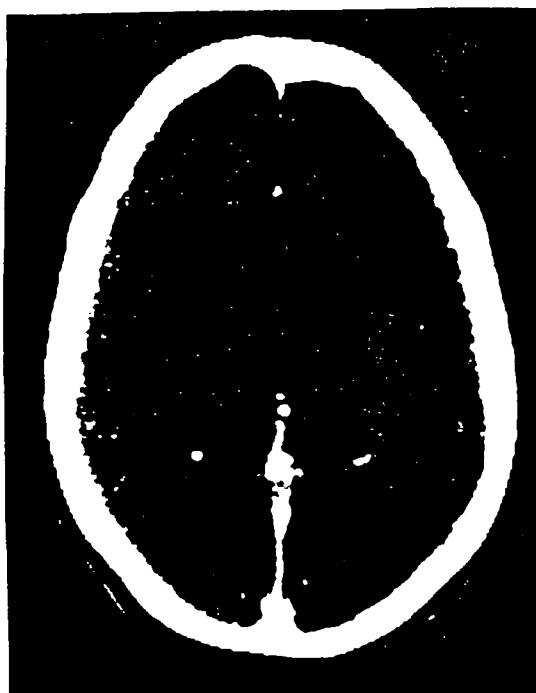


Fig.15. (Links) CT-opname uit 1972.
(80 x 80 matrix)

Andere reconstructie technieken.

In tabel 1 was al aangegeven dat reconstructietechnieken ook bij andere modaliteiten worden toegepast. Bij nucleair geneeskundig onderzoek wordt het vervaardigen van doorsnede beelden al een aantal jaren klinisch gebruikt (ECAT: emission computer assisted tomography); toepassingen m.b.v. ultrageluid zijn in een experimenteel stadium.

De meest spectaculaire ontwikkeling van de laatste jaren is echter het vervaardigen van doorsnede beelden m.b.v. kernspinresonantie (NMR), waarbij onder meer gebruik gemaakt wordt van reconstructietechnieken die voor röntgen CT ontwikkeld zijn. Bij NMR-CT wordt het lichaam geplaatst in een zeer sterk magneetveld (inductie tussen 0,15 en 1,5 T). Door radiofrequentie straling met een geschikt gekozen frequentie in te stralen kunnen b.v. de protonen in het lichaam geëxciteerd worden; bij het terugkeren naar de evenwichtssituatie wordt een signaal uitgezonden waarvan de sterkte ondermeer afhankelijk is van de proton concentratie en van twee relaxatietijden (T_1 en T_2).

Met behulp van hulpvelden kan plaatscodering tot stand gebracht worden, waarna doorsnede beelden gereconstrueerd kunnen worden. De grijswaarde van een beeldelement wordt bepaald door de protonconcentratie en relaxatietijden van de protonen in het corresponderende volume element. In tegenstelling tot de situatie bij röntgen CT is het met deze techniek eenvoudig mogelijk om het vlak van doorsnede elke gewenste orientatie in het lichaam te geven (fig. 19). Een ander voordeel is dat niet met ioniserende straling gewerkt wordt; een nadeel is dat tot nu toe de opname tijd om een doorsnede beeld te vervaardigen betrekkelijk lang is (in de orde van 1 minuut).

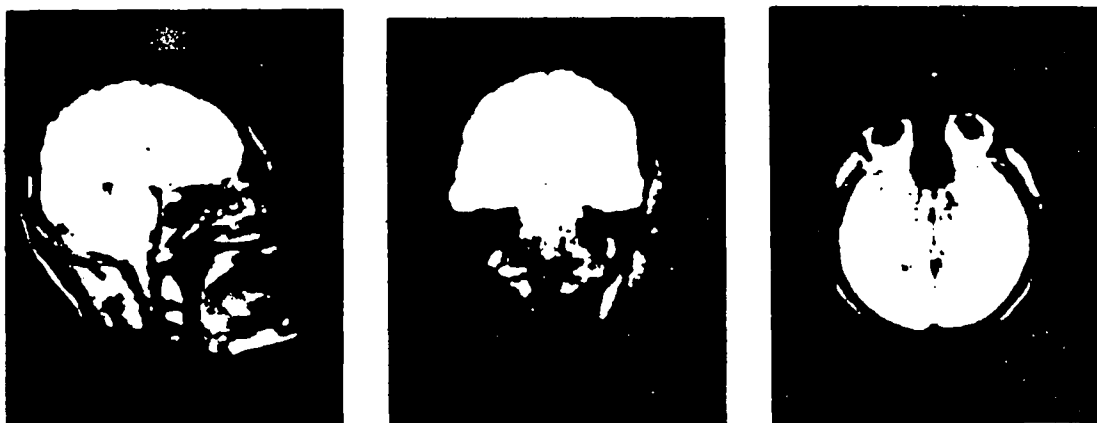


Fig.19. Doorsnedebeelden door het hoofd, verkregen met kernspintomografie, in drie verschillende onderling loodrechte vlakken.

BIJLAGE I14

Literatuur

- 1) M.M. Ter-Pogossian: The Physical Aspects of Diagnostic Radiology.
Harper en Row, 1969 (algemeen; ietwat verouderd)
- 2) L.A. Shepp en B.F. Logan: The fourier reconstruction of a head section.
IEEE Transactions on nuclear science NS-21 (1974)
21-43 (gefilterde terugprojectie; geeft onder
meer een eenvoudig Fortran programma).
- 3) H.J. Scudder: Introduction to Computer Aided Tomography.
Proceedings of the IEEE 66(1978) 628-637
- 4) A.C. Kak: Computerized Tomography with X-ray, emission and ultrasound
sources: Proceedings of the IEEE 67(1979) 1245-1272.
- 5) I.L. Pykett: NMR Imaging in Medicine.
Scientific American mei 1982 78-88.
- 6) P.R. Locher: Tomografie met behulp van protonspin resonantie.
Philips technisch tijdschrift 41(1983) 73-89