STRALINGSHYGIËNE VOOR DUMMY'S

Deel 3

STRALINGSHYGIËNE

bij

RADIOACTIEVE STOFFEN

en

RÖNTGENTOESTELLEN

W.J. van Gaalen

Bevat informatie welke vereist is voor de verantwoordelijke deskundige
op het niveau 5 van de Kernenergiewet.

∞

SAMENVATTING

Doelgroep

"Stralingshygiëne bij Radioactieve Stoffen en Röntgentoestellen" is bedoeld als zelfstudie voor leerlingen en studenten met belangstelling voor de Stralingshygiëne. Ook voor hen die met enige vorm van straling uitzendend materieel of toestellen in aanraking kunnen komen. Zoals bij werkzaamheden op het gebied van bevoorrading, veiligheid, onderhoud en of het verzamelen van materieel dat radioactieve stoffen bevat.

Leerstof

De leerstof, op stralingsdeskundigheid niveau - 5 van de Kernenergiewet, wordt in de vorm van een cursus niet vanuit de puur theoretische kant benaderd, maar richt zich op de praktijksituaties, zoals deze zich (kunnen) voordoen binnen een organisatie of een “historische” verzameling.

Opzet

De leerstof is gebaseerd op de cursus TSD 99.9383 van 1 september 1996. Deze door mij ontwikkelde Defensiecursus werd afgesloten met een Multiple Choice Examen. Om een bredere doelgroep te kunnen bedienen is alle bedrijfsgevoelige informatie hieruit verwijderd. De cursus is nu opgezet in de veronderstelling dat de lezer al enige basiskennis bezit van de wiskundige schrijfwijze en natuurkundige eenheden, zoals deze in Bijlage A is vermeld.

In deze cursus wordt eerst ruime aandacht wordt geschonken aan wettelijke bepalingen en voorschriften, de atoomtheorie, radiologische eenheden, biologische effecten en de natuurlijke of achtergrondstraling. Vervolgd wordt met het behandelen van het detecteren van straling, de te nemen veiligheidsmaatregelen, de ongevallenprocedure, veel voorkomende stralingsbronnen, werkzaamheden aan radioactief materiaal, de radioactieve afvalstromen en het veilig gebruik van röntgentoestellen.

De minimaal noodzakelijke kennisstof wordt met een **!** voor de kantlijn en/of met cursieve tekst gemarkeerd. Extra leerstof is als “**fac:**” gemarkeerd. Tevens zijn in Bijlage B opgenomen de nodige verklaringen van de begrippen, vreemde woorden en gebruikte afkortingen. Ter oefening is het Multiple Choice Examen als Bijlage C gevoegd.

Veel leesplezier, Willem!

Nota Bene:

Dit uitreikstuk wordt beschikbaar gesteld voor persoonlijk gebruik en zelfstudie. Het maken van kopiëren voor commerciële doeleinden is niet toegestaan. Daarom mag niets uit deze tekst commercieel worden gebruikt zonder toestemming van de auteur.

0-0-0

INHOUDSOVERZICHT

Nr	Hoofdstuk	blad
	SAMENVATTING	1
	INHOUDSOVERZICHT	2
1.	**WETTELIJKE BEPALINGEN EN VOORSCHRIFTEN**	5
1.1	- Het ontstaan van wettelijke bepalingen	
1.2	- Wettelijke bepalingen en ioniserende straling	
1.3	- I.C.R.P. - normen	
1.4	- Definitiebesluit Kernenergiewet	
1.5	- Besluit stralenbescherming	6
1.6	- Vergunningen en autorisaties	8
1.7	- Taken commandant / Directeur	9
1.8	- Taak van de verantwoordelijk deskundige	
1.9	- Radiologische werkzaamheden	10
1.10	- Geneeskundige keuringen	11
1.11	- Stralingscontrole	12
1.12	- Apparaten of instrumenten van het aangewezen type	
1.13	- Radioactieve stoffen waarvoor geen vergunning of autorisatie is vereist bij het aanwenden, doch alleen bij vervoer	13
1.14	- Kernenergiewet dossier	
1.15.	- Toezichthouder	
2.	**BOUW VAN DE MATERIE**	14
2.1	- Materie	
2.2	- Moleculen	
2.3	- Atomen	
2.4	- Elementen	
2.5	- Periodiek systeem der elementen	15
2.6	- Verbindingen van elementen	16
2.7	- Bouw van het atoom	17
2.8	- Atoommodel	
2.9	- Standaard schrijfwijze	18
2.10	- Proton/neutron verhouding	
2.11	- Isotopen 19	
2.12	- Epiloog	20
3.	**RADIOACTIVITEIT**	21
3.1	- De ontdekking van radioactiviteit	
3.2	- Eigenschappen van radioactiviteit	
3.3	- Soorten straling	
3.4	- Transmutatie	23
3.5	- Het golfverschijnsel	
3.6	- Dualiteit van elektromagnetische golven	24
3.7	- Het verband tussen frequentie, golflengte en energie	
3.8	- De elektronvolt	25
3.9	- Halveringstijd	26
3.10	- In de natuur voorkomende uraniumisotopen	
3.11	- Radioactieve families	
3.12	- Wisselwerking met materie	27

INHOUDSOVERZICHT

Nr	Hoofdstuk	blad
4.	**RADIOLOGISCHE EENHEDEN**	29
4.1	- Activiteit	
4.2	- Blootstelling aan stralingvelden	30
4.3	- Absorptie van energie	31
4.4	- Biologisch effect (stralingsschade)	33
4.5	- Bronconstante en activiteit	34
4.6	- Relatieve Biologische Effectiviteit (RBE)	35
4.7	- Resumé	36
5.	**BIOLOGISCHE EFFECTEN**	**38**
5.1	- Biologische effecten van ioniserende straling	
5.2	- Somatische schade	
5.3	- Genetische schade	42
5.4	- Dosislimieten	43
5.5	- Normering van risico's	44
5.6	- Risicoschatting	46
5.7	- ICRP-risicofactoren	48
5.8	- Individuele risico's	
5.9	- Epiloog	49
6.	**NATUURLIJKE OF ACHTERGRONDSTRALING**	**50**
6.1	- Natuurlijke straling	
6.2	- Straling uit de aardkorst	
6.3	- Radioactieve stoffen in de atmosfeer	51
6.4	- Stralingsbelasting in de atmosfeer	52
6.5	- Achterhaalde toepassingen van radioactieve stoffen	53
6.6	- Stralingsbelasting in Nederland	54
6.7	- Resumé stralingsgevaar	55
7.	**DETECTIE VAN STRALING**	**56**
7.1	- Inleiding	
7.2	- De detector	
7.3	- De signaalverwerking	60
7.4	- De uitlezing	
7.5	- Nuleffect, dode tijd en telstatistiek.	61
7.6	- Persoonlijke dosisregistratiemiddelen	62
8.	**STRALINGBESCHERMING**	**65**
8.1	- Inleiding	
8.2	- Externe bestraling	
8.3	- Interne bestraling	67
8.4	- Eigenschappen van lichtgevende verf	68
8.5	- Merktekens	69
8.6	- Veiligheidsinstructie	70
8.7	- Procedures	71

INHOUDSOVERZICHT

Nr	Hoofdstuk	blad
9.	**TOEPASSINGEN VAN RADIOACTIEVE STOFFEN**	**73**
9.1	- Inleiding	
9.2	- Radiotoxiciteit	
9.3	- Aanschaf en gebruik van radioactieve stoffen	
9.4	- Toepassingen	74
10.	**WERKZAAMHEDEN AAN RADIOACTIEF MATERIEEL**	**76**
10.1	- Algemene regels	
10.2	- Controle op aanwezigheid	
10.3	- Bergplaatsen / opslag	77
10.4	- Het vervoer	78
10.5	- Deskundigheidseisen voor het personeel	80
11.	**RADIOACTIEF AFVAL**	**81**
11.1	- Inleiding	
11.2	- Afvoer	
11.3	- Verwerking	82
12.	**EIGENSCHAPPEN EN GEBRUIK VAN RÖNTGENSTRALING**	**85**
12.1	- Fysische eigenschappen van röntgenstraling.	
12.2	- Constructie röntgenbuis	86
12.3	- Het röntgentoestel	87
12.4	- Beeldvorming op de röntgenfilm	
13.	**VEILIG WERKEN MET RÖNTGENTOESTELLEN**	**90**
13.1	- Persoonlijke bescherming van de radiologische werker	
13.2	- Persoonlijke bescherming van de patiënt	92
13.3	- Storingsmelding.	95
13.4	- Veiligheidsinstructie voor gebruikers van een röntgentoestel	
Bijlage A, Basiskennis wis- en natuurkunde		96
1.	Inleiding	
2.	Wiskundige eenheden	
3.	Natuurkundige eenheden	98
4	Elektriciteit en Magnetisme	100
Bijlage B, Begrippen, vreemde woorden en afkortingen, betreffende kernenergie, kernmaterieel en toestellen		108
Bijlage C, Multiple Choice Examen		117
Bijlage D, Het Tsjernobyl ongeval, volgorde der gebeurtenissen		127

0-0-0

Origineel van juli 1996; revisie zomer 2013

../SHvD_3_SH RA-stoffen en Röntgentoestellen-99.9383 -v2.docx.

1. WETTELIJKE BEPALINGEN EN VOORSCHRIFTEN

1.1 Het ontstaan van wettelijke bepalingen

Wanneer van staatswege de behoefte ontstaat bepaalde zaken te regelen, wordt overgegaan tot het vaststellen van een wet. Deze wet wordt ingediend bij de Tweede en Eerste Kamer en uiteindelijk door Z(H).M. de Koning(in) ondertekend en gepubliceerd in het Staatsblad (Stb). Een wet is vaak een raamwet; dit wil zeggen dat de praktische invulling later, door de betrokken minister wordt vastgesteld via de zogenaamde algemene maatregelen van bestuur.

1.2 Wettelijke regelingen voor ioniserende straling

Voor ioniserende straling bestaan deze regelingen uit:

- de wet, die ten grondslag ligt aan de wettelijke bepalingen voor ioniserende stralen, is de Kernenergiewet van 21 februari 1963, gepubliceerd in Stb 82 van 1963.
- de voornaamste algemene maatregelen van bestuur, gepubliceerd in de vorm van uitvoeringsbesluiten, welke verderop behandeld worden, zijn:
  - Definitiebesluit Kernenergiewet (Stb 358, 1969),
  - Besluit stralingsbescherming Kernenergiewet (Stb 465, 1985),
  - Vrijstellingsbesluit landsverdediging Kernenergiewet (Stb 476, 1969)

N.B. Met het Staatsblad 514 van 1969 wordt uiteindelijk de Kernenergiewet met zo'n 20 algemene maatregelen van bestuur van kracht verklaard met als ingangsdatum 1 januari 1970. **Let Op:** E.e.a. is gewijzigd conform het Besluit van 23 oktober 2017, houdende vaststelling van regels ter bescherming van personen tegen de gevaren van blootstelling aan ioniserende straling (Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming).

Interne voorschriften. De voorgaande wettelijke bepalingen zijn juridisch gesteld en lezen daardoor nogal moeilijk. Daarom moet een **organisatie haar eigen voorschriften opstellen**. Zo geldt voor de krijgsmacht de "Handleiding Stralingshygiëne Defensie". (MP35-311).

1.3 I.C.R.P.-normen

De opgesomde wetten en uitvoeringsbesluiten zijn gebaseerd op de internationaal geaccepteerde normen, die worden vastgesteld en geëvalueerd door het Internationaal Committee on Radiological Protection (ICRP). De normen zijn gebaseerd op:

- Rechtvaardiging
- Het ALARA-principe / Optimalisatie
- Dosislimieten

1.4 Definitiebesluit Kernenergiewet

Hierin worden definities gegeven van de eenheid van ionisatie in lucht, geabsorbeerde dosis (Gy) en dosisequivalent (Sv), welke in Hoofdstuk 4 worden behandeld. De belangrijkste definities en begrippen worden onder "Begrippen vreemde woorden en Afkortingen" vermeld in Bijlage B.

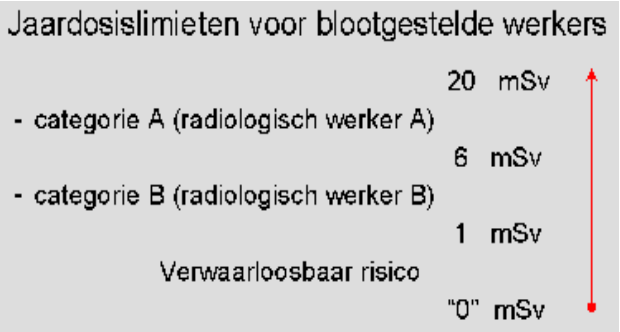
1.5 Besluit stralenbescherming Kernenergiewet

Dit besluit geeft richtlijnen tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming van de gezondheid der bevolking en werkers tegen de aan ioniserende straling verbonden gevaren. De voorschriften van de organisatie moeten hierop zijn gebaseerd.

Stralingsbelasting buiten het perceel. De stralingsbelasting buiten het perceel ten gevolge van de directe straling mag niet meer bedragen dan 1,5 mSv per jaar. Dit komt overeen met een dosisequivalenttempo bij 168 uur per week van 0,2 µSv per uur.

Dosisbeperking. Het dosisequivalent dat een blootgestelde werker (vroeger: radiologisch werker) ten hoogste (de dosislimiet) mag ontvangen is:

a. Bij blootstelling van **het gehele lichaam**: 20 mSv per jaar;
b. Bij blootstelling van de ooglens: 20 mSv per jaar;
c. Bij blootstelling van de huid, handen, onderarm, voeten en enkels: 500 mSv per jaar.
d. Tevens mag het effectief dosisequivalent 20 mSv per jaar niet overschrijden. Hierbij mag in geen van de daarvoor in aanmerking komende organen het gemiddelde dosisequivalent meer bedragen dan 500 mSv per jaar.
e. In bijzondere gevallen mag (met toestemming van de Directeur) slechts éénmaal in het leven van een mannelijk persoon de bovengenoemde waarde met een factor 2 worden vermenigvuldigd.



Figuur 1.1. Jaardosislimieten voor blootgestelde werkers.

Categorie-indeling personeel. In geval van werkzaamheden met radioactieve stoffen bevattend materieel (kernmaterieel) en/of ioniserende straling uitzendende toestellen kan men spreken van *radiologische werkzaamheden*. De belangrijkste punten uit de handleiding zijn (zie ook figuur 1.1):

a. Het personeel dat bij radiologische werkzaamheden meer dan 6 mSv kan ontvangen wordt ingedeeld in de categorie A en wordt jaarlijks periodiek gekeurd.
b. Het personeel dat meer dan 2 mSv, doch minder dan 6 mSv kan ontvangen wordt ingedeeld in de categorie B.

c. Voor de categorie **A** en **B** is het dragen van een persoonlijk dosisregistratie-middel (**PDM**) verplicht.
d. Maatregelen moeten worden getroffen opdat personeel, dat géén radiologische werkzaamheden verricht, niet meer dan 2 mSv per jaar ontvangt.
e. Een zwangere vrouw, die radiologische werkzaamheden verricht, mag per 13 opeenvolgende weken niet meer dan 5 mSv in het abdomen ontvangen en niet meer dan 1 mSv in de foetus ontvangen.
f. Voor personen jonger dan 18 jaar geldt, dat bij werkzaamheden de ontvangen dosisequivalenten minder moeten zijn dan 2 mSv, tenzij het leerlingen en studerende van 16 tot 18 jaar betreft, die zich voorbereiden op een beroep waarbij ze aan ioniserende stralen worden blootgesteld; in dat geval mogen de dosisequivalenten de 6 mSv niet overschrijden.
g. Leerlingen en studerende boven 18 jaar zijn aan de onder 1.5.2 genoemde maxima gebonden, als zij een radiologisch beroep gaan uitoefenen.
h. Andere leerlingen en studerende mogen jaarlijks uit hoofde van hun opleiding niet meer dan 0,5 mSv ontvangen, waarbij geen enkel éénmalig dosisequivalent 0,05 mSv mag overschrijden.

Toestellen. Enkele belangrijke punten zijn:

a. Elektronenstraalbuizen voor visuele weergave zijn géén toestellen in de zin der wet, indien het dosisequivalenttempo op geen enkel punt op 0,05 meter afstand van welke plaats van het oppervlak van het apparaat 5 µSv per uur (µSv/h) over schrijdt.
! b. Voor andere toestellen is de wet niet van toepassing, indien op 0,1 meter afstand (waar ook gemeten) van het toestel het dosisequivalenttempo minder is dan 1 µSv/h (0,1 mrem/h) en het toestel door bevoegde autoriteit is "aangewezen".
c. De lekstraling, gemeten met gesloten opening op 1 meter afstand van het focus, van een diagnostisch toestel moet minder zijn dan 1 mSv/h en van toestel voor therapeutisch gebruik minder dan 10 mSv/h.
d. Bij toestellen voor röntgenfluoroscopie dient de directe stralenbundel binnen het vlak van het beeldscherm te blijven en toestellen voor medisch-fluoroscopisch röntgenonderzoek moeten zijn voorzien van een beeldversterker met TV-keten.
e. Voor röntgentoestellen met een maximale buisspanning van 100 kVolt of meer is een vergunning vereist; Bij een toestel voor therapie of onderwijsdoeleinden is ook onder de 100 kVolt een vergunning vereist.
f. Voor alle toestellen geldt een meldingsplicht indien ze in gebruik worden genomen èn wanneer het toestelgebruik wordt beëindigd.
g. Het gebruik van schoenfluoroscopen en kryptoscopen is verboden.

h. Van sommige toestellen (bijvoorbeeld therapietoestellen) moet de stralingsopbrengst regelmatig worden gemeten door een erkende dienst of instelling.
i. De constructie en opstelling van toestellen moet zodanig zijn dat er veilig mee kan worden gewerkt.
j. Een toestel mag niet door onbevoegden in werking kunnen worden gesteld.

! ***Deskundigheidsniveaus.*** De deskundigheidsniveaus zijn gebaseerd op het risico voor de werkers. Onder risico wordt verstaan de kans dat "ongewenste gevolgen van een bepaalde activiteit" zich zullen voordoen. De deskundigheid wordt onderscheiden in:

- ***Niveau 5A,*** met betrekking tot het gebruik van radioactieve bronnen en röntgentoestellen met ***gering risico***.
- ***Niveau 5B,*** met betrekking tot het gebruik van de niet-ingekapselde radioactieve bronnen met ***gering risico***.
- ***Niveau 4A,*** met betrekking tot het gebruik van alle röntgentoestellen en ingekapselde radioactieve bronnen en andere ioniserende straling uitzendende toestellen welke een ***matig risico*** met zich meebrengen.
- ***Niveau 4B,*** met betrekking tot het gebruik van de niet-ingekapselde radioactieve bronnen met ***matig risico***.
- ***Niveau 3,*** met betrekking tot het gebruik van bepaalde niet- ingekapselde radioactieve stoffen, waarmee mag worden gewerkt in een zogenaamd C-Laboratorium.
- ***Niveau 2,*** waarbij een aanzienlijk grotere deskundigheid is vereist dan bij niveau 3 voor het gebruik van alle ingekapselde en niet-ingekapselde radioactieve bronnen en alle ioniserende straling uitzendende toestellen.
- ***Niveau 1,*** op vakgebied van internationaal erkend niveau. Opleiding op dit niveau wordt in Nederland niet gegeven.

1.6 Vergunningen en autorisaties

Vergunningen. Beperking van de gevaren voor de volksgezondheid, bij toepassing van ioniserende straling, wordt bereikt via een vergunningenstelsel. Een vergunning is vereist voor vrijwel alle handelingen met kernmaterieel en toestellen of - bij sommige radioactieve stoffen - slechts alleen voor het vervoer en het lozen van die stoffen. Anders dan voor kernmaterieel, geldt voor toestellen dat alleen het feitelijk gebruik hiervan aan een vergunning is gebonden. De voor de gezondheid gevaarlijke ioniserende straling wordt immers pas opgewekt, indien een toestel is ingeschakeld. Een tweede onderscheid met kernmaterieel is, dat slechts een beperkt aantal categorieën toestellen onder de vergunningsplicht valt. Voor de krijgsmacht betreft dit enkele groepen van röntgentoestellen.

Vergunningaanvraag. Vergunningen moeten worden aangevraagd voor aanvang van werkzaamheden en/of het voorhanden hebben van kernmaterieel bij

Agentschap NL, **Stralingsbescherming,** van het **ministerie van Economische Zaken**, Landbouw en Innovatie en wordt in de Staatscourant gepubliceerd zie: *http://www.agentschapnl.nl/programmas-regelingen/stralingsbescherming*.
De vergunning wordt verleend aan de Directeur van de inrichting/organisatie.

Vrijstellingsbesluit landsverdediging. Voor het omgaan, in bezit hebben enzovoort van materiaal waarin zich radioactieve stoffen bevinden is normaal gesproken een vergunning nodig van het daarvoor aangewezen Minister. *Voor het Ministerie van Defensie geldt voor een aantal toepassingen, om redenen van geheimhouding, het Vrijstellingsbesluit Landsverdediging. De minister is daarbij gemachtigd om binnen haar organisatie, een Registrerend Orgaan (**RO**) zelf vergunningen, die dan autorisaties heten, te laten verstrekken en een eigen **"stralingbeschermingseenheid"** op de naleving van deze wet in stand te houden.*

Autorisaties. Om het geclassificeerde gebruik voor de krijgsmacht (of in NATO-verband) volgens dezelfde normen te regelen, is bepaald dat hiervoor een autorisatie van de minister van Defensie is vereist, ook al valt dit materieel niet altijd onder de feitelijke macht van de krijgsmacht. Volgens de militaire voorschriften is geheimhouding vereist, indien gegevens, die een graad van geheimhouding (classificatie) hebben, zouden moeten worden prijsgegeven:

a. Bij het aanvragen van een vergunning of de naleving van deze voorschriften;
b. Door de aangifte van toestellen.

Indien een vergelijkbare vergunning door het Agentschap NL niet zou zijn verleend, omdat de gevaren van de aanwending van een bepaalde radioactieve stof of het gebruik van een bepaald toestel onaanvaardbaar groot zijn, dan wordt ook een autorisatie niet verleend. De beslissing over de verlening van de autorisatie door het hoofd van het **RO** ligt uiteindelijk bij de minister van Defensie.

1.7 Taken commandant / Directeur

Zorgplicht. De commandant of Directeur van de organisatie draagt zorg, dat:

a. De verleende vergunning(en) ter plaatse van de handelingen aanwezig zijn en op aanvraag kunnen worden getoond en een juiste administratie wordt gevoerd door een Registrerend Orgaan (**RO**);
b. Het aanschaffen van kernmaterieel en toestellen slechts gebeurt door een hiertoe aangewezen "verwervingsautoriteit" en wordt op de juiste wijze opgeslagen, verpakt, verplaatst, vervoerd, of afgevoerd;
c. Het als blootgestelde werker aangewezen personeel:
   - is aangemeld en géén aanvang neemt met de werkzaamheden, voordat de medische geschiktheid is vastgesteld;
   - voorzien is van een Persoonlijk Dosisregistratie Middel (**PDM**) en hiermee op de juiste manier omgaat;
   - bij beëindiging van de radiologische werkzaamheden een beëindigingkeuring wordt aangevraagd aan het **RO**.

d. Mutaties over dosisregistratie worden gemeld.
e. Indien op grond van een vergunning een verantwoordelijk deskundige is aangewezen, de werkzaamheden verricht worden door of onder leiding dan wel toezicht van deze deskundige;
f. Het overige personeel voldoende is geïnstrueerd over hun aandeel in de werkzaamheden met of aan kernmaterieel en in bezit wordt gesteld van een schriftelijke veiligheidsinstructie.
g. Dat de alarmregeling en de te nemen maatregelen bij brand en bij stralingsongevallen in ruime kring bekend zijn.
h. Geconstateerde tekortkomingen zo spoedig mogelijk op worden opgeheven.
i. In de maand februari van elk jaar aan het **RO** wordt opgestuurd een overzicht van alle onder hem ressorterende radiologische werkers, die een **PDM** in gebruik hebben. Op dit overzicht, naar de toestand per 1 februari van dat jaar, dient het registratienummer van de persoon en het PDM te worden vermeld.
j. De voorgeschreven meldingen tijdig worden gedaan;

Verantwoordelijkheid. De Leidinggevende moet gehoor geven aan de adviezen van de aangewezen verantwoordelijk deskundige (**VD**). Indien hij zich niet kan verenigen met deze adviezen, kan hij nader advies vragen aan het hoofd van de Stralingsbeschermingeenheid; indien geen overeenstemming kan worden bereikt, beslist de Directeur van de organisatie.

1.8 Taak van de verantwoordelijke deskundige

Aanwezigheid. De verantwoordelijke deskundige houdt toezicht op alle werkzaamheden met of aan kernmaterieel en toestellen. Dit houdt niet in dat hij tijdens alle werkzaamheden aanwezig moet zijn, maar wel dat hij altijd de verantwoordelijkheid draagt voor de juiste wijze van omgaan met kernmaterieel.

De verantwoordelijke deskundige;

a. Adviseert de commandant / leidinggevende bij het opstellen van schriftelijke veiligheidsinstructies en het brandbestrijdingsplan;
b. Adviseert de leidinggevende zo nodig schriftelijk, over werkwijzen en veiligheidsmaatregelen, bijvoorbeeld over beëindiging van radiologische werkzaamheden, indien de veiligheidsvoorschriften niet voldoende of niet op de juiste wijze worden nageleefd;
c. Draagt er zorg voor dat het personeel is voorzien van de veiligheidsinstructies en brandbestrijdingsplan;
d. Draagt er zorg voor dat terstond stralingshygiënische maatregelen worden genomen indien zich een onveilige situatie voordoet;
e. Stelt de leidinggevende onmiddellijk op de hoogte van alle incidenten, zoals ongevallen en (vermeende) overbestraling.

1.9 Radiologische werkzaamheden

Radiologische werkzaamheden zijn werkzaamheden waarbij het aannemelijk is dat het personeel, door de aanwending van radioactieve stoffen of het gebruik van een toestel, een bepaald dosisequivalent kan ontvangen. Het **RO** bepaalt of er sprake is van radiologische werkzaamheden, indien dit niet in een autorisatie of vergunning is vermeld. De Stralingsbeschermingeenheid kan hiertoe aanvullende metingen verrichten. In de praktijk omvatten de radiologische werkzaamheden:

a. Werkzaamheden die bestaan uit het **geregeld** omgaan met ingekapselde radioactieve stoffen (bijvoorbeeld instructeurs met oefenbronnen);
b. Werkzaamheden met niet-ingekapselde radioactieve stoffen (bijvoorbeeld radioactieve stoffen voor medische toepassingen en radioactieve lichtgevende verf);
c. Werkzaamheden door personen die zich **geregeld** voor de uitvoering van hun taak moeten bevinden in ruimten waar toestellen worden gebruikt;
d. Onderhoud- en reparatiewerkzaamheden aan toestellen.

Verplichtingen van de blootgestelde werker. Een blootgestelde werker moet, indien hij aan straling wordt blootgesteld, anders dan uit hoofde van zijn/haar functie of door medisch onderzoek, zijn commandant/leidinggevende hiervan op de hoogte stellen. Deze geeft dit door aan de **RO**. De blootgestelde werker moet in geval van ziekte de betrokken arts op de hoogte stellen van zijn functie als blootgestelde. De blootgestelde werker moet aan een keuring meewerken.

1.10. Geneeskundige keuringen

Typen keuringen. De voorgeschreven geneeskundige keuringen geschieden op basis van de categorie-indeling als blootgestelde werker en vinden plaats:

a. Aanvangskeuring, bij aanvang van de radiologische werkzaamheden voor categorie A en B. De commandant van personeel dat geacht wordt radiologische werkzaamheden te gaan verrichten meldt dit aan de **RO**, voor aanvang van de werkzaamheden.
b. Beëindigingkeuring, bij uitdiensttreding en beëindiging van de radiologische werkzaamheden voor zowel categorie A en B. Voor militair en burgerlijke blootgestelde werkers vraagt de commandant zo spoedig mogelijk, doch minstens een maand voor de beëindiging van de radiologische werkzaamheden, een keuring aan de **RO**. De keuring hoeft niet te worden aangevraagd, indien minder dan drie maanden voor de beëindiging een medisch onderzoek is verricht, tenzij de **RO** uitdrukkelijk anders bepaalt.
c. Periodieke keuring, éénmaal per jaar voor alleen categorie A. De periodieke keuring wordt door de RO bij de betrokken instanties aangevraagd. Tussen twee periodieke keuringen mag, bij voortdurende radiologische werkzaamheden, een periode van maximaal 13 maanden liggen.
d. Bijzondere keuring, bij vermoeden van uitzonderlijke bestraling of besmetting. Indien de commandant of de lokale arts door wijziging in de

gezondheidstoestand van een blootgestelde werker een extra geneeskundig onderzoek raadzaam acht, brengt hij dit ter kennis van de **RO**.

Aanwijzing en keuring. De aanwijzing van personeel voor geneeskundig onderzoek als bedoeld in vorig punt geschiedt voor:

a. Militairen door de Directeur, waarbij het onderzoek door de **RO** wordt geregeld;
b. Burgers door de Directeur in overleg met de GGD, waarbij het onderzoek wordt verricht door een daartoe door de GGD aangewezen arts:
   - de stralingsarts voor werkers in categorie A,
   - de bedrijfsarts voor werkers in categorie B.

Militair personeel en burgerpersoneel in het buitenland worden door een militaire arts gekeurd.

De medische geschiktheidverklaring wordt voor militairen en het burgerpersoneel in het buitenland afgegeven door de stralingsarts van de Directie en voor overige burgers door de GGD. De keuringsarts en de commandant van de radiologische werker ontvangen schriftelijk bericht over de medische geschiktheid van de gekeurde tot het verrichten van radiologische werkzaamheden. Bij overplaatsing moet de medische geschiktheidverklaring aan zijn nieuwe commandant worden gezonden, bij het verlaten van de dienst aan de **RO**.

1.11 ! Stralingscontrole. De stralingsbelasting ten gevolge van medische toepassingen en natuurlijke of achtergrondstraling, worden in de normen buiten beschouwing gelaten.

Dosisregistratie. Ter vaststelling van de door hem ontvangen stralingsbelasting:

! Moet iedere blootgestelde werker de beschikking hebben over een op naam gesteld **PDM**.

! Het **PDM** dient om achteraf een eventuele stralingsbelasting vast te stellen en is géén beschermingsmiddel.

! Het **PDM** wordt door of namens de commandant verstrekt en is voor strikt persoonlijk gebruik; zij mag daarom niet worden uitgeleend. Ter voorkoming van onjuiste meetresultaten moet het PDM buiten werktijd worden bewaard op een koele, droge en stralingsvrije plaats.

Van het medisch dossier moet in het kernenergiewet dossier onder andere zijn opgenomen:

a. De uitslag van geneeskundige onderzoeken;
b. Het toegepaste dosisregistratiemiddel(en);
c. Inlichtingen betreffende de aard van de tewerkstelling evenals de routine dosisregistratie; en
d. De dosisregistratie bij incidentele bestralingen.

! ***Twijfel of incidenten***. In geval van twijfel over de stralingsveiligheid op een onderdeel of bij het vermoeden van een "**stralingsincident**" (overdosering of besmetting met radioactieve stoffen), moet door of namens de commandant onverwijld de Stralingsbeschermingeenheid worden ingelicht en de Inspectie Milieuhygiëne Zuid-West van het Ministerie VROM/RIMH (tel. 010-2244444). In overleg met de Directeur, ook zonodig de GGD en de I-SZW (arbeidsinspectie). De Kernenergiewet verbiedt het voorhanden hebben van radioactieve stoffen zonder vergunning. Iedereen die radioactieve stoffen aantreft of denkt over radioactief materieel te beschikken terwijl hiervoor geen vergunning is verleend, dient dit zo spoedig mogelijk te melden.

1.12 Apparaten of instrumenten van het "aangewezen type"

Apparaten of instrumenten van het "aangewezen type" kunnen door de betrokken minister van het vergunningstelsel worden vrijgesteld. Deze apparaten en instrumenten worden aangeduid met de tekst "aangewezen type". Aan een dergelijke aanwijzing kunnen bepaalde voorschriften worden verbonden voor gebruik, opslag, reparatie, en vervoer.

1.13 Radioactieve stoffen waarvoor geen vergunning of autorisatie is vereist bij het aanwenden, doch alleen bij vervoer en lozing.

Ten aanzien van deze radioactieve stoffen gelden wel de regels voor opslag, verplaatsing, reparatie, en onderhoud.

1.14 Kernenergiewet dossier

Alle administratieve bescheiden moeten lokaal in het “Kernenergiewet dossier” worden opgeborgen. Dit dossier wordt beheerd door de verantwoordelijke deskundige.

1.15. Toezichthouder. De Kernenergiewet verbiedt het voorhanden hebben van radioactieve stoffen zonder vergunning. Iedereen die radioactieve stoffen aantreft of denkt over radioactief materieel te beschikken terwijl hiervoor geen vergunning is verleend, dient dit zo spoedig mogelijk te melden. De Inspectie Milieuhygiëne Zuid-West van het Ministerie VROM/RIMH (tel. 010-2244444) is aangewezen als verantwoordelijke dienst voor de afhandeling van deze meldingen en van stralingsongevallen.

Op last van de afspraken in de EU-is ook de regelgeving in NL aangepast. Zie :
Besluit van 23 oktober 2017, houdende vaststelling van regels ter bescherming van personen tegen de gevaren van blootstelling aan ioniserende straling (Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming).

0-0-0

2. BOUW VAN DE MATERIE

2.1 ! Materie

De uitleg van het begrip radioactiviteit begint met een beschrijving van de samenstelling van alle stoffen. Alles wat door ons wordt waargenomen bestaat immers uit stof. Als verzamelnaam voor de verschillende stoffen wordt het woord materie gebruikt. Een definitie van materie zou kunnen zijn:

"Alles wat ruimte inneemt en massa heeft"

Het eerste wat opvalt is dat materie in drie verschillende toestanden voorkomt; namelijk als vaste, vloeibare of als gasvormige stof. De toestand waarin een stof zich bevindt hangt ook af van de temperatuur en de druk. Van vele stoffen zijn drie verschillende toestanden bekend. Zo is water bij een normale luchtdruk:

Vast	beneden 0 graden Celsius
Vloeibaar	tussen 0 en 100 graden Celsius
Gasvormig	boven 100 graden Celsius

Ruw geschat bestaan er minstens 4.000.000 verschillende stoffen. Wil men hierover iets zinnigs zeggen, dan zal eerst nader op de eigenschappen en op de bouw van de materie moeten worden ingegaan.

2.2 Moleculen

Een hoeveelheid van een bepaalde stof delen we in tweeën. Daarna doen we dit steeds opnieuw met een overblijvende helft; we voelen nu intuïtief wel aan dat deze deling niet tot in het oneindige kan worden herhaald. Uiteindelijk blijft er een zéér klein deeltje van de stof over dat nog alle eigenschappen van die stof bezit. Bij verdere deling van dit kleine deeltje zullen de dan gevormde stoffen deze eigenschappen niet meer bezitten. Het kleinste deeltje van een bepaalde stof, dat nog alle eigenschappen van die stof bezit, wordt nu een molecuul genoemd.

2.3 Atomen

De moleculen kunnen nog verder worden uitgesplitst in hun samenstellende onderdelen. De deeltjes die dan overblijven worden atomen genoemd. Indien de atomen uit de verschillende stoffen per soort bij elkaar worden gevoegd, blijven er circa 100 verschillende atomen over. Hiervan worden er circa 83 tot de stabiele atomen gerekend. Het aantal van 100 verschillende atomen is klein genoeg om op een eenvoudige wijze te beschrijven.

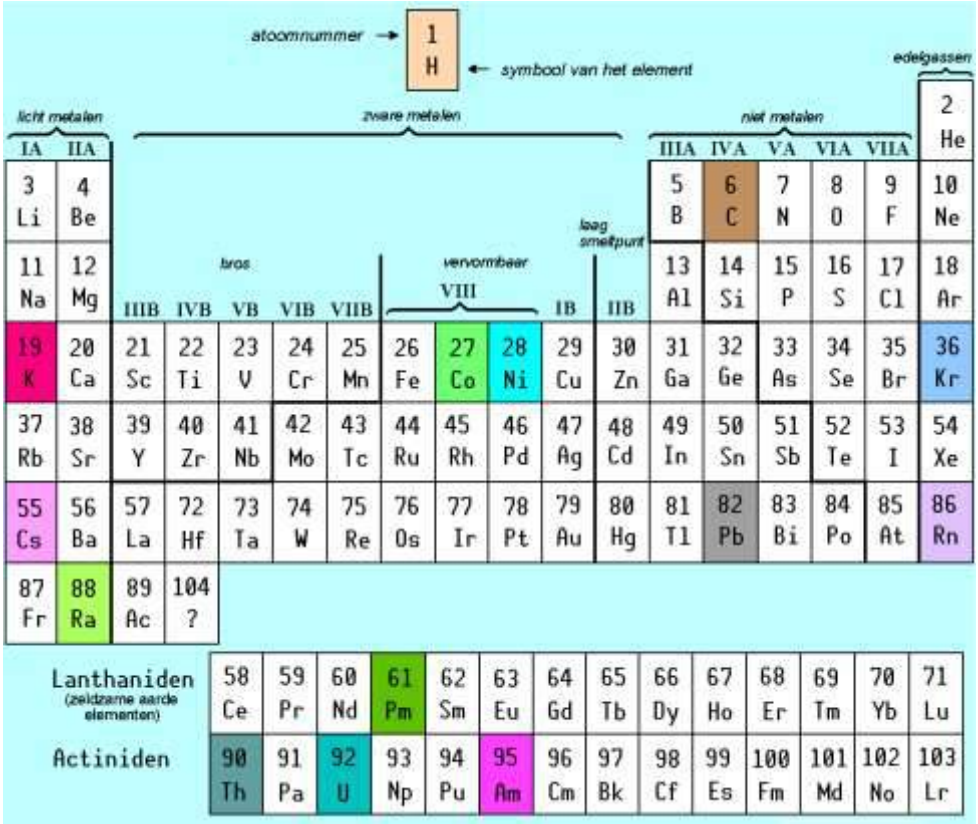
2.4 Elementen

Voegen we een groot aantal atomen van dezelfde soort bij elkaar, dan gebruiken we voor deze hoeveelheid stof de omschrijving element. Alle bekende stoffen kunnen uit de circa 100 verschillende elementen worden opgebouwd.

De elementen laten zich op een bepaalde wijze rangschikken, waarbij ieder element een internationaal gestandaardiseerde naam heeft; deze naam is vaak gebaseerd op de Latijnse taal. De meest gangbare elementen hebben daarnaast nog een naam die in de omgangstaal gebruikelijk is. In de vorige eeuw, toen de chemie een grote vlucht nam, zijn veel nieuwe elementen ontdekt.

2.5 Periodiek systeem der elementen

De elementen kunnen naar chemische eigenschappen en gewicht worden gegroepeerd en gerangschikt in het zogenaamde Periodiek Systeem der Elementen (zie tabel 2.1). Elk element heeft hierin een eigen rangnummer.



Tabel 2.1.

Het gebruik van de volledige naam is vaak omslachtig; water stof heet in het Latijn Hydrogenium, zuurstof Oxygenium enzovoort. In de chemie heeft men daarom voor de verschillen de elementen standaardafkortingen ingevoerd.
Meestal gebruikt men de eerste letter van de naam van het element. Deze letter wordt als hoofdletter geschreven, vaak gevolgd door een klein geschreven tweede letter. De elementen die met dezelfde letter beginnen kunnen zo van elkaar worden onderscheiden. Waterstof wordt afgekort tot H, Helium tot He, Hafnium tot Hf enzovoort.

Tabel Periodiek Systeem der elementen. In een overzicht van de elementen in de Engelse taal en af kortingen vindt men in tabel 2.2. Hierin zijn ook enkele specifieke Nederlandse benamingen opgenomen.

Element	Symbool	Atoom nummer (Z)	Nederlandse benaming	Element	Symbool	Atoom nummer (Z)	Nederlandse benaming
Actinium	Ac	89		Molybdenum	Mo	42	Molybdeen
Aluminum	Al	13	Aluminium	Neodymium	Nd	60	
Americium	Am	95		Neon	Ne	10	Neon
Antimony	Sb	51	Antimoon	Neptunium	Np	93	
Argon	Ar	18	Argon	Nickel	Ni	28	Nikkel
Arsenic	As	33	Arsenicum	Nitrogen	N	7	Stikstof
Astatine	At	85		Osmium	Os	76	
Barium	Ba	56		Oxygen	O	8	Zuurstof
Beryllium	Be	4		Palladium	Pd	46	
Bismuth	Bi	83		Phosphorus	P	15	Fosfor
Boron	B	5	Borium	Platinum	Pt	78	Platina
Bromine	Br	35	Broom	Plutonium	Pu	94	
Cadmium	Cd	48		Polonium	Po	84	
Calcium	Ca	20		Potassium	K	19	Kalium
Carbon	C	6	Koolstof	Praseodymium	Pr	59	
Cerium	Ce	58		Prometheum	Pm	61	
Cesium	Cs	55		Protoactinium	Pa	91	
Chlorine	Cl	17	Chloor	Radium	Ra	88	
Chromium	Cr	24	Chroom	Radon	Rn	86	
Cobalt	Co	27		Rhenium	Re	75	
Niobium	Nb	41		Rhodium	Rh	45	
Copper	Cu	29	Koper	Rubidium	Rb	37	
Curium	Cm	96		Ruthenium	Ru	44	
Dysprosium	Dy	66		Samarium	Sm	62	
Erbium	Er	68		Scandium	Sc	21	
Europium	Eu	63		Selenium	Se	34	
Fluorine	F	9	Fluor	Silicon	Si	14	Slicium
Francium	Fr	87		Silver	Ag	47	Zilver
Gadolinium	Gd	64		Sodium	Na	11	Natrium
Gallium	Ga	31		Strontium	Sr	38	
Germanium	Ge	32		Sulfur	S	16	Zwavel
Gold	Au	79		Tantalum	Ta	73	
Hafnium	Hf	72		Technetium	Tc	43	
Helium	He	2		Tellurium	Te	52	
Holmium	Ho	67		Terbium	Tb	65	
Hydrogen	H	1	Waterstof	Thallium	Tl	81	
Indium	In	49		Thorium	Th	90	
Iodine	I	53	Jodium	Thulium	Tm	69	
Iridium	Ir	77		Tin	Sn	50	
Iron	Fe	26	IJzer	Titanium	Ti	22	
Krypton	Kr	36		Tungsten	W	74	Wolfraam
Lanthanum	La	57		Uranium	U	92	
Lead	Pb	82	Lood	Vanadium	V	23	
Lithium	Li	3		Xenon	Xe	54	
Lutecium	Lu	71		Ytterbium	Yb	70	
Magnetium	Mg	12		Yttrium	Y	39	
Manganese	Mn	25	Mangaan	Zinc	Zn	30	Zink
Mercury	Hg	80	Kwik	Zirconium	Zr	40	

2.2. Tabel van Elementen, Symbolen en Z-nummers.

2.6 Verbindingen van de elementen.

De verbindingen van elementen vormen de moleculen. Een gestandaardiseerde schrijfwijze geeft aan uit welke elementen en uit hoeveel atomen per element ieder molecuul is opgebouwd. Bij ieder element wordt, rechts onder de verkorte naam, een getal geplaatst. Dit getal geeft aan hoeveel atomen van het element in het molecuul zijn opgenomen. Het getal 1 wordt hierbij niet gebruikt.
Een molecuul keukenzout bestaat uit één atoom natrium en één atoom chloor. Dit molecuul wordt geschreven als:

$NaCl$

Het watermolecuul bestaat uit twee atomen waterstof en één atoom zuurstof; het wordt geschreven als:

H_20

Een bekende groep stoffen zijn de koolwaterstoffen; deze bestaan uit combinaties van koolstof (Carbonium, afgekort C) en waterstof (H):

methaan = CH_4
ethaan = C_2H_6
propaan = C_3H_8 enzovoort.

De zogenaamde edelgassen (onder andere neon, argon en xenon) bestaan als molecuul uit één enkel atoom. De meeste gassen bestaan uit twee-atomige moleculen; waterstof komt voor als H_2 en zuurstof als O_2. Een klein percentage zuurstof komt als O_3 of ozon in de natuur voor.

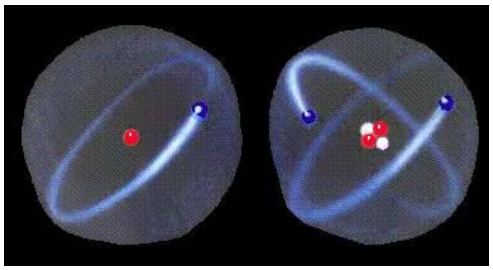
2.7 Bouw van het atoom

Radioactiviteit wordt niet beïnvloed door de chemische sa menstelling van een stof. We moeten dus nog dieper door dringen in de opbouw van elementen en atomen. Met de bestaande technische middelen, inclusief de elektronenmicroscoop kunnen we helaas geen afzonderlijk atoom bekijken; het atoom is hiervoor nog veel te klein. Om de eigenschappen van het atoom te kunnen verklaren wordt door de natuurkundige een model geschapen. De mogelijke op bouw en onderlinge samenhang kan daarmee worden aangetoond. Een dergelijk model wordt naar behoefte aangepast aan de resultaten van nieuwe experimenten. In het ergste geval wanneer het oude model onhoudbaar is gebleken, wordt het door een ander model vervangen.

2.8 Atoommodel

Voor ons doel gebruiken we het eenvoudige atoommodel. Dit model lijkt veel op een miniatuur zonnestelsel. Het gaat uit van een kern waar één of meer elektronen omheen draaien. Wat vinden we in de kern zelf? Twee soorten deeltjes, namelijk:

- Protonen, die we ons voorstellen als bolletjes met een positieve elektrische lading (rood in figuur 2.1).
- Neutronen, die voor te stellen zijn als bolletjes zonder lading, die praktisch even zwaar zijn als de protonen (wit in figuur 2.1).



Figuur2.1.

De al genoemde elektronen bezitten dezelfde lading als de aanwezige protonen, maar negatief. De massa van een elektron bedraagt 1/1840 ste deel van de massa van een proton; elektronen dragen daardoor nauwelijks iets bij tot de massa van het atoom! De elektronen lopen niet allemaal op dezelfde afstand rond de kern. Er zijn zogenaamde elektronenschillen te onder scheiden, die per schil slechts een beperkt aantal elektronen kunnen bevatten. *Op deze wijze zijn de typische chemische eigenschappen van de verschillende elementen te verklaren.* Hierop wordt in deze cursus niet verder ingegaan.

2.9 Standaard schrijfwijze

Om het verband aan te geven tussen de afzonderlijke delen wordt een standaard schrijfwijze gebruikt (zie figuur 2.2). Hierbij geldt:

- het aantal protonen in de kern van het atoom is gelijk aan het rangnummer van het element. In het Periodiek Systeem der Elementen wordt dit aangegeven met het atoomnummer **Z** (zie tabel 2.2.).
- het aantal elektronen is gelijk aan het aantal protonen van het beschouwde atoom; met andere woorden het atoom is normaal gesproken elektrisch neutraal.
- het aantal neutronen in de kern wordt aangegeven met **N**. LET OP: Het aantal neutronen wordt NIET geschreven!
- het gewicht van het atoom hangt af van de som van het aantal protonen Z en neutronen **N**. Dit geeft men aan met het massagetal **A**.

De standaard schrijfwijze

Z = het atoomnummer of het aantal protonen,

A = het massagetal of het gewicht van het atoom,

N = het aantal neutronen, dat niet wordt geschreven,

zodat: $A = Z + N$

Voor element X wordt dit geschreven als: ${}^{A}_{Z}X$

dus bijvoorbeeld:

${}^{9}_{4}Be$, ${}^{12}_{6}C$ en ${}^{238}_{92}U$

Figuur 2.2. De standaard schrijfwijze.

2.10 Proton/neutron verhouding

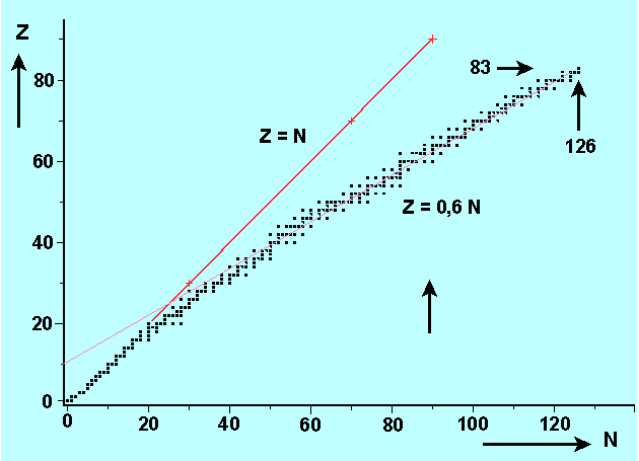
In de kern van een atoom bepaalt het aantal protonen tot welk element het atoom behoort. Waarom komen er dan neutronen in de kern voor? Dit wordt op de volgende manier verklaard:

- Uit de elektriciteitsleer is bekend dat twee positieve ladingen elkaar afstoten. Een kern met twee of meer protonen, die immers een positieve lading bezitten, zou volgens dit principe niet kunnen bestaan.
  Hier komen de neutronen te hulp; door bepaalde kern krachten tussen de protonen en neutronen blijft zo'n kern toch stabiel.

Bekende voorbeelden van stabiele kernen zijn:

- Helium: $^{4}_{2}He$, dat bestaat uit 2 protonen en 2 neutronen,
- Koolstof: $^{12}_{6}C$, dat bestaat uit 6 protonen en 6 neutronen.

Is de proton/neutron verhouding bij alle atoomkernen één op één? Neen, bij een toenemend aantal protonen blijken er steeds meer neutronen dan protonen nodig zijn, zie figuur 2.3.

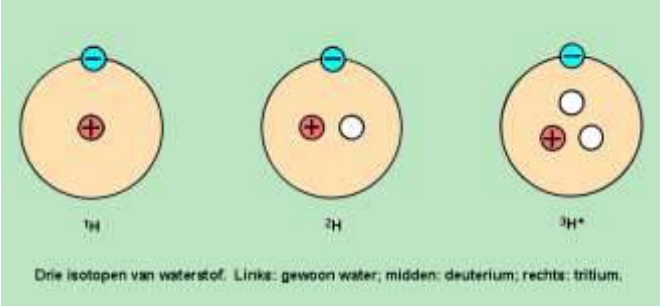


Figuur 2.3. Proton-Neutron verhouding.

Zo heeft lood (Plumbum), dat wordt geschreven als: $^{206}_{82}Pb$, ..naast 82 protonen maar liefst 124 neutronen in de kern (206-82); dus 1,5 maal zoveel neutronen dan protonen!

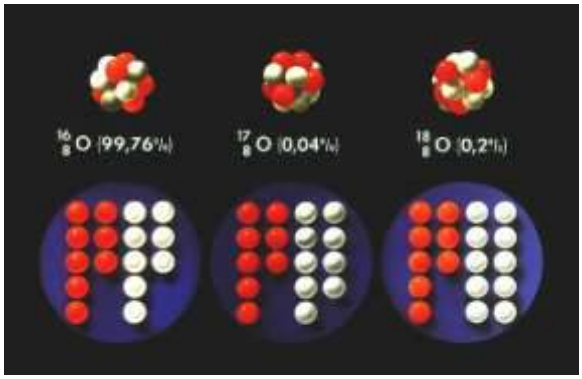
2.11 Isotopen

Met natuurkundige proeven is aangetoond dat, bij sommige elementen, het aantal neutronen binnen nauwe grenzen varieert. Bij waterstof (zie figuur 2.4.) kan de kern op drie verschillende manieren zijn samengesteld uit:



Figuur 2.4. Isotopen van waterstof.

Deze kernen worden isotopen van elkaar genoemd. Isotopen vinden we niet alleen bij waterstof, maar ook bij veel andere elementen. Zoals Zuurstof (zie figuur 2.5.).



Figuur 2.5. Isotopen van Zuurstof.

Het in de natuur voorkomende, chloor (Cl) bestaat voor 75% uit: $^{35}_{17}Cl$ atomen.

De isotopen van een element reageren chemisch gelijk. De onderlinge verschillen kunnen alleen met ingewikkelde natuurkundige middelen worden aangetoond.

2.12 **Epiloog**. Als inleiding op het volgende hoofdstuk nog enkele opmerkingen:

- Er zijn elementen waarbij zowel een tekort als een relatief overschot aan neutronen de reden kan zijn voor instabiliteit van de kern.
- De nu nog van nature voorkomende atoomkernen zijn meestal stabiel bij een protonenaantal lager of gelijk aan 83 en altijd instabiel bij een protonengetal hoger dan 83.

De hierbij optredende verschijnselen worden nader toegelicht onder het hoofdstuk "RADIOACTIVITEIT".

0-0-0

3. ! RADIOACTIVITEIT

3.1 De ontdekking van radioactiviteit

In 1896 werd het verschijnsel radioactiviteit ontdekt door de Fransman A.H. Becquerel. Hij gebruikte bij één van zijn experimenten een stuk uraniumerts (zie figuur 3.1) om het papier van een ingepakte fotografische plaat dicht te houden. Na ontwikkeling van de plaat zag hij hierop tot zijn grote verbazing een afdruk van dit stuk erts. Dit verschijnsel moest wel het gevolg zijn van een soort straling uit het stuk erts. Hij gaf hieraan de benaming radioactiviteit.

Figuur 3.1. Uranium erts.

Voor vele natuurkundigen uit die dagen opende het verschijnsel radioactiviteit een volledig nieuw arbeidsterrein. Al spoedig daarna werden andere radioactieve elementen ontdekt, zoals twee jaar later het radium door Madame Curie. Al deze radioactieve elementen hebben de eigenschap om straling uit te zenden. De straling dringt door materie heen en geeft op fotografisch materiaal een zwarting.

3.2 Eigenschappen van radioactiviteit

Allerlei proeven wezen uit dat radioactiviteit niet kan worden beïnvloed door chemische bewerkingen of veranderingen in temperatuur en druk.

Radioactiviteit is dus alleen het gevolg van processen die zich afspelen in de kern van het atoom. Met andere woorden:
Radioactiviteit is de actie van een NIET-stabiele atoomkern om weer stabiel te worden. De atoomkern raakt zijn overtollige energie kwijt in de vorm van straling!

Bij straling uit radioactieve stoffen kunnen we nog andere eigenschappen opmerken. De intensiteit van de straling of activiteit neemt per tijdseenheid af! Deze eigenschap wordt nader uitgewerkt in de paragraaf ***halveringstijd.*** De radioactieve stoffen veranderen in (vervallen naar) een stabiele, of een andere radioactieve stof.

In het laatste geval spreken we van een vervalreeks, die in de paragraaf ***radioactieve families*** verder wordt behandeld. Straling kan effecten hebben op materie. Bij de uitleg hierover wordt eerst ingegaan op de soorten straling waarmee men in aanraking kan komen en de eenheid van stralingsenergie.

3.3 Soorten straling

De belangrijkste soorten straling zijn alfa-, bèta-, gamma- en neutronenstraling. De naam van de soort straling is afgeleid van de wijze waarop de straling vrijkomt. In de syllabus wordt niet ingegaan op het ontstaan en de effecten van neutronenstraling.

Alfastraling. Uit de kern van een atoom komt een alfadeeltje. Dit is in feite een heliumkern, bestaande uit 2 protonen en 2 neutronen. De oorspronkelijke kern heeft nu 2 protonen minder; dat wil zeggen, de nieuwe kern heeft een rangnummer dat 2 lager is. Voor radium wordt deze reactie als volgt weergegeven:

$$^{226}_{88}Ra \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{222}_{86}Rn$$

De pijl geeft aan in welke richting het proces verloopt. Links en rechts van de pijl is de som van het aantal protonen (88 = 2 + 86) en de massa (226 = 4 + 222) gelijk gebleven! Uit één atoom radium ontstaan twee atomen; één atoom helium en één atoom radon. Beide nieuwgevormde atomen zijn edelgassen. Van deze soort reacties is een groot aantal bekend.

Bètastraling. Uit de kern komt een bètadeeltje. Dit deeltje is identiek met een elektron; dat wil zeggen een deeltje met een negatieve lading. Toch stelt dit ons even voor een probleem. In de kern zijn slechts protonen (met een positieve lading) en neutronen (zonder lading) aanwezig, maar geen elektronen! Waar komt het elektron dan vandaan? Men neemt aan dat een elektron in de kern ontstaat als gevolg van de splitsing van een neutron in een proton en een elektron. Met de schrijfwijze van punt 2.9 uit hoofdstuk 2 wordt dit dan als volgt voorgesteld:

- één neutron (lading 0, massa 1: $^{1}_{0}n$
- één proton (lading +1, massa 1: $^{1}_{+1}p$
- één elektron (lading -1, massa ongeveer 0): $^{0}_{-1}e$

We zien dat de reactie inderdaad zo kan verlopen als eerder is aangenomen:

$$^{1}_{0}N \longrightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{1}_{1}p$$

Wat gebeurt er met een kern die een bètadeeltje uitstoot? De kern blijft even zwaar (massa elektron is ongeveer 0); er gaat echter een neutron over in een proton. We krijgen dus een kern met een proton meer. Er ontstaat nu een element met een rangnummer dat een hoger is dan het oorspronkelijke element. Een voorbeeld hiervan is het promethium, dat vervalt naar samarium.

$$^{147}_{61}Pm \longrightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{147}_{62}Sm$$

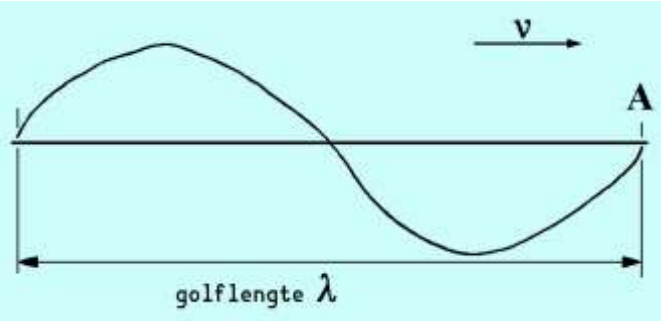
Het aantal protonen (61 = -1 + 62) en de massa (147 = 0 + 147) is voor en na de reactie aan elkaar gelijk.

Gammastraling. Na één van de eerder genoemde processen komt ook vaak elektromagnetische straling vrij. Deze straling noemen we gammastraling. Dit is géén deeltje, het heeft géén gewicht, maar vertegenwoordigt wel een hoeveelheid energie. Deze straling kunnen we ons, evenals zichtbaar licht en microgolfstraling voorstellen als een golfverschijnsel, dat in punt 3.5 wordt uitgelegd.

Röntgenstraling is ook een vorm van elektromagnetische straling. Het essentiële verschil tussen röntgen- en gammastraling is dat gammastraling uit de kern afkomstig is, terwijl röntgenstraling ontstaat in de elektronenwolk van een atoom. In de praktijk treedt een ander verschil aan het licht: de straling van een röntgenbuis is opgebouwd uit vele energieën (golflengten), terwijl gammastraling meestal monochromatisch is.

3.4 **Transmutatie**. In punt 3.3 waar *deeltjes* de kern verlaten, is het atoom veranderd omdat het aantal protonen is gewijzigd. Er is dus een ander element ontstaan! Dit soort verandering wordt transmutatie genoemd.

3.5 **Het golfverschijnsel**. Een puntvormige beroering van een wateroppervlak geeft een zichtbare voorstelling van een golf. Er ontstaan dan golftoppen en golfdalen, die zich in concentrische cirkels met een bepaalde snelheid uitbreiden. Een dwarsdoorsnede van zo'n golf ziet er als volgt uit:



Figuur 3.2. Het golfverschijnsel

Bij een golfverschijnsel onderscheiden we twee dingen:
- de golflengte (λ), uitgesproken als "lambda", en
- de (golf)frequentie (ν) of snelheid, is het aantal golven dat per tijdseenheid punt A passeert (aantal trillingen per seconde).

De frequentie is omgekeerd evenredig met de golflengte (f = 1/λ), waarbij de evenredigheidsconstante "c" gelijk is aan de lichtsnelheid 300.000 km/s. De snelheid (ν), waarmee de golfbeweging zich verplaatst, volgt uit: **ν = c / λ**

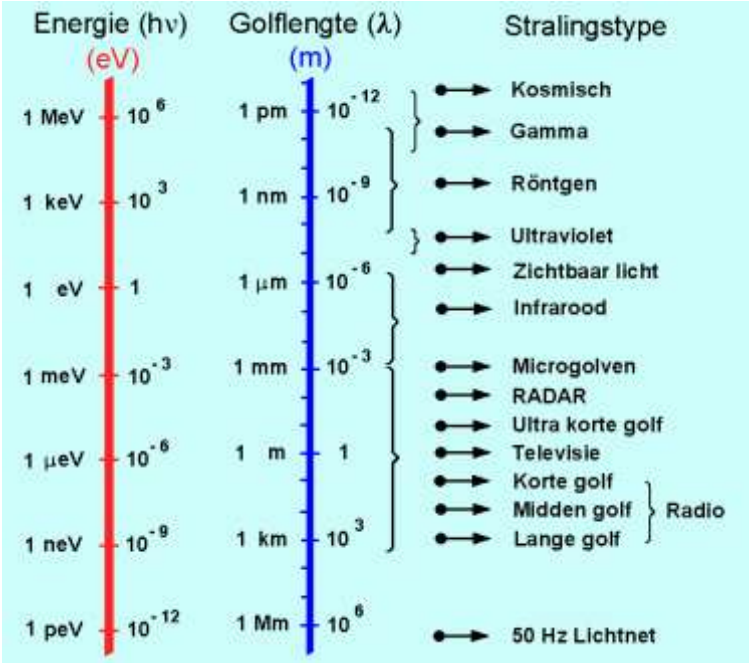
Naast golven in water kent men ook geluidsgolven, waarvan de snelheid in lucht circa 330 meter per seconde bedraagt. In deze cursus zijn alleen de elektromagnetische golven, zoals de radio-, licht-, röntgen- en gammagolven van belang. Deze hebben als gemeenschappelijk kenmerk dat hun snelheid circa 300.000 km per seconde bedraagt. Van deze hoge voortplantingssnelheid merken we in het dagelijkse leven weinig. Een radiosignaal van de VIKING-lander op Mars doet er echter circa 10 minuten over om de aarde te bereiken. Bij een lange golflengte zal dus, door de constante snelheid, de frequentie laag en bij een korte golflengte de frequentie hoog zijn.

3.6. Dualiteit van elektromagnetische golven.

Sprak men vroeger over elektromagnetische golven; nu is het juister om van elektromagnetische straling te spreken. Uit diverse experimenten blijkt dat elektromagnetische straling een tweeslachtig karakter vertoont; het manifesteert zich enerzijds als een golfverschijnsel, anderzijds als een stroom van massaloze deeltjes, die zich met de lichtsnelheid voortbewegen. Dit zelfde geldt voor elektronen. Blijkbaar zijn het golf- en deeltjeskarakter twee verschillende vormen voor het zelfde verschijnsel. Bij een stroom van deeltjes worden de afzonderlijke deeltjes "quanten" of fotonen genoemd. Deze "fotonen" verplaatsen zich met de lichtsnelheid en bezitten een energie die recht evenredig is met de frequentie: **E = h . ν** of **E = h . c/ λ**

Waarin **h** de constante van Planck is ($6{,}625.10^{-34}$ joules. s).

3.7 Het verband tussen Frequentie Golflengte en Energie is in figuur 3.3 weergegeven. De gammastraling is zeer kortgolvig en overlapt voor een deel het gebied van de röntgenstraling. Röntgenstraling wordt kunstmatig opgewekt en gedraagt zich precies hetzelfde als gammastraling, maar vertegenwoordigt meestal een veel lagere energie.



Figuur 3.3. Het verband tussen Frequentie, Golflengte en Energie.

3.8 De elektronvolt

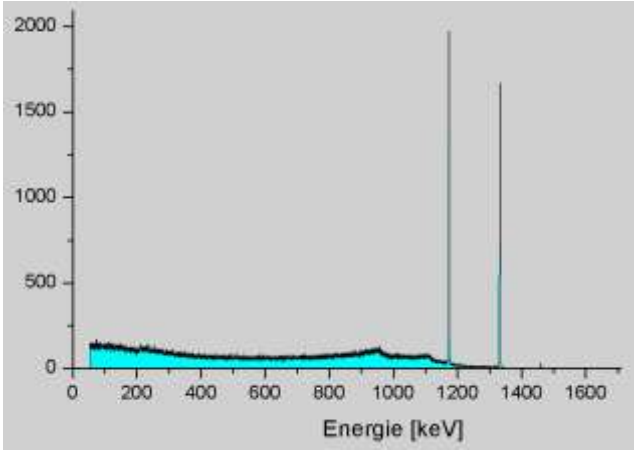
Bij elektromagnetische straling (EM-straling) van zéér hoge frequenties zoals gammastraling, is het gebruik van de eenheden van frequenties en golflengte omslachtig. Daarom is afgesproken hierbij de energie van de straling aan te geven. De energie wordt uitgedrukt in de eenheid van elektronvolt, kilo- of Mega-elektronvolt; afgekort tot eV, keV en MeV.

Daar 1 eV overeen komt met een energie van 1,6 x 10^{-19} Joules, is voor iedere frequentie de overeenkomstige energie in eV uit te rekenen met de formule:
E = h . v. Zo vertegenwoordigt de frequentie van 10 Hertz (Hz) een energie van 410 keV.

De energie van de door de verschillende radioactieve stoffen uit te zenden gammastraling is zeer karakteristiek voor de betreffende stof. Een voorbeeld is de cobalt-isotoop Co-60, die als volgt vervalt:

$^{60}_{27}Co \longrightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{60}_{28}Ni$ gevolgd door twee "pakketjes" gammastraling.

Deze gammastraling wordt ook wel gammakwanten of fotonen genoemd. De energie van de Co-60 gammakwanten bedraagt 1,17 en 1,332 MeV. Met apparatuur, zoals de gammaspectrometer, zijn deze energieën zichtbaar te maken (zie figuur 3.4). Een bepaalde radioactieve stof kan aan zijn gammaspectrum worden herkend, omdat de uitgezonden straling karakteristiek is voor die soort!



Figuur 3.4. Gammaspectrum van Cobalt-60.

3.9 De halveringstijd

Onder de halveringstijd wordt verstaan de tijd waarin een hoeveelheid radioactieve stof tot op de helft is verminderd. Zo zal, bij een aantal atomen radium, er af en toe een radiumatoom zich spontaan splitsen (vervallen) in een helium- en een radonatoom. Er blijven dus steeds minder radiumatomen over.

Dit verval is een met een loterij te vergelijken kansproces; het is niet te beïnvloeden, maar kan wel statistisch worden beschreven. Van één bepaald atoom weten we niet of het vandaag vervalt of over 10.000 jaar! Gaan we uit van een groot aantal radiumatomen, in één gram bevat circa $2{,}5.10^{21}$ atomen, dan zullen per seconde ongeveer steeds eenzelfde aantal atomen vervallen (circa 37 miljard). De tijd die nodig is om nog de helft van de oorspronkelijke hoeveelheid radium over te houden, blijkt circa 1620 jaar te zijn. De halveringstijd is voor de verschillende radioactieve stoffen niet gelijk; er zijn halveringstijden van fracties van een seconde tot miljarden jaren.

3.10 In de natuur voorkomende uranium isotopen.

Het in de natuur voorkomend uranium bevat uraniumisotopen. Hierin is géén spontane kettingreactie mogelijk, daar het percentage U-235 te klein is:

- splijting van dit uranium is dus niet mogelijk;.
- eerst dient "verrijking" te geschieden;
- dan pas is een "gestuurde" kettingreactie mogelijk.

3.11 Radioactieve families

Het verval van een stabiele stof via meer dan één andere radioactieve stof noemt men een vervalreeks. Het bestaan van deze reeksen kan ook met het volgende voorbeeld worden aangetoond. Kan radium, met een halveringstijd van circa 1620 jaar, nog steeds in de natuur worden gevonden, nu de aarde ongeveer 15 miljard (15×10^9) jaar geleden is gevormd? Ja, dit kan alleen als radium steeds opnieuw wordt gevormd. Radium (Ra-226) ontstaat namelijk op de volgende wijze:

$$^{230}_{90}Th \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{226}_{88}Ra$$

Het thorium (Th-230) heeft slechts een halveringstijd van 80.0000 jaar en is op zijn beurt ontstaan uit uranium U-234:

$$^{234}_{92}U \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{230}_{90}Th$$

Het U-234 is langs omwegen ontstaan uit U-238, dat een halveringstijd ($T_{1/2}$) heeft van 4,5 miljard jaar en dit nu is lang genoeg. U-238 wordt de "stammoeder" genoemd van een grote "familie" radioactieve elementen. Heeft deze familie een "laatste kind", met andere woorden eindigt de "stamboom" ergens? Ja, door al deze reacties wordt de kern steeds lichter; uiteindelijk komt zij terecht in het gebied waar kernen voorkomen met een Z gelijk of kleiner dan 83; het gebied van de stabiele kernen. De volgende families zijn bekend:

- De **uraniumfamilie**, stammoeder U-238: $^{238}_{92}U$ vervalt naar $^{206}_{82}Pb$.
- De **thoriumfamilie**, stammoeder Th-232: $^{232}_{90}Th$ vervalt naar $^{208}_{82}Pb$.
- De **actiniumfamilie**, stammoeder U-235: $^{235}_{92}U$ vervalt naar $^{207}_{82}Pb$.
- De **neptuniumfamilie**, stammoeder Np-237: $^{237}_{93}Np$ vervalt naar $^{209}_{83}Bi$.

Deze laatste familie is uitgestorven; de halveringstijd van de stammoeder bedraagt slechts 3 miljoen jaar en wordt daarom niet meer in de natuur aangetroffen. Dit kon pas bestudeerd worden nadat in een kerncentrale kunstmatig Np-237 was aangemaakt!

In het voorafgaande is voldoende beschreven wat straling is. De optredende effecten wanneer materie met straling in aanraking komt, worden hierna behandeld.

3.12 Wisselwerking met materie

Alfa-, bèta-, röntgen- en gammastraling verliezen hun energie door wisselwerking met materie (lucht, water, metaal, weefsel enzovoort), voornamelijk door wisselwerking met de elektronenwolk, waarbij ionisatie en excitatie kunnen optreden.

Energie. Uit onderzoek is gebleken dat er een minimale energie nodig is voor ionisatie. Voor vaste stof ligt deze energie tussen 1 en 10 elektronvolt (eV), voor vloeistoffen bij circa 25 eV en voor gassen gemiddeld bij 34 eV. De energie van alfa- en bètadeeltjes röntgen- en gammastraling is véél hoger en kan daarom in materie ionisaties te veroorzaken.

Bij ionisatie kunnen één of meer elektronen uit de aanwezige atomen worden losgeslagen. De som van de positieve en negatieve lading is nu ongelijk aan nul. We zeggen dat het atoom een ion is geworden - is geïoniseerd -. Hierom wordt deze straling ook wel ioniserende straling genoemd. Een belangrijk effect is dat de zo gevormde ionen chemische reacties kunnen veroorzaken die het materiaal veranderen. Bij materie veroorzaakt straling in het algemeen enige warmte, die verder niet van belang is.

Effecten van gammastraling. Gammastraling kan op 3 manieren interactie met materie geven:

- het foto-elektrisch effect: een gammakwant draagt zijn energie volledig over aan een elektron;
- het comptoneffect: een gammakwant draagt een deel van zijn energie over aan een elektron (comptonelektron genaamd). Er blijft een gammakwant bestaan met een lagere energie;
- paarvorming: de gammakwant moet een energie hebben van minstens 2 x 0,511 MeV om de productie van een elektronenpaar (elektron en positron) mogelijk te doen zijn.

Voordat wordt ingegaan op de effecten op levende materie worden eerst in hoofdstuk 4 de gangbare radiologische eenheden besproken.

0-0-0

4. ! RADIOLOGISCHE GROOTHEDEN EN EENHEDEN

Met de benaming "grootheden" worden begrippen bedoeld die in de natuurkunde en techniek worden gehanteerd en in hun onderling verband worden bestudeerd en meetbaar zijn. De "eenheden" worden gedefinieerd met behulp van kunstmatige of aan de natuur ontleende standaarden.

In dit hoofdstuk worden eerst de grootheden beschreven waarmee de "sterkte" van een stralingsbron en het daarbij aanwezige stralingsveld wordt gedefinieerd. Vervolgens worden de grootheden en de samenhangende factoren bij dosimetrie behandeld die betrekking hebben op de energieoverdracht van ioniserende straling aan materie. Het hoofdstuk wordt afgesloten met enkele conversietabellen en een korte samenvatting van de voor deze cursus belangrijkste radiologische groot- en eenheden.

4.1 Activiteit

Bronsterkte. De grootheid activiteit of bronsterkte (symbool: **A**) van een hoeveelheid radioactieve stof wordt gekarakteriseerd als het aantal niet-stabiele atomenkernen dat per seconde overgaat van een *instabiele* naar een meer *stabiele* toestand. Goed beschouwd is de grootheid activiteit identiek aan het product van het aantal kernen en de snelheid waarmee deze vervallen (zie ook hoofdstuk 3). De grootheid activiteit wordt in het SI-stelsel uitgedrukt in de eenheid Becquerel (afkorting: **Bq**).

Een activiteit van één Becquerel komt overeen met een hoeveelheid radioactieve stof waarin één desintegratie per seconde plaatsvindt.

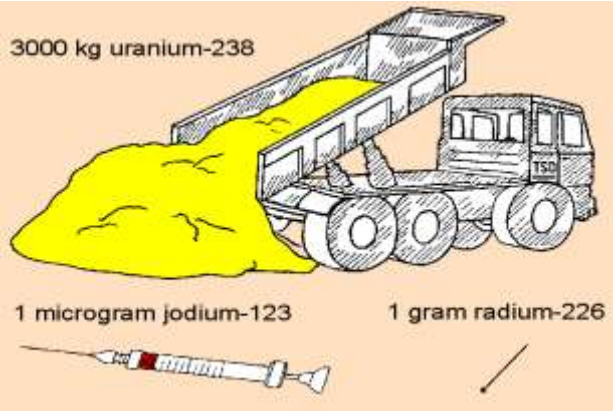
In de praktijk is 1 Bq een bijzonder kleine maat, daarom worden veelvouden van de eenheid becquerel gebruikt, zoals de kilobecquerel [kBq], megabecquerel [MBq] en gigabecquerel [GBq].

Vroeger werd de curie (afkorting: Ci) als eenheid voor activiteit gebruikt. Zo kende men aan 1 gram radium, waarin per seconde 37 miljard atomen vervallen, een activiteit toe van 1 Curie. Het rekenkundig verband tussen de oude en nieuwe eenheid is (zie ook tabel 4.4):

$$1\ Ci = 3{,}7 \times 10^{10}\ Bq = 37\ GBq$$
$$1\ Bq = 2{,}7 \times 10^{-11}\ Ci = 27\ picocurie\ [pCi]$$

Hoeveelheid radioactieve stof. Het is een misvatting dat de activiteit van een radioactieve stof overeenkomt met de *hoeveelheid* van die stof. De activiteit is weliswaar *een maat* voor de hoeveelheid maar om de hoeveelheid stof te kunnen berekenen moeten we ook weten hoe groot de vervalsnelheid of halveringstijd is.

Specifieke activiteit. De specifieke activiteit is de activiteit per gewichtshoeveelheid. De massa van eenzelfde hoeveelheid activiteit verschilt sterk per radionuclide en is afhankelijk van de halveringstijd. Met het voorbeeld in figuur 4.1. wordt weergegeven dat een activiteit van ***37 GBq*** overeenkomt met een massa van circa ***3000 kg*** aan uranium-238, ***1 microgram*** jodium-123 en ***1 gram*** radium-226.



Figuur 4.1. Voorbeelden van gelijke activiteit en ongelijke massa.

De specifieke activiteit is voor U-238, Ra-226 en I-123 respectievelijk 12,3 kBq/g, 37 GBq/g en 37.000 TBq/g!

4.2 Blootstelling aan stralingsvelden

Een stralingsbron veroorzaakt in zijn omgeving een stralingsveld dat als het ware bestaat uit een verzameling energierijke stralingsdeeltjes.

Exposie. De oude grootheid exposie (symbool: **X**) is een maat voor de ionisatiedichtheid in lucht die wordt veroorzaakt door fotonenstraling (röntgen- of gammastraling). Deze grootheid stamt uit de beginjaren van de toepassing van röntgenstraling en werd toen gebruikt als meetgrootheid om de intensiteit van het stralingsveld aan te geven.
De ionisatiedichtheid in lucht kan worden opgevat als een hoeveelheid elektrische lading ter plaatse, welke een maat is voor de sterkte van het stralingsveld. In lucht heeft fotonen- of gammastraling het vermogen om vanaf een fotonenenergie van circa 34 eV een (snelle) elektronenemissie te veroorzaken, die weerandere ionisaties veroorzaakt.

De niet SI-eenheid van exposie aan fotonenstraling is de röntgen (R). Eén röntgen geeft een lading van 2,58 x 10^{-4} Coulomb (van één teken) of 2,08 x 10^{9} ionenparen per cm^3. De hiervoor in lucht benodigde energie komt overeen met circa 8,5 x 10^{-3} J/kg. Grofweg betekent dit dat om 1 kg lucht op te laden tot een lading van 1 Coulomb een fotonenstroom met een intensiteit van 3876 Röntgen nodig is.

Het gebruik van de grootheid exposie en de eenheid röntgen is achterhaald. Het meten van de in lucht gevormde elektrische lading gaat alleen op bij de relatief lage energie van röntgenstraling maar is ongeschikt voor hoogenergetische fotonenstraling. Daardoor verliest het begrip exposie veel van zijn praktische betekenis. Dit heeft geleid tot de invoering van nieuwe dosimetrische grootheden. Hier is de hoeveelheid gevormde ionisaties niet belangrijk, maar wel de overgedragen energie aan materie!

Exposie is géén dosisgrootheid. Men heeft door het meten van de in lucht gevormde elektrische lading slechts inzicht in de hoeveelheid stralingsenergie welke ter plaatse door röntgenstraling kan worden afgegeven in andere materieelsoorten (of menselijk weefsel). Indien de afgifte van energie alleen plaatsvindt in lucht gebruiken we liever van de grootheid kerma.

Exposietempo. De tijdsafgeleide van exposie is exposietempo (stralings-intensiteit of exposiesnelheid). In het SI-stelsel wordt deze grootheid exposietempo (symbool: **X**) uitgedrukt in de eenheid coulomb per kilogram per seconde. Verouderde praktische eenheden zijn de röntgen per seconde, röntgen per uur enzovoort.

Kerma. De naam Kerma (symbool: **K**) is afgeleid van **K**inetic **E**nergy **R**eleased in **Ma**terial. Dit is de overgedragen kinetische energie in materie van alle vrijgemaakte secundaire geladen deeltjes in deze materie door ongeladen stralingsdeeltjes. In het SI-stelsel wordt deze grootheid uitgedrukt in de eenheid **Gy**.

4.3 Absorptie van energie.

Geabsorbeerde dosis. Onder de grootheid geabsorbeerde dosis, ook wel "dosis" genoemd, wordt verstaan de geabsorbeerde dosis die het gevolg is van de absorptie van energie in het stralingsveld van een bron. In het SI-stelsel wordt deze grootheid (symbool: **D**) uitgedrukt in de eenheid Gray (afgekort: **Gy**), waarbij: **1 Gy = 1 joule per kg**

Voorheen was dit de grootheid rad (radiation absorbed dose), waarbij één rad = 0,01 Joule per kg. Bij een energieopname van één rad, is dit dus 100 maal minder dan de opname van één Gray! In lucht is de hoeveelheid straling (geabsorbeerde dosis) die men oploopt als men aan 0,01 Gray (Gy) blootstaat:

0,01 Gy = 0,01 J/kg = 1 rad

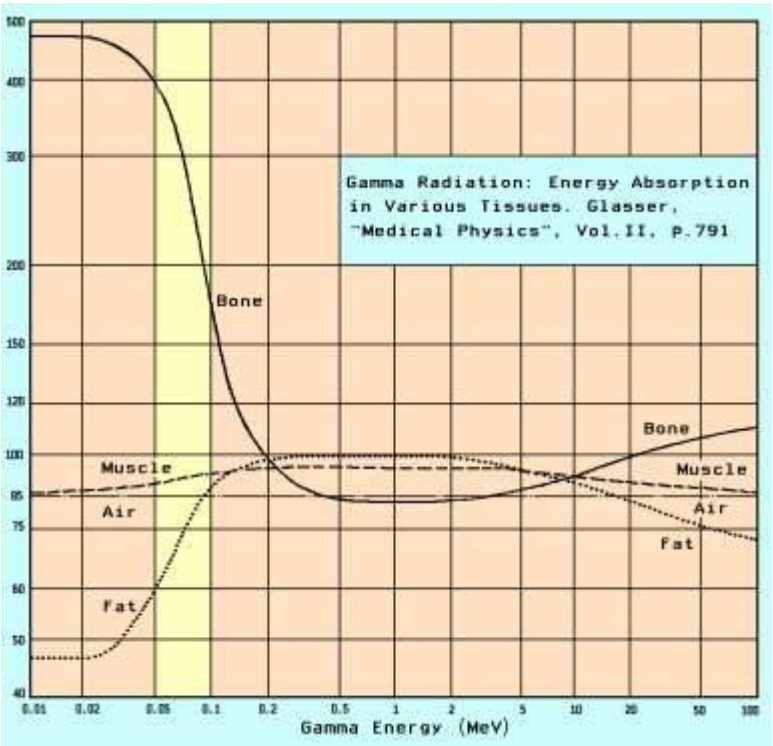
fac: ***Energieafhankelijkheid.*** In lucht is de overdracht van energie niet energieafhankelijk en geldt (indien één röntgen gelijk is aan 8,5 x 10^{-3} J per kg lucht) dat 1 R = 0,85 rad.

Bij andere materialen dan lucht is de overdracht van energie wel sterk afhankelijk van de energie en de dichtheid van de soort materiaal. Van belang is de inwerking van röntgenstraling op de verschillende stoffen waaruit ons lichaam is opgebouwd. Dit moet duidelijk worden uit tabel 4.1 en figuur 4.2.

Tabel 4.1 Energie-absorptie in bot en zacht weefsel.

Energie van de röntgenstraling (keVolt)	rad per röntgen in	
	zacht weefsel	bot
100	0,94	3,10
250	0,95	1,76
400	0,97	1,11

Stelling: Voor zacht weefsel (spieren) wordt veelal aangenomen dat 1 rad = 1 R. Dit is over een vrij groot energiegebied geldig en toelaatbaar voor stralingsbeschermingdoeleinden. Klopt dit? Let in figuur 4.2. op de dosis in het gebied 0,05 tot 0,1 MeV!



Figuur 4.2. Energie-absorptie in verschillende weefsels

Dosistempo. Deze grootheid geeft aan hoeveel energie per tijdseenheid wordt geabsorbeerd. In het SI-stelsel wordt deze grootheid uitgedrukt in de eenheid Gray per uur of Gray per seconde [Gy/h of Gy/s]. *Bij sommige intensiteitsmeters wordt de geabsorbeerde dosis per tijdseenheid vermeld in centigray per uur [cGy/h]:* ***1 cGy/h ≈ 0,01 Gy/h***

4.4 Biologisch effect (stralingsschade)

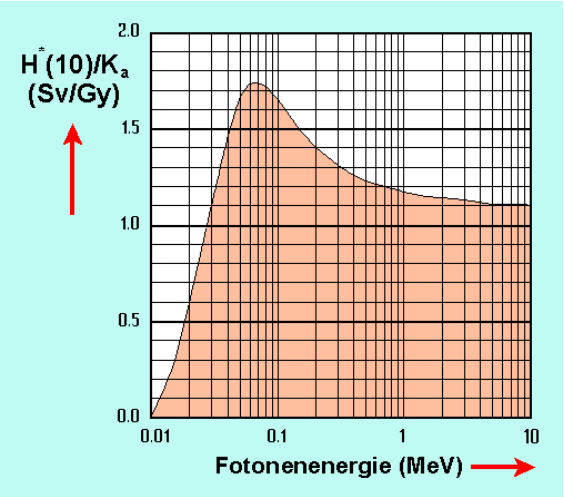
Dosisequivalent. De grootheid dosisequivalent karakteriseert het optredende biologisch effect (stralingsschade) van de geabsorbeerde hoeveelheid straling. Deze grootheid (symbool: **H**) wordt uitgedrukt in de eenheid Sievert (afgekort: **Sv**), waarbij geldt voor gammastraling: **1 Sv = 1 J/kg**

Vroeger gebruikte men hiervoor de grootheid rem (röntgen equivalent man), waarbij 1 rem = 0,01 Joule per kg, zodat 1 rem ⍰ 0,01 Sv.

Dosisequivalenttempo. De tijdsafgeleide van dosisequivalent is dosisequivalent-tempo. Deze grootheid wordt ook uitgedrukt in de eenheid Sievert of microsievert per uur [Sv/h of µSv/h].

fac: ***Effectief dosisequivalent***. De grootheid effectief dosisequivalent is de som van de optredende biologische effecten in de verschillende organen. De behandeling van deze grootheid (symbool: $\mathbf{H_E}$), die ook wordt uitgedrukt in de eenheid Sievert, valt buiten het niveau van deze cursus.

fac: ***Omgevingsdosisequivalent***. De ICRU-grootheid die beter aansluit bij de dosis die een mens zou ontvangen als deze zich in een stralingsveld zou bevinden is genaamd "omgevingsdosisequivalent" (symbool: $\mathbf{H^*(10)}$) (in het Engels: "ambient dose equivalent").
Deze grootheid is gedefinieerd als het dosisequivalent op 10 mm diepte in een bol van weefselequivalent materiaal en is een goed meetbare grootheid. In figuur 4.3. wordt de relatie tussen de grootheden omgevingsdosisequivalent en kerma in lucht weergegeven.



Figuur 4.3. Relatie tussen omgevingsdosisequivalent en kerma in lucht.

Omgevingsdosisequivalenttempo. De grootheid omgevingsdosisequivalent-tempo wordt ook uitgedrukt in de eenheid Sievert per uur [Sv/h of µSv/h].

Lading in lucht (exposietempo)	Geabsorbeerde dosis	Dosisequivalent (schade)
2,58 . 10^{-2} C/kg	1 Gray (Gy)	1 Sievert (Sv)
↑	100 cGy	↑
Oud 100 Röntgen (R)	100 rad	100 rem

Figuur 4.4. geeft een overzicht van de besproken grootheden.

4.5 Bronconstante en activiteit.

fac: Om aan te geven hoe groot de intensiteit is bij eenzelfde activiteit van verschillende gammabronnen op één meter afstand wordt een constante gebruikt. In de nieuwe eenheden wordt deze constante "bronconstante" genoemd (symbool: **Γ**). Deze bronconstante geldt voor het omgevings-dosisequivalenttempo $H^*(10)$ op 1 meter van een puntbron en wordt uitgedrukt in $\mu Sv.m^2.MBq^{-1}.h^{-1}$ (zie voor de uitleg hierover ook onder punt 4.4).

Tabel 4.2. Bronconstante voor enkele radionucliden

Nuclide	[$\mu Sv.\ m^2.MBq^{-1}.h^{-1}$] symbool: **Γ**	Opmerkingen: De constante geldt voor $H^*(10)$
Co-60	0,36	
Cs-134	0,25	
Cs-137	0,093	in evenwicht met Ba-137m
I-131	0,66	
Tc-99m	0,023	
Ra-226	0,22	in evenwicht met alle dochters en 0,5 mm Pt scherm

Het bepalen van activiteit. De activiteit of sterkte van een gamma- stralingsbron kan door het meten van de stralingsintensiteit worden berekend met onderstaande formule. Zo is ook op iedere gewenste afstand van een bekende activiteit de te verwachten stralingsintensiteit te berekenen. De relatie van de verschillende parameters tot elkaar is in formulevorm als volgt weer te geven:

$$A = \frac{K \cdot d^2}{\Gamma}$$

Waarin:
- A = de activiteit [Bq of MBq]
- K = luchtkermatempo [Gy/h] (zie punt 4.3)
- d = de afstand tot de bron [m]
- Γ = bronconstante (zie punt 4.5)

Evenzo kan bij een bepaalde bronsterkte het luchtkermatempo op afstand **d** worden bepaald volgens:

$$K = \frac{\Gamma \cdot A}{d^2}$$

Zoals in de voorgaande formule(s) is te zien neemt de intensiteit van de straling kwadratisch af met de afstand!

4.6 Relatieve Biologische Effectiviteit (RBE).

De biologische werkzaamheid van ioniserende straling in menselijk weefsel wordt bepaald door de lokaal geabsorbeerde hoeveelheid stralingsenergie en de wijze waarop deze energie over het bestraalde weefsel wordt verdeeld. In de radiobiologie wordt de biologische werkzaamheid van een stralingssoort voor een bepaald type effecten uitgedrukt met de RBE-factor.

Kwaliteitsfactor. Voor stralingsbeschermingsdoeleinden wordt de biologische werkzaamheid uitgedrukt in de *kwaliteitsfactor* (symbool: **Q**). Deze kwaliteitsfactor is te beschouwen als een verhoudingsgetal dat aangeeft hoeveel maal een bepaalde stralingssoort werkzamer is ten opzichte van röntgenstraling. Deze factor is:

1 voor fotonen-, röntgen-, gamma- en bètastraling,
2 voor thermische neutronen (Q = 2 á 3),
5 voor matig snelle neutronen (Q = 3 tot 8),
10 voor protonen en snelle neutronen en
20 voor alfastraling en zeer snelle neutronen.

Verband tussen D en H. Men moet er op bedacht zijn dat het dosisequivalent H in Sievert **NIET** voor alle stralingssoorten evenredig is met de geabsorbeerde dosis D in Gray. De kwaliteitsfactor is dus de factor waarmee men de geabsorbeerde dosis D moet vermenigvuldigen om het dosisequivalent H te verkrijgen, of in formulevorm: **H = Q x D [Sv = Q x Gy]**

Zacht weefsel. Voor fotonenstraling met een energie lager dan 1,5 MeV (röntgenstraling en gammastraling) geldt een kwaliteitsfactor van 1 (zie ook figuur 4.3.4.), zodat voor zacht weefsel gesteld kan worden:

1 Gy = 1 Sv (≈ 100 R)

4.7 Resumé

Voor de praktijksituatie zijn de volgende tabellen en overzichten van nut:

- **SI-stelsel**. De relatie tussen de SI en de niet-SI eenheden, zie tabel 4.3;
- **Conversie** van curie naar Becquerel, zie tabel 4.4;
- **Overzicht** van de radiologische grootheden en eenheden in Figuur 4.5.

Tabel 4.3. Relatie tussen SI eenheden en niet-SI eenheden

Fysische grootheid	SI eenheid	Niet-SI eenheid	Relatie
Activiteit	becquerel (Bq) 1 Becquerel=1/s	Curie (Ci)	1 Bq = $2{,}7 \times 10^{-11}$ Ci = 27 pCi 1 Ci = $3{,}7 \times 10^{10}$ Bq = 37 GBq
Geabsorbeerde dosis	gray (Gy) 1 Gy= 1 J/kg	rad (rad)	1 Gy ≈ 100 rad 1 rad ≈ 0,01 Gy = 10 mGy
Dosisequivalent	sievert (Sv) 1 Sv= 1 J/kg	rem	1 Sv ≈ 100 rem 1 rem ≈ 0,01 Sv = 10 mSv
Exposie	coulomb/kg	röntgen (R)	1 C/kg = 3876 R (C/kg) = 3,876 kR 1 R = $2{,}58 \times 10^{-4}$ C/kg = 258 µC/kg

Tabel 4.4. Conversie van Curie naar Becquerel

µCi mCi Ci	kBq MBq GBq	µCi mCi Ci	MBq GBq TBq
0,1	3,7	30	1,11
0,2	7,4	40	1,48
0,3	11,1	60	2,22
0,4	14,8	70	2,59
0,5	18,5	80	2,96
1	37	90	3,33
2	74	100	3,7
3	111	150	5,55
4	148	200	7,4
5	185	250	9,25
6	222	300	11,1
7	259	400	14,8
8	296	500	18,5
9	333	600	22,2
10	370	700	25,9
15	555	800	29,6
20	740	900	33,3

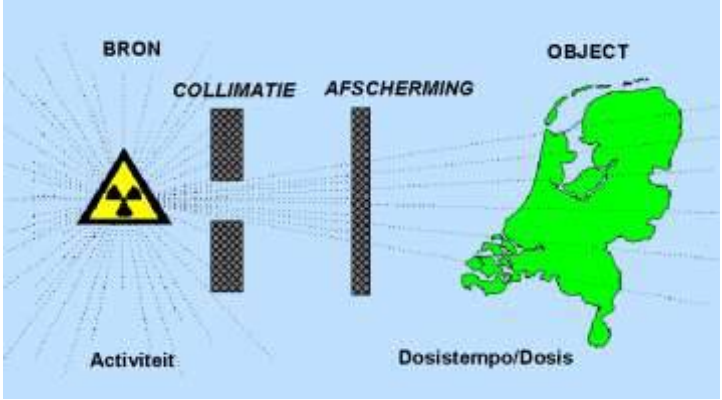
Voorbeelden:

0,2 µCi	=	7,4 kBq	50 µCi	=	1,85 MBq
5 mCi	=	185 MBq	200 mCi	=	7,4 GBq
20 Ci	=	740 GBq	1000 Ci	=	37 TBq

Vuistregel: 1 millicurie komt overeen met 37 megabecquerel (1 mCi ≈7 MBq)

NB: Besmetting wordt uitgedrukt in Bq/cm^2 of Bq/m^2
Specifieke activiteit wordt uitgedrukt in Bq/g of Bq/kg.

Overzicht radiologische grootheden en eenheden:



Figuur 4.5. Relatie radiologische grootheden en eenheden.

Dosistempo/Dosis: (te vergelijken met lichtintensiteit)

Grootheden en eenheden:

- **Ionisaties in lucht**	**:**	**C/kg**	**(Coulomb per kg)**
- vroeger	:	R	(Röntgen)
- **Dosis in lucht**	**:**	**Gy**	**(Air-kerma)**
- **Dosis in materiaal**	**:**	**Gy**	**(Gray)**
- vroeger	:	rad	(radiation absorbed dose)
- **Dosiseffect in weefsel**	**:**	**Sv**	**(Sievert)**
- vroeger	:	rem	(röntgen equivalent man)

samenhang:	**huidig**		**oud**
	1 C/kg	**≈**	**3876 R**
	1 Gy	**≈**	**100 rad**
	1 Sv	**≈**	**100 rem**

tussen de soorten:

1 C/kg in lucht	**≈**	**33,68 Gy**
1 C/kg in weefsel	**≈**	**37,21 Gy**
1 Gy röntgen/gamma	**≈**	**1 Sv**
1 Gy alfa/neutronen	**≈**	**20 Sv**

tijdsafhankelijk: ***dosistempo*: 1 Sv/h geeft een dosis van 1 Sv in elk uur!**

Naschrift. Wanneer men de intensiteit van en de tijd van blootstelling aan de straling kent, kan de dosis worden bepaald. Als de dosis bekend is kan men daarmee **de KANS** op biologische schade bepalen. In het hoofdstuk 5, Biologische effecten, wordt hierop nader ingegaan.

0-0-0

5. ! BIOLOGISCHE EFFECTEN

5.1 Biologische effecten van ioniserende straling

Zeer spoedig na de uitvinding van de röntgenstralen (1895) bleken deze stralen gevaarlijk te zijn. Effecten waren onder andere verlies van haar, afschilvering van de huid van de handen, brandwonden, ontstekingen, kwaadaardige groei van cellen enzovoort. Door onvoldoende voorzorgen en *de primitieve constructie van röntgenapparatuur*, stierven de meeste radiologen van die dagen binnen 20 jaar, nadat zij met dit werk waren begonnen.

Tegenwoordig is men zich terdege ervan bewust dat ioniserende straling in staat is energie aan materie over te dragen. Het menselijk lichaam is opgebouwd uit vele weefsels, die weer bestaan uit cellen. Iedere cel is opgebouwd uit vele stoffen van vaak zeer complexe verbindingen (denk aan het DNA).

Bij ***ionisatie*** van de ***celatomen*** kan directe of indirecte ***celschade*** optreden, afhankelijk van het aantal betrokken atomen en hun plaats in de cel. Bij celschade kan in de cel een chromosoombeschadiging optreden of kan celdood volgen. Afhankelijk van de soort cel kan hierop weer weefselsterfte, orgaandood enzovoort volgen.

Nota Bene: Punt 2.8 uit hoofdstuk 3 leert dat ***een geïoniseerd atoom zich chemisch anders gedraagt***, met alle gevolgen van dien! Hieruit mag terecht worden geconcludeerd dat ioniserende straling per definitie gevaarlijk is voor de mens.

Bij de uiteindelijke schade wordt een onderscheid gemaakt tussen schade aan de mens zelf *(somatische schade)* en de schade aan diens nakomeling *(genetische schade)*. Altijd is dit het gevolg van een bepaalde hoeveelheid overgedragen (geabsorbeerde) energie.

5.2 Somatische schade

De parameters, die van belang zijn voor de uiteindelijke schade bij blootstelling aan ioniserende straling, zijn:

- de ***soort*** en ***intensiteit*** van de straling,
- de ***gevoeligheid*** van het getroffen weefsel (snelgroeiend weefsel ondervindt meer schade),
- de ***plaats*** van de straling (in- of uitwendig),
- het ***oppervlak*** waarover de bestraling plaatsvindt (het gehele lichaam of bijvoorbeeld alleen de hand),
- de ***tijdsduur*** van de bestraling.

De effecten van somatische schade zijn te verdelen in ***directe*** en ***late*** effecten.

Bij directe effecten (niet stochastisch) is het verband tussen bestraling en de daaruit voortvloeiende ziekteverschijnselen zonder meer duidelijk: De ernst van het effect neemt toe naarmate de stralingsdosis groter is. De dosiseffectrelatie wordt bij de directe effecten gekenmerkt door het bestaan van een ***drempeldosis***, waar beneden het effect niet optreedt, of als niet-schadelijk wordt ervaren. In de volgende tabel 5.1 zijn de effecten weergegeven die als gevolg van éénmalige dosis over het gehele lichaam kunnen optreden.

Het verband tussen de stralingsbelasting in (Sv) en de daaruit voortvloeiende ziekteverschijnselen is zonder meer duidelijk:

"0" - 0,25	géén zichtbare schade
0,25 - 0,5	mogelijk afwijkend bloedbeeld, maar géén ernstige schade
0,5 - 1	bloedbeeldverandering, mogelijk lichte vorm van stralingsziekte (overgeven, misselijkheid enz.)
1 - 2	symptomen van stralingsziekte, herstel binnen 6 weken, mogelijk blijvende schade
2 - 4	schade zeker, gedeeltelijke invaliditeit, toenemende kans op overlijden (bij circa 4 Sv overlijdt 50% van de bestraalde personen).

Tabel 5.1. Relatie dosis, verschijnselen en sterfte.

Dodelijke doses. Stralingsdoses groter dan 5 Sv zijn in het algemeen dodelijk en gaan gepaard met verschijnselen die *stralingssyndromen* worden genoemd. De kennis hierover berust op waarnemingen bij experimenteel onderzoek met proefdieren en incidentele observaties bij de mens. Deze verschijnselen van stralingsziekte bij de mens zijn waargenomen bij de slachtoffers van kernbomexplosies in Hirosjima en Nagasaki, ongevallen met sterkte stralingsbronnen en bestralingen ten behoeve van medische behandeling.

Stralingsdoes van 4 tot 10 Sv sterft 50. Tot 100% van de blootgestelde binnen een maand en bij een stralingsdosis van 0 tot 50 Sv sterft 100% binnen een week door vocht- en bloedverlies bij darmbeschadiging.

Bij stralingsdoses van meer dan 50 Sv vindt 100% van de sterfte plaats binnen enkele uren, ten gevolge van beschadiging van het centrale zenuwstelsel. Een bijzonder wijze van bestraling vindt plaats bij een nog ongeboren kind ***(in utero)***, wiens moeder een röntgenonderzoek ondergaat. Cellen, die zich snel delen en/of zuurstofrijk zijn, zijn erg gevoelig voor straling. Het is duidelijk dat bestraling in de eerste drie maanden van de zwangerschap zeker voorkomen moet worden.

fac: ***Klinische tolerantiedosis***. Bij de radiotherapie speelt het begrip *"klinische tolerantiedosis"* een belangrijke rol. Hieronder wordt die dosis verstaan, waarbij in minder dan 5% van de gevallen niet-stochastische (directe) effecten optreden. Voor alle andere, niet genoemde, organen bedraagt de tolerantiedosis meestal 40 Sv of meer. In de tabel klinische tolerantie dosis is het uitgangspunt voor Röntgen- en gammastraling, 2 Gy per fractie, 5 fracties per week, gedurende 4 tot 7 weken.

Tabel 5.2. Klinische tolerantie dosis.

Orgaan	Niet-stochastische schade, optredend binnen 5 jaar na medische bestraling	Tolerantiedosis (Gy)
beenmerg	aplasie, pancytopenie	2 - 3 *) 30 **)
lever	acute en chronische hepatitis	30
long	acute en chronische pneumonitis	25
nier	acute en chronische nephrosclerosis	23
testes	permanente sterilisatie	5 - 15
ovaria	permanente sterilisatie	2 - 6
ooglens	cataract	5 - 14

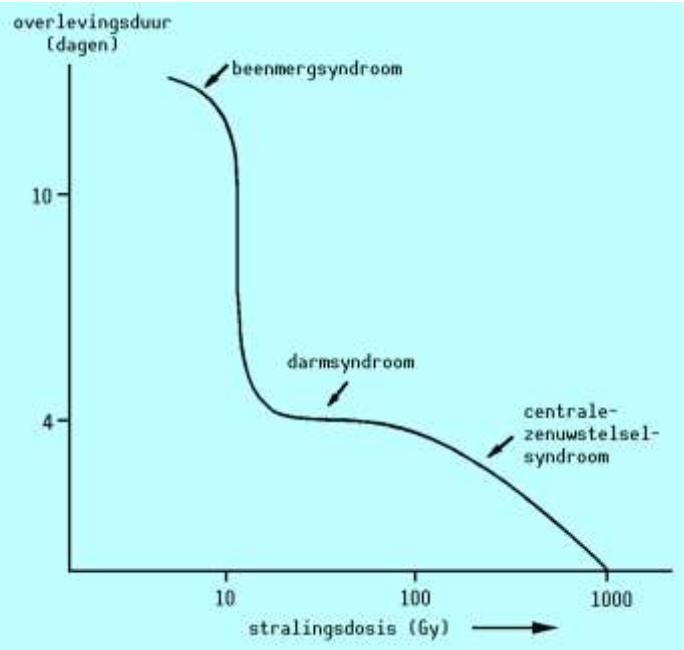
*) eenmalige dosis
**) voor 90 % bestraald orgaan

Referte: Cancer, supplement, April 1976, 37, nr.4, pag. 2047; Rubin en Casarett, Chapter 8, Concepts of clinical radiation pathology, 1973 (ed. W.B. Saunders, Cy, London).

Chronische bestraling. Bij chronische bestraling met middelmatige doses op de handen treedt vaak huid-erytheem (roodkleuring) op, gevolgd door haaruitval en abnormale pigmentvorming. Ook kan de huid dunner worden; gladder en de normale tekening verliezen, er kunnen gaten in vallen (zweren), die niet of zeer langzaam genezen, er kan afsterving voorkomen, nagels kunnen bros worden, er kan huidkanker ontstaan enzovoort.....!

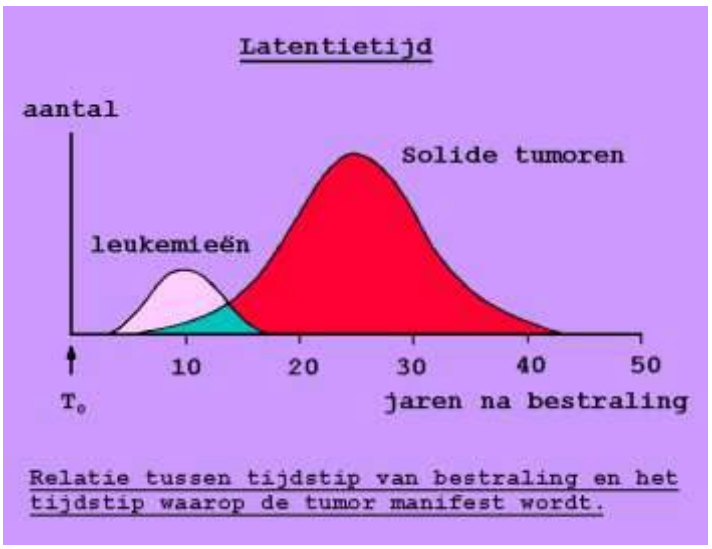
De overlevingsduur na bestraling wordt in de figuur 5.1 weergegeven. Deze schematische voorstelling van de overlevingsduur na bestraling van het gehele lichaam met verschillende doses en berust voornamelijk op gegevens die met muizen zijn verkregen. Bij een bestraling van 4 tot 10 Sv is vooral het *beenmergsyndroom* de oorzaak van het overlijden. Hierbij kan soms beenmergtransplantatie als therapie worden toegepast. De doodsoorzaak bij een bestraling van 10 tot 50 Sv is het zogenaamde *gastro-intestinale syndroom* of *darmsyndroom* en boven 50 Sv het *centraalzenuwstelselsyndroom*.

Bij een bestraling van 4 tot 10 Sv is vooral het *beenmergsyndroom* de oorzaak van het overlijden. Hierbij kan soms beenmergtransplantatie als therapie worden toegepast. De doodsoorzaak bij een bestraling van 10 tot 50 Sv is het zogenaamde *gastro-intestinale syndroom* of *darmsyndroom* en boven 50 Sv het *centraalzenuwstelselsyndroom*.



Figuur 5.1. Het verband tussen stralingsdosis (Gy) en overlevingsduur (dagen).

Onder late effecten (ook wel stochastische effecten genaamd) vallen vooral het ontstaan van tumoren, leukemie en staar. Deze verschijnselen vertonen een kans op een effect, dat wil zeggen naar mate de stralingsdosis groter is, neemt de kans toe, dat men een laat effect ziet; de ernst van het effect is echter hetzelfde. Deze effecten kunnen zich openbaren van enkele jaren tot tientallen jaren later. De figuur 5.2. geeft de relatie weer tussen het tijdstip van bestraling en het moment waarop het verschijnsel zich openbaart. Deze tijd, de latentietijd genaamd, is voor respectievelijk leukemie en solide tumoren ongeveer 10 en 25 jaar.



Figuur 5.2. Latentietijd

Het verband tussen een éénmalige dosis en het optredend effect is om deze reden NIET altijd aanwijsbaar! Er zijn bepaalde beroepsgroepen die een verhoogde kans op deze effecten hebben: met name röntgenologen en materiaalonderzoekers. Deze verhoogde kans bestaat ook voor patiënten die, voor medische doeleinden, een langdurige of afwisselende dosis hebben ontvangen.

Omdat eerder genoemde verschijnselen ook voorkomen bij NIET bestraalde personen, is alleen ***statistisch*** aantoonbaar dat deze personen een ***verhoogd stralingsrisico*** hebben.

Er zijn echter nog andere effecten van straling die niet tot uitdrukking komen bij degenen die zelf aan straling worden blootgesteld. Deze zogenaamde genetische schade openbaart zich pas bij hun directe nakomelingen of in latere generaties.

5.3 Genetische schade

Genen. In lichaamscellen komen 46 chromosomen voor, die elk een groot aantal genen bevatten. De genen dragen de erfelijke informatie, waarnaar het individu is opgebouwd.

Voortplanting. Eenvoudig gesteld bevatten rijpe geslachtscellen slechts 23 chromosomen; bij vereniging van een eicel en een spermatozoa wordt dan weer één cel met 46 chromosomen gevormd, waaruit dan door deling en differentiatie weer een nieuw individu ontstaat. Elke levendgeborene heeft op dit moment een kans van circa 6%, dat hij/zij een ziekte of gebrek heeft met een duidelijke genetische inslag. Deze "schade" wordt zeker door de bestraalde persoon aan zijn/haar nageslacht doorgegeven!

Verstoring in de ontwikkeling. De ontwikkeling van een lichaamscel kan ook door ioniserende straling worden verstoord en wel op twee manieren:

1. *Allereerst kan de deling en versmelting van chromosomen worden gestoord: er ontstaat dan een bevruchte eicel, waarin een bepaald chromosoom teveel aanwezig is, waardoor het geboren individu min of meer ernstige afwijkingen heeft. Bij een tekort aan één of meer chromosomen optreden, zullen meestal deze individuen geen genetische belasting voor het nageslacht vormen, daar zij niet tot voortplanting komen. Soms zijn de afwijkingen zo groot, dat er een vroegtijdige dood of een miskraam optreedt. Dit behoeft echter niet alleen door straling te zijn ontstaan.*
2. *Een tweede effect is de beschadiging door ioniserende straling van sommige genen. De chromosomen zullen zich normaal delen en de eicel en spermatozoa zich correct verenigen, doch het individu vertoont bepaalde afwijkingen (kleurenblindheid, albinisme).*

fac: ***Verdubbelingdosis***. Deze afwijkingen zijn niet specifiek voor stralingsschade; hooguit is statistisch gezien het voorkomen van een bepaalde afwijking vergroot. Men spreekt daarom wel van een zogenaamde *verdubbelingdosis*, dat is die dosis, waarbij een bepaalde afwijking tweemaal zo vaak optreedt als van nature mag worden verwacht. Er zijn schattingen van 0,3 tot 1,2 Sievert (éénmalige dosis) tot 2,4 Sievert (bij chronische bestraling).

fac: **Effectief dosisequivalent**

Weegfactoren. In de stralingsbescherming is het begrip ingevoerd van het *effectief dosisequivalent*, daar het lichaam meestal niet homogeen wordt bestraald. Men kan nu weegfactoren invoeren, die als het ware de dosis in één of enkele organen, na vermenigvuldiging met een weegfactor van het afzonderlijke orgaan, gesommeerd een dosis geven. Deze dosis wordt geacht hetzelfde risico te geven als in het geval dat deze dosis homogeen over het gehele lichaam is ontvangen. Deze weegfactoren worden in internationaal verband ontwikkeld en door de ICRP gepubliceerd (zie tabel 5.3):

Tabel 5.3. ICRP-weegfaktoren.

Orgaan of weefsel	wT
gonaden	0,25
borstklier	0,15
rood beenmerg	0,12
long	0,12
schildklier	0,03
botoppervlak	0,03
overige weefsels	0,30 *)

Totaal	1,0

*) Overige weefsels: wT = 0,06 voor elk van de vijf overige organen of weefsels die de hoogste dosis krijgen.

5.4. ***Dosislimieten.*** De blootstelling aan ioniserende straling in de uitoefening van werkzaamheden is uit maatschappelijke overwegingen aan een maximum gebonden: de dosislimieten(zie ook hiervoor punt 1.5 van hoofdstuk 1).

De dosis, die een radiologische werker maximaal mag ontvangen, bedraagt 50 millisievert/jaar (mSv/j) voor het gehele organisme. Wanneer nu een enkel orgaan, waarvan de weegfactor klein is, wordt bestraald, zou de dosis in dat orgaan zeer hoog kunnen zijn, voordat de limiet wordt overschreden.

Om directe (niet-stochastische) effecten te voorkomen is er een grens van 500 mSv/j voor elk orgaan ingevoerd, met uit zondering van de ooglens, waarvoor 150 mSv/j wordt aangehouden. In tabel 5.4 is aangegeven, welke organen deze limiet van 500 mSv/j bereiken, voordat de effectieve dosislimiet van 50 mSv/j wordt overschreden.

fac:

Tabel 5.4 Maximale orgaandosis op grond van weegfactor en stochastische dosislimiet bij bestraling van een enkel orgaan.		
Orgaan	Weegfaktor wT	
		Voor 0,05 Sv . jaar $^{-1}$
gonaden	0,25	0,2
borst	0,15	0,33
beenmerg	0,12	0,42
long	0,12	0,42
botoppervlak	0,03	1,7 *)
schildklier	0,03	1,7 *)
overige organen	0,06	0,8 *)
*) voor deze organen geldt de niet-stochastische limiet van 0,5 Sv/jaar.		

Radiobiologische gegevens tonen aan dat acute bestraling met een dosis gelijk aan de niet-stochastiche jaarlimiet voor minder dan 10% van de cellen in een orgaan celdood betekent. Dit is onvoldoende voor functieverlies; hiervoor zou het percentage 90% of hoger moeten zijn. In vele organen wordt het celverlies binnen enkele dagen tot weken weer aangevuld (reepopulatie); dit geldt echter niet voor bijvoorbeeld de ovaria.

5.5 Normering van risico's

De hoofdlijnen uit de nota van VROM/SZW getiteld "Omgaan met risico's van straling" (Tweede Kamer, vergaderjaar 1989-1990, 21483, nr 2) zijn gebaseerd op een nieuw systeem van normering. Dit heeft in principe betrekking op alle menselijke activiteiten waarbij er als gevolg van ioniserende straling kans op schade is. Hierbij worden de volgende categorieën bronnen onderscheiden:

- ***Bronnen waarbij de radioactiviteit functioneel is*** (bijvoorbeeld kerncentrales en laboratoria waar met radioactieve stoffen wordt gewerkt (in het besluit stralenbescherming wordt dit geregeld).
- ***De niet-nucleaire industrieën*** waar natuurlijke radioactiviteit als verontreiniging in de grondstoffen aanwezig is en door concentratie tot risico's kan leiden (staal- en fosfaaterts verwerkende industrie.
- ***Bronnen die betrekking hebben op bouwen en wonen***; een verhoging van natuurlijke radioactiviteit die het gevolg is van de toegepaste bouwmaterialen en bouwwijzen kan hier tot verhoogde risico's leiden.

Definitie risico. Onder risico wordt verstaan "ongewenste gevolgen van een bepaalde activiteit, verbonden met de kans dat deze zich zullen voordoen" (NMP, 1989).

Uitgangspunten. Voor bronnen waarbij radioactiviteit functioneel is en voor niet-nucleaire industrieën is voor het milieubeleid uit- gegaan van het principe dat de normen worden uitgedrukt in risicogrenzen, zoals dit in het Nationaal Milieubeleidsplan en in de nota "Omgaan met risico's" wordt omschreven.

Tevens wordt er een onderscheid gemaakt tussen normale- (reguliere) en ongevalsituaties:

- Elke blootstelling, hoe gering ook, heeft een kans op nadelige effecten tot gevolg.
- Alle manieren waarop ioniserende straling de gezondheid van de mens kan schaden worden als even ernstig beschouwd (géén onderscheid tussen ziekte en sterfte).
- Het risico wordt per jaar uitgedrukt, aangezien men z'n hele leven dit risico loopt.
- Bij lage stralingsdosis worden de normen op de vrouw afgestemd, omdat deze gemiddeld gevoeliger is voor nadelige effecten dan de man.
- Op basis van de huidige kennis wordt er voorlopig van uitgegaan dat een stralingsdosis van 1 millisievert (mSv) overeen komt met een kans op overlijden van 2,5 x 10^{-5} per jaar.

Bij een gemiddelde dosis van 2,5 mSv bedraagt de kans op overlijden ongeveer 6 op de 100.000 en daarmee 0,5 % van de totale sterfte van de mens.

Normale situatie:
Alle bronnen. Voor een individu is het maximaal toelaatbare risico- niveau (overlijden) als gevolg van alle bronnen gesteld op 10^{-5} per jaar, dat wil zeggen dat de kans op overlijden één op de honderdduizend per jaar is. Dit komt overeen met een effectief dosisequivalent van 0,4 mSv per jaar.

Per bron is dit 10^{-6} per jaar en het niveau waarbij het risico per bron verwaarloosbaar wordt geacht, is gesteld op 10^{-8} per jaar.

Een overlijdensrisico van 10^{-4} met de nieuwe sterfterisicofactor van 2,5% per Sievert, komt overeen met een dosisequivalent van 4 mSv; 10^{-3} met 40 mSv en 10^{-2} met 400 mSv.

Grote ongelukken. Bij grote ongelukken is de maximaal toelaatbare kans op tien sterfgevallen is gesteld op 10^{-5} per jaar; op honderd sterfgevallen is de kans 10^{-7} per jaar.

ALARA. Het ALARA-principe wordt door de overheid toegepast als het risico van een bron zich bevindt tussen het maximaal toelaatbare risico en het niveau waarbij het risico verwaarloosbaar wordt geacht. In het milieubeleid wordt ernaar gestreefd het niveau te bereiken waarbij het risico verwaarloosbaar wordt geacht.

Er worden géén risicogrenzen gesteld aan de risico's die het gevolg zijn van bronnen die betrekking hebben op bouwen en wonen zijn slechts in beperkte mate te beïnvloeden. Wel wordt gestreefd naar een reductie.

5.6 Risicoschatting.

Onderzoek wijst uit dat het menselijke embryo bijzonder stralingsgevoelig is; vooral in de eerste drie maanden na de bevruchting (conceptie) vindt er een snelle deling van alle cellen plaats; dode of beschadigde cellen hebben op dit moment relatief veel invloed op de uiteindelijke vorm van schade.

Er is en wordt veel onderzoek gedaan naar de risico's en het optreden van genetische schade, afhankelijk van de toegediende dosis (Gy). Daarbij wordt het aantal spontaan optredende genetische afwijkingen vergeleken met die van na bestraling. Met behulp van deze gegevens kan een risicoschatting worden gemaakt. Het een en ander kan aan de hand van een voorbeeld worden toegelicht:

Uit statisch onderzoek blijkt dat per miljoen levend geborenen, gedurende vele generaties na elkaar, circa 100.000 spontaan optredende genetische afwijkingen voorkomen. Wanneer nu bij al deze generaties een bestraling van 0,01 Sv (1 rem) op de gonaden plaatsvindt, zal dit resulteren in circa 60 à 1100 extra optredende genetische afwijkingen. Dit aantal extra afwijkingen, door een dosis van 0,01 Sv per generatie, is dus kleiner of gelijk aan 1% van het totale aantal genetische afwijkingen!

Toerekening van het aantal sterfgevallen aan straling. Het berekende aantal sterfgevallen aan kanker ten gevolge van bestraling met 1 mSv (100 mrem) per jaar in relatie tot de waargenomen sterfte aan kanker en de sterfte totaal in Nederland is in de tabel 5.5 weergegeven.

Leeftijdsgroep	Percentage van de bevolking	Aantal sterfgevallen per jaar per miljoen personen in de betreffende leeftijdsgroep		
(jaar)	*(%)*	*Totaal*	*T.g.v. kanker*	*T.g.v. kanker, ontstaan na bestraling met 1 mSv per jaar*
0 - 14	27	1.200	80	4
15 - 44	43	1.000	230	7
45 - 64	20	8.200	3.000	18
65 - 74	7	32.000	9.400	26
75 en ouder	4	105.000	18.500	32

Deze gegevens zijn ontleend aan het Gezondheidsraadrapport "Kerncentrales en Volksgezondheid". De bevolkingsgegevens en de waargenomen sterfte ten gevolge van kanker zijn afkomstig uit het statistisch zakboekje 1974 en het aantal doden ten gevolge van een bestraling met 1 mSv per jaar zijn berekend op basis van het BEIR-rapport 1972.

Tabel 5.5. Sterfgevallen per jaar in Nederland.

fac: ***Het UNSCEAR-rapport*** dat in 1977 is verschenen geeft hierover het volgende:

Tabel 5.6. Risicoschatting voor kankerinductie door straling (UNSCEAR-1977).		
Bestraald orgaan of weefsel	***Morbiditeit*** *of ziektecijfer*)*	***Mortaliteit*** *of sterftecijfer**)*
beenmerg (leukemie)	10 - 60	10 - 60
schildklier	50 - 150	5 - 15
borstweefsel vrouw	30 - 110	10 - 60
longen	25 - 50	25 - 50
speekselklieren	10 - 20	5
Maag, lever, dikke darm, hersenen (alle tumoren).		10 - 15***)
Bot, slokdarm, dunne darm, rectum, blaas, alvleesklier, lymfatisch weefsel, slijmvliezen van schedelholtes.		2 - 5***)
)* *Getallen tonen het aantal gevallen van door straling geïnduceerde kanker* ***per miljoen personen per 0,01 Sv* *lage-LET röntgen of gammastraling.*		
***)* *Uit het grote verschil tussen morbiditeit en mortaliteit bij de schildklier volgt dat dit betrekkelijk goedaardige tumoren zijn.*		
****)* *Voor elk orgaan.*		

De beoordeling van beroepsrisico's. Bij de beoordeling van mogelijke beroepsrisico's ten gevolge van radiologische werkzaamheden is, bij gebrek aan een objectieve maatstaf, een vergelijking te maken met andere beroepen, cq. handelingen ***De sterftekans***, uitgedrukt in verschillende ordes van grootte, wordt in tabel 5.7. en 5.8 weergegeven.

Blootstelling met kans op "late" sterfte		Blootstelling met kans op acute sterfte †
Hard-drugsverslaving Alcoholverslaving Sigaretten roken, 1 pakje per dag	2de orde	Leeftijd 60 à 65 jaar
Continue werken met asbest Werken in kolenmijn (long) Gemiddelde kankerfrequentie bevolking Overmatig alcoholgebruik (lever)	3de orde	Leeftijd 40 à 50 jaar 1 jaar mijnbouw, bouwnijverheid of transportsector
Continue stralingsdosis 50 mSv/jaar Luchtverontreiniging industriestad (long)	4de orde	Verkeersongevallen (gemiddeld) 1 jaar industrie (gemiddeld) Leeftijd 10 jaar
Continue blootstelling 5 mSv/jaar	5de orde	1 uur beroepsboksen* 1 uur autoracen* 1 uur bergbeklimmen* 1 jaar "veilig" beroep
Natuurlijke achtergrondstraling Eenmalige stralingsdosis 10 mSv	6de orde	100 km autorijden* 100 km vliegtuigpassagier* 50 km motorfiets*
* per jaar	NB. 6de orde = 1: 1.000.000	

Tabel 5.7. Jaarlijkse sterftekansen van verschillende ordes van grootte.

Tabel 5.8. Kans op sterfte door ongeval of kanker in Nederland (10^{-6} per jaar = 1 : 1000000).	
Oorzaak	**Kans per 1000000**
Verkeer	140
Andere ongevallen (20-40 jaar)*)	60
Aardgas gebruik	<0,1
Verbranding van kolen	0,1
IJzer en staalindustrie	1
kanker (algemeen). *)	2200
Kanker ten gevolge van natuurlijke of achtergrondstraling van 1 mSv/jaar	13
Kanker, jaarlijks extra 0,5 mSv	6
*) over het gehele leven	

5.7 ICRP-risicofaktoren; fac:

Risico per Sievert. Uit de volgende tabel 5.9 volgt dat bij homogene bestraling van het gehele lichaam het somatische risico op sterfte wordt begroot op 1,25 x 10^{-2} per Sievert (procent per Sievert). De kans op ernstige schade in de eerste twee generaties (die de bestraalde persoon nog kan meemaken) wordt begroot op 0,4 x 10^{-2} per Sv. Het totale risico per Sievert is dus 1,65 x 10^{-2}.

Tabel 5.9. Risico per sievert (Sv) en schade (ICRP1977).		
Weefsel/orgaan	**Schade**	**Risicofactor** per Sievert orgaandosis
Gonaden	Ernstige schade aan nageslacht t.g.v. blootstelling van één der ouders:	
	- in de eerste 2 generaties	1 x 10^{-2}
	- in alle daaropvolgende generaties	1 x 10^{-2}
Rood beenmerg	ongeneeslijke leukemie	0,2 x 10^{-2}
Bot	ongeneeslijke botkanker	0,05 x 10^{-2}
Long	ongeneeslijke longkanker	0,2 x 10^{-2}
Schildklier	ongeneeslijke schildklierkanker	0,05 x 10^{-2}
Borst	ongeneeslijke borstkanker, gemiddeld over de sexe.	0,025 x 10^{-2}
Alle andere samen	ongeneeslijke, kwaadaardige gezwellen	0,5 x 10^{-2}
	Totaal	1,25 x 10^{-2}
NB.: ongeneeslijk = ziek worden + doodgaan! In ICRP92: 5% per Sv (5 x 10^{-2}/Sv).		

5.8 Individuele risico`s.

In recente publicaties wordt veel aandacht besteed aan de risico's die het gevolg zijn van blootstelling aan straling in vergelijking met andere risico's. Men moet er altijd op bedacht zijn dat de kans op een fataal ongeval door andere oorzaken veel groter kan zijn. Dit houden verband met de leefgewoonten, het deelnemen aan verkeer, huishoudongelukken en zelfs met de aard van het beroep, zoals de tabel 5.10 aangeeft. Men dient zich wel te realiseren dat bij radiologische werkzaamheden slechts sporadisch fatale ongevallen voorkomen, maar dat wel de eventuele gevolgen pas na geruime tijd zichtbaar kunnen worden.

Tabel 5.10. Het aantal fatale beroepsongevallen in de Verenigde Staten in doden per miljoen per jaar.			
BEROEP	1955	1964	**1975**
Handel	120	80	60
lichte industrie	120	100	80
ambtenaar	150	130	125
transportsektor	340	440	330
landbouw	550	670	580
bouwnijverheid	750	730	710
mijnbouw	1040	1080	630
Gemiddeld voor alle beroepen	240	210	150

De ontvangen dosis in de arbeidssituatie wordt verplicht geregistreerd. De tabel 5.11 vermeldt de op de persoonlijke dosismeter over de jaren 1984 t/m 1988 de geregistreerde jaarlijks dosisequivalent, bij personen, die in de uitoefening van hun werkzaamheden aan ioniserende straling zijn blootgesteld.

Tabel 5.11. Jaarlijkse dosis voor blootgestelde werkers					
		Aantal personen met			
JAAR	**badges**	**Jaardosis in mSv**			
		<5	5<H<15	15<H<50	>50
1984	28715	27675	809	217	14
1985	28992	27874	867	232	9
1986	29165	28130	801	224	10
1987	31230	30212	804	199	15
1988	31979	30864	884	217	14

Fac: **Tsjernobyl.** De gevolgen van het ongeval te Tsjernobyl in 1986 houden nog steeds velen bezig. In Bijlage D worden ter kennisname de chronologische volgorde van gebeurtenissen gegeven, zoals die ook in de Staatscourant 87 van 1986 zijn gepubliceerd. (zie ook voor de mogelijke gevolgen voor de gezondheid van de Sovjetbevolking in het gepubliceerde overzicht van de Nederlandse Vereniging voor Stralingshygiëne, NVS-NIEUWS van april 1990).

5.9 **Epiloog.** Nu we de effecten kennen die straling heeft op biologisch weefsel, zal een ieder z'n best doen om toch aan zo weinig mogelijk straling te worden blootgesteld. Toch kan de stralingsbelasting niet tot nul worden gereduceerd. In het dagelijkse leven hebben we te maken met de zogenaamde "natuurlijke of achtergrondstraling" die in hoofdstuk 6 zal worden behandeld.

0-0-0

6. ! NATUURLIJKE OF ACHTERGRONDSTRALING

6.1 Natuurlijke straling

Doordat ioniserende straling biologische effecten kan veroorzaken, zal iedereen proberen hiermee zo min mogelijk in aanraking te komen. Het liefst zou men alle soorten ioniserende straling volledig buiten willen sluiten. In de praktijk blijkt dit NIET mogelijk te zijn; in het dagelijkse leven staat men altijd bloot aan een hoeveelheid ioniserende straling. Deze straling wordt daarom de natuurlijke of achtergrond straling genoemd en is sterk afhankelijk van:

- de bodemgesteldheid;
- de gebruikte bouwmaterialen (gips, beton en hout), zo loopt een bewoner in een houten huis 30 tot 40% minder stralingsbelasting op dan in een van bakstenen en/of beton gemaakt huis;
- de kosmische straling (bij toenemende hoogte treedt op onze breedtegraad, van circa 52° NB, een verdubbeling op per 1500 meter hoogteverschil).

Dit hoofdstuk wordt afgesloten met een overzicht van achterhaalde toepassingen en de stralingsbelasting waaraan men op jaarbasis in Nederland blootstaat.

6.2 Straling uit de aardkorst

Delfstoffen. Op onze aardbol zijn verschillen te constateren in de uit de bodem afkomstige hoeveelheid straling. Op plaatsen waar de aardkorst veel monaziet (met 8 a 10% thorium) bevat, of granietsoorten met sporen van radioactieve elementen aanwezig zijn, is het stralingsniveau merkbaar hoger (zie tabel 6.1).

Tabel 6.1. Radioactiviteit in delfstoffen

	K-40 (Bq/kg)	U-238 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	Rn-222 (Bq/l)
Steenkool				
Polen	37 - 760	2 - 140	7 - 110	-
Gr.Brittannië	-	11 - 29	2 - 19	-
Ver.Staten(gem.)	52	18	21	-
Fosfaaterts				
Florida (USA)	48	1300	30	-
Marokko	10	1700	20	-
USSR	44	44	78	-
Aardgas				
Nederland	-	-	-	0,1 - 5,4
Canada	-	-	-	0,2 - 30
Ver.Staten	-	-	-	0,1 - 40
Mergel in de BRD	800	85	60	-
Bauxiet				
Griekenland	800	150	350	-
Frankrijk	450	110	260	-

Uit: Indicatief Meerjaren Programma Straling 1985-1989

Zo zijn er in Frankrijk plaatsen waar dosiswaarden van 17 tot 800 mGy (1,7 - 80 rad) per jaar voorkomen. Toch vertoont de op die plaatsen aanwezige bevolking géén significante, aan straling toe te schrijven, verschillen met andere, aan minder straling blootgestelde, groepen.

***Bouwmaterialen**. De sporen van radioactieve elementen zijn, met name in* klei en beton, in sommige bouwmaterialen terug te vinden. Deze materialen geven daardoor een hogere stralingsbelasting dan bijvoorbeeld hout en kunststoffen. De belangrijkste nucliden zijn hierbij radium (Ra-226), thorium (Th-232) en kalium (K-40). Waar radium en thorium aanwezig zijn heeft men ook te maken met het radioactieve edelgas radon (Rn-220 en Rn-222), zie tabel 6.2 en 6.3.

Tabel 6.2. Activiteitsconcentratie (in Bq/g) van enkele bouwmaterialen en grondstoffen die daarvoor kunnen worden gebruikt.

	Kalium-40	Radium-226	Thorium-232
Baksteen	ca. 0,67	ca. 0,06	ca. 0,07
Kalkzandsteen	ca. 0,22	<0,02	<0,02
Cement	ca. 0,22	<0,03	<0,02
Beton	ca. 0,63	ca. 0,04	<0,06
Natuurgips	ca. 0,07	<0,02	<0,01
Chemiegips	<0,11	ca. 0,55	<0,02
Vliegas	0,33 à 1,11	0,08 à 0,39	0,06 à 0,26
Uit: Indicatief Meerjaren Programma Straling 1985-1989			

Tabel 6.3. Radioactieve stoffen in bouwmaterialen (naar .G.Ackers, RIVM).

Concentratie in bouwmaterialen (gemiddelden)	
Ra-226	< 100 Bq/kg
Th-232	< 100 Bq/kg
Ka-40	<1000 Bq/kg
Concentratie in grondsoorten	
Ra-226	5 - 50 Bq/kg
Th-232	8 - 80 Bq/kg
Ka-40	< 750 Bq/kg
Radonexhalatiesnelheid	
beton	circa 2,6 Bq/m^2.h
baksteen	circa 1 Bq/m^2.h
natuurlijke gipsblokken	circa 1,5 Bq/m^2.h
fosfaatgipsblokken	6 - 16 Bq/m^2.h

Naast straling uit bodem en woonomgeving hebben we ook te maken met radioactieve stoffen die in de atmosfeer worden gevormd.

6.3 Radioactieve stoffen in de atmosfeer

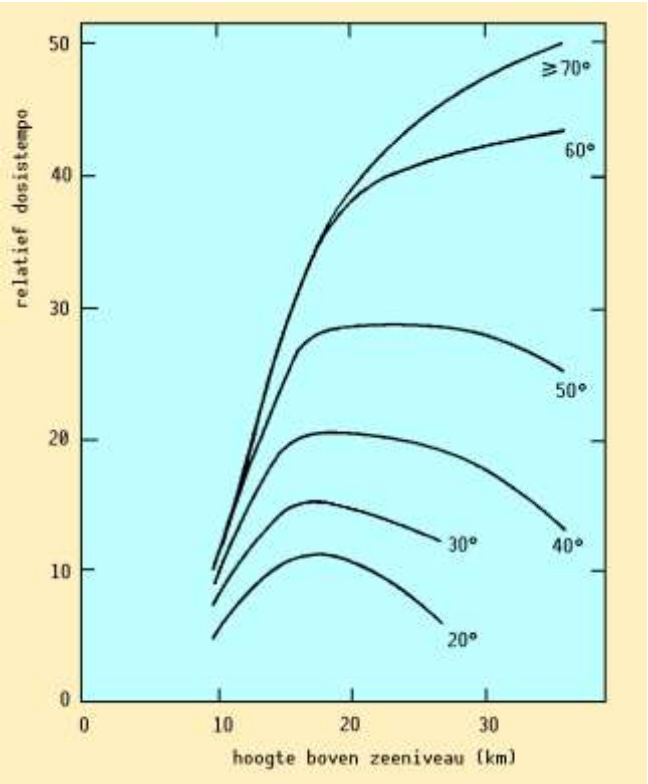
In de hogere luchtlagen zijn moleculen van stikstof, zuurstof en het edelgas argon aanwezig. Uit deze moleculen ontstaan door botsing met kosmische straling, voornamelijk zeer energierijke protonen, radioactieve nucliden. We onderscheiden daarbij naar toenemend gewicht, onder andere:

- Tritium (H-3)
- Beryllium (Be-7 en Be-10)
- Koolstof (C-14)
- Natrium (Na-22)
- Fosfor (P-32 en P-33)
- Zwavel (S-35)
- Chloor (Cl-36 en Cl-38)

De halveringstijd van deze nucliden varieert tussen minuten (Cl-38: 37,5 minuten), vele jaren (C-14: 5570 jaar) en langer. *Door neerslag komen deze nucliden in hoeveelheden van 3,7 tot 1850 Bq per liter*, uit de atmosfeer in het water en op het land en dus ook in de voedselketen terecht. De bijdrage van deze radioactieve stoffen aan de totale stralingsbelasting in Nederland is zéér gering. De bijdrage van de kosmische straling direct uit de galactische ruimte is beduidend hoger.

6.4 Stralingsbelasting in de atmosfeer

De te absorberen stralingsdosis ten gevolge van kosmische straling neemt sterk toe met de hoogte boven het aardoppervlak. Ook is de breedtegraad van de plaats op de aarde bepalend (zie figuur 6.1). Rond de evenaar is deze straling relatief gering.



Figuur 6.1. Relatief dosistempo van de direct ioniserende component van de kosmische straling als functie van de hoogte boven zeeniveau voor verschillende breedtegraden (ontleend aan UNSCEAR-rapport 1977).

De verzwakking van de kosmische straling hangt nauw samen met de dikte van de tussenliggende luchtlagen. Bij vliegen op grote hoogte, bijvoorbeeld 20 km met de "Concorde", blijkt dat bemanning en passagiers, zeker bij zonne-uitbarstingen, aan aanzienlijk hogere dosistempi worden blootgesteld. Deze dosis kan op 20 km hoogte wel toenemen tot 20 à 40 mGy (2 à 4 rad) per uur (zie ook tabel 6.4).

Tabel 6.4. Variatie van het dosistempo met de hoogte boven zeeniveau.

Hoogte boven zeeniveau in km	Dosistempo in mrad/jaar		
	Direct ioniserend	Neutronen	Som
0	28	2	30
1	43	2	45
3	96	9	105
7	615	35	650
9	1050	70	1120
12	2630	175	2805
20	5260	265	5525

Stralingbelasting bij ruimtevaart heeft geleid tot het vaststellen van dosislimieten voor astronauten, zoals in tabel 6.5 en 6.6 wordt weergegeven.

Tabel 6.5. Astronauten dosisequivalent limieten (Sv).

Periode	Beenmerg	Ooglens	Huid
Carrière	zie tabel 6.6	4,0	6,0
Jaarlijks	0,50	2,0	3,0
30 dagen	0,25	1,0	1,5

Tabel 6.6. Carièrelimieten voor ruimtestationwerkers, met betrekking tot het beenmerg (NCRP; HP aug 1988, blz 162.)

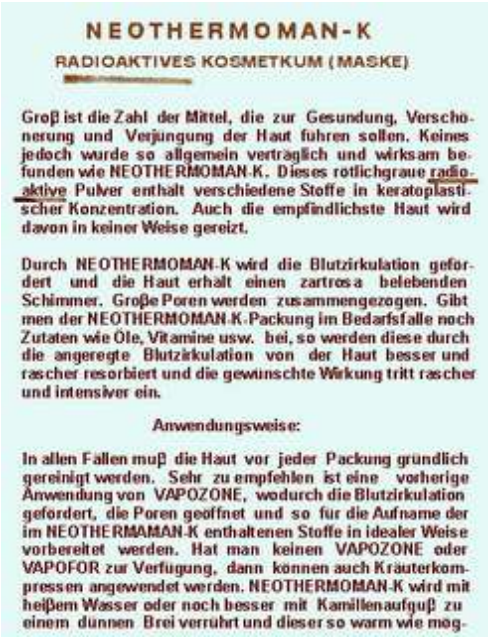
Lifetime Excess Risk of Fatal Cancer	Sexe	Age at first Exposure (y)			
		25	35	45	55
		[Sv]	[Sv]	[Sv]	[Sv]
3×10^{-2}	male	1,5	2,50	3,25	4,0
3×10^{-2}	female	1,0	1,75	2,50	3,0

Voor de Nederlander die met zijn beide benen op de grond blijft, is het van belang te weten hoe hoog de stralingsbelasting is, waaraan hij onbewust is of wordt blootgesteld.

6.5 Achterhaalde toepassingen van radioactieve stoffen

Er waren tijden dat men zich minder bewust was van de gevaren verbonden aan het gebruikt van radioactieve stoffen in allerlei materiaal. Op vele gebieden werden toepassingen bedacht, waarvan het nut zich achteraf sterk laat betwijfelen. Géén van deze toepassingen wordt in de kernenergiewet anno 1996 en later meer toegestaan (zie onderstaande figuur 6.2abcdef):

- bliksemafleider
- cosmetica (gezichtsmaskers)
- glazuren en verf in tegels en huishoudelijk aardewerk
- drankjes (de radiumdrinkbeker)
- speelgoed (experimenteerdoos)
- bougies
- radiumkussen (voor astmapatiënten)
- dobbers
- schoenfluoroscopen



NEOTHERMOMAN-K

RADIOAKTIVES KOSMETKUM (MASKE)

Groß ist die Zahl der Mittel, die zur Gesundung, Verschönerung und Verjüngung der Haut führen sollen. Keines jedoch wurde so allgemein verträglich und wirksam befunden wie NEOTHERMOMAN-K. Dieses rötlichgraue radioaktive Pulver enthält verschiedene Stoffe in keratoplastischer Konzentration. Auch die empfindlichste Haut wird davon in keiner Weise gereizt.

Durch NEOTHERMOMAN-K wird die Blutzirkulation gefördert und die Haut erhält einen zartrosa belebenden Schimmer. Große Poren werden zusammengezogen. Gibt men der NEOTHERMOMAN-K-Packung im Bedarfsfalle noch Zutaten wie Öle, Vitamine usw. bei, so werden diese durch die angeregte Blutzirkulation von der Haut besser und rascher resorbiert und die gewünschte Wirkung tritt rascher und intensiver ein.

Anwendungsweise:

In allen Fällen muß die Haut vor jeder Packung gründlich gereinigt werden. Sehr zu empfehlen ist eine vorherige Anwendung von VAPOZONE, wodurch die Blutzirkulation gefördert, die Poren geöffnet und so für die Aufname der im NEOTHERMAMAN-K enthaltenen Stoffe in idealer Weise vorbereitet werden. Hat man keinen VAPOZONE oder VAPOFOR zur Verfügung, dann können auch Kräuterkompressen angewendet werden. NEOTHERMOMAN-K wird mit heißem Wasser oder noch besser mit Kamillenaufguß zu einem dünnen Brei verrührt und dieser so warm wie mog-

Figuur 6.2abcdef. Achterhaalde toepassingen

De stralingsbelasting waaraan men heden ten dage blootstaat wordt in het volgende punt uitgewerkt.

6.6 ! Stralingbelasting in Nederland

De stralingsbelasting of geabsorbeerde dosis (dosisequivalent) waaraan men in Nederland per jaar **ONVERMIJDELIJK** blootstaat bedraagt circa 2 mSv (200 mrem). Deze belasting is naar de oorzaken als volgt onder te verdelen:

Natuurlijke straling[*)]

De stralingsbelastings in Nederland op jaarbasis, als gevolg van "natuurlijke" stralingsbronnen, waarvan we ons niet of nauwelijks bewust zijn.			
Kosmische straling (zeeniveau)	circa	0,3	mSv
In het Lichaam (o.a. K-40)	circa	0,3	mSv
In bodem en woonomgeving (0,35 - 0,65 mSv)	gemiddeld	0,5	mSv
Longdosis Radon in woonhuizen (tot 0,9 mSv)[*)]	gemiddeld	?	
	In totaal	1,1	mSv

*) Deze wordt veroorzaakt door alfa-deeltjes uit thoron en radon.
De belasting is sterk afhankelijk van de ventilatiegraad in woonhuizen!

Kunstmatige bronnen

De stralingsbelasting in Nederland op jaarbasis, als gevolg van "menselijke handelingen" waarvan we ons niet of nauwelijks bewust zijn.			
Röntgendiagnostiek (0,3 - 0,9 mSv), gemiddeld		0,6	mSv
Nucleaire geneeskunde	circa	0,03	mSv
Radiologische werkzaamheden	circa	0,008	mSv
Fall-out van atoombom proeven	circa	0,09	mSv
Fall-out ten gevolge van Tsjernobyl	circa	0,05	mSv
Vliegreizen	circa	0,005	mSv
Kernenergie (maximale lozing in NL)		< 0,01	mSv
Gebruiksgoederen (KTV, horloge)	circa	0,01	mSv
Diversen (industrie, aardgas)	circa	0,1	mSv
	In totaal	0,9	mSv

6.7 Resumé van het stralingsgevaar

Men zou kunnen zeggen:
"Een reëel stralingsgevaar, voor uitwendig te ontvangen straling ontstaat pas wanneer de dosis hoger wordt dan de bestaande verschillen in de natuurlijke of achtergrondstraling".

Nu een ieder kennis heeft genomen van de stralingsdosis waaraan men op jaarbasis in ieder geval blootstaat, is het interessant te weten hoe we deze waarden kunnen meten. In het volgende hoofdstuk zal daarom nader worden ingegaan op de detectie van straling.

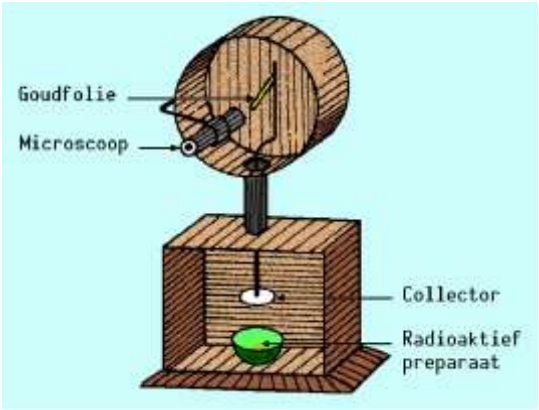
0-0-0

7. DETECTIE VAN STRALING

7.1 Inleiding

Ioniserende straling wordt meestal gedetecteerd door gebruik te maken òf van het ioniserend vermogen òf van het feit dat atomen of moleculen in een aangeslagen toestand worden gebracht. De werking van meetapparatuur berust op het waarnemen en vastleggen van de effecten, die optreden op bij deze overdracht van energie door ionisatie en excitatie aan gasvormige, vloeibare en vaste stoffen.

De eerste waarnemingen werden gedaan met behulp van een electrometer. De door straling veroorzaakte ladingsverandering werd omgezet in een beweging. (zie Figuur 7.1).



Figuur 7.1. De electrometer

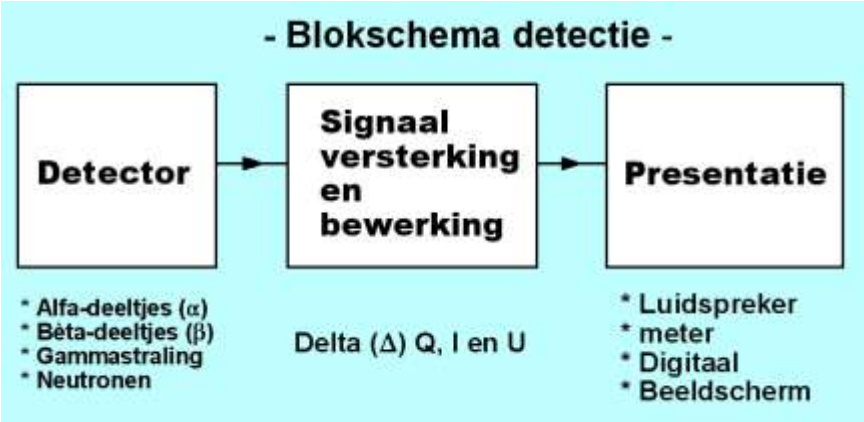
Wellicht is “zwarting” van de fotografische emulsie door straling de oudste methode, welke nu nog steeds in gebruik is zowel voor kwalitatieve (autoradiografie) als voor kwantitatieve (filmdosimetrie) doeleinden.

Dit hoofdstuk wordt beperkt tot een uitleg over de meetapparaten die gebruikt worden voor het meten van:

- de mate van radioactiviteit (intensiteit van uitgezonden straling),
- de hoeveelheid ontvangen straling (stralingsdosis).

De effecten worden in elektrische signalen omgezet en verder bewerkt. Om een indruk te krijgen hoe dit geschiedt, zal globaal de opbouw van de apparaten worden besproken.

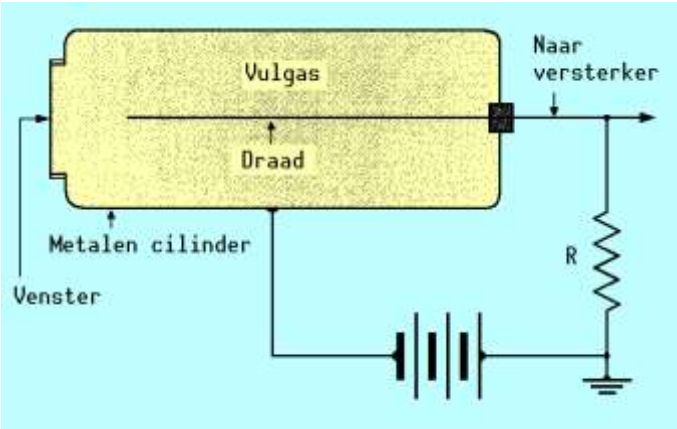
7.2 De detector. De opbouw van het meetapparaat. Bij alle, vaak ingewikkelde, meetapparaten kunnen we in de opbouw toch enkele hoofdbestanddelen onderscheiden. Deze delen zijn de detector, het signaal bewerkingsdeel en de uitlezing, welke elk afzonderlijk worden behandeld (zie Figuur 7.2).



Figuur 7.2. De opbouw van het meetapparaat.

De detector is het stralingsgevoelige deel, dat veelal specifiek ontworpen is voor de afzonderlijke detectie van alfa-, bèta- en gammastraling. De werking van de meest gangbare typen, zoals de gasgevulde-, vaste stof- en vloeistofdetector wordt in het kort beschreven:

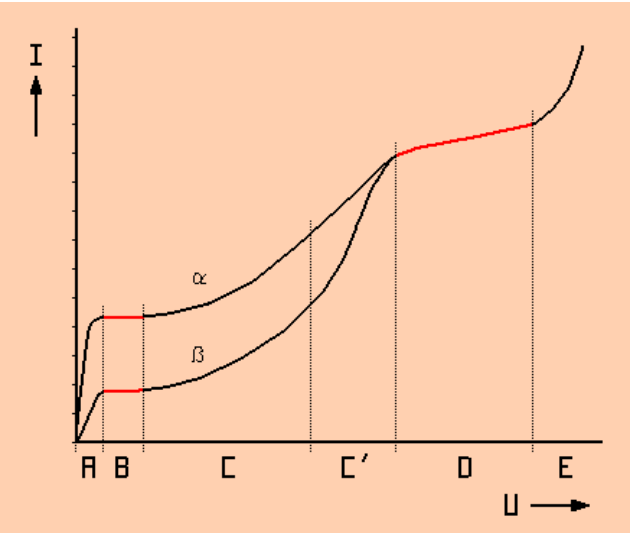
De gasgevulde detector. Tot de gasgevulde detectoren behoren de ionisatiekamer, de proportionele telbuis en de Geiger-Müller (GM-)telbuis (zie figuur 7.3). Deze bestaan ieder uit twee van elkaar geïsoleerde elektroden waartussen een bepaalde spanning is aangebracht. Deze spanning is karakteristiek voor de soort detector. De ruimte tussen de elektroden is meestal gevuld met lucht van normale druk, maar kan ook gevuld zijn met een speciaal gas met een al dan niet afwijkende druk.



Figuur 7.3. De gasgevulde detector

Afhankelijk van de aangelegde spanning en gasdruk wordt door de invallende ioniserende straling het gas min of meer geïoniseerd. De gevormde elektronen bewegen zich naar de positieve en de gevormde (positieve) ionen naar de negatieve elektrode.

Is de spanning laag, dan hebben enkele elektronen en positieve ionen een kans op hun weg naar de elektroden te recombineren (Figuur 7.4. gebied A, ionenverlies door recombinatie). Bij hogere spanning, de verzadigingsspanning, kan dit effect niet meer optreden.



Figuur 7.4. Verhouding stroom en spanning bij gasgevulde detectoren.

a. **Ionisatiekamer**. De ionisatiekamer wordt meestal op één van de volgende manieren gebruikt (gebied B, verzadigde ionenstroom):
   - in een gesloten stroomketen, waarin de stroom wordt gemeten. Deze zeer kleine stroom is een maat voor het aantal ionenparen dat per tijdseenheid wordt gevormd.
   - als een geladen condensator. De spanningsdaling is afhankelijk van het aantal ionenparen dat wordt gevormd gedurende de tijd van blootstelling aan straling.

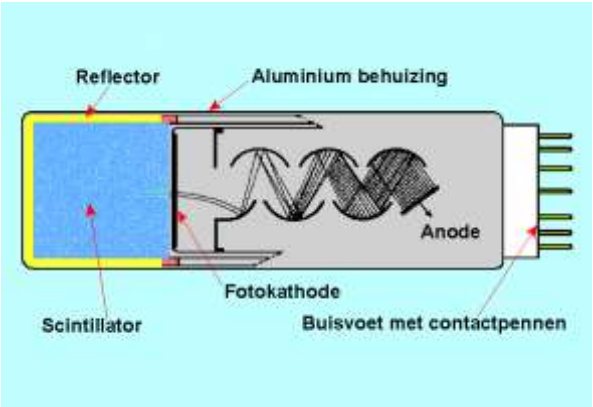
   Ionisatiekamers komen voor in vele uitvoeringsvormen. Hun eigenschappen worden vooral bepaald door de aard en dikte van de wand en het volume van de kamer. Het toepassingsgebied is meestal: röntgen- en gamma-straling.
b. **Proportionele teller**. De proportionele teller werkt in het gebied waarin bij toenemende spanning tussen de elektroden de door de straling primair veroorzaakte ionen (elektronen) zodanig versnellen, dat zij op hun beurt tot ionisatie in staat zijn: het ladingstransport is evenredig met de aangelegde spanning (gebied C is bruikbaar, gebied C' niet).
c. **GM-buis**. De GM-(tel)buis werkt in het gebied waarin bij nog hogere spanningen de gasversterking zodanig toeneemt dat de elektronen zich over de hele (positieve) elektrode uitbreiden (lawine-effect), waardoor de grootte van de resulterende impuls onafhankelijk wordt van de grootte van de primaire ionisatie (gebied D).

Nadeel: De zich langzamer bewegende ionen schermen het elektrisch veld rond de draad af, waardoor de ontlading wordt beëindigd. Zodra de positieve ionen de negatieve elektrode hebben bereikt is de GM-buis weer instaat een ionisatie te registreren. De hiervoor benodigde tijd wordt ***dode tijd*** genoemd en deze bedraagt in de orde van grootte van 10^{-4} seconde (zie ook punt 7.5).

Voordeel: Het plateau van een GM-buis is doorgaans 100 Volt of meer lang en heeft een helling die per type verschilt. Is deze < 15% per 100 volt, dan worden aan de voedingsbron lagere eisen gesteld (stabiliteit). Door de grote stroompuls kan bij een GM-buis het versterkerdeel eenvoudig en het ontwerp relatief goedkoop zijn.

De GM-(tel)buis is, afhankelijk van het type, te gebruiken voor detectie van zowel alfa-, bèta-, gamma- en röntgenstraling.

Vaste stof detector. In deze detector wordt door de ioniserende straling de geleidbaarheid van halfgeleiders beïnvloed. In kristalstructuren van onder andere verontreinigd natriumjodide en zinksulfide treedt fluorescentielicht in de vorm van lichtflitsjes op (scintillatie). Deze lichtflitsjes kunnen zeer goed met een fotomultiplicatiebuis (Figuur 7.5)worden omgezet in elektrische impulsen.



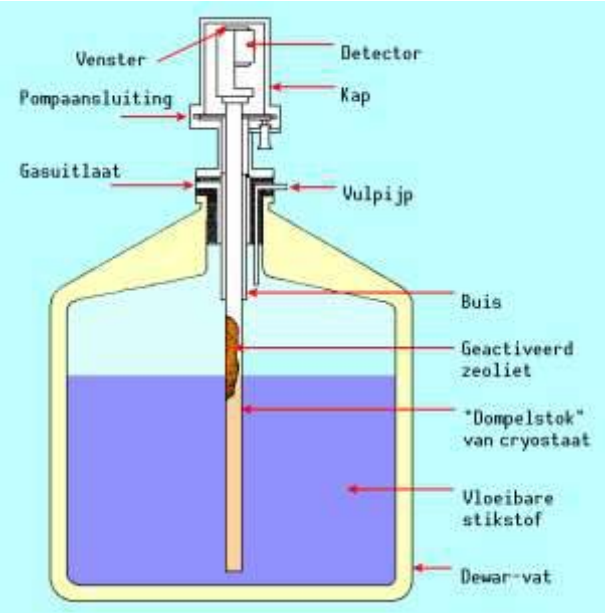
Figuur 7.5. De scintillatiedetector.

Thermoluminescentie. Het fluorescentielicht komt bij deze soort detectoren pas na verwarming vrij. De totale hoeveelheid vrijkomend licht is een maat voor de geabsorbeerde stralingsdosis. Deze detector wordt steeds vaker gebruikt bij persooonlijke dosisregistratiemiddelen.

Vloeistofscintillatieteller. Hierbij wordt een scintillatiestof met een oplosmiddel gemengd en samen met de te onderzoeken (radioactieve) stof in een doorzichtig flesje samengebracht. Deze methode is vooral geschikt voor het meten van laagenergetische bètadeeltjes (bijvoorbeeld tritium in urine).

Halfgeleider detector. Behalve een gas kan ook een vaste stof met een hoge elektrische weerstand worden gebruikt als omzetter in een ionisatiedetector. Het product van een ionisatie is dan geen elektron-ionpaar, maar een elektron en een elektronen-"gat". Hierbij wordt gebruik gemaakt van "één-kristallen" van zuivere halfgeleider materialen i-Ge en i-Si.

In dit intrinsieke Ge of Si is de lekstroom bij kamertemperatuur nog te hoog, zodat halfgeleiderdetectoren worden gekoeld tot minstens -30° en -160° C. Om deze reden wordt een halfgeleiderdetector vaak ingebouwd in een vacuum-cryostaat met vloeibare stikstof, zie figuur 7.6.



Figuur 7.6. Gekoelde Ge-detector

Fotografische film. Uit de mate van zwarting van een fotografische film kan ook de stralingsdosis worden afgeleid.

7.3 De signaalverwerking

In dit deel worden signalen uit de detector omgezet in een bruikbaar meetsignaal. Zeer kleine stroom-, spanning- of ladingverschillen (**ΔI, ΔU, ΔQ**) worden hierbij versterkt en bewerkt.

7.4 De uitlezing

Bij de uiteindelijke presentatie van het gemeten niveau wordt een onderscheid gemaakt in de vormen van presentatie:

a. **Kwalitatieve weergave**. Dit is het simpele ja/nee, het meer of minder aanwezig zijn van ioniserende straling. Meestal worden hier de impulsen uit het signaal verwerkingsdeel in een gewone luidspreker hoorbaar gemaakt (tikken).

b. **Kwantitatieve weergave**. Hierbij wordt zo nauwkeurig mogelijk bepaald hoeveel, of hoe hoog de intensiteit is. De uitvoering van dit deel kan bestaan uit een geijkte meterschaal, of uit zeer ingewikkelde digitale apparatuur. Deze apparatuur is al dan niet voorzien van een automatische be- en verwerking van de meetgegevens.

7.5 Nuleffect, dode tijd en telstatistiek.

Bij iedere meting van radioactiviteit moet met de volgende factoren rekening worden gehouden:

a. **Nuleffect**. Tengevolge van kosmische straling en de aanwezigheid van radioactieve stoffen in de natuur wordt in iedere meetopstelling al iets geregistreerd, terwijl er nog geen radioactiviteit bij de detector is gebracht. Dit wordt het <u>nuleffect</u> (background, achtergrondstraling genoemd, waarmee een gemeten (totale) waarde moet worden gecorrigeerd.

b. **Dode tijd**. Vrijwel iedere detector is na de registratie van een deeltje of foton enige tijd ongeschikt om de volgende gebeurtenis te registreren. Deze zogenaamde <u>dode tijd</u> is sterk afhankelijk van het type detector. Scintillatoren en fotomultipliers hebben een kleine en GM-(tel)buizen een tamelijk grote dode tijd van circa 100 à 200 µs. Omdat de dode tijd, zelfs voor een aantal GM-buizen uit dezelfde serie nog verschillen vertonen, wordt in de daarna volgende versterkers vaak een kunstmatige doch constante dode tijd aangebracht. Deze dode tijd is groter dat de te verwachten hoogste waarde van de alle te gebruiken telbuizen. Voor dit effect kan worden gecorrigeerd met de formule:

$$R_{werkelijk} = \frac{R_{gemeten}}{1 - R_{gemeten} * \tau}$$

waarin:

$R_{werkelijk}$ = het aantal impulsen per tijdseenheid dat de meetopstelling had moeten registreren,

$R_{gemeten}$ = het werkelijk aantal geregistreerde impulsen per tijdseenheid,

τ = dode tijd (NB. in dezelfde tijdseenheid!).

c. **Telstatistiek**. Radioactiviteit is een reeks van gebeurtenissen met een <u>statistische spreiding</u>. Een aantal metingen, herhaald met dezelfde apparatuur onder de zelfde omstandigheden, zal niet steeds exact hetzelfde resultaat geven. De standaarddeviatie **σ** (sigma) geeft aan welke onzekerheid het uit één meting verkregen resultaat heeft. Bij radioactiviteit metingen is $\sigma = \sqrt{N}$, waarin N het aantal getelde geregistreerde impulsen voorstelt.

fac: Het in tijd **t** getelde aantal kan worden opgegeven als **N ± √ N**. Als de meting wordt herhaald is de kans dat de nieuwe waarde tussen **N + √ N** en **N - √ N** ligt, gelijk aan **68,3 %.** Evenzo is nu de kans voor **N ± 2 √ N** gelijk aan **95,5 %** en voor **N ± 3 √ N**, gelijk aan 99,7 %. Meestal is men geïnteresseerd in het aantal per tijdseenheid waarvoor dan wordt gevonden:

$$\frac{N}{t} \pm \frac{\sqrt{N}}{t}$$

Als $\mathbf{R_1 \pm \sigma_1}$ de waarde is die voor het **preparaat + nuleffect** wordt gevonden, en $\mathbf{R_2 \pm \sigma_2}$ de waarde van het **nuleffect** is (beide gemeten in de zelfde tijd **t**), dan is de waarde van het gemeten preparaat gelijk aan:

$$(R_1 - R_2) \pm \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$$

Anders gezegd: Om een resultaat te verkrijgen met een redelijke betrouwbaarheid is het nodig dat $\mathbf{R_1 / R_2}$ minstens gelijk is aan **circa 3**. Dat betekent òf zorgen voor een preparaat van voldoende sterkte, óf gebruik maken van een opstelling met een zeer laag nuleffect.

7.6 ! Persoonlijke dosisregistratiemiddelen (PDM)

Als registratiemiddel voor persoonlijke dosisregistratie wordt gebruikt:

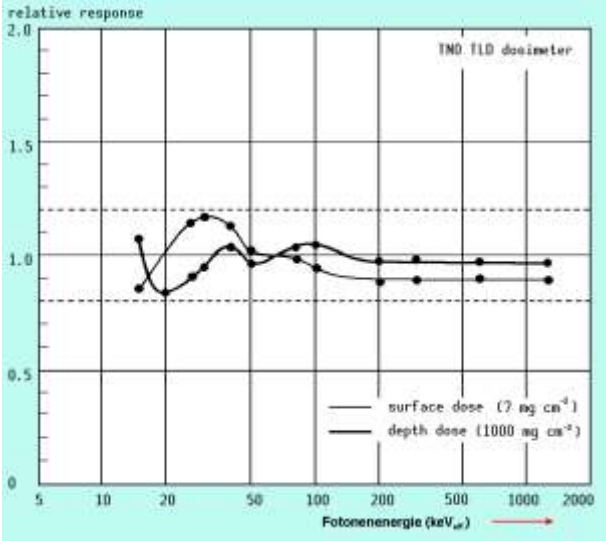
a. ***De filmbadge*** Een veelgebruikte filmbadge is afkomstig van de Radiologische Dienst TNO. Na ontwikkeling van de film en uitlezing is de dosis bekend, die de drager over een bepaalde periode heeft opgelopen. De filmbadge geeft de drager altijd een administratieve dosis, ten gevolge van de onderste meetgrens, van 5 mSv (0,5rem) per jaar (25 perioden à 0,2 mSv) en wordt daarom steeds minder gebruikt (Figuur 7.7a-rechts boven).

b. ***De TLD (Thermo Luminescentie Dosismeter)-badge*** wordt steeds meer gebruikt. Deze wordt per 14 dagen, per maand of per kwartaal omgewisseld. De onderste meetgrens is circa 0,01 mSv (1 mrem); dit geeft voor een kwartaal badge altijd een administratieve dosis van 0,04 mSv (4 mrem) per jaar!

Figuur 7.7ab. De opbouw van en de TNO/TLD-badge.

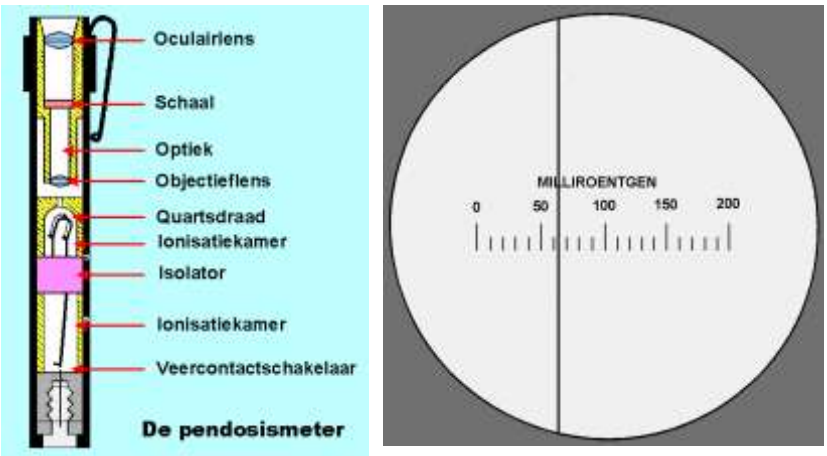
De gebruikte TNO/TLD-badge bestaat uit één of meer zeer kleine keramische plaatjes (zie figuur 7.7ab). Een groot nadeel is de hogere kostprijs ten opzichte van de filmbadge. De TNO TL-dosimeter biedt plaats aan vier TL-detectors, in diverse vormen. De detectors kunnen worden voorzien van filters van verschillende materialen en diktes.

Voor routinematige meting van doses röntgen- en/of gammastraling worden twee lithiumfluoride detectors gebruikt (afmetingen: 3 x 3 x 0,9 mm). De één meet de huiddosis - *oppervlaktedosis* -, de ander de dosis voor dieper gelegen organen - *dieptedosis* - (zie figuur 7.8).



Figuur 7.8. Relatieve response TNO/TLD-badge.

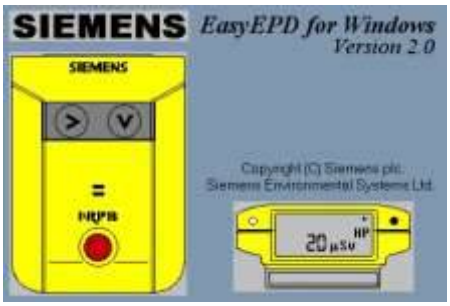
c. ***De Pendosismeter(****zie figuur 7.9ab****)*** werkt als een oplaadbare capaciteit, waarbij het ladingsverlies een maat is voor de ontvangen stralingsdosis. Het laagste meetbereik loopt van 0 tot 2 mSv (0 tot 200 mrem).



Figuur 7.9ab. De pendosismeter en uitlezing.

Dit is voor normale werkomstandigheden vaak te ongevoelig. Men moet ook oppassen voor het natuurlijke ladingsverlies door lekstroompjes en een ruwe behandeling.

d. ***De zakdosismeter*** is een klein draagbaar instrument. Afhankelijk van de uitvoering kan een alarmniveau naar keuze worden ingesteld en is zowel de dosis als het exposietempo af te lezen (zie figuur 10).



Figuur 7.10. Elektronische zakdosismeter, type Siemens EPD.

Nu we enig inzicht hebben hoe meetapparaten kunnen zijn opgebouwd, moeten we goed bedenken dat het meten van ioniserende straling slechts één van de handelingen is die bij stralingsbescherming worden uitgevoerd. De andere handelingen en maatregelen zullen in het hoofdstuk "stralingsbescherming" aan de orde komen. Daarna worden in het volgende hoofdstukken de verschillende stralingsbronnen en hoe hiermee om te gaan beschreven.

0-0-0

8. ! STRALINGBESCHERMING

8.1 Inleiding

Ter verkleining van risico's worden in de stralingsbescherming bij de omgang met radioactieve stoffen bevattend materieel en ioniserende straling uitzendende toestellen de te nemen maatregelen dwingend voorgeschreven. Hierbij wordt rekening gehouden met het voorkomen van de ongewenste gevolgen van zowel externe- als interne bestraling, in drie verschillende fasen:

* vooraf ---> de veiligheidsinstructie
* tijdens het omgaan ---> de werkprocedure,
* achteraf (incident) ---> de ongevalsprocedure.

Vooraf en tijdens het omgaan vindt een onafhankelijke controle plaats van de bronnen, het gebruik van voorzieningen en inrichtingen en over de ter plaatse aanwezige deskundigheid.

Bij de uitleg van de definities wordt ingegaan op enkele praktijk situaties en de daarbij in acht te nemen veiligheidsmaatregelen. Vervolgens wordt de toepassing van radioactieve lichtgevende verf behandeld. Het hoofdstuk wordt afgesloten met de bespreking van het gebruik van merktekens en hoe te handelen in de ongevalsituatie

8.2 Externe bestraling

Onder externe bestraling wordt verstaan de blootstelling aan straling afkomstig van bronnen, die zich buiten het menselijk lichaam bevinden. De te nemen maatregelen hangen zéér nauw samen met de eigenschappen van de af te schermen stralingssoorten.

Alfastraling. Zendt een bron alfadeeltjes uit, dan blijken deze in lucht slechts een reikwijdte(dracht) te hebben van enkele centimeters; een dun blaadje papier houdt ze al tegen.
De dikte van de hoornlaag van de menselijke huid biedt dan al voldoende afscherming. Bij externe of uitwendige bestraling door alfadeeltjes zijn dus geen grote gevolgen te verwachten, mits de huid in takt is. Alfadeeltjes zijn volledig af te schermen.

Bètastraling. Bètadeeltjes hebben een reikwijdte (dracht) in lucht tot enkele meters ver (afhankelijk van de energie). Omdat met name het oog een zeer gevoelig orgaan is voor bètadeeltjes werken de instrumentmakers achter een perspex ruit, of dragen op z'n minst een veiligheidsbril. De bètadeeltjes zijn in tegenstelling tot gammastraling volledig af te schermen.

Gamma- en röntgenstraling. Bij de bescherming tegen gamma- en röntgenstraling staan drie belangrijke regels voorop:

a. **Houdt afstand**. De afstand moet zo groot mogelijk worden gehouden. De hoeveelheid te ontvangen straling is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand. Gammastraling heeft in lucht een dracht van enkele tientallen meters (afhankelijk van de energie).
b. **Tijdsduur kort**. Het bekorten van de bestralingstijd is een zeer belangrijke maatregel. De te ontvangen dosis is rechtevenredig met de tijd van blootstelling.
c. **Scherm af**. De straling die in afscherming wordt geabsorbeerd geeft u geen stralingsbelasting. Materialen met een hoge Z, dus in het bijzonder lood (Z=82), kunnen bij uitstek als afschermingsmateriaal worden gebruikt.

Halveringsdikte. Wanneer een afscherming met dikte D nog de helft van een stralingssoort doorlaat, dan zal de afscherming met dikte 2D niet alle straling tegenhouden, maar nog: 1/2 x 1/2 = 1/4 deel van die straling doorlaten!

Anders gezegd, bij gamma- en röntgenstraling is een volledige (100%) afscherming niet mogelijk. In de praktijk wordt de straling zoveel afgeschermd dat de nog resterende straling altijd onder, en meestal vèr onder, de maximaal toelaatbare hoeveelheid straling ligt.

In de tabellen 8.1 t/m 8.4 worden de verzwakkingfactoren gegeven voor water, beton, ijzer en lood bij verschillende energieën aan gammastraling.

Tabel 8.1: Afscherming met water. Dikte van een waterlaag in cm, met een soortelijke massa van rho = 10^3 kg/m^3, voor verschillende verzwakkingsfactoren voor gammastraling (brede bundel geometrie).

Verzwakkingsfactor	Energie van de gammastraling (MeV)				
k	0,1	0,2	0,5	1	1,5
2	21	27	28	28	28
5	25	37	46	50	54
10	30	45	57	62	70
20	33	50	68	76	87
50	39	60	80	93	106
100	46	67	89	105	120
200	48	73	99	118	135

Tabel 8.2: Afscherming met beton. Dikte van een betonlaag in cm, met een soortelijke massa van rho = 2,3 x 10^3 kg/m^3, voor verschillende verzwakkingsfactoren voor gammastraling (brede bundel geometrie).

Verzwakkingfactor	Energie van de gammastraling (MeV)				
k	0,1	0,2	0,5	1	1,5
2	4,7	7,6	12,3	12,9	13,6
5	5,6	11,0	21,1	23,5	25,8
10	8,2	14,6	25,8	29,9	34,0
20	8,7	15,3	29,9	37,0	42,5
50	9,9	18,8	35,0	44,6	52,1
100	11,5	21,1	39,9	50,5	58,3

Tabel 8.3: Afscherming met ijzer. Dikte van een ijzerlaag in cm, met een soortelijke massa van rho = 7,89 x 10^3 kg/m^3, voor verschillende verzwakkingsfactoren voor gammastraling (bredebundel geometrie).					
Verzwakkingsfactor	**Energie van de gammastraling (MeV)**				
k	0,1	0,2	0,5	1	1,5
2	0,8	1,3	2,6	3,4	3,8
5	1,5	2,5	4,8	6,5	7,3
10	2,1	3,4	6,2	8,5	10,0
20	2,6	4,3	7,5	10,5	12,2
50	3,1	5,1	9,0	13,0	15,5
100	3,8	5,9	10,2	14,7	17,6

Tabel 8.4: Afscherming met lood. Dikte van een loodlaag in cm, met een soortelijke massa van rho = 11,34 x 10^3 kg/m^3, voor verschillende verzwakkingsfactoren voor gammastraling (brede bundel geometrie).					
Verzwakkingsfactor	**Energie van de gammastraling (MeV)**				
k	0,1	0,2	0,5	1	1,5
2	0,1	0,2	0,5	1,3	1,7
5	0,2	0,4	1,1	2,8	3,8
10	0,3	0,55	1,6	3,8	5,1
20	0,3	0,6	2,0	4,9	6,6
50	0,4	0,85	2,6	6,0	8,2
100	0,5	1,0	3,0	7,0	9,65

Vraag: Een verzwakkingsfactor **k van 2 is dus één halveringsdikte?**

8.3 Interne bestraling

Interne bestraling treedt op als de radioactieve stoffen in het lichaam terechtkomen. Dit kan gebeuren door:

* inademing (inhalatie),
* inslikken (ingestie),
* wondbesmetting (subcutane injectie),
* huidpenetratie (submersie), ingeval van blootstelling aan radioactieve edelgassen.

We spreken dan van een inwendige besmetting. In dat geval is het toepassen van afscherming en het nemen van afstand helaas niet mogelijk. Ook is de tijd waarin de bestraling plaatsvindt niet of nauwelijks te beïnvloeden.

Met name alfadeeltjes zijn sterk ioniserend en zijn daardoor bijzonder gevaarlijk; inwendig is er geen beschermende hoornlaag aanwezig, maar wel zachte slijmvliezen die vrij stralingsgevoelig zijn.

Maatregelen ter voorkoming. Bij open radioactieve bronnen zijn alle veiligheidsmaatregelen erop gericht te allen tijde te voorkomen dat radioactieve stoffen via water, lucht, bodem of via besmette handen de mens inwendig kunnen besmetten:

* Lees vooraf de veiligheidsinstructie,
* Betracht een uiterste netheid in de manier van werken,
* Eet, drink en rook niet tijdens de werkzaamheden,
* Was de handen goed na afloop van de werkzaamheden (ook al wordt er met handschoenen aan gewerkt).
* Leef de specifieke maatregelen van de veiligheidsinstructie na,
* Signaleer afwijkend gedrag van collega's.

8.4 Eigenschappen van lichtgevende verf.

Lichtgevende verf zendt niet spontaan licht uit. Het verfpigment wordt of geactiveerd door het daglicht (we noemen het dan "nalichtende verf" of is vermengd met een radioactieve stof tot een pasta). Ook kan het verfpigment continue worden aangestraald door het binnen de omhulling aanwezig radioactief gas (bètalight).

Voor- en nadelen. De toepassing van radioactieve lichtgevende verf kan voor de gebruikers voordelen bezitten (géén batterijen voor verlichting nodig!), uit het oogpunt van stralingsbescherming kleven er aan het gebruik vaak onverwachte nadelen. Deze nadelen kunnen aan het licht komen bij opslag, vervanging, onderhoud, reparatie, breuk en/of ongevallen en afvoer.

Hoeveelheid radioactieve stof. Voor een bepaalde lichtopbrengst uit een verfpigment zal bij het toepassen van een nuclide met een lage energie (zoals tritium) veel meer (wel meer dan 1 miljoen maal) aan activiteit nodig zijn dan bij een nuclide met een hoge energie zoals radium!

Effectieve lichtopbrengst. Bij een radioactieve lichtgevende verf soort wordt de effectieve lichtopbrengst na verloop van tijd beduidend minder of zelfs tot nul gereduceerd:

* Van een met tritiumverf (H-3) bestreken wijzerplaat ($T_{1/2}$ is 12,3 jaar) is de lichtopbrengst na circa 6 jaar is gehalveerd.
* Radiumverf (Ra-226), is na circa 10 jaar donkerbruin verkleurd; geeft voor die tijd al bijna geen licht meer en heeft de oorspronkelijke activiteit vrijwel behouden ($T_{1/2}$ is circa 1600 jaar).

NB. door de hoge energie van radiumverf wordt zowel het verfpigment en als het bindmiddel (nodig voor de hechting aan de ondergrond) kapot gestraald, waardoor de verf brokkelig wordt en er grote kans bestaat op ongecontroleerde verspreiding van het radioactieve materiaal; met alle gevolgen van dien!

Tritium (-verf). Doordat het tritiumatoom zo klein is, dringt het overal doorheen (diffusie). Hoewel dit proces zeer langzaam verloopt, zijn met name de huid, plastic en zelfs metaal hiervoor als het ware poreus. De kans op inademing en besmetting van werkoppervlakten en dergelijke is dan ook zeer reëel.

Tritium in de vorm van waterdamp (getritieerd water, **HTO**) wordt bijzonder goed in het lichaam opgenomen en is daarom een factor 1000 gevaarlijker dan het tritium in de vorm van waterstofgas (**HT**).

In het menselijk lichaam opgenomen tritium gaat (het gedraagt zich chemisch als een waterstofatoom) allerlei verbindingen aan, zodat bij radioactief verval het uittredende elektron schade kan doen ontstaan:

Zit ergens een tritiumatoom als schakel in een chemische verbinding, dan ontstaat bij verval van dat atoom een breuk; tritium vervalt naar helium, een edelgas dat immers geen verbinding met andere elementen kan aangaan.

Bronhouder voor tritium. Het tritium in lichtbronnen wordt van fabriekswege verpakt in glazen bronhouders van een vaak speciale glassoort (het zogenaamde "hardglas" of borosilicaatglas), waarin diffusie niet meer kan optreden of beneden een gestelde norm blijft.
Met tritium gevulde bronnen worden pas echt gevaarlijk bij breuk; het worden dan "OPEN BRONNEN". Bij breuk van een tritium (licht)bron zal niet alle tritium worden opgenomen door de hierbij aanwezige(n).

Herkenning tritium (licht)bronnen. Door de volledige absorptie van bètadeeltjes in het bronomhulsel is het niet mogelijk de gesloten tritiumbronnen met de gebruikelijke stralingsapparatuur (een eenvoudige bèta-gammamonitor te detecteren zodat een andere manier van herkenning noodzakelijk is.

Werkzaamheden aan tritium (licht)bronnen mogen alleen worden uitgevoerd door personeel dat in het bezit is van een schriftelijke veiligheidsinstructie en daarnaast instructies heeft ontvangen van bijvoorbeeld de verantwoordelijk deskundige.

8.5 Merktekens

Door het op de juiste wijze aanbrengen van markeringen kan uitwendige bestraling en een inwendige besmetting worden voorkomen. Ook voor de krijgsmacht is het van belang dat radioactieve stoffen herkenbaar en dus deugdelijk zijn gemerkt. Immers, wanneer ter plaatse geen of niet de juiste meetapparatuur aanwezig is, kan men afgaan op de merk- of gevarentekens, die op het materiaal zijn aangebracht.

Officieel heet dit vlindersymbool "het veiligheidsteken ioniserende straling" (zie figuur 8.1). Dit teken in een zwarte kleur op een gele ondergrond, wordt aangebracht op de buitenzijde van het materieel (testsets, voedingskasten, enz.) en is dit bedoeld als waarschuwing voor het onderhoudspersoneel. Voor de gebruiker heeft dit geen verdere consequenties.

Figuur 8.1. Het veiligheidsteken ioniserende straling

In bepaalde gevallen is het niet altijd even duidelijk of dit teken waarschuwt voor parasitaire röntgenstraling of voor de aanwezigheid van radioactieve stoffen. Men moet er op bedacht zijn dat het aanbrengen van dit teken op niet-radioactief materiaal of op toegangsdeuren soms ongewild nare consequenties kan hebben!

8.6. Veiligheidsinstructie

De veiligheidsinstructie is bedoeld als een herinnering aan de te nemen maatregelen en dient op de werklocatie duidelijk zichtbaar aanwezig te zijn.

Voorbeeld veiligheidsinstructie. Bij het werken met open radioactieve bronnen wordt in de laboratoriumruimte (..) verstaan het prepareren van monsters in de zuurkast voor nadere analyse met de Germanium- en of NaJ-detector:

- **ETEN, DRINKEN en ROKEN** is in deze werkruimte verboden, evenals opslag en gebruik van serviesgoed in het keukenblok;
- **GEBRUIK** de laboratoriumjassen **NIET** buiten de laboratoriumruimte;
- **DRAAG** het Persoonlijk Dosisregistratie Middel (PDM) op de voorgeschreven wijze;
- **WERK** in de zuurkast uitsluitend met handschoenen aan;
- **BEPERK** de hoeveelheid radioactieve stoffen in de laboratoriumruimte en zuurkast zo veel mogelijk:
- **DEPONEER** het radioactief afval uitsluitend in de hiervoor bestemde box;
- **MANIPULEER** ijkbronnen uitsluitend met een pincet;
- **PLAATS** alle niet noodzakelijke ijkbronnen en monsters **DIREKT** terug in de bronhouder(s) en of de **BERGPLAATS** voor radioactieve stoffen (kamer YY);
- **LOZING** op het riool van radioactief vloeibaar afval, met een concentratie groter dan 0,037 Bq/ml (maximaal 1,85 MBq/4 weken) is **NIET** toegestaan, dit wordt in de vloeistofafvaltank verzameld en afgevoerd in de 30-liter COVRA vaten;
- **WAARSCHUW** bij calamiteiten de ter zake kundige, de verantwoordelijke deskundige en neem in geval van een tritiumcalamiteit direkt een urinemonster;
- **WAS** na afloop van de werkzaamheden de handen.

~~~~
~~~~

Goedkeuring. De veiligheidsinstructie, door de commandant/leidinggevende van het betrokken onderdeel uit te reiken, dient te zijn goedgekeurd door de bevoegde autoriteiten, waar onder de toezichthouder (De Inspectie Milieuhygiëne Zuid-West van het Ministerie VROM/RIMH (tel. 010-2244444).

8.7 Procedures

Werkprocedures moeten zo zijn opgesteld, dat de mogelijkheid van breuk van de (licht)bronnen zo klein mogelijk is en dat externe bestraling zoveel mogelijk wordt voorkomen.

Ongevalprocedure. De ongevalprocedure maakt deel uit van de veiligheidsinstructie en of de werkprocedure. Men dient vooraf al rekening te houden met de aanwezige nuclide(n), soort en sterkte van de bron(nen).

Iedere onvoorziene omstandigheid (o.a. breuk en vermissing) bij radioactieve stoffen en ongewenste bestraling door bronnen of toestellen wordt gezien als een "stralingsincident".

Melding. Men dient zo spoedig mogelijk, al dan niet door tussenkomst van de lokale deskundige en de verantwoordelijke deskundige en de toezichthouder op de hoogte te stellen van het incident, met inachtnemen van het volgende:

- ***Gesloten bronnen***. Veel elektronenbuizen bezitten als gesloten bron een kleine hoeveelheid radioactieve stof in vaste vorm. Bij breuk verandert de gesloten bron in een open bron en is er een kans op verspreiding van deze radioactieve stof en dus op besmetting.
- ***Elektronenbuizen met een radioactief gas (Krypton, Kr-85)***. Bij directe breuk van deze componenten kan de blootstelling worden verminderd door in de werkruimte direct ramen en deuren naar de buitenlucht toe te openen voor extra ventilatie.
- ***Breuk van tritium (licht)bronnen***. Bij componenten gevuld met tritium (H-3), kan bij breuk het gas in de werkruimte vrijkomen. Als in de veiligheidsinstructie GEEN extra maatregelen zijn voorgeschreven geldt het volgende:
    - Een goede ventilatie van de ruimte gedurende 30 minuten is dan meestal afdoende om de gasresten volledig af te voeren.
    - In die tijd is de aanwezigheid van personeel ter plaatse niet gewenst.
    - Bij breuk moeten de restanten omzichtig worden verzameld en als radioactief afval worden verpakt en ingeleverd.

  Bij een constatering achteraf dat breuk is opgetreden in een tritium (licht) bron buiten de werkruimte (Geeft nu géén licht meer!), dient men het betrokken materieel, na overleg met de deskundige zo nodig alsnog te isoleren van de omgeving.
- ***Overbestraling bij gebruik van een röntgentoestel***. Schakel het toestel uit.

- ***Overbestraling door een radioactieve bron***. Plaats de bron zo snel mogelijk terug in de originele houder en of bergplaats. Is dit niet (meer) mogelijk, zorg ervoor dat al het personeel onmiddellijk de directe omgeving verlaat en sluit deze af.

Registratie. De volgende gegevens moeten bij een ongeluk (incident) worden genoteerd of handelingen worden verricht:
- de namen van personen bij het ongeluk (incident) aanwezig,
- een beschrijving van de omstandigheden (hoe laat, waar en hoe de breuk/bestraling plaatsvond en dergelijke),

Medische Handelingen. De eventuele snijwonden, ten gevolge van de breuk of restanten, moeten door de Medische Dienst worden behandeld. Vermeld dan wel dat er een mogelijke besmetting kan zijn ontstaan!

Bij een tritiumbesmetting dient men, indien het een breuk betreft van een bron met een grotere activiteit dan 3,7 GBq (100 mCi):
- Een urinemonster van genoemde personen te nemen, het liefst in glazen flesjes en zo spoedig mogelijk doch uiterlijk na 2 uur (ter bepaling van het nulniveau), en
- Dit te herhalen na circa 2 dagen, wanneer het tritium volledig door het lichaam is verspreid.

Aan de hand van de meetresultaten wordt beslist of een verdere meting van het tritium in de urine van de "besmette" personen gewenst is (ter vaststelling van de opgelopen stralingsbelasting). De overige handelingen zijn vermeld op de EHBO-instructiekaart, met name:

Door het drinken van grote hoeveelheden vocht in de vorm van melk, koffie, thee of water (tenminste 3 liter extra per dag) wordt de tijd, waarin de helft van het door het lichaam opgenomen tritium wordt uitgescheiden, verkort van 15 tot 5 dagen (en wordt dus ook de stralingsbelasting evenredig kleiner). Het menselijk lichaam mag maximaal 2 millicurie tritium (74 MBq) bevatten.

Vrijgave van de ruimte*. De werkzaamheden in de werkruimte mogen worden* hervat zodra de deskundige daarvoor toestemming heeft gegeven. In het geval van een tritiumbesmetting mag de ruimte, afhankelijk van de grootte van de bron, minimaal 30 minuten na het tijdstip van de breuk door niemand worden betreden (met uitzondering van mensenreddende handelingen) en pas weer in gebruik worden genomen na controlemetingen en goedkeuring door de verantwoordelijke deskundige.

0-0-0

9. TOEPASSINGEN VAN RADIOACTIEVE STOFFEN

9.1 Inleiding

In de praktijk komt om vele redenen materieel voor waarin radioactieve stoffen zijn verwerkt. De hoeveelheid radioactieve stof verschilt sterk per nuclide en toepassing. Om verschillen in sterkte te kunnen aangeven, wordt de maat voor de sterkte of activiteit gedefinieerd en toegelicht. Het hoofdstuk besluit met een opsomming over het praktische gebruik.

9.2 Radiotoxiciteit

De hoeveelheid van een radioactieve stof die men zonder vergunning (vrij) in bezit mag hebben, hangt af van de soort radioactieve stof. Op grond van hun radiotoxiciteit (giftigheid) zijn alle radioactieve stoffen ingedeeld in een van de volgende vier groepen:

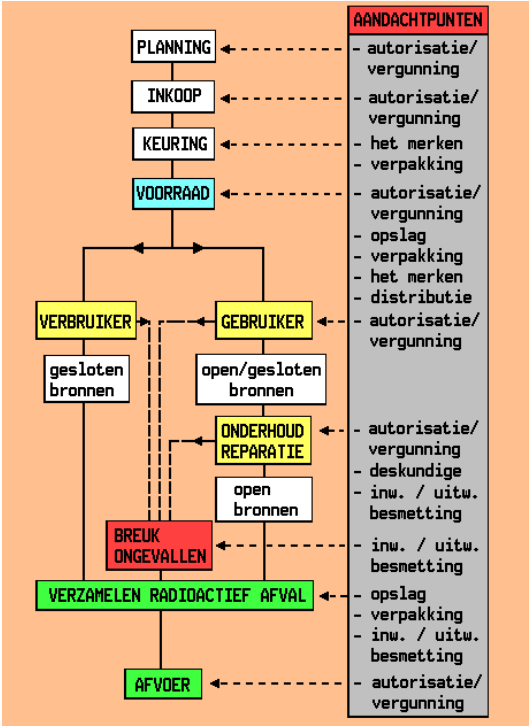
Tabel 9.1. Radiotoxiciteit en vergunningsgrens

Radiotoxiciteit	Géén vergunning nodig bij een activiteit lager dan:	Voorbeelden van radioactieve stoffen per groep
zeer hoge	5 kBq (0,14 µCi)	radium (Ra-226), americium (Am-241)
hoge	50 kBq (1,4 µCi)	cobalt (Co-60), strontium (Sr-90), thorium (Th-232)
matige	500 kBq (14 µCi)	koolstof (C-14), nikkel (Ni-63), barium (Ba-133), cesium (Cs-137), promethium (Pm-147)
lage	5 MBq (140 µCi)	tritium (H-3), krypton (Kr-85), radon (Rn-220), uranium (U-235, U-238)

9.3 Aanschaf en gebruik van radioactieve stoffen

Bij de verwerving van materieel dat radioactieve stoffen bevat geeft figuur 9.1 de aandachtpunten weer voor de verschillende niveaus in een organisatie waar men met dit materieel te maken krijgt. Ook bij de opleidingsinstituten van de krijgsmacht, waar dit materieel voor instructiedoeleinden wordt gebruikt is deze figuur van toepassing.

Opslag. Op 0,1 meter afstand van het oppervlak van een “goedgekeurde “opslagplaats of bergplaats, mag het dosisequivalent tempo niet hoger zijn dan 0,5 µSv/h.



Figuur 9.1. Materieelstroom en aandachtpunten

9.4 Toepassingen

In de volgende opsomming worden de in de praktijk voorkomende radioactieve stoffen tussen haakjes vermeld achter de meest gebruikte toepassing. De activiteit is, omdat de fabrikanten dit nog vaak vermelden, in eenheid Curie aangegeven. Tevens wordt de aard van de bronnen toegelicht. Reken de activiteit genoemd in de hieronder genoemde punten om naar waarden in "Becquerel"!

a. ***Test- en oefenbronnen (Ra-226; Cs-137; Co-60)***. Dit zijn vaak gesloten bronnen, die zelf al van de benodigde transportafschermingen zijn voorzien. De grootte van de activiteit varieert hierbij tussen 10 µCi bij radium tot 15 Ci bij kobaltbronnen (zie figuur 9.2).

Figuur 9.2. Diverse test- en oefenbronnen.

b. ***Rookmelders (Am-241; Ra-226)***. Dit zijn vaak niet-hermetisch gesloten bronnen waarbij de activiteit, van 0,1 tot 75 µCi per bron, over verschillende kleine bronnetjes in een melder kan zijn verdeeld (zie figuur 9.3).

Figuur 9.3. Diverse rookmelders.

c. ***Metaallegeringen / lenzen (Th-232)***. In elektronenbuizen (gesloten bronnen) zijn dit "thoriated tungsten" gloeidraden en kathodes. De activiteit is meestal erg laag - vaak kleiner dan 0,001 µCi. LET OP: Pas als het glas of omhulsel is gebroken, spreken we van een OPEN BRON! Voor een grotere slijtvastheid wordt thorium ook gebruikt in spuitstukken van magnesiumaluminium, zoals uitlaatspruitstukken en casings van straalmotoren. Voor filtertoepassingen wordt thorium als coating op het glas aangebracht en bij kleine lenzen met een specifieke brekingsindex gemengd met het glas.
d. ***Elektronenbuizen (Pm-147; Cs-137; Kr-85; Ni-63; Co-60; H-3)***. De radioactieve stof wordt nu gebruikt als voorionisatie bij thyratrons, overspanning-beveiligingen, ruisbuizen en zend-ontvangstschakelaars (de TR- en ATR-switches). De activiteit varieert daarbij tussen 0,7 µCi en 150 mCi.
e. ***Lichtgevende verf (Ra-226; Pm-147; H-3)*** wordt toegepast op wijzerplaten van auto- en vliegtuiginstrumenten en uurwerken. Afhankelijk van het nuclide komen activiteiten voor van 0,1 µCi tot 10 mCi. Alleen bij geopende instrumenten en instrumenten waarvan het glas gebroken is, wordt gesproken van open bronnen.
f. ***Lichtgevende verf (H-3) in lichtbronnen***. Bij deze zogenaamde "bètalights", is de activiteit erg hoog en kan variëren tussen 0,05 en circa 10 Ci. Het waterstofgas (H-3) is soms met een overdruk in een glazen buisje opgesloten.
g. ***Röntgenstraling*** wordt toegepast bij de hospitalen, tandartsen en materiaalonderzoek (de straling is uitschakelbaar!).
h. ***Parasitaire röntgenstraling*** kan op alle plaatsen waar met hoge spanningen wordt gewerkt, in de regel boven 5 kVolt, optreden. Met name bij klystrons, thyratrons, magnetrons, amplitrons en beeldbuizen van radar- en zendinstallaties. Röntgen- en parasitaire röntgenstraling is gelukkig weer verdwenen als de hoogspanning is uitgeschakeld.

0-0-0

10. WERKZAAMHEDEN AAN RADIOACTIEF MATERIEEL

10.1 Algemene regels

Voor werkzaamheden aan radioactieve stoffen bevattend materieel gelden de algemene inzichten van de stralingsbescherming zoals die in hoofdstuk 8 zijn beschreven. In de volgende punten worden deze nogmaals opgesomd:

a. Bij alle werkzaamheden aan radioactief materieel is een schriftelijke veiligheidsinstructie verplicht (zie ook punt 8.6.).
b. Materieel dat radioactieve stoffen bevat, dient alleen door geïnstrueerd personeel te worden behandeld.
c. Onderhoud, reparatie en opslag mag uitsluitend geschieden in daarvoor speciaal ingerichte en goedgekeurde werkplaatsen en magazijnen.
d. Bij reparatiewerkzaamheden aan voertuig- en vliegtuiginstrumenten met radiumverf is het raadzaam deze eerst enkele dagen geopend te laten uitwasemen. Het aanwezige radon (Rn-220 en Rn-222), met een halveringstijd van respectievelijk 56 seconden en 3,8 dagen, kan dan ontsnappen. Dit radon heeft zich in eerste instantie vastgezet en kan aanleiding geven tot een besmetting.
e. Instructeurs die uitleg geven over gebruik van materieel dat radioactieve componenten bevat dienen hieraan de nodige aandacht te schenken.

10.2 Controle op aanwezigheid

Voor het aantonen van radioactieve artikelen is niet altijd meetapparatuur noodzakelijk. Men kan in eerste instantie afgaan op de aangebrachte merktekens. Ook kan men in een materieel beheersysteem aangeven dat een artikel een radioactieve stof en/of kan (parasitaire) röntgenstraling uitzenden.

Herkenning van lichtgevende radioactieve verf. Of een lichtgevende verf radioactieve stoffen bevat is, met uitzondering van oude radiumverf, op de volgende manier eenvoudig te bepalen:

- Berg het artikel 48 uur in het donker op.
- Kijk na die tijd - ook in het donker en na een adaptietijd van minimaal 15 minuten - of er nog een lichtschijnsel is waar te nemen.
- Wanneer er geen lichtschijnsel meer aan het verfoppervlak is te zien, dan bevat de gebruikte verf geen radioactieve stof.
- "Gloeit" de verf nog steeds op, dan gaat het om een radioactieve verfsoort.

Bij artikelen met tritiumverf (H-3) is soms, afhankelijk van de dikte van het tussenliggend materiaal, met gevoelige meetapparatuur enige straling aan te tonen. Deze straling wordt secundaire- of remstraling genoemd.

Voor elektronische componenten zal indien dit niet administratief bekend is (aan het NSN!), voor het aantonen van radioactieve stoffen meetapparatuur moeten worden gebruikt. Hierbij geldt dat aan de buitenzijde:

a. Bij artikelen die ***tritium (H-3)*** bevatten, dit niet is aan te tonen met een "eenvoudige" bèta-gammamonitor.
b. ***Promethium (Pm-147)*** en ***krypton (Kr-85***) daar en tegen bij nieuw materieel redelijk goed en bij oud materieel nauwelijks meer is aan te tonen.
c. ***Cobalt (Co-60), cesium (Cs-137)*** en ***radium (Ra-226)*** goed kunnen worden aangetoond met een eenvoudige bèta-gammamonitor.

! ***Twijfel***. In geval van twijfel, over het al dan niet aanwezig zijn van radioactieve stoffen in het materiaal, moet men dit altijd als radioactief beschouwen en als zodanig behandelen. De assistentie van een deskundige - voor de definitieve vaststelling of een artikel radioactief is - is dan onontbeerlijk.

10.3 Bergplaatsen / opslag

Een bergplaats van radioactieve stoffen, splijtstoffen en ertsen (kernmaterieel) moet minimaal aan de volgende eisen voldoen:

a. Moet uitsluitend bestemd zijn voor gebruik voor de opslag van radioactieve stoffen of splijtstoffen of ertsen;
b. De bergplaats moet droog en in goede staat van onderhoud zijn;
c. De bergplaats moet een brandwerende constructie hebben;
d. De bergplaats moet zijn goedgekeurd door de Toezichthouder;
e. De bergplaats moet zijn gelegen op een afstand van tenminste 100 meter van explosieven, licht-ontvlambare stoffen, en drukhouders, tenzij anders is bepaald;
f. De bergplaats moet zodanig zijn geconstrueerd dat, indien het (betrokken) kernmaterieel in de bergplaats is geplaatst, het dosisequivalenttempo - op 10 cm afstand van enig punt - van:
    1. Het buitenoppervlak van de bergplaats of van de afrastering van de bergplaats niet meer bedraagt dat 1 microsievert per uur (1 µSv/h) en
    2. Indien de bergplaats tevens erfafscheiding is, niet meer dan 0,1 microsievert per uur (0,1 µSv/h);
g. Het gebruik van open vuur in de bergplaats is verboden, evenals het nuttigen van eet-, drink-, en rookwaren.

De uitvoering van het voorgaande moet zo goed mogelijk worden nagestreefd. Om reden van een goede bedrijfsvoering kan echter van genoemde bepalingen worden afgeweken. Eén en ander ter beoordeling van de toezichthouder, tenzij dit al in de vergunning of autorisatie is vastgelegd.

Afsluitbaarheid van de bergplaats. De bergplaats moet kunnen worden afgesloten met een deugdelijk slot. Op de bergplaats dient te zijn aangegeven waar de sleutel zich bevindt. De bergplaats moet afdoende worden beveiligd of bewaakt, zodat diefstal, ongewild verloren gaan en dergelijke worden voorkomen.

Van het slot van de deur moeten twee sleutels bij de afdeling aanwezig zijn, waarvan een exemplaar berust op een door de Directeur te bepalen plaats, die bekend is aan de (lokale en/of bedrijfs-)brandweer.

Markering van de bergplaats. Op de toegang moeten aan de buitenzijde duidelijk en onuitwisbaar zijn aangebracht de aanduiding "RADIOACTIEVE STOFFEN" en het waarschuwingsteken in zwart op gele ondergrond (zie figuur 10.1).

Figuur 10.1. Waarschuwingsteken met onderbord

Brandweereisen. In de vergunning zijn deze eisen nader vastgelegd.

10.4 Het vervoer

De (in de krijgsmacht) voorkomende artikelen met radioactieve stoffen moeten, op enkele uitzonderingen na, altijd afzonderlijk zijn voorzien van het waarschuwingsteken voor ioniserende straling volgens figuur 10.2.

Figuur 10.2. Waarschuwingstekens bij transport

Wanneer echter de stralingsintensiteit van het colli NIET uitkomt boven de 5 µSv/h (<0,5 mrem/h) aan het oppervlak van de verpakking, geldt bij het vervoer hiervan dat:

a. De verpakking van deze artikelen aan bepaalde normen moet voldoen en moet zijn voorzien van het opschrift "RADIOACTIEF" (en dus NIET van een van de gevaaretiketten zoals is aan gegeven in figuur 10.2).

b. Tijdens het vervoer geen lekkage (verspreiding) van de radioactieve stof kan plaatsvinden.
c. De vervoersdocumenten zijn voorzien van de tekst:
"Radioactieve stoffen (Instrumenten of artikelen),7, blad 2 ADR", waarbij de naam van het artikel onderstreept moet worden.
d. Het voertuig NIET hoeft te zijn voorzien van enig etiket als waarschuwingsteken.
e. De afzender verantwoordelijk blijft voor het transport.
f. De chauffeur dient ***altijd*** in het bezit te zijn van de veiligheidsinstructie "Vervoer radioactieve stoffen", (zie **voorbeeld** in figuur 10.3).

(voorbeeld)VEILIGHEIDSINSTRUCTIE
VERVOER RADIOACTIEVE STOFFEN

Waarschuwen bij ongeval:
1. De verantwoordelijke Deskundige:
   * Alarmnummer: xxxxxxxxxx
2. Centrale Verkeerspost Koninklijke Marechaussee (CVKMAR) in Driebergen:
   * Alarmnummer: 0343.531113.
3. De Inspectie Milieuhygiëne Zuid-West van het Ministerie VROM/RIMH,
   * Telefoonnummer 010-2244444

Lading: *)
* Gevarenklasse : (Instrumenten), 7 (blad 2 VLG/ADR).

* Aard van het gevaar : Ioniserende straling.

Te nemen maatregelen:
1. Plaats het voertuig zo ver mogelijk van de verkeersstroom en zet de motor af.
2. Tracht brand te bestrijden.
3. Houd omstanders op een afstand.
4. Raak de colli (= vervoerseenheid) niet aan.

*) Hier invullen wat van toepassing is, bijv. “Kompassen KM9657” of “Testbron”

Figuur 10.3. De instructiekaart bij vervoer (kleur: ORANJE).

10.5 Deskundigheidseisen voor het personeel.

In de vergunning of autorisatie wordt bepaald welk niveau van deskundigheid minimaal is vereist. In vele gevallen wordt bepaald dat de leiding van - of het toezicht bij de werkzaamheden moet berusten bij een "bevoegde deskundige".

Afhankelijk van de aard van de werkzaamheden zal het personeel moeten voldoen aan de bepaalde deskundigheidseisen, of zijn geïnstrueerd over hun aandeel in de werkzaamheden.

Ter plaatse dient een ieder die werkzaamheden verricht met kernmaterieel en ioniserende straling uitzendende toestellen in het bezit te zijn van een schriftelijke veiligheidsinstructie (zie ook punt 8.6).

Deze moet worden vastgesteld door de commandant /leidinggevende en moet zijn goedgekeurd door de bevoegde autoriteit.

De veiligheidsinstructie moet gericht zijn op de aard van de te verrichten werkzaamheden. Een afschrift van de instructie moet worden gezonden aan de materieel verwerver/beheerder, toezichthouder en de verantwoordelijke deskundige.

Het is raadzaam voor de omgang met radioactieve stoffen bevattend materieel "Werkprocedures" te gebruiken en de "Ongevalsprocedure" van tijd tot tijd te controleren.

0-0-0

11 RADIOACTIEF AFVAL

11.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt beknopt weergegeven hoe het verzamelen en verwerking van radioactief afval uit de krijgsmacht plaatsvond. Vele duizenden voertuigen, vliegtuigen en communicatie apparaten, deels verkregen via de z.g. Marschall-hulp, waren voorzien van aanwijsinstrumenten, teksten en merktekens met strontium (Sr-90) en radium (Ra-226) verf. Deze verf gaf allang géén licht meer.

Het was een taak van de afzonderlijke krijgsmachtdelen om het radioactieve materieel, waaronder ook elektronenbuizen, te merken voordat dit in gebruik genomen en of afgestoten werd. Alle artikelen, waarvan bekend was of een sterk vermoeden bestond dat zij enige vorm van radioactiviteit bevatten, waren opgenomen in een centrale lijst.
Omdat de artikelen die niet-radioactief zijn NIMMER als radioactief afval mogen worden aangeboden, was een uitgebreide registratie noodzakelijk. In deze zogenaamde BARK-1009 lijst, uitgegeven en bijgehouden door het RO, werden ook de mogelijke parasitaire röntgenstralingsbronnen (klystrons, thyratrons en dergelijke) vermeld.

De afvalketen begon op het moment dat een artikel met een radioactieve stof niet meer bruikbaar was en moest worden afgevoerd. We spraken dan van:

"Overtollig materieel dat radioactieve stoffen bevat"

Zoals in de voorschriften was aangegeven, mocht afvoer van dit materieel alleen geschieden via een speciale procedure en door de daartoe aangewezen instantie(s).

11.2 Afvoer

Het radioactief afval werd verzameld in stalen 60-liter verzamelvaten, op een wijze dat breuk en dus verspreiding in het vat niet mogelijk is. De vaten werden altijd op een droge geventileerde plaats opgeslagen. De normale afvoer naar de Centrale Ophaaldienst Voor Radioactief Afval (COVRA) vond plaats door tussenkomst van een Verzamelplaats. Ook werd om stralingshygiënische gronden soms afgezien van een reductie in volume en vond incidenteel ok directe afstoting plaats naar de COVRA in Petten en later Borsele.

Inventarislijst. De inhoud van de afzonderlijke verzamelvaten moest uit de bijgevoegde inventarislijsten blijken (zie figuur 11.1abcdefg.). Zowel de transporteenheden en de Lijndiensten verrichtten de transporten van radioactief afval conform de regels van de verleende autorisatie/vergunning.

Vrachtbrief. Alle legeronderdelen dienden de volle verzamelvaten met een vrachtbrief aan te bieden. De afzender bleef verantwoordelijk voor het transport.

11.3 Verwerking

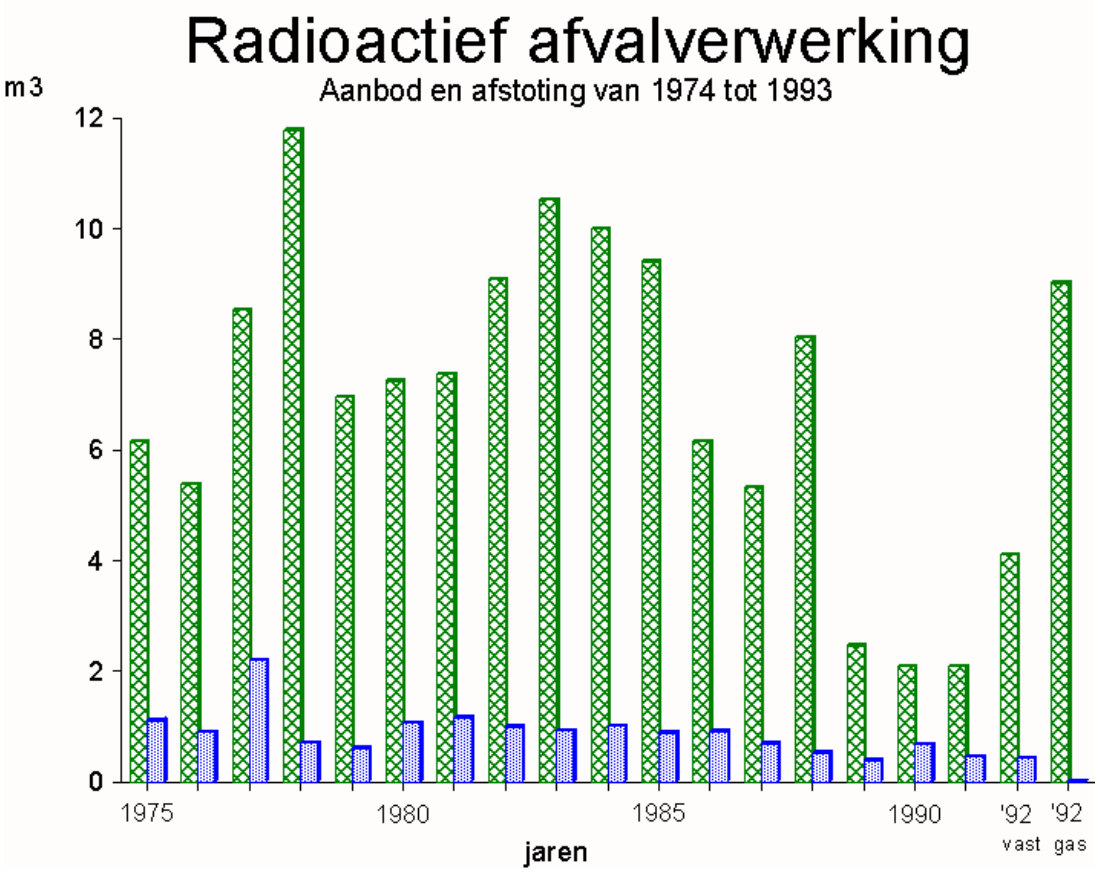
Het door de krijgsmachtdelen ingebrachte radioactieve afval werd in afwachting van de volume reductie en afvoer centraal opgeslagen. Waar mogelijk werd dan het volume verkleind door de niet-radioactieve bestanddelen te verwijderen. Door deze gecontroleerde reductie in volume van het aangeboden (overtollige) radioactieve stoffen bevattend materieel kon een aanzienlijke besparing van de kosten voor de gehele krijgsmacht worden bereikt.

Figuur 11.1abcdefg. Aangeboden overtollig radioactieve stoffen bevattend materieel.

De reductie in volume vond plaats onder voorwaarden in de zuurkast van een daartoe speciaal geautoriseerde inrichting (Zie figuur 11.2). Bij de verwerking werden zoveel mogelijk alle niet-radioactieve bestanddelen en verpakkingen verwijderd.

Een overzicht van de verwerkte hoeveelheden wordt in figuur 11.3 weergegeven.

Figuur 11.2. Faciliteit volumereductie



Figuur 11.3. Verwerkte hoeveelheden Overtollig radioactieve stoffen bevattend materieel (groen: aanbod, blauw: aan COVRA aangeboden).

De overblijvende radioactieve delen werden waar mogelijk in volume verkleind, gesorteerd en in, door de COVRA(Centrale Ophaaldienst voor Radioactief Afval) in Vlissingen beschikbaar gestelde, vaten van 100 liter gestort (zie figuur 11.4 links).

Figuur 11.4. COVRA- vaten.

Deze vaten werden bij verder verwerking door de COVRA, met behulp van een 1500-tons pers, samengeperst en in een 200 liter vat, dat al voorzien was van een dikke betonnen afscherming, opgeborgen (zie figuur 11.4. Rechts en figuur 11.5). Dit vat werd verder met beton afgestort en vervolgens opgeslagen (figuur 11.6).

Figuur 11.5 Inhoud 200-liter vat.

Figuur 11.6 . Opslag bij de COVRA.

0-0-0

12. ! EIGENSCHAPPEN, OPWEKKING EN GEBRUIK VAN RÖNTGENSTRALING

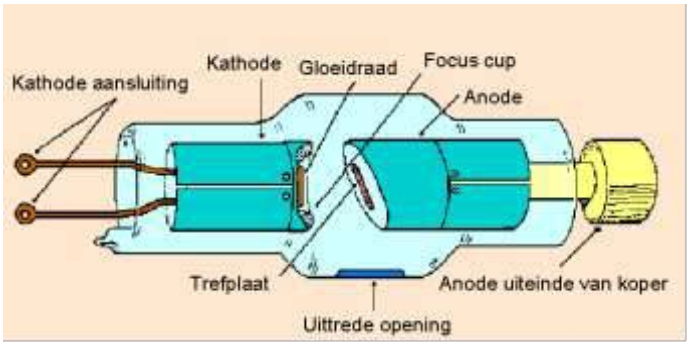
12.1 Fysische eigenschappen van röntgenstraling. Röntgenstraling:

- ***plant zich rechtlijnig voort***. Doordat röntgenstraling zich rechtlijnig voortplant, kunnen schaduwbeelden worden gevormd; het is echter niet mogelijk de röntgenstraling via lenzen of iets dergelijks te focusseren.
- ***kan door materie heen dringen***. De eigenschap dat röntgenstraling door ondoorzichtige voorwerpen kan heendringen, is van onschatbare waarde gebleken bij diverse onderzoekingen.
- ***wordt geabsorbeerd*.** Veranderingen in dichtheid en samenstelling van de materie doen karakteristieke verschillen in doorlaatbaarheid voor röntgenstraling ontstaan, die op de een of andere wijze kunnen worden zichtbaar gemaakt; dit zichtbaar maken kan geschieden door middel van een fluorescentiescherm of op een fotografische plaat. De absorptie is de zogenaamde foto-elektrische absorptie. hierbij wordt een röntgenfoton door een atoom ingevangen en gebruikt om een baanelektron uit het atoom te verwijderen. De mate waarin dit gebeurd is afhankelijk van diverse factoren:
  a. Hoe groter de **Z** van het materiaal, des te groter de absorptie en wel in eerste instantie evenredig met de derde macht van **Z**.
  b. De absorptie is evenredig met de soortelijke massa (g/cm^3) van de beschouwde materie.
  c. De absorptie is afhankelijk van de dikte van de doorstraalde materie. Hierbij bestaat geen lineair verband! Absorbeert bijvoorbeeld een materiaal het dikte d cm 50 % van de straling, dan zal de volgende laag van d cm opnieuw de helft van de dan nog aanwezige 50 % straling absorberen, dus nog 25 % van de straling doorlaten.
  d. De absorptie is afhankelijk van de zogenaamde "hardheid" van de straling. Hoe "weker" de straling is (dus hoe langer de golflengte!) des te meer absorptie er op treedt, èn omgekeerd, hoe "harder" de straling, des te minder absorptie.
- ***wordt verstrooid*.** Verstrooiing van röntgenstraling kan op twee manieren plaatsvinden:
  a. <u>Klassieke verstrooiing</u>. Deze is op te vatten als een botsing tussen het röntgenfoton en het atoom als geheel; er vindt geen energieoverdracht plaats, het röntgenfoton verandert slechts van richting.
  b. <u>Comton verstrooiing</u>. Hierbij treft het röntgenfoton het atoom, werpt een baanelektron uit het atoom, doch er blijft een zekere hoeveelheid energie over; hieruit ontstaat een nieuw röntgenfoton met een lagere energie dan het opvallend röntgenfoton, dus met een langere golflengte. Hoe harder de röntgenstraling is, des te meer strooistraling en Comton verstrooiing er zal optreden. Wanneer het doorstraalde voorwerp dikker is, zal er ook meer verstrooiing plaatsvinden.

- ***kan fluorescentie opwekken*.** Fluorescentie is de eigenschap, dat sommige stoffen, wanneer deze door onder andere röntgenstraling worden getroffen, oplichten. Hiervan wordt gebruik gemaakt in de fluoroscopie, waarbij de radioloog direct op het fluorescentiescherm ontstane beeld direct bekijkt en bij versterkingsschermen in filmcassettes.
- ***veroorzaakt ionisatie*.** Het veroorzaken van ionisatie (bij voorbeeld in lucht), dat wil zeggen er ontstaan elektrisch geladen atomen, die één of meer elektronen missen. Hiermee kan de hoeveelheid röntgenstraling worden gemeten.

12.2 Constructie röntgenbuis

Bij de constructie van röntgenbuizen wordt rekeningen gehouden met de toepassing. Figuur 12.1 geeft de schematische opbouw van een röntgenbuis weer.



Figuur 12.1. Schematische opbouw van een röntgenbuis

In het algemeen geldt dat:

- de gloeistroom wel 5 Ampère kan bedragen bij 12 Volt;
- de hoogspanning tussen 35 tot 200 kVolt ligt;
- de elektronenstroom door de buis uitgedrukt wordt in mA;
- de anode voor een goede warmteafvoer uit koper bestaat;
- voor een goed rendement in de anode een trefplaatje van wolfram, met een smeltpunt van 3300° C, is geplaatst
- de kathode op een zodanige wijze is gedimensioneerd dat de elektronen gericht gebundeld worden op de trefplaat;
- het geheel omgeven is door een afscherming (om zoveel mogelijk uittreden van röntgenstraling in de niet-gewenste richting te voorkomen), waardoor tevens beveiliging wordt verkregen tegen de op de buis staande hoogspanning;
- voor koeling het omhulsel geheel met olie gevuld is, welke vaak wordt rondgepompt.
- bij grotere toestellen buizen worden gebruikt, waarvan de anode roteert, zodat steeds weer een ander deel van de rotor door de elektronenbundel wordt getroffen. Hierdoor is een grotere output mogelijk.

12.3 Het Röntgentoestel

Een röntgentoestel bestaat niet alleen maar uit een kale röntgenbuis. Noodzakelijk zijn een controlepaneel, een statief om de röntgenbuis aan te bevestigen, een voedingseenheid enz. Sommige toestellen zijn uitgerust met een fototimer. Deze meet de hoeveelheid straling, die door het bestraalde voorwerp komt. Hierbij hoeft men alleen het kilovoltage en milliampèrage in te stellen; de belichting duurt juist zo lang als nodig is voor een voldoende zwarting. Hoe hoger het vermogen, des te hoger de hoogspanning en stroom. Bij hoge spanningen en grote vermogens worden strenge eisen gesteld aan de elektrische isolatie en aan de koeling van de röntgenbuizen. Er zijn twee categorieën röntgentoestellen te onderscheiden:

a. Voor **diagnostisch** onderzoek; hierbij wordt de diagnose gesteld aan de hand van verkregen röntgenfoto's of d.m.v. een direct afleesbare met Beeldversterker met een televisieketen; waardoor vele malen minder straling wordt gebruikt;
b. Voor **therapeutisch** gebruik; de röntgenstraling wordt hierbij gebruikt voor het behandelen (doden) van gezwellen (tumoren).

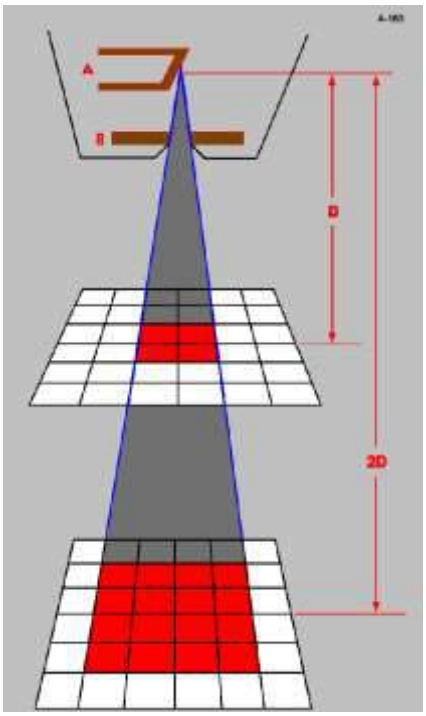
12.4 Beeldvorming op de röntgenfilm.

Röntgenstralen planten zich net als lichtstralen in alle richtingen rechtlijnig voort. De röntgenbuis wordt daarom omgeven met een mantel van lood met daarin slechts een cirkelvormige opening waardoor de voor het doel benodigde straling naar buiten kan treden. Deze stralen vormen de zogenaamde *primaire bundel* welke voor de beeldvorming wordt gebruikt. Het streven is er op gericht een röntgenbeeld op de film te verkrijgen met een goed contrast, dat wil zeggen een juiste verdeling van helderheden onderling over het beeld, evenals een voldoende helderheid van het totaal beeld. Een goede vergelijking ziet men optreden bij een zwart-wit TV-toestel, waarbij zowel een juist contrast, als een juiste helderheid kan worden ingesteld. Naast de eigenschappen van de film zelf spelen de volgende factoren hierbij een rol.

Factoren die het beeld beïnvloeden. Het beeld is door drie factoren te beïnvloeden:

- ***Instelling mAs***. De hoeveelheid röntgenstraling is evenredig met de stroomsterkte in mA door de röntgenbuis en evenredig met de tijd. Verandering in de stroomsterkte geven een verandering in de zwarting van de plaat. De onderlinge helderheid verhoudingen blijven echter constant. Het contrast verandert dus (binnen ruime grenzen) niet. Voor een bepaalde zwarting (overige condities constant gehouden) is het product van het aantal milliampère en de tijd in seconde, kortweg aangegeven met **"mAs"**, constant. Een opname moet direct goed zijn door gebruik van de juiste kV en mAs instelling, waarbij steeds tabellen moeten worden geraadpleegd (dus niet uit het geheugen of met de "natte vinger").

- ***Afstand focusfilm en Belichtingstijd***. De factoren belichtingstijd en afstand focusfilm hangen ten nauwste met elkaar samen. Maakt men de afstand tussen focus en film tweemaal zo groot, dan wordt de hoeveelheid straling per oppervlakte-eenheid (bij gelijke tijd van bestraling en aantal milliampère) viermaal zo klein. Onder deze condities moet men dan voor eenzelfde zwarting viermaal zo lang belichten. Dit wordt aanschouwelijk gemaakt in figuur 12.2. Als focus-huid afstand moet een zo groot als praktisch mogelijke afstand worden aangehouden. Minimaal dient dit 0,4 meter te zijn!



Figuur 12.2. Stralingsintensiteit is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand.

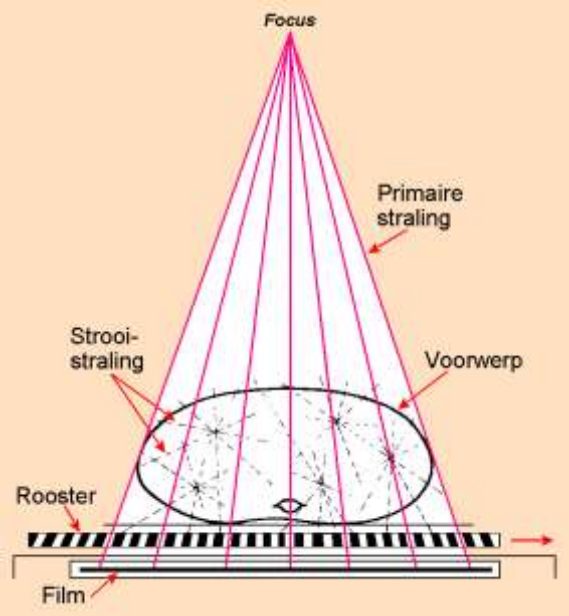
- ***Hoogspanning in kilovolt (kV).*** Bij hogere voltage (gelijke buisstroom en afstand) zal het nuttig effect van het toegevoerde vermogen resulteren in een veelgrotere stralingsopbrengst. Er ontstaat dus een helderder beeld. Het contrast zal echter afnemen, daar absorptie evenredig is met de derde macht van de golflengte, dus omgekeerd evenredig met de derde macht van de spanning op de buis. Het kiezen van een hoger kilovoltage leidt voor bepaalde opnamen tot dosisvermindering; er treedt wel een verminderd contrast op; een lager kilovoltage verhoogt het contrast. Verhoging van het kilovoltage geeft dus een toename van de totale helderheid naast het nivellering van de contrast verschillen.

Als ***mAs*** of ***afstand*** worden gebruikt om de helderheid te veranderen, wordt het contrast niet beïnvloed. Maar als het ***kilovoltage*** wordt gebruikt om de helderheid te veranderen, dan wordt ook het contrast beïnvloed.

Naast bovengenoemde factoren, zijn er nog andere mogelijkheden om een optimale foto te verkrijgen, waarbij vaak ook de stralenbelasting van de doorstraalde personen gunstig kan worden beïnvloed.

Van de eigenschap, dat röntgenstraling bepaalde stoffen doet oplichten, wordt dankbaar gebruik gemaakt in de röntgenfotografie. Daar fotografische film veel gevoeliger gemaakt kan worden voor zichtbaar en Ultra Violet licht brengt men ter weerszijde van de (dubbelzijdig van emulsie voorziene) röntgenfilm fluorescerende schermen aan. Het gevolg is, dat men voor dezelfde zwarting slechts 1/25e deel van de tijd behoeft te stralen, dan nodig zou zijn geweest zonder gebruik van schermen. Schermen en film worden samen bevestigd in een cassette. Het gebruik van schermen geeft bovendien nog een beter contrast.

Bij gebruik van de röntgenbuis blijkt, dat in het trefvlak van de bundel de intensiteit niet homogeen is verdeeld. In de lengterichting van de buis gezien wordt niet in loodrechte richting de meeste straling uitgezonden, doch in een hier scheefopstaande richting (naar de kathode toe). Van dit zogenaamde "heeleffect" kan soms dankbaar gebruik worden gemaakt. (zie figuur 12.3)



Figuur 12.3 Gebruik rooster voor het "heeleffect".

Sommige toestellen zijn uitgerust met een fototimer. Deze meet de hoeveelheid straling, die door het bestraalde voorwerp komt. Hierbij behoeft men alleen het kilovoltage, milliampèrage en afstand in te stellen en duurt de belichting juist zo lang als nodig is voor een voldoende zwarting.

0-0-0

13. ! VEILIG WERKEN MET RÖNTGENTOESTELLEN

Röntgentoestellen mogen alleen door geïnstrueerd personeel worden gebruikt in daartoe goedgekeurde inrichtingen en opstellingsplaatsen (zie figuur 13.1). Het onderhoud en testen na een reparatie mag uitsluitend geschieden in daarvoor ingerichte en goedgekeurde werkplaats. Voor de opslag van röntgentoestellen gelden dezelfde regels als voor de opslag voor elektrische apparaten. Men dient wel zorg te dragen dat onbevoegden het toestel niet inwerking kunnen stellen. Voor het vervoer van röntgentoestellen gelden geen speciale maatregelen.

Figuur 13.1. Goedgekeurde opstelling voor een Tandheelkundig röntgentoestel.

13.1 Persoonlijke bescherming van de radiologische werker

Elektrische gevaren.

a. De röntgentoestellen voor normaal gebruik werken met een hoogspanning in het gebied tussen de 35 en 150 kV. Een aardleiding waaraan alle metalen delen van het toestel zijn verbonden is daarom een absolute noodzaak en zelfs wettelijk voorgeschreven.

b. Effecten die door een elektrische schok kunnen worden veroorzaakt zijn:
   - verlamming van de verschillende organen; is het ademhalingssysteem gestoord, dan is kunstmatige ademhaling noodzakelijk.
   - brandwonden.
   - botbreuken door te heftige samentrekking van spieren.
   - na-effecten, zoals onder andere bewusteloosheid, misselijkheid, tijdelijk slecht horen of zien.
   - overlijden; ook kunnen zich bepaalde condities zich voordoen die de door tot gevolg hebben, zoals hartfibrillatie, kramptoestand van het ademhalingssysteem, plotseling optredende hoge bloeddruk waardoor in- en uitwendige bloedingen kunnen ontstaan of grote verbrandingen.

c. Het is dus nodig de volgende voorzorgen te nemen:
   - nagaan, of het röntgentoestel is geaard.
   - niet met vochtige handen het röntgentoestel bedienen.
   - nooit reparaties of afstellingen door onderhoudspersoneel laten uitvoeren, indien het röntgentoestel nog staat ingeschakeld.
   - de hoogspanningskabels niet onnodig buigen of te knikken, of er knikken in te laten ontstaan, waardoor er breuk in de isolatie kan optreden.
   - losse draden en verbindingen of defecte blanke kabels moeten onmiddellijk worden gemeld aan het personeel dat met het onderhoud is belast.

Radiologische gevaren. Röntgenstraling kan de mens op verschillende manieren schade berokkenen. Dit geldt zowel voor de patiënt als de bedienaar van het röntgentoestel. Men dienst daarom de volgende voorzorgen te nemen, als men het toestel bedient:

a. De opstelling van het röntgentoestel moet zodanig zijn, dat in aangrenzende vertrekken geen schadelijke hoeveelheid straling kan doordringen.
b. De röntgenbuis zèlf moet voldoende afgeschermd zijn; desondanks dient de bedienaar zover als in de praktijk mogelijk blijkt, verwijderd te blijven van de röntgenbuis, wanneer er wordt gestraald.
c. Optimaal gebruik maken van de aanwezige afschermende voorzieningen, zowel bij de patiënt als bij de bedienaar van het röntgentoestel; hieronder vallen loodhandschoenen, loodschorten, loodschermen enzovoort.
d. Maak geen opnamen, terwijl andere personen (met uitzondering van de patiënt) zich in de röntgenkamer bevinden; geef deze personen eerst de gelegenheid achter het loodscherm te gaan staan of de kamer te verlaten.
e. Maak het onmogelijk, dat iemand de kamer binnenkomt op het moment, dat er een opname wordt gemaakt (rode lamp en/of vergrendeling van de toegangsdeur.
f. Maak geen experimentele opnames van uzelf of kennissen om uw opnametechniek te verbeteren; dit moet kunnen worden afgeleid uit de al gemaakte opnames van patiënten, waaruit dus het belang van een goede administratieve archiefindeling blijkt.
g. Houd een patiënt niet vast tijdens de opname; indien dit toch nodig is, verdient het aanbeveling dit éénmalig te laten doen door een persoon, die beroepshalve niet aan straling wordt blootgesteld.
h. Nooit zorgeloos met röntgentoestellen omgaan.
i. Uw persoonlijk dosisregistratiemiddel (PDM) altijd op de juiste wijze dragen, dus niet achter uw loodschort!

Keuringen. Voordat een de bedienaar daadwerkelijk mag aanvangen met het nemen van röntgenopnamen, dient hij eerst:

- te zijn aangewezen als radiologisch werker, zoals bedoeld onder punt 1.9 van hoofdstuk 1.
- het voorgeschreven keuringsonderzoek te ondergaan zoals onder hoofdstuk 1, punt 1.10 is beschreven.

Persoonlijk dosisregistratiemiddel (PDM). Ten overvloede wordt er op gewezen dat een PDM geen bescherming geeft tegen straling maar alleen *achteraf* de opgelopen dosis aangeeft.

a. Ondanks alle voorzorgen die u neemt, blijft de mogelijkheid bestaan dat u een stralingsbelasting oploopt; het is van belang te weten hoe groot deze dosis is en daarom wordt u een persoonlijk dosisregistratiemiddel uitgereikt.
b. Op dit moment worden PDM's in de vorm van een TLD-badge (Thermo Luminescentie Dosismeter) gebruikt.
c. De TLD-badge is thans het meest gebruikte dosisregistratiemiddel (voor de werking en opbouw zie punt 7.5).
d. De termijn van omwisseling van de PDM's hangt af van de indeling van de werkzaamheden. Meestal geschied de omwisseling per veertien dagen, per maand of per kwartaal.

Deskundigheidseisen waaraan het personeel moet voldoen. In de vergunning wordt bepaald welk niveau van deskundigheid minimaal is vereist. In vele gevallen wordt bepaald dat de leiding van - of het toezicht bij de werkzaamheden - moet berusten bij een "bevoegde deskundige". Afhankelijk van de aard van de werkzaamheden zal het personeel moeten voldoen aan bepaalde deskundigheidseisen, of zijn geïnstrueerd over hun aandeel in de werkzaamheden.

Schriftelijke veiligheidsinstructie. Ieder die werkzaamheden verricht met ioniserende straling uitzendende toestellen moet in het bezit zijn van een schriftelijke veiligheidsinstructie. Deze instructie wordt vastgesteld door de commandant/ leidinggevende en moet zijn goedgekeurd door het **RO** of de verantwoordelijke deskundige en in bijzondere gevallen door de Directeur. De instructie moet gericht zijn op de aard van de werkzaamheden (zie punt 13.4).

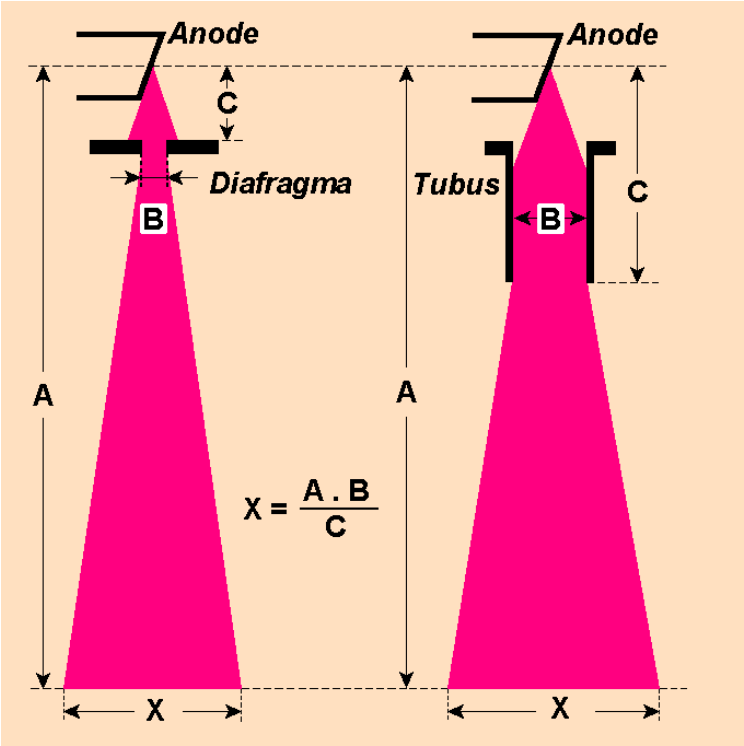
13.2 Persoonlijke bescherming van de patiënt

- ***Rechtvaardiging.*** Iedere röntgenfoto geeft de patiënt een stralingsbelasting. Men moet zich dus afvragen of het nemen van de foto gerechtvaardigd is. Voorkom dat door onzorgvuldig handelen extra foto`s nodig zijn.
- ***Opname voorbereiding.*** Maak gebruik van een zo klein mogelijke bundelgrootte en gebruik loodflappen om delen van de patiënt af te schermen. De grootst mogelijke aandacht geldt voor de afscherming van lichaamdelen, welke niet worden doorgelicht; speciaal bij kinderen, in verwachting zijnde vrouwen en iedereen beneden de veertig jaar, waarbij

afscherming van de gonaden belangrijk is.

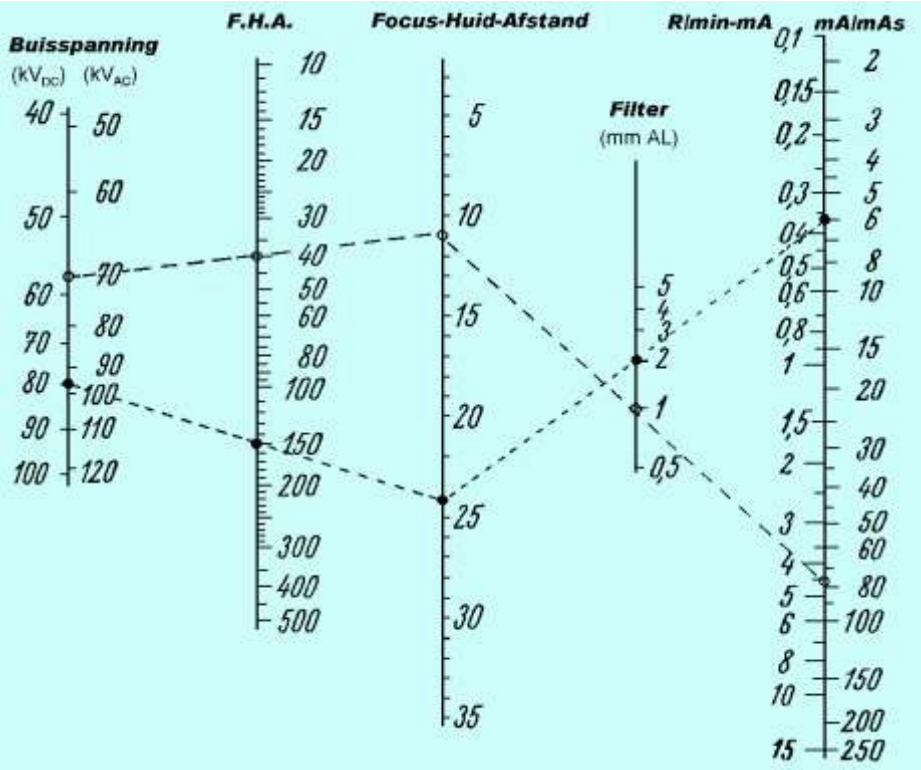
- ***Identificatie.*** Het plaatsen van de juiste identificatiegegevens op de film en het er op toezien, dat geen afbeeldingen van vreemde voorwerpen op de foto (zoals ringen en kettingen) kunnen voorkomen.
- ***Filtering.*** Zachte straling draagt niet bij tot de beeldvorming, maar wordt wel door de patiënt geabsorbeerd. Ter voorkoming van onnodige stralingsbelasting door de patiënt dient het röntgentoestel te zijn voorzien van voldoende filtering:
  - 0,5 mm Al equivalent of meer, bij speciale toestellen, met een buisspanning minder dan 50 kVolt,
  - 1,5 mm Al equivalent bij een buisspanning tot 70 kVolt,
  - 2 mm Al equivalent voor buisspanningen van meer dan 70 kVolt, doch niet meer dan 100 kVolt, en
  - 2,5 mm Al equivalent bij buisspanningen van meer dan 100 kVolt.

  Toestellen voor panoramische technieken moeten dezelfde filtratie hebben als de medisch-diagnostische toestellen. De aangegeven, wettelijk verplichte filtraties bij de verschillende buisspanningen zijn een minimum eis!
- ***Veldgrootte***. De patiënt moet voor het maken van een röntgenfoto aan straling worden blootgesteld; het is dus van het groot belang de patiënt slechts die hoeveelheid straling te laten ontvangen, die strikt noodzakelijk is voor een goede foto; de veldgrootte (in te stellen met het lichtvizier) mag niet groter zijn dan de gebruikte fotocassette. Zie figuur 13.2 voor de relatie tussen beeldgrootte en de afstand.



Figuur 13.2. Relatie beeldgrootte en afstand

- ***Parameters (instelknoppen):***
  kV = kilovolt = buisspanning = doordringend vermogen.
  mA = milliampére = buisstroom = dichtheid/zwarting.
  ms = milliseconde = opnameduur = effect gelijk aan buisstroom.
  mAs = milliAmpére per seconde = combinatie van buisstroom en de opnameduur.
  Bedenk dat de afstand tussen de buis en het object invloed heeft op de geometrie, dosis en bovengenoemde parameters. Wees bedacht op foto-effecten.
- ***Bepaling Exposie- en dosistempo bij röntgentoestellen. fac:***
  Het Exposietempo (bijvoorbeeld R/s) en het dosistempo (bijvoorbeeld Gy/s) kunnen vaak bij een bepaalde spanning in kV op de röntgenbuis worden gerelateerd aan de stroom in mA, de tijd in seconde, de mate van filtering en de afstand tot de patiënt. Men werkt dan onder ander met de oude eenheden zoals "R per mAs op 1 meter". In figuur 13.3 wordt een "monogram" weergegeven waarin, uitgaande van bepaalde condities, op eenvoudige wijze het exposietempo kan worden afgelezen.



Figuur 13.3. Röntgenbuisspanning, Output en filtratie.

- **Fotoverwerking.** Zorg voor een goede fotoverwerking. Het is niet gerechtvaardigd als door een slechte fotoverwerking extra foto`s moeten worden genomen. Voorkom een onbruikbare opname; deze kan ontstaan door:

- het gebruik van een niet geladen cassette,
- het niet plaatsen van een cassette in de bucky,
- foutieve instelling van de buis over de patiënt en film,
- het maken van dubbele opnames op één plaat,
- het onjuist afwerken van een foto in de donkere kamer.

13.3 Storingsmelding.

Storingen moeten zo snel mogelijk worden verholpen. Meld storingen direct via het storingstelefoonnummer van de betreffende onderhoudsdienst. Vul dit nummer in op de veiligheidsinstructie bij het röntgentoestel.

13.4 VEILIGHEIDSINSTRUKTIE VOOR GEBRUIKERS VAN EEN RÖNTGENTOESTEL

1. U mag het toestel alleen gebruiken indien U:
   - 18 jaar of ouder bent en niet zwanger of zogende;
   - medisch geschikt bent verklaard;
   - voorzien bent van een Persoonlijk Dosisregistratie Middel (PDM);
   - kennis heeft genomen van de bij het röntgentoestel behorende handleiding(en) en eventuele bepalingen van het Registratie Informatie Formulier (RIF);
   - een instructie over het omgaan met röntgentoestellen heeft gehad.
2. Het toestel mag alleen voor medische doeleinden worden gebruikt, indien dit medisch noodzakelijk wordt geacht; houd het aantal opnamen zo beperkt mogelijk.
3. Ieder voorwerp dat door röntgenstraling wordt getroffen - ook het menselijk lichaam - verstrooit de straling in alle richtingen. Houdt U zich daarom aan de volgende regels:
   - beperk de tijd dat U aan straling wordt bloot gesteld;
   - houd een zo groot mogelijke afstand tot de stralingsbron aan;
   - kies een geschikte plaats tijdens de opname, zo mogelijk achter een scherm of muur;
   - gebruik een zo klein mogelijk diafragma, aangepast aan het filmformaat;
   - pas het voorgeschreven filter toe;
   - gebruik beschermende middelen, zoals loodschort, loodhandschoenen, loodflappen;
   - laat het fixeren van patiënt of filmcassette over aan de patiënt of aan een begeleider.
4. Laat géén personen toe in ruimten waar röntgenopnamen worden gemaakt, indien hun aanwezigheid niet strikt noodzakelijk is.
5. Meld storingen aan het röntgentoestel onmiddellijk en staak het gebruik ervan totdat de oorzaak door deskundigen is onderzocht. Gebruik het toestel niet na reparatie of wijziging van de toestelopstelling, vóór dat de toezichthoudende instantie het toestel heeft gecontroleerd op stralingsveiligheid en voor gebruik heeft vrijgegeven.
6. Rapporteer alle omstandigheden die U uit oogpunt van stralingsbescherming belangrijk voorkomen. Meld aan het RO wanneer U buiten uw werkzaam heden voor uw bedrijf nog aan röntgenstraling wordt blootgesteld of om gaat met radioactieve stoffen. Stel bij ziekte uw dokter en de controlerende arts op de hoogte van uw functie als radiologisch werker.
7. Uitgereikt door (naam/functie): . . . . . .

8. Storingsmelding (Telefoon): . . . . . .

0-0-0

Bijlage A

BASISKENNIS WIS- en NATUURKUNDE

1. Inleiding

Voor deze cursus is enige kennis van de wiskunde en natuurkunde vereist. In deze bijlage wordt het minimaal benodigde gepresenteerd. Deze leerstof wordt als voorkennis beschouwd en niet als zodanig tijdens de lessen behandeld.

2. Wiskundige eenheden

De wiskunde gebruikt dikwijls een bepaalde schrijfwijze (notatie) en afkortingen om iets zo kort mogelijk te formuleren.

2.1 *Machten*

Het getalsysteem dat algemeen gebruikt wordt is het tientallig systeem. Hierbij worden tien verschillende symbolen, namelijk de cijfers 0 t/m 9, gebruikt om elk getal te kunnen uitdrukken. De keuze van het tientallig stelsel is duidelijk: de mens heeft tien vingers! Hoe stellen we getallen samen? Van 1 t/m 9 is geen probleem, doch wat volgt er na **9**? Uit de ons ter beschikking staande symbolen wordt het getal na de "**9**" samengesteld uit een "**1**" gevolgd door een "**0**", dus "**10**". Doortellend komt na "**19**" het getal "**20**" en zo verder tot "**99**". Daarna komt weer een "**1**", doch nu gevolgd door twee nullen "**00**", het getal "**100**". Op deze wijze kan men ongelimiteerd doorgaan.

De getallen, bestaande uit een "**1**" gevolgd door een aantal nullen, kunnen op een speciale wijze worden geschreven; namelijk als een "**macht**" van 10. Bij het getal 1.000.000 worden de nullen per drie stuks gescheiden door een punt *(LET OP, in de Engelse taal wordt dit met een komma gedaan, dus schrijft men 1,000,000).* Dit getal kan ook geschreven worden als een product van een aantal malen het getal 10, namelijk: 1.000.000 = 10 x 10 x 10 x 10 x 10 x 10

In de wiskunde is de afgesproken notatie hiervoor $\mathbf{10^6}$. Hierin is de "**6**" de "**macht**" of ook wel "**exponent**" genaamd en is de 10 het grondgetal. Natuurlijk mag deze notatie ook worden gebruikt bij andere grondgetallen dan 10. Zo is het getal 512 te schrijven als 8^3, immers 8 x 8 x 8 = 512

Het bepalen van de macht of exponent wordt pas duidelijk na het uitvoeren van de berekening, in tegenstelling tot het getal 1.000.000, waarbij de macht van 10 direct kan worden bepaald; deze is namelijk gelijk aan het aantal nullen, dus 6!

2.2 *Bewerkingen*

Heeft men nog meer gemak van deze notatie? Ja, bewerkingen met getallen, bestaande uit een 1 gevolgd door een aantal nullen, zoals vermenigvuldigen en delen worden nu een stuk eenvoudiger.

Voor de vermenigvuldiging 100 x 1.000 = 100.000 mag volgens de afspraak geschreven worden: $10^2 \times 10^3 = 10^5$

Merk op:

Bij vermenigvuldiging worden de exponenten opgeteld (2 + 3 = 5)! Bij het delen van bijvoorbeeld 10.000.000 door 1000 = 10.000 ($10^7 - 10^3 = 10^4$) worden de exponenten van elkaar afgetrokken (7 - 4 = 3)!

Volgens afspraak is $10^1 = 10$. Echter de "1" wordt vaak als exponent weggelaten:

$$\frac{10.000}{1.000} = 10 \quad \text{of anders geschreven:} \quad \frac{10^4}{10^3} = 10^1$$

In het volgende voorbeeld staat achter de "1" geen "0", zodat de "0" de exponent wordt:

$$\frac{1.000}{1.000} = 1 \quad \text{of anders geschreven:} \quad \frac{10^3}{10^3} = 10^0 \text{ ……. Dus } 10^0 = 1 \text{ !}$$

Vraag: Is er een probleem bij het delen, wanneer de exponent van het getal in de noemer groter is dan de exponent van het getal in de teller?

Bij het volgende voorbeeld gaan we er van uit dat de wijze waarop breuken worden vereenvoudigd bekend is:

$$\frac{100}{10.000} = \frac{1}{100} \quad \text{of anders geschreven:} \quad \frac{10^2}{10^4} = \frac{1}{10^2}$$

Volgens de afspraak zou echter gelden:

$$\frac{10^2}{10^4} = 10^{(2-4)} = 10^{-2} \text{ (een zogenaamde negatieve macht van 10)}$$

We schrijven daarom $\frac{1}{10^2} = \frac{1}{10^{+2}} = 10^{-2}$

Bij gebruik van de "decimale notatie" wordt de breuk:

$\frac{1}{100}$ geschreven als 0,01: het aantal cijfers achter de komma geeft het getal -2!

2.3 *Wetenschappelijke schrijfwijze*

Zeer kleine of zeer grote getallen worden vaak uitgedrukt in de machten van 10; de zogenaamde wetenschappelijke schrijfwijze of notatie. Deze vorm kan men

algebraïsch als volgt weergeven: $A \times 10^{n}$

Hierin is "A" groter of gelijk aan 1, doch kleiner dan 10 (met de notatie $1<A<10$) en kan "**n**" ieder heel getal zijn, zowel positief als negatief en nul. De voorbeelden laten zien hoe we een getal in de standaardvorm brengen:

De gemiddelde afstand van de aarde tot de zon bedraagt circa 150.000.000.000 m. Dit is 15 x 10.000.000.000 m = 15×10^{10} m. Hierbij is "A" gelijk aan 15, maar voldoet nog niet aan de voorwaarden! Echter $15 = 1{,}5 \times 10^{1}$, zodat: $1{,}5 \times 10^{1} \times 10^{10}$ m, wat overeenkomt met $1{,}5 \times 10^{11}$ m. "A" = 1,5 dus voldoet!

In het waterstofatoom bedraagt de gemiddelde afstand tussen het elektron en het proton 0,000000053 millimeter.
Dit is 53 x 0,000000001 mm = 53×10^{-9} mm, of $5{,}3 \times 10^{+1} \times 10^{-9} = 5{,}3 \times 10^{-8}$ mm.

3. Natuurkundige eenheden

In de natuurkunde gebruikt men de zogenaamde eenheden. De meter, kilogram en seconde zijn hiervan enkele voorbeelden. Meet men bijvoorbeeld de afstand tussen twee punten, dan kan men dit door een getal aangeven, gevolgd door de eenheid van lengte.

3.1 *Schrijfwijze*

Naast de lengte-eenheid kent men ook nog andere eenheden; voor gewicht, tijd, elektriciteit enzovoort. Voor een juiste schrijfwijze gelden de volgende regels:

a. Eenheden, voluit geschreven, beginnen met een kleine letter, dus: één meter, twee seconde, drie volt, vier ampère enzovoort.
b. Afgekorte eenheden of symbolen zijn genormaliseerd en kennen eveneens geen meervoudsvorm. Indien ze zijn afgeleid van de naam van een geleerde, worden ze met een hoofdletter geschreven, in andere gevallen met een kleine letter, dus: "V" voor volt (naar Volta), maar "s" voor seconde.
c. Men kan eenheden combineren, bijvoorbeeld kilowattuur afgekort tot kWh (waarin de h als afkorting voor "hour" = uur wordt gebruikt) en kilometer per uur afgekort tot km/h.

Quotiënten zoals $\frac{kg}{m^3}$ of $\mathbf{kg/m^3}$ schrijft men ook als $\mathbf{kg.m^{-3}}$.

3.2 *Voorvoegsels*

Bij het gebruik van eenheden worden vaak voorvoegsels gebruikt. De volgende voorvoegsels worden, als machten van tien die een drievoud zijn, bij natuurkundige eenheden gebruikt, zie tabel 3.1:

Macht	Naam	Afkorting
10^{12}	terra	T
10^{9}	giga	G
10^{6}	mega	M
10^{3}	kilo	k
10^{2}	hecto	H (!)
10^{1}	deca	da
10^{-1}	deci	D (!)
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	µ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f

3.3 *Eenhedenstelsels*

In der loop der tijd zijn in verschillende takken der techniek en wetenschap ook verschillende eenhedenstelsels ontstaan. Een eenhedenstelsel bestaat uit een zo beperkt mogelijk aantal grondeenheden, welke natuurkundig zijn gedefinieerd (zodat deze kunnen worden gereconstrueerd) en een aantal, uit deze grondeenheden, afgeleide eenheden.

De verschillende eenhedenstelsels zijn thans vervangen door het Système Internationale (S.I.). Men komt in oudere literatuur nog de oude eenheden tegen, zie punt 3.3b.

a. Overzicht van het S.I.-stelsel voor zover van toepassing:

Grondeenheden	lengte	M (meter)
	massa	kg (kilogrammassa)
	tijd	S (seconde)
	stroomsterkte	A (ampère)
Afgeleide eenheden	snelheid	m/s
	versnelling	m/s^2
	kracht	N = newton = kgm/s^2
	druk	Pa = pascal = N/m^2
	arbeid	J = joule = N.m
	vermogen	W = watt = J/s
	elektrische lading	C = coulomb = A.s
	elektrische potentiaal	V = volt = J/A.s

b. In het S.I.-stelsel zijn verschillende oudere eenheden vervangen door S.I.-eenheden:

erg	= 10^{-7} J
angstrom	= 10^{-10} m
dyne	= 10^{-5} N
mm kwik	= 133 Pa
C	= K + 273,16 (graad Kelvin)
eV	= 1,6 x 10^{-19} J

c. Verschillende oude eenheden mogen in het S.I.-stelsel niet meer worden gebruikt, zoals de paardenkracht (pk). Bij automotoren wordt tegenwoordig het vermogen uitgedrukt in kilo watt (kW). Gewichtseenheden, die nog in het spraakgebruik voorkomen, zoals pond en ons, mochten al lang niet meer worden gebruikt in het handelsverkeer (zelfs wettelijk verboden).

3.4 *Afgeleide eenheden*

De volgende eenheden, afgeleid uit de grondeenheden, worden gebruikt:

Hertz (symbool Hz), eenheid, gebruikt bij het aangeven van een frequentie, dit is het aantal malen dat een periodiek verschijnsel per seconde plaatsvindt (dimensie dus 1/s of s^{-1});

Ohm (symbool Ω), eenheid van weerstand (R); te berekenen uit het quotiënt van het aantal volt (U) en het aantal ampère(I):

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}} \text{ ohm}$$

Farad (symbool F), eenheid van capaciteit (C); te berekenen uit het quotiënt van de hoeveelheid lading (Q) en het daarbij optredende voltage (U) bij een condensator:

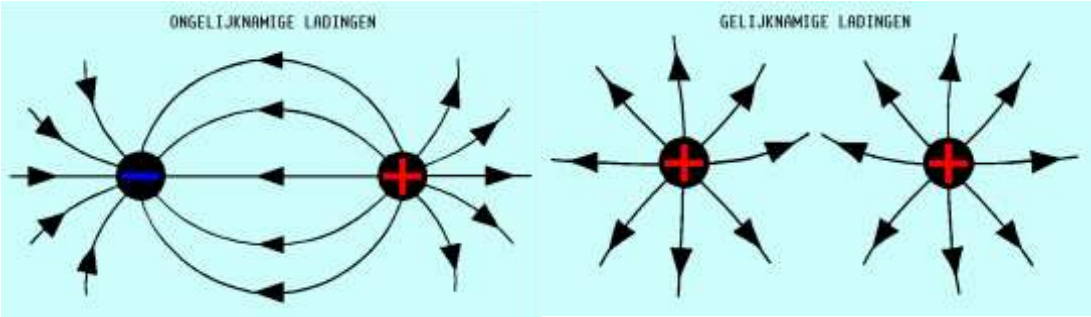
$$\mathbf{C} = \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{U}} \text{ farad}$$

N.B. Het is helaas wel zo dat in de Fysica eenzelfde letter vaak voor diverse eenheden wordt gebruikt. Uit de tekst is echter meestal wel duidelijk af te leiden, over welke eenheid het gaat.

4 ELEKTRICITEIT EN MAGNETISME

4.1 ***Elektriciteit in rust.*** Men stelt zich rond elektrische ladingen een krachtveld voor, bestaande uit zogenaamde krachtlijnen, die de richting aangeven, waarin theoretisch een vrije positieve lading zich zou bewegen onder invloed van die ladingen. Wordt een glazen staaf opgewreven met een zijden doek en vrij opgehangen aan een draad; en wordt vervolgens een tweede staaf, die op dezelfde wijze is behandeld, bij de eerste staaf gebracht, dan blijkt dat deze staven elkaar afstoten. Neemt men echter een hardrubber staaf, die met een wollen lap wordt opgewreven bij deze glazen staaf, dan blijkt dat deze staven elkaar aantrekken. Deze en andere proeven zijn te verklaren door het gedrag van de elektronen van de atomen, waaruit de staven zijn opgebouwd:

a. De glazen staaf, die eerst elektrisch neutraal was, heeft elektronen afgestaan aan de zijden lap en is hierdoor positief geladen door een tekort aan elektronen;
b. De hardrubber staaf heeft elektronen opgenomen uit de wollen lap en is dus negatief geladen, doordat deze staaf nu een overschot aan elektronen heeft;
c. Gelijknamige ladingen stoten elkaar blijkbaar af, ongelijknamige ladingen trekken elkaar aan;
d. De afstotende of aantrekkende kracht blijkt evenredig te zijn met het product van de ladingen (uitgedrukt in coulomb) en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tussen de ladingen (Figuur 4.1).



Figuur 4.1. Aantrekken en afstoten bij ladingsverschil.

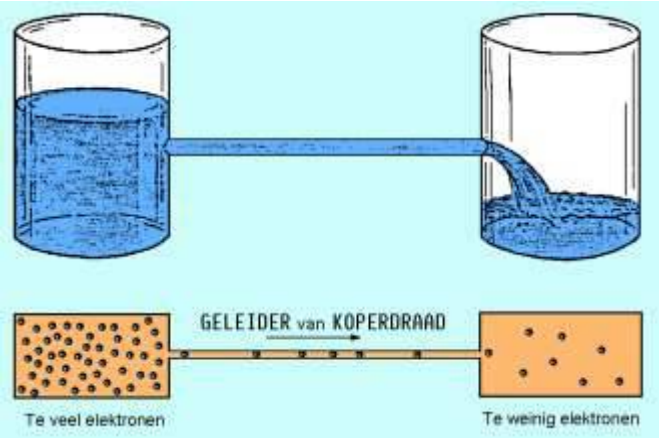
Zolang geen elektronenuitwisseling plaats vindt tussen de geladen lichamen, blijft het elektrisch veld constant Het geheel van deze verschijnselen wordt in de Natuurkunde "Elektrostatika" genoemd.

4.2 ***Elektriciteit in beweging.*** Materialen, zoals glas en porselein geleiden de elektronen slecht en worden daarom isolatoren genoemd. Metalen geleiden elektronen goed (het ene metaal beter dan het andere) en worden daarom geleiders genoemd. Geladen lichamen hebben een potentiaal ten opzichte van de "aarde", waarvan het potentiaal per definitie "0" is. Dit potentiaal wordt uitgedrukt in volt en is gelijk aan het quotiënt van de lading van het lichaam en de capaciteit ervan, in formule:

$$U = \frac{Q}{C} \text{ Volt} \quad (\text{Q in coulomb, C in farad})$$

Twee geladen lichamen zullen in de meeste gevallen een verschillend potentiaal hebben ten opzichte van de aarde en dus ook ten opzichte van elkaar. Worden deze lichamen met elkaar verbonden, dan zullen onder invloed van dit potentiaalverschil de elektronen zich zodanig over de lichamen verdelen, totdat het potentiaalverschil tussen de lichamen nul wordt. In het algemeen heeft dan de ontstane combinatie een potentiaalverschil ten opzichte van de aarde. Het transport van elektronen van het ene naar het andere lichaam wordt een elektronenstroom genoemd, die is uitgedrukt in ampère.

De richting van deze stroom is van de plaats van het grootste overschot aan elektronen naar de plaats waar minder elektronen zijn of een tekort aan elektronen aanwezig is (Figuur 4.2).



Figuur 4.2. Het watermodel als demonstratie van een elektronenstroom.

Zouden we er in slagen de twee lichamen een blijvend potentiaalverschil ten opzichte van elkaar te doen behouden, dan blijft er een elektronenstroom vloeien. Deze elektronenstroom kan voor verschillende doeleinden worden gebruikt:

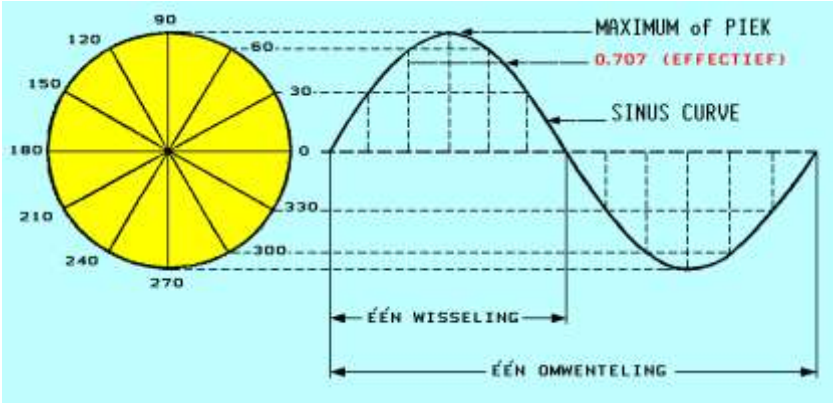
* Het transport van energie over grote afstanden;
* Bij doorgang van veel elektronen door een dunne draad wordt deze draad verwarmd (gloeilampen en gloeispiralen in röntgenbuizen);
* Rond een geleider, waardoor een stroom vloeit, ontstaat een magnetisch veld; hiervan wordt gebruik gemaakt bij transformatoren, elektromotoren enzovoort.

Er zijn in de techniek twee soorten elektrische stroom te onderscheiden:

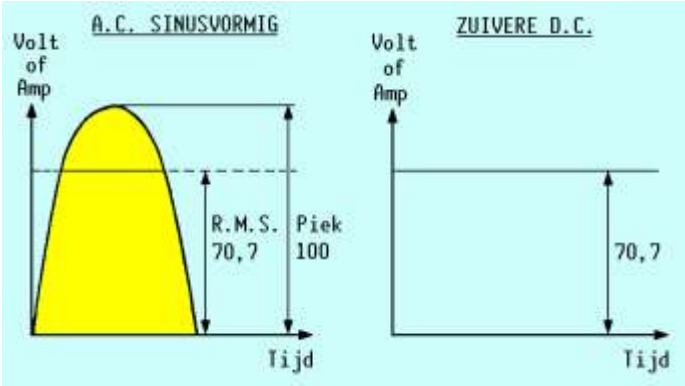
* Gelijkstroom (aangeduid met **DC** = Direct Current); het kenmerk hiervan is, dat de elektronen steeds in één richting stromen; we zien de toepassing meestal bij mobiele apparatuur, waarbij de gelijkstroom door batterijen of accu's wordt geleverd.
* Wisselstroom (aangeduid met **AC** = Alternating Current); hierbij golven de elektronen steeds heen en weer met een bepaalde frequentie (in Europa 50 Hz, in de USA 60 Hz).

4.3 ***Golfvormen.*** Hierin zijn twee zogenaamde amplituden te onderscheiden:

* Maximum- of topwaarde.
* Effectieve waarde (ook wel RMS-waarde genoemd in de Engelse literatuur), gelijk aan 0,707 x de topwaarde. Dit is de waarde, die dezelfde energie geeft aan een gebruiksapparaat als een gelijkstroom met dezelfde constante waarde.

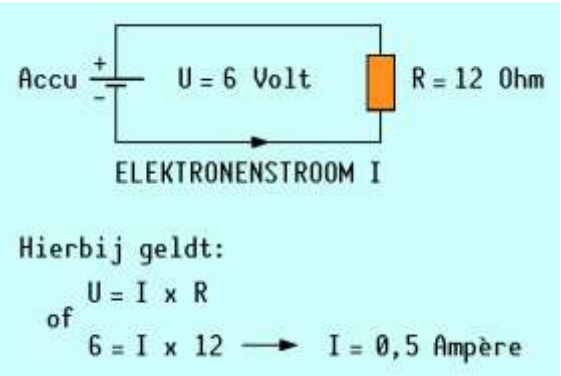


Figuur 4.3. Golfvorm van de wisselstroom (en de constructie ervan).
De effectieve wisselspanning is qua grootte de nominale spanning van het elektriciteitsnet, dus bij huis, tuin en keukengebruik 230 Volt.



Figuur 4.4. Relatie tussen RMS en topwaarde.

4.4 ***Weerstand.*** Iedere geleider of isolator biedt weerstand aan de elektronenstroom. Deze weerstand wordt uitgedrukt in ohms. Een weerstand heeft de waarde van één ohm, wanneer bij de doorgang van één ampère over deze weerstand een potentiaalverschil van één volt ontstaat. In schema's wordt een weerstand meestal aangeduid met de R (van "resistance"), een spanning met U en een stroom met I van "intensiteit"). Een rekenvoorbeeld van figuur 4.5 kan het een en ander verduidelijken:



Figuur 4.5. Rekenvoorbeeld

4.5 ***Vermogen.*** Wanneer een elektrisch toestel op het elektriciteitsnet wordt aangesloten, zal dit toestel een bepaald vermogen opnemen. Het vermogen P is het aantal joule, wat het toestel per seconde opneemt en dit wordt uitgedrukt in watt. Dit is al in bijlage B aangegeven, de definitie luidt: W = J/s. Vermenigvuldigt men het aantal watt met de tijd in seconde, dan verkrijgt men de energie (of arbeid) uitgedrukt in joule.

Dit vermogen staat op de meeste toestellen aangegeven. Stel, dat men uitgaat van een toestel met een vermogen van 2200 W:

Uit Bijlage B: $\mathbf{V} = \frac{\mathbf{J}}{\mathbf{A.s}}$; Vermenigvuldigt men links en rechts met A, dan geeft dit:

$$\mathbf{V \times A} = \frac{J}{\mathbf{s}} = \mathbf{W}$$

Het product van spanning (in volt) en stroom (in ampère) geeft het vermogen (in watt). Sluit men dus een toestel van 2200 W aan op 220 V, dan zal er een stroom van 10 A door dit toestel vloeien. Te grote stroomsterkten in een leiding kan schade geven, daarom worden leidingen beschermd door smeltveiligheden, die doorsmelten bij een te hoge stroomsterkte. Ook worden hiervoor tegenwoordig wel zogenaamde automaten gebruikt, die weer in bedrijf komen indien een bepaalde knop op deze automaat wordt ingedrukt.
Ook de weerstand van bovengenoemd toestel is nu uit te rekenen: **U = I x R**
Vermogen **P** = **U** x **I** = I x R x I = I^2 x R of 2200 = 10 x 10 x R ➔ R = 22 Ohm.

De elektriciteitscentrale rekent niet in joule maar in kWh; dit is een handzamer eenheid. Gaat men uit van een toestel met een vermogen van 1000 W (= 1 kW), dan gebruikt dit toestel per uur één kWh. Dit is gelijk aan 1000 x 3600 = 3.600.000 joule.

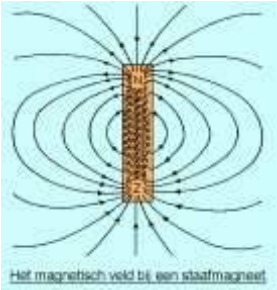
4.6 ***Krachtstroom.*** Het kan bij grote röntgentoestellen voorkomen dat een toestel zoveel vermogen opneemt, dat het 220 V net dit niet kan leveren. Hierin wordt dan voorzien door het zogenaamde krachtstroom- of draaistroomnet met een spanning van 380 V, bestaande uit drie geleiders en één nulleider. Hierop wordt niet verder ingegaan.

4.7 ***Magnetisme.*** Sommige stoffen vertonen magnetisme, dat is het vermogen om andere stoffen, zoals ijzer, aan te trekken. Dit magnetisme ontstaat door elektronenbewegingen in het materiaal en niet, zoals in de Elektrostatica, door een tekort of overschot aan elektronen aan de oppervlakte van dat materiaal. Men stelt zich het ontstaan van magnetisme als volgt voor:

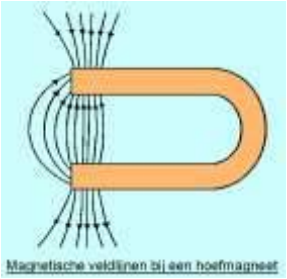
a. Terwijl de elektronen in hun baan rond de atoomkern draaien, draaien ze tevens rond hun eigen as;

b. In kleine, de zo genaamde Weiss gebiedjes (ter grootte van 105 atomen is deze "spin" op dezelfde wijze gericht;
c. Worden de Weiss gebiedjes nog door een uitwendige invloed in gelijke zin gericht, dan ontstaat, bij een juiste materiaalkeuze, een z.g. permanente magneet.

Wordt een staafmagneet vrij opgehangen, dan zal deze zich in een bepaalde richting en wel ongeveer Noord-Zuid opstellen. Dit komt doordat de aarde over een magnetisch veld beschikt. Hierop berust de werking van een kompas. De uiteinden van de staafmagneet, polen genoemd, worden nu onderscheiden in de Noordpool (het uiteinde dat naar de aardse Noordpool wijst) en de Zuidpool (het uiteinde dat naar de aardse Zuidpool wijst). Om de werking van de staafmagneet in de ruimte rond deze magneet te verklaren wordt gebruik gemaakt van krachtlijnen. Voor deze magnetische krachtlijnen wordt als richting aangenomen de richting van de Noordpool naar Zuidpool om de staafmagneet heen, dit is de richting waarin een (theoretische) magnetische Noordpool zich zou bewegen onder invloed van de staafmagneet.



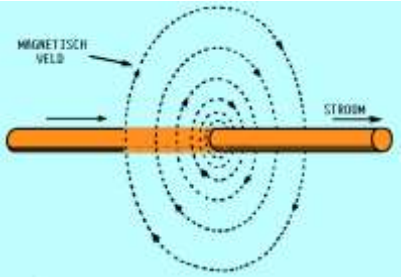
Figuur 4.6. A



Figuur 4.6. B

Bij **A** ziet men het krachtenveld rond een staafmagneet, bij **B** het krachtenveld van een zogenaamde hoefijzermagneet. Uit ervaring blijkt, wanneer een tweede staafmagneet bij de eerste vrij opgehangen staafmagneet wordt gebracht, dat gelijknamige polen elkaar afstoten en ongelijknamige polen elkaar aantrekken.

4.8 ***Elektromagnetisme.*** Bij een permanente magneet is het magnetisch veld niet naar believen in en uitschakelen, wat voor bepaalde toepassing wenselijk is. Rond een stroomvoerende geleider blijkt een magnetisch veld te ontstaan (zie afbeelding, de pijl bij "current" geeft de richting van de elektronenstroom aan).



Figuur 4.7. Magnetisch veld rond een geleider (linker handregel).

Bij een spoelvormig opgewonden geleider worden de krachtlijnen sterk gebundeld en wordt aan de uiteinden van de spoel een noord- en Zuidpool gevormd. Wordt een weekijzerkern in de spoel geschoven, dan richten de Weiss-gebiedjes hierin zich en zal het magnetisme veel sterker worden (bij speciale materialen wel tot 50.000 maal).

4.9 ***Elektromagnetische inductie.*** Bij een open spoel (zonder weekijzerkern), waarover een voltmeter (met nulpunt in het midden van de schaal) is geschakeld zal, indien men snel een staafmagneet in de spoel brengt, de voltmeter een uitslag vertonen en direct weer naar nul terugvallen. Wordt de staafmagneet er snel weer uitgetrokken, dan zal de voltmeter opnieuw een uitslag geven, echter naar de andere zijde. Blijkbaar ontstaat deze elektromagnetische inductie alleen wanneer de spoel door een in sterkte variërend magnetisch veld wordt gesneden. De optredende stroomrichting is zo gericht, dat de beweging van de staafmagneet wordt tegengewerkt (wet van Lenz).

Schakelt men bij een spoel de stroom in, dan zal elke winding een magnetisch veld opwekken, dat in de andere windingen een stroom induceert, die de oorspronkelijke stroom tracht tegen te werken. De stroom zal dus niet direct op volle sterkte door de spoel vloeien, doch heeft een eindige tijd nodig om van nul tot maximum sterkte te komen. Wordt de stroom verbroken, dan zal ook dit weer worden tegengewerkt door het ontstaan van een stroom in dezelfde richting als de oorspronkelijke stroom. Dit geeft aanleiding tot vonkvorming bij de schakelaar.

Stelt men twee spoelen op in elkaars verlengde en schakelt men de stroom in de ene spoel in, dan zal in de tweede spoel een stroom worden geïnduceerd. De voltmeter slaat dan even uit, totdat de stroom in de eerste spoel op volle sterkte is en zal dan weer tot nul terugvallen. Schakelt men de stroom uit, dan slaat de voltmeter eventjes uit naar de andere kant. Dit is het principe van de transformator.

Wederzijdse inductie Bekrachtigt men de eerste (of de primaire) spoel met wisselstroom, dan krijgt men in deze spoel een wisselend magnetisch veld, wat in de tweede (of secundaire) spoel een wisselspanning induceert. Met gelijk stroom lukt dit niet, er is dus geen gelijkstroomtrafo! Althans niet in deze eenvoudige vorm.

Door de keuze van verschillende windingaantallen voor de twee spoelen kan men de aan de primaire spoel liggende spanning omlaag of omhoog transformeren ("step-down" en "step-up" transformator). Daar, afgezien van de verliezen in de trafo, er aan vermogen (in watt) uitkomt, wat er in wordt gestopt, is dus het product van U x I zowel primair als secundair gelijk.

De inwerking van twee spoelen op elkaar (de "koppeling") wordt sterk verbeterd, wanneer er een kern van weekijzer of beter nog een speciaal hiervoor ontwikkeld materiaal zoals Permalloy wordt toegepast.

Een speciaal type transformator is de autotransformator, waarin de primaire en secundaire windingen op een speciale manier elektrisch zijn gekoppeld. Deze trafo wordt veel toegepast op plaatsen waar de ingangsspanning van een toestel slechts binnen nauwe grenzen mag variëren en de voedingsspanning niet constant is.

0-0-0

Bijlage B

BETEKENIS VAN ENIGE UITDRUKKINGEN, VREEMDE WOORDEN EN AFKORTINGEN.

Betreffende kernenergie, kernmaterieel en toestellen:

"aangewezen type"

1. apparaten of instrumenten, die niet het uitzenden van ioniserende straling beogen of waarin zich radioactieve stoffen bevinden, waarvoor krachtens de kernenergiewet een vergunning of autorisatie is vereist, doch die aan bepaalde constructie eisen voldoen, zodanig dat het dosisequivalenttempo niet meer dan één microsievert per uur (1 µSv/h) op 0,1 meter afstand van welke plaats dan ook van het oppervlak bedraagt, kunnen door de betrokken ministers van het vergunningsstelsel worden vrijgesteld;
2. toestellen, die niet beogen het uitzenden van ioniserende straling;
3. rookmelders, gedereguleerde;

aanwenden (van radioactieve stoffen)

Het bereiden, repareren, vervangen, afvoeren, voorhanden hebben - anders dan voor vervoer - en toepassen;

absorber

Materiaal dat straling absorbeert;

absorptie

Verschijnsel waarbij straling door materie wordt verzwakt (letterlijk "opslorping";

achtergrondstraling

Straling afkomstig van radioactieve stoffen in de natuur, zowel van binnen als buiten het menselijk lichaam, ook wel natuurlijke radioactiviteit genoemd;

adaptatie

Het zich voegen van het oog naar verschillende lichtsterkte, door verandering der gevoeligheid en van de wijdte der pupil;

aflevering

De overdracht door de fabrikant of leverancier in de feitelijke macht van de betrokken verwervingsautoriteit;

alara

Acroniem van "As Low As Reasonably Achievable": zo laag mogelijk al redelijker wijs mogelijk is;

alfadeeltjes (α)

Positief geladen heliumkern, bestaande uit twee protonen en twee neutronen;

activiteit

1. Indien het betreft de activiteit van één bepaald nuclide: Het aantal spontane atoomkernmutaties in een hoeveelheid van dat nuclide in een ten opzichte van de halveringstijd kort tijdsinterval, gedeeld door de duur van dit interval;
2. Indien het betreft de activiteit van een stof: De som van de activiteiten van de nucliden, welke in de stof voorkomen;

anode

Positieve elektrode;

antero-posterior

In voor- en achterwaartse richting;

articulatio tibio-fibularis superior

Gewricht kuitbeenscheenbeen bij de knie;

atoomnummer (Z)
Aantal protonen in een atoomkern;

autorisatie
Zie vergunning;

axiaal
In de richting van de as verlopend;

Becquerel
SI-eenheid, die de sterkte van radioactief materiaal aangeeft en de waarde van één desintegratie per seconde heeft;

bètastralen (ß)
Bundel bètadeeltjes, negatief of positief geladen deeltje, met een massa van 1/1837 van een protonmassa (Als deeltje gelijk aan respectievelijk een elektron en een positron);

bevoegde deskundige
De deskundige, die is vermeld in de vergunning of autorisatie dan wel - indien dat niet is geschied - de deskundige, bedoeld in de Handleiding Stralingshygiëne Defensie;

Bragg-reflectie
Interferentie van röntgenstraling aan roostervlakken van een kristal;

bron
Een toestel of een radioactieve stof, in staat ioniserende straling uit te zenden;

bron (ingekapseld of gesloten-)
Een bron, bestaande uit radioactieve stoffen, die
1. op hechte wijze in vaste niet-radioactieve stoffen zijn op genomen of
2. zijn omgeven door een niet-radioactief omhulsel, één en ander met dien verstande dat zowel de onder 1. bedoelde stoffen als het onder 2. bedoelde omhulsel voldoende weerstand bieden om onder normale omstandigheden elke verspreiding van radioactieve stoffen en elke mogelijkheid van besmetting te voorkomen;

bron (niet-ingekapselde of open-)
Een andere bron dan een ingekapselde of gesloten bron;

bronchografie
Röntgenfoto van de bronchi, vervaardigd met behulp van contrastvloeistof;

buiten gebruik stellen (van een toestel)
De overdracht anders dan voor modificatie-, reparatie- of onderhoudswerkzaamheden, aan een ander onderdeel of een instantie buiten Defensie (zie ook in gebruik stellen);

calcaneus
Hielbeen;

coecum
Blindedarm, begin dikke darm;

coherentie verstrooiing
Verstrooiing van deeltjes of straling, waarbij geen energie uitwisseling met het atoom plaatsvindt, alleen verandering van richting;

collimator
Soort diafragma voor een bundel deeltjes of straling;

commandant (zonder toevoeging)
De commandant of het hoofd van een onderdeel;

comprimeren
Samendrukken;

Compton-effect
Elastische wisselwerking tussen een gammaquant en een elektron. Het elektron wint de hoeveelheid energie, die het gammaquant verliest. Op deze wijze onder andere verliest gammastraling zijn energie in materie;

concrement
Steen, b.v. nier- of gal-;

craniaal
Naar het hoofd toe;

Curie (Ci)
(oude) grondeenheid, die de sterkte van radioactief materiaal aangeeft en de waarde van $3{,}7 \times 10^{10}$ desintegraties per seconde heeft. Bij benadering is het de activiteit van 1 gram radium;

detector
Materiaal of instrument dat gevoelig is voor straling;

diagnosis
Herkenning, onderscheiding van een ziekte;

diagnostiek
De kunst van het stellen van een diagnose;

differentiatie
Verandering naar een stadium van hogere orde;

divergerend
Uit elkander gaand, bijvoorbeeld van stralen;

dorso-plantair
Richting voetrug-voetzool;

dorso-volair
Richting handrug-handpalm;

dosimeter
Instrument dat de ontvangen dosis registreert (bijvoorbeeld filmbadge of thermoluminiscentie dosismeter);

dosis
De energie die straling afgeeft aan een hoeveelheid materie;

dosis (geabsorbeerde-)
Hoeveelheid energie door ioniserende straling aan een hoeveelheid stof op een bepaalde plaats overgedragen, gedeeld door de massa van die hoeveelheid stof;

dosisequivalent
Product van de geabsorbeerde dosis en een of meer factoren, door welke de biologische werkzaamheid van de geabsorbeerde dosis tot uitdrukking wordt gebracht (populair ook wel de stralingsbelasting genaamd). Een dosis van bijvoorbeeld bètadeeltjes veroorzaakt niet hetzelfde biologische effect als een zelfde dosis alfadeeltjes;

dosistempo
De dosis per tijdseenheid;

dracht
Afstand die een deeltje in materie aflegt;

elektromagnetische straling
Een gecombineerde verandering van een elektrisch en een magnetisch veld, die zich voortplant met de lichtsnelheid, bijvoorbeeld radiogolven, licht- en gammastraling;

elektron

Kleinste hoeveelheid elektriciteit met negatieve lading;

elementaire deeltjes

Eenvoudige materiedeeltjes, bijvoorbeeld neutron, proton, elektron. De minder bekende deeltjes zijn: bijvoorbeeld neutrino's, muonen en mesonen;

excentrisch

Van het middelpunt af;

exposie

De grootheid exposie is een maat voor de ionisatiedichtheid in lucht die wordt veroorzaakt door fotonenstraling (röntgen- of gammastraling). Deze grootheid stamt uit de beginjaren van de toepassing van röntgenstraling en werd gebruikt als meetgrootheid om de intensiteit van het stralingsveld aan te geven;

exposietempo

Exposie per tijdseenheid. Een veel gebruikte eenheid is de röntgen per uur (R/u);

feitelijke macht

De heerschappij, evenals het in bruikleen onder zich hebben;

filmbadge

Een pakketje, waarin een stukje fotografische film, die de opgelopen ioniserende straling meet. De dosis wordt bepaald uit de zwarting van de film;

fistel

Pijp- of buisvormige zweer, die onderhouden wordt door een ontsteking in de diepte;

fluorescentie

Het vermogen van bepaalde stoffen om de ontvangen energie (bijvoorbeeld röntgenstraling) om te zetten in zichtbare straling;

focus

Brandpunt, waar door botsing van de elektronen de röntgenstralen ontstaan;

foramen opticum

Opening voor de oogzenuw;

fosforescentie

De eigenschap om na röntgenbestraling licht af te geven;

gammastraling

Hoogenergetische elektromagnetische straling, die veelvuldig vrijkomt bij alfa- of bètastraling. Gammastraling heeft een groot doordringingvermogen en is door dikke, zware materialen te verzwakken;

gehalte

Het massa-isotopengehalte van de elementen uranium, thorium en plutonium in splijtstoffen;

Geiger-Müller buis

Een instrument om ioniserende straling te meten. Het bestaat uit een met gas gevulde buis, waarin zich een elektrode bevindt. Tussen de elektrode en de buis wordt een elektrische spanning aangebracht. Als nu een radioactief deeltje de buis binnendringt ontstaat er een elektrische lading, welke als een stroomstoot te meten is;

halveringstijd (T½ of τ)

De tijd waarin de helft van een hoeveelheid radioactieve stof vervallen is;

halveringsdikte (d½)

De benodigde dikte van een bepaald materiaal om de intensiteit van de opvallende straling te halveren;

in gebruik stellen (van een toestel)
De overdracht aan het onderdeel waar dat toestel feitelijk zal worden gebruikt (zie ook buiten gebruik stellen);

interlobaire spleten
Tussen de kwabben (long) aanwezige spleten;

ionisatie
Het proces, waarbij ionen worden gevormd, bijvoorbeeld bij een elektrische ontlading;

ionisatiekamer
In de kamer ontstaat elektrische lading, doordat het gas in de kamer wordt geïoniseerd. Door de ontstane lading is het gas in de kamer geleidend;

ioniserende straling
Röntgen- en gammastraling, evenals corpusculaire (materiedeeltjes, zoals α- en ß-deeltjes) straling, die in staat is atomen te ioniseren;

isobaren
Nucliden, die hetzelfde massagetal, maar verschillende atoomnummers bezitten, bijvoorbeeld;

isomeren
Nucliden, die hetzelfde aantal protonen en neutronen bezitten, maar waarvan de energietoestand van de kern verschillend is;

isotopen
Nucliden, die hetzelfde aantal protonen, maar verschillend aantal neutronen bezitten. Het atoomnummer is hetzelfde, het massanummer verschilt;

kathode
Negatieve elektrode

kerma (K)
De overgedragen kinetische energie in materie van alle vrijgemaakte secundaire geladen deeltjes in deze materie door ongeladen stralingsdeeltjes;

kernenergie
Energie, vrijkomend bij splijting of versmelting van atoomkernen;

kerninrichting
Een inrichting waarin:
1. Kernenergie kan worden vrijgemaakt;
2. Splijtstoffen kunnen worden vervaardigd, bewerkt, verwerkt, of opgeslagen;

kerninstallatie
Installatie waarin splijtstoffen dan wel radioactieve stoffen worden gebruikt en niet valt onder de definities van kerninrichting of kernuitrusting;

kernmaterieel
Radioactieve stoffen, splijtstoffen en ertsen;

kernuitrusting
Een technische voorziening, geschikt om een vaartuig of ander vervoermiddel door middel van kernenergie voort te bewegen;

kosmische straling
Zeer hoogenergetische straling, afkomstig van buiten de aarde. De straling levert een bijdrage tot de achtergrondstraling;

kwadratenwet
Als het verband tussen de fysische grootheid A afneemt met het kwadraat van de afstand, noemt men dit de kwadratenwet. In formule: $\mathbf{A = A_o/R^2}$;

kwant (quant)
Ook wel foton genoemd. Een energiepakketje;

lateraal
Aan de zijde zich bevindend;

luminescentie
Lichtuitstraling na inwerking van röntgenstraling;

massagetal
Aantal protonen èn neutronen in een atoomkern;

metacarpaal
Middenhandsbeen;

monitor
Een instrument dat het ioniserende stralingsniveau meet in ruimten waarin met radioactieve stoffen wordt gewerkt;

myelografie
Onderzoek van het wervelkanaal door middel van röntgenstralen, nadat een contrastvloeistof is ingespoten;

nuclide
Atoomsoort, met hetzelfde massagetal, atoomnummer en energietoestand van de kern (het metastabiel zijn wordt op symbolische wijze aangegeven door een "m" toe te voegen aan het massagetal). Nucliden van één element heten isotopen;

onderdeel
Elke militaire of burgerlijke organisatie, ressorterende onder Defensie, met een eigen commandant of hoofd;

ontdoen (het zich-)
Elke handeling waardoor kernmaterieel buiten de feitelijke macht van Defensie wordt gebracht;

os naviculare
Scheepvormig been (handwortel of voetwortel);

os pisiforme
Erwtvormig been, handwortelbeentje;

paarvorming
Het omzetten van energie (bijvoorbeeld bij gammastraling) in materie onder invloed van een elektrisch of magnetisch veld, zodat een deeltje met zijn antideeltje ontstaat, bijvoorbeeld elektron en positron, waarvoor een energie van 1,02 MeV nodig is;

patella
Knieschijf;

pathologisch
Ziekelijk;

planto-dorsaal
Richting voetzool-voetrug;

positron
Zie bètadeeltje;

postero-anterior
Richting achter-voorwaarts;

pronatie
Draaien van het spaakbeen over de ellepijp, waardoor de handrug boven komt;

proximaal
Naar het lichaam (middelpunt) toe; dichter bij de romp gelegen;

rad
De oude eenheid van dosis, komt overeen met 0,01 J/kg;

radioactieve rookmelder
Rookmelder die voorzien is van een kleine hoeveelheid radioactieve stof ten behoeve van een juiste werking;

radioactieve rookmelder (gedereguleerde-)
Rookmelder die zo weinig radioactieve stof bevat, dat deze na aanwijzing in de Nederlandse Staatscourant zonder vergunning mag worden aangewend;

radioactief verval
Spontane transformatie van een kern in een andere kern of in een andere energietoestand;

radioactieve stoffen
Materie, dat ioniserende straling uitzendt, evenals stoffen en voorwerpen die zodanige materie bevatten, met uitzondering van splijtstoffen en ertsen;

radioactiviteit
Het vermogen van bepaalde kernen om na enige tijd spontaan een elementair deeltje uit te zenden;

radiologische werker
Werker, die moet zijn gekeurd en voorzien zijn van een persoonlijk dosisregistratiemiddel uit hoofde van zijn werkzaamheden met radioactieve stoffen of toestellen; Tegenwoordig “blootgestelde werker genoemd.

radius
Spaakbeen;

rem
Oude eenheid van dosisequivalent, röntgen equivalent man;

remstraling
Elektromagnetische straling die ontstaat als elektronen afgeremd worden door het elektrisch veld van een atoomkern (röntgenstraling ontstaat op deze manier);

retrograad
Van buiten uit;

röntgen
De niet SI-eenheid van door ioniserende straling gevormde lading per massa-eenheid lucht. **1R = 2,58 x 10^{-4} C/kg**;

röntgenstraling
Een doordringende elektromagnetische straling met een golflengte van circa 0,1 nanometer. Deze ontstaat als remstraling of wanneer een "gat" in de binnenschil van een atoom door een elektron wordt opgevuld;

sacraalwervels
De vijf wervels welke het heiligbeen vormen;

salpingografie
Röntgenfotografie van de met contrastvloeistof gevulde eileiders;

scintillatieteller
Een instrument dat ioniserende straling meet door de ontstane lichtflitsjes (scintillaties) te detecteren;

sella turcica
In de schedelbasis gelegen ruimte, waarin de hypofyse ligt;

splijtstoffen
Materie welke, op basis van massagehalte, minimaal 0,1% uranium, 0,1% plutonium of 3% thorium bevat, evenals stoffen en voorwerpen, die zodanige materie bevatten;

splijtstoffen (onbestraalde-)
Splijtstoffen, die niet aan kunstmatige bestraling zijn blootgesteld;

sterno-claviculair gewricht
Gewricht tussen borstbeen en sleutelbeen;

sternum
Borstbeen;

straling
De uitzending van energie door elektromagnetische golven of door deeltjes (bijvoorbeeld alfastraling, röntgenstraling);

substantie
Stof, bestanddeel;

tangentiaal
In de richting van het raakvlak;

terugstrooiïng
Wisselwerking van deeltjes in materie door botsingen of magnetische velden, waardoor de deeltjes als het ware worden gereflecteerd;

toestel
Toestel dat ioniserende straling kan uitzenden, anders dan ten gevolge van
1. spontane atoomkernmutatie van radioactieve stoffen;
2. spontane atoomkernmutatie van splijtstoffen;
3. kernsplijting;

met uitzondering van
a. Televisietoestellen of toestellen, waarin één of meer elektronen- straalbuizen voor visuele beeldweergave worden toegepast, waarbij op geen enkel punt op 0,05 meter afstand van welke plaats ook van het oppervlak van het toestel een dosisequivalenttempo kan worden veroorzaakt van meer dan 5 microsievert per uur (5 µSv/h).
b. Toestellen van een "aangewezen type";

tritiumlichtbron
Hermetisch gesloten glazen omhulling, gevuld met tritiumgas, waarvan de binnenzijde is bedekt met een fosforescerende stof;

tritiumlichtinstrument
Elk instrument of apparaat of een deel daarvan dat één of meer tritium- lichtbronnen bevat;

ulna
Ellepijp;

uranium (natuurlijk-)
Uranium, waarin het massagehalte van de uraniumisotopen gelijk is aan dat, wat in de natuur wordt aangetroffen;

uranium (verarmd-)
Uranium, waarin het massagehalte van uranium-235 en uranium-233 samen kleiner is dan het massagehalte van uranium-235 in natuurlijk uranium;

uranium (verrijkt-)

Uranium, waarin het massagehalte van uranium-235 en uranium-233 samen groter is dan het massagehalte van uranium-235 in natuurlijk uranium;

ventriculografie

Röntgenfotografie van de met lucht gevulde hersenkamers;

vergunning

De door het **Agentschap NL**, **Stralingsbescherming,** van het **ministerie van Economische Zaken**, Landbouw en Innovatie verleende toestemming voor het gebruik van radioactieve stoffen of ioniserende straling uitzendende toestellen;

verpakkings en vervoersinstruktie (VVI)

Een overzicht van de aanvullende voorwaarden, opgesteld door de verwervingsautoriteit, waaraan de verpakking moet voldoen en waarop bij het vervoer moet worden gelet;

verrijkingsgraad

Het massagehalte van uranium-235 en uranium-233 samen in verrijkt uranium;

verstrekking

De overdracht door de verwervingsautoriteit aan de commandant of het hoofd van het onderdeel waar kernmaterieel zal worden gebruikt;

verticaal

Loodrecht;

vervalreeks

Een opeenvolgend verval van een nuclide, waarbij steeds nieuwe radioactieve nucliden ontstaan. Het eerste nuclide wordt moedernuclide genoemd, de vervolgproducten worden dochternucliden genoemd;

vervoer

Het overbrengen - inclusief het laden, het lossen, de overslag en de opslag in verband met het overbrengen - van kernmaterieel van een plaats naar elders, daarbij geheel of gedeeltelijk gebruik makend van de openbare weg, een waterweg of het luchtruim, voor zover die stoffen geen deel uitmaken van het vervoermiddel en voor zover het overbrengen enzovoort niet valt onder het begrip verplaatsen;

verwerven

De (rechts)handelingen, welke beogen het in de feitelijke macht van de organisatie te brengen; het verwervingsproces omvat de tijd tussen het ontstaan van de eerste stafeisen en de uiteindelijke verstrekking (instroming);

verwervingsautoriteit

Een autoriteit die bevoegd is kernmaterieel en toestellen te verwerven;

volo-dorsaal

Richting handpalmhandrug;

wolfranium (wolfram)

Grijs-zwart metaal met hoog smeltpunt (Engels: tungsten).

0-0-0

Bijlage C

Multiple Choice Examen (alle antwoorden staan in de voorgaande tekst!).
Nota Bene: Lees de hele vraag aandachtig en **omcirkel** dan pas het GOEDE antwoord!

1a. Het voorvoegsel "mega" (afgekort "M") duidt de volgende factor aan:
A. 10^3 B. 10^9 C. 10^6

1b. Het voorvoegsel "centi" (afgekort "c") duidt de volgende factor aan:
A. 10^{-3} B. 10^{-2} C. 10^{-1}

2a. De kleinste eenheid van een element is een:
A. atoom B. molecuul C. ion

2b. De kleinste eenheid van een verbinding, die nog de scheikundige eigenschappen van die verbinding heeft, is een:
A. atoom B. molecuul C. ion

3. Het atoomnummer Z (gelijk aan het rangnummer in het periodiek systeem der elementen) van een element bepaalt in de kern van dat element het aantal:
A. protonen B. neutronen C. positronen

4. Het massagetal A van een element is gelijk aan:
A. het verschil van het aanwezige aantal neutronen en protonen
B. de som van het aanwezige aantal neutronen en protonen
C. het aanwezige aantal neutronen

5. Ongelijknamige ladingen:
A. trekken elkaar aan
B. stoten elkaar af
C. oefenen geen invloed op elkaar uit

6. De coulomb (C) is de eenheid van:
A. potentiaalverschil B. lading C. activiteit D. energie

7. Een atoomkern, die 4 protonen en 3 neutronen bevat, wordt aangeduid als:
A. ${}^{4}_{7}X$ B. ${}^{7}_{3}X$ C. ${}^{3}_{4}X$ D. ${}^{7}_{4}X$

8. De neutronen in een atoomkern:
A. dragen bij tot de massa en de lading
B. beïnvloeden alleen de lading
C. beïnvloeden alleen de massa
D. zijn even zwaar als de elektronen in de schillen

9. Isotopen van een element verschillen in:

A. het aantal elektronen
B. het aantal neutronen
C. chemische eigenschappen
D. het aantal protonen

10. Bij een alfadeeltje behoort het massagetal:

A. 2 en atoomnummer 1
B. 4 en atoomnummer 2
C. 6 en atoomnummer 3
D. 6 en atoomnummer 4

11. Men spreekt bij fotonen van:

A. alfastraling
B. bètastraling
C. gammastraling
D. neutronenstraling

12. Een röntgentoestel zendt straling uit van:

A. één golflengte
B. een tiental golflengtes
C. een groot aantal golflengtes

13. De röntgen is de (niet SI-) eenheid van:

A. geabsorbeerde dosis
B. dosisequivalent
C. exposie

14. Het exposietempo is omgekeerd evenredig aan het kwadraat van de:

A. activiteit B. energie C. tijd D. afstand

15. Bij klassieke verstrooiing:

A. wordt de golflengte van het opvallend foton langer
B. behoudt het foton zijn energie, doch verandert van richting
C. slaat het foton een elektron uit de buitenste schil van het atoom

16. Bij de zogenaamde Comton-verstrooiing:

A. maakt een foton een elektron uit het atoom vrij en blijft er tevens een foton met langere golflengte over
B. heeft het opvallende foton een kernreactie tot gevolg
C. gaat het opvallende foton ongehinderd door het atoom heen

17. Een röntgentoestel wordt vaak van een extra filter (meestal aluminium) voorzien. De uittredende straling wordt hierdoor:

A. verzwakt, maar relatief gezien harder
B. gehalveerd
C. verzwakt, maar relatief gezien zachter

18. De verzwakkingsfaktor voor een nauwe bundel gammastraling van een absorberende laag van 10 halveringsdikten is ongeveer:

A. 10
B. 100
C. 1000
D. 10000

19. De gray (Gy) is de eenheid van:

A. dosisequivalent (rem)
B. geabsorbeerde dosis
C. exposie

20. Het aanraken van een ingekapselde gammabron wordt ontraden vanwege:

A. het vrijkomen van alfadeeltjes
B. de korte afstand tot de bron (kwadratenwet)
C. de kans op beschadiging van de bronhouder
D. de temperatuur van de bron

21. Voor een nuclide met een activiteit van 1,2 GBq en met een halveringstijd van 6 uur is de activiteit na 24 uur:

A. 37,5 MBq. B. 75 MBq. C. 120 MBq. D. 300 MBq.

22. In een stralingsbron muteren in één minuut 216 x 10^6 atoomkernen. De activiteit van de bron is:

A. 60 kBq. B. 3,6 MBq. C. 1,3 GBq. D. 7,8 GBq.

23. Bij een meting te velde met een röntgentoestel wordt een cirkelvormig gebied afgezet met een straal van 20 meter. Op de rand van deze cirkel heerst een maximaal exposietempo van 2,5 µSv/uur. Wat moet de straal van de cirkel zijn als er maximaal 10 µSv/uur mag heersen?

A. 400 meter B. 40 meter C. 5 meter D. 10 meter

24. De halveringstijd van cobalt (Co-60) bedraagt 5,2 jaar. Op 1 september 1979 heeft een bron een sterkte van 1 Megabecquerel, wanneer bedraagt de sterkte 0,5 Megabecquerel?

A. 1 sept '84 B. 12 nov '83 C. 12 nov '84 D. 1 sept '80

25. In het midden van een stalen kast, met een plankdiepte van 0,4 meter, wordt een cesiumbron (Cs-137) opgeslagen (Halveringstijd 30 jaar). De kast is voorzien van het waarschuwingsteken voor ioniserende straling. Direct aan het oppervlak, met de kastdeur open wordt in de deuropening een exposietempo gemeten van 1,05 µSv/h *(omcirkel het GOEDE antwoord):*

A. De kast mag als bergplaats worden gebruikt
B. De kast mag niet als bergplaats voor deze bron worden gebruikt

26. De (lineïeke) verzwakkingscoëfficient neemt:

A. af bij materiaal met grotere Z
B. toe bij materiaal met grotere Z
C. toe noch af bij materiaal met grotere Z

27. Valt i.p.v. een smalle bundel een brede bundel gammastraling op een afscherming, dan zal achter die afscherming:

A. door build-up een hogere intensiteit worden gemeten
B. door verstrooiing een kleinere intensiteit worden gemeten
C. de gemeten intensiteit niet veranderen

28. In de bundel van een röntgentoestel wordt op een bepaalde plaats een exposie-tempo van 0,1 Gy/uur gemeten. Hoe dik moet een betonnen wand zijn om het exposietempo te verlagen tot 6,25 mGy/uur? (Halveringsdikte beton 3 cm)

A. 3 cm B. 12 cm C. 9 cm D. 6 cm

29. Een vrij stralende gammabron veroorzaakt een dosistempo van 250 µGy/h op 2 m afstand van de bron. Een stralingsniveau van 10 µGy/h komt dan voor op:

A. 5 m B. 10 m C. 25 m D. 100 m

30. Radiologische werkzaamheden mogen:

A. Altijd worden verricht
B. Alleen door niet zieke personen worden verricht
C. Alleen na een medische keuring met positief resultaat worden verricht

31. Een hoge dosis straling met een gering doordringend vermogen kan de oorzaak zijn van:

A. huidkanker B. misselijkheid C. hoofdpijn D. leukemie

32. Botzoekers zijn stoffen, die:

A. een straling uitzenden, die alleen op de beenderen inwerkt
B. alfastraling uitzenden
C. in de beenderen worden opgenomen
D. bij andere stoffen radioactiviteit induceren

33. De becquerel (Bq) is de eenheid van:
A. oppervlakte besmetting
B. exposietempo
C. activiteit

34. Het eerste effect van een uitwendige bestraling van de hand met een hoge dosis is:
A. hoofdpijn
B. leukemie
C. huid-erytheem (roodkleuring)
D. diarree

35. Een in korte tijd ontvangen totale lichaamsdosis van 6 Sv is:
A. in de meeste gevallen dodelijk
B. voor 50 % van de bestraalde personen dodelijk
C. niet schadelijk
D. slechts schadelijk voor de ooglenzen (cataract)

36. De dosis over het gehele lichaam voor een sterftekans van 100% bij de mens bedraagt minimaal:
A. 4 Sv B. 2 Sv C. 10 Sv

37. De kwaliteitsfaktor (Q) voor alfastraling is:
A. 10 B. 1 C. 5 D. 20

38. Bij een dosis van 60 Sv over het gehele lichaam overlijdt men:
A. door het beenmerg syndroom
B. door het gastrolintestinale syndroom
C. door het centraal zenuwstelsel syndroom

39. Een meetapparaat, dat gebaseerd is op de eigenschap, dat bepaalde stoffen bij ionisatie lichtflitsjes afgeven, is de:
A. ionisatiekamer
B. thermoluminescentiedosismeter
C. filmdosismeter
D. scintillatieteller

40. Het maximale exposietempo, dat met een GM-teller kan worden gemeten, is onder andere afhankelijk van:
A. atmosferische druk
B. voedingsspanning
C. dode tijd van de teller
D. afstand van de teller tot de bron

41. Een filmbadge wordt gebruikt voor:

A. Afscherming tegen straling
B. Persoonlijke dosisregistratie
C. Administratieve doeleinden
D. Geen van de andere antwoorden is goed

42. Hoe groter het kristal van een scintillatieteller is, des te groter is de:

A. gevoeligheid
B. dode tijd
C. richtingsafhankelijkheid
D. energieafhankelijkheid

43. De Sievert (Sv) is de eenheid van:

A. de mate van besmetting
B. stralingsbelasting
C. stralingsschade of dosisequivalent

44. Geef van de volgende "uitspraken" aan of deze juist (J) of onjuist (O) zijn *(omcirkel het GOEDE antwoord)***:**

J / O A. Stoffen waarvan het aantal protonen in de atoomkern gelijk is, maar het aantal neutronen verschillend, noemt men radicalen.
J / O B. Het aantal desintegraties per seconde van een bepaald isotoop noemt men de activiteit in Becquerel.
J / O C. De activiteit van een bepaalde hoeveelheid van een element is afhankelijk van de wijze waarop dit element vervalt.

45. Geef van de volgende "uitspraken" aan of deze juist (J) of onjuist (O) zijn *(omcirkel het GOEDE antwoord)***:**

J / O A. Na veroudering (evt. kunstmatig) van een stof, zal de halveringstijd groter zijn.
J / O B. De activiteit van een bepaald element per eenheid van massa wordt de specifieke activiteit genoemd.
J / O C. De activiteit van een bepaald materiaal uitgesplitst naar de verschillende daarin voorkomende nucliden wordt de specifieke activiteit genoemd.

46. Geef van de volgende "uitspraken" aan of deze juist (J) of onjuist (O) zijn *(omcirkel het GOEDE antwoord)***:**

J / O A. Omdat alfa- en/of bètastraling geen EM-golfverschijnsel is kunnen magnetische velden geen invloed op deze deeltjes uitoefenen.
J / O B. Alfastraling is, vanwege de grote overgedragen energie per weglengte, eenvoudig af te schermen.
J / O C. Röntgenstraling is in het algemeen te laagenergetisch om ionisaties teweeg te brengen in vaste stoffen.

47. Geef van de volgende "uitspraken" aan of deze juist (J) of onjuist (O) zijn *(omcirkel het GOEDE antwoord)***:**

J / O A. Ventilatie in woningen is ook belangrijk in verband met het radon (een radioactief edelgas), dat uit bepaalde bouw materialen ontwijkt.

J / O B. Onder natuurlijke activiteit verstaat men onder andere de activiteit, die in gebruiksvoorwerpen wordt toegepast (bv lichtgevende wijzerplaten).

J / O C. Het gebruik van radioactieve elementen in elektronische componenten is tegenwoordig verboden.

48. Een radiologisch werker van 38 jaar oud mag per jaar geen groter effectief dosisequivalent ontvangen dan:

A. 500 mSv B. 50 mSv C. 5 mSv

49. Geef van de volgende "uitspraken" aan of deze juist (J) of onjuist (O) zijn *(omcirkel het GOEDE antwoord)***:**

J / O A. Het energiespectrum van een gammastraling uitzendend isotoop is continue (dus geen herkenbare pieken).

J / O B. Het exposietempo van een puntvormige gammabron neemt af met de afstand in het kwadraat.

J / O C. Na één halveringsdikte is de energie van de gammastraling van een bron met de helft afgenomen.

J / O D. Na één halveringsdikte is het exposietempo, t.g.v. een gammabron, met de helft afgenomen.

50. Bij röntgendiagnostiek dient de lekstraling, gemeten op 1 meter afstand van het focus, minder te zijn dan:

A. 100 mSv per uur B. 10 mSv per uur C. 1 mSv per uur

51. Aan de verplichting voor radiologisch personeel "persoonlijke controlemiddelen" te dragen wordt voldaan, indien:

A. geschikte dosismeters van een erkende instelling worden gedragen

B. een stralingsmeetapparaat met een schaalaanwijzing in mR/h wordt gehanteerd

C. een pendosismeter wordt gedragen

D. regelmatig medisch onderzoek plaatsvindt

52. Mag u uw Persoonlijk DosisregistratieMiddel (PDM) bij overplaatsing zondermeer aan uw opvolger overdragen?

A. ja

B. neen, want het nummer van het PDM is strikt persoonlijk en wordt dus niet voor een andere persoon uitgegeven

C. niet zonder meer; toegestaan na voorafgaande melding aan het RO, dat de registratie van de PDM`s bijhoudt

53. In Nederland staat men per jaar aan een stralingsbelasting bloot, ten gevolge van natuurlijke en medisch-geïndiceerde straling (exclusief Radon en vervalprodukten) van:

A. circa 17 mSv B. circa 1,7 mSv C. circa 0,17 mSv

54. Bij het werken met röntgentoestellen dient u uw persoonlijk dosisregistratiemiddel:

A. boven het loodschort te dragen
B. onder het loodschort te dragen
C. aan het röntgentoestel te hangen

55. Wordt bij het maken van een röntgenfoto bij gelijkblijvend voltage en tijd de milliampère-instelling verandert, dan heeft dit:

A. wel effect op het kontrast
B. geen effect op het kontrast
C. een verandering in de verdeling van de golflengtes tot gevolg

56. Om contrastverhoging te verkrijgen zal men het aantal kV`s:

A. verlagen
B. verhogen
C. gelijk laten, doch het aantal milliampères verhogen

57. Bij een röntgenbuis van een diagnostiektoestel moet het focus:

A. van materiaal zijn gemaakt met een laag soortelijk gewicht
B. zo groot mogelijk zijn, opdat het focus niet te zwaar wordt belast
C. zo klein mogelijk zijn om zoveel mogelijk detail te verkrijgen

58. Voor een scherpe röntgenfoto moet de:

A. afstand van het focus tot het voorwerp zo klein mogelijk zijn en moet het voorwerp zo ver mogelijk van de film worden verwijderd
B. afstand van het focus tot het voorwerp zo groot mogelijk zijn en het voorwerp zo dicht mogelijk bij de film geplaatst
C. focus en film zo dicht mogelijk bij het voorwerp zijn geplaatst

59. Fluorescerende schermen in een röntgenfilmcassette:

A. geven een geringere stralingsbelasting van de patiënt
B. geven meer details, maar ook meer stralingsbelasting van de patiënt
C. zijn noodzakelijk daar röntgenstraling anders geen effect op de film kan geven

60. Het "heel effect:

A. is het effect dat de uit de röntgenbuis komende straling qua intensiteit niet homogeen is verdeeld
B. wordt zo genoemd, omdat röntgenstraling geneeskrachtige eigenschappen bezit
C. treedt op bij een röntgenbuis met een molybdeen anode

61. De straling van een röntgentoestel moet:

A. zoveel mogelijk worden gefilterd om een zo hard mogelijke straling te verkrijgen
B. niet worden gefilterd om een zo groot mogelijke stralingsopbrengst te verkrijgen
C. zo worden gefilterd, dat de onbruikbare zachte straling wordt weggefilterd

62. Grids of rasters worden in de röntgenfotografie gebruikt om:

A. ongewenste belichting van de film door strooistraling te voorkomen
B. een lijnennet op de foto aan te brengen voor het doen van nauwkeurige metingen
C. de filmcassette steun te verlenen tegen doorbuiging

63. Bij röntgenstraling van 60 keV wordt in bot ten opzichte van zacht weefsel:

A. minder grays per röntgen opgenomen
B. evenveel grays per röntgen opgenomen
C. meer grays per röntgen opgenomen

64. Voor alle röntgentoestellen (ook die niet-vergunningsplichtig zijn) geldt een aangifteplicht:

A. wanneer ze in gebruik gesteld worden en wanneer het gebruik van het toestel wordt beëindigd
B. alleen, indien het gebruik van het toestel wordt beëindigd
C. wanneer het toestel moet worden vervoerd

66. Aan de verplichting voor radiologisch personeel "persoonlijke controle-middelen" te dragen wordt voldaan, indien:

A. geschikte dosismeters van een erkende instelling worden gedragen
B. een stralingsmeetapparaat met een schaalaanwijzing in mR/h wordt gehanteerd
C. een pendosismeter wordt gedragen

67. Mag een leerling (e) van 17 jaar (die radiologisch laborant wil worden) werk-zaamheden verrichten, waarbij hij of zij aan straling kan worden blootgesteld?

A. ja, maar met een bepaalde dosisbeperking
B. neen
C. ja, na verkregen toestemming van de Arbeidsinspectie

68. Geef van de volgende "uitspraken" aan of deze juist (J) of onjuist (O) zijn *(omcirkel het GOEDE antwoord)***:**

J / O A. met een dure monitor zijn alle soorten straling te meten.
J / O B. de bètastraling van tritium is zelfs met een eenvoudige monitor te meten.
J / O C. radioactieve afval mag met het huisvuil worden meegegeven.

69. In Nederland bedraagt de "natuurlijke"- of achtergrondstraling per jaar:

A. circa 0,11 mSv B. circa 11 mSv C. circa 1,1 mSv

70. Achtergrondstraling is:

A. afkomstig van kernenergie
B. alleen op de Noord- en Zuidpool aanwezig
C. altijd aanwezig

71. Onder genetische stralingsschade verstaat men:

A. de schade, die de bestraalde persoon zelf ondervindt
B. de schade, die door de bestraalde persoon aan zijn nageslacht wordt doorgegeven
C. de schade, als kind ontvangen, die invloed heeft op de verdere ontwikkeling tot volwassene.

72. De drie grondprincipes bij de bescherming tegen straling tijd, afstand en afscherming) gelden:

A. voor bestraling door bronnen buiten het lichaam
B. alleen voor gammastraling
C. uitsluitend voor inwendige besmetting
D. niet voor röntgenstraling

0-0-0

Willem van Gaalen, 26 mei 1992.
89 vragen; dus 1,1 punt per vraag te verdienen!

Aangevuld d.d. 6 februari 2018 ivm wijzigingen wetgeving:

Op last van de afspraken in de EU-is ook de regelgeving in NL aangepast. Zie : ***Besluit van 23 oktober 2017, houdende vaststelling van regels ter bescherming van personen tegen de gevaren van blootstelling aan ioniserende straling (Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming).***

Bijlage D

HET TSJERNOBYL ONGEVAL

Volgorde der gebeurtenissen

De volgorde der gebeurtenissen en reacties van het Tsjernobyl ongeval komen goed tot uitdrukking in de brief van de minister van VROM zoals die is gepubliceerd in de staatscourant 87 van 1986, waaruit wordt geciteerd: Het is duidelijk dat in een zaak als de onderhavige de bescherming van de volksgezondheid en het milieu en de voorziening in betrouwbare voeding leidend beginsel te enerzijde vormen, terwijl de landbouwbelangen en de internationale verhoudingen een ander uitgangspunt zijn. Ook de mogelijk belangrijke consequenties van het ongeval in sociaal-psychologisch opzicht en de economisch- politieke aspecten en handelsbelangen zijn daarbij van belang.

Bevindingen en genomen maatregelen

Door het ongeval met de centrale zijn grote hoeveelheden radioactieve stoffen in de atmosfeer geloosd. Deze stoffen zijn door luchtstromen meegevoerd naar Noord-West-Europa.

29 april 1986

Nadat op 29 april 1986 de mogelijke ernst van het ongeval duidelijk begon te worden heeft onder leiding van de minister-president een eerste verkennend overleg plaatsgevonden tussen de meest betrokken bewindslieden. Verspreiding van de radioactieve stoffen boven Nederland had - blijkens metingen - toen nog niet plaatsgevonden. Wel is een geïntensiveerd meetprogramma in uitvoering genomen, dat zowel betrekking had op luchtmonsters als op grasmonsters. Aldus werd continu nagegaan of verspreiding boven Nederland zou plaatsvinden.

30 april 1986

Op 30 april 1986 is te Leidschendam een Bestuurlijk Coördinatiecentrum ingesteld waarin alle betrokken departementen vertegenwoordigd zijn. Tijdens regelmatige gehouden vergaderingen van dat orgaan werd de actuele situatie geëvalueerd en bezien of er aanleiding is maatregelen te nemen.

1 mei 1986

Naar aanleiding van de vele vragen, die vanuit de bevolking werden gesteld over de gevolgen van het ongeval met de kerncentrale is met ingang van 1 mei 1986 een informatiecentrum ingericht. Op dit element zal hieronder in de paragraaf "Voorlichting" nader worden ingegaan. Overdag was er overigens toen nog geen sprake van verhoogd stralingsniveau.

2 mei 1986

In de loop van 2 mei 1986 wezen metingen in de lucht een verhoogd stralingsniveau aan; de activiteit van jodium-131 steeg van minder dan 0,1 Becquerel (Bq/m^3) omstreeks 5 uur `s-morgens tot een waarde van 13,6 Bq/m^3 omstreeks het middaguur; in de loop van de dag daalde deze waarde weer tot circa 4 Bq/m^3. Deze verhoogde activiteit bleek ook uit zgn. exposietempo-metingen op 1,2 m boven het maaiveld.

Onder normale omstandigheden wordt een waarde van 0,14 millirem per dag gemeten. Om 9.10 uur bleek een waarde te zijn bereikt van 0,2 mrem/dag; twee uur later was de waarde verder opgelopen tot 0,22 mrem/dag; de rest van de dag bleef het exposietempo ongeveer constant.

Ook het oppervlaktewater (in de Rijn bij Lobith) bleek op 2 mei 1986 hogere waarden dan normaal te vertonen. Aangevoerde melk werd vanaf deze dag continu bemonsterd en geanalyseerd; er werd toen geen radioactiviteit van betekenis gemeten.

Alhoewel derhalve sprake was van duidelijk verhoogde activiteit in het milieu bleven de waarden nog zodanig ruim onder kritiek te achten niveaus dat op dat moment nog geen directe maatregelen nodig werden geacht. Wel werden huisartsen geïnformeerd over het onderzoek van personen, die kort tevoren teruggekeerd waren van een bezoek aan één van de Oost-Europese landen, waar sprake is van een verhoogde radioactiviteit. Ook werden - mede opgrond van de weersverwachting -voorbereidingen getroffen voor de hierna te noemen maatregelen ten aanzien van runderen, bedoeld voor de melkwinning.

3 mei 1986

Op 3 mei 1986 bleef het stralingsniveau in de lucht tamelijk constant rond de 3 Bq/m^3 totdat in de loop van de dag uitregening plaatsvond en de waarden tot minder dan 0,1 Bq/m^3 daalden. Wel leidde deze uitregening tot een verhoogde oppervlaktebelasting. Dit was vooral van belang met het oog op het melkvee, omdat door opname van grote hoeveelheden licht besmet gras toch een aanzienlijke ophoping van radioactiviteit in de melk kon ontstaan. In verband daarmee werd het intensief meetprogramma van melk en gras uitgebreid naar andere tuinbouw- en akkerbouwproducten en vervolgens naar visserijproducten; ook werden metingen van vlees, met name schildklierweefsel, gestart.

Op grond van de meetresultaten van de grasmonsters werd tot nader order een verbod uitgevaardigd melkkoeien buiten te houden en te laten grazen; ook werd het voederen met vers gras of andere gewassen, die nog op het veld staan, verboden. Melkveehouders werd aangeraden geconserveerd ruwvoer en krachtvoer te voederen. Er bestond nog geen aanleiding tot maatregelen ten aanzien van de melk.

Mocht de norm van 500 Bq per liter melk evenwel worden overschreden, dan zou de betreffende partij niet tot consumptiemelk worden verwerkt, maar tot houdbare producten zoals melkpoeder. Voorts werd nadere informatie verschaft over de procedure ten aanzien van binnenkomende schepen uit besmette gebieden en besmette voertuigen uit Oost-Europa.

4 mei 1986

Metingen op 4 mei 1986 toonden aan dat er nauwelijks meer sprake was van een verhoging van de hoeveelheid jodium-131 in de lucht. In het oppervlaktewater stegen de activiteitsconcentraties; het ß-totaal varieerde toen tussen 6000 en 13400 Bq/m^3 bij normale waarden tussen 160 en 200 Bq/m^3; de α-totaalwaarden lagen tussen 50 en 250 Bq/m^3 bij normale waarden tussen 54 en 73 Bq/m^3. Voor nader maatregelen bestond nog geen aanleiding. Op de naleving van het graasverbod wordt door de Algemene Inspectiedienst intensieve controle uitgeoefend; bij overtreding wordt een proces-verbaal opgemaakt, terwijl daarnaast tot in beslagname van melk wordt overgegaan. Inmiddels werd ook aan een aantal aspecten aandacht besteed. Zo werden zogenaamde langdurige nucliden aan onderzoek onderworpen en werden metingen verricht aan luchtfilters in gebouwen.

5 mei 1986

Op 5 mei 1986 bleek een verdere afname van de hoeveelheid straling in de lucht. Wel werd gerekend met de mogelijkheid dat grote hoeveelheden jodium-131 zich in schildklierweefsel van geslachte dieren zou kunnen ophopen, reden waarom tot nader order werd voorgeschreven dat bij het slachten deze schildklieren als schadelijk voor de gezondheid dienden te worden aangemerkt en derhalve dienden te worden vernietigd. In het vlees werd niet meer dan 39 Bq/kg gemeten, hetgeen geen aanleiding gaf tot maatregelen. De metingen ten aanzien van gras toonden nog een heterogeen beeld; bij melk werd de norm niet overschreden. De eerste metingen ten aanzien van groenten toonden nog geen resultaten, die aanleiding gaven tot nader maatregelen.

De ruwvoerpositie (van belang in verband met het graasverbod van runderen) verschilde in de onderscheidene regio's in sommige gebieden kwam een goede samenwerking tussen betrokkenen op gang om noden te lenigen. Met de zuivelindustrie werd overleg gepleegd, waarbij een zeer positieve medewerking werd ondervonden.

Onderzoek werd gestart op welke wijze op meer structurele wijze controle op import- en transitogoederen in havens, bij de grenzen en op luchthavens kon worden uitgeoefend.

In een brief aan alle artsen werd aanvullende informatie verstrekt over de actuele situatie. Ook werd aandacht besteed aan het treffen van voorzieningen in de organisatorische sfeer, nu naar verwachting een aantal activiteiten voorshands dienen te worden gecontinueerd.

Voorts werd bij het uitblijven anderszins van informatie over de situatie in het buitenland per telex aan een twintigtal ambassades gevraagd een aantal concrete vragen omtrent metingen en eventueel genomen maatregelen in het betreffende land te beantwoorden; de eerste resultaten daarvan zijn inmiddels ontvangen maar bieden nog een te onvolledig beeld om hier een overzicht te verstrekken.

6 mei 1986

Op 6 mei 1986 kon een verder daling van de straling in de lucht worden geconstateerd; ook de metingen van het regenwater vertoonden een dergelijke tendens. Voor wat het oppervlaktewater betreft werd - als gevolg van de aanvoer uit Duitsland - een toename van de verontreiniging op de Rijn gemeten. De metingen ten aanzien van gras vertoonden een zelfde beeld als de vorige dag, zij het dat hier en daar enige teruggang werd vastgesteld.

Op enkele punten bleken nadere maatregelen wenselijk. Besloten werd aan de consument het advies te geven om tot nader order geen verse spinazie te eten aangezien bij onderzoek van dit op de volle grond geteelde gewas te hoge stralingsniveaus werden vastgesteld. In verband hiermee is voorts besloten dat verse spinazie tot nader order dient te worden vernietigd. Bovendien werd besloten verse schapenmelk buiten de consumptie te houden en bereiding van schapenkaas die binnen vijf weken na bereiding wordt geconsumeerd, te verbieden. Deze maatregel houdt verband met het feit dat schapen in de wei verblijven. Naar verwachting zullen deze maatregelen slechts gedurende een korte periode van kracht behoeven te blijven. Omdat geiten in de stal worden gehouden en geen vers gras gevoerd krijgen, zijn geen maatregelen ten aanzien van de geitenhouderij nodig.

Voorlichting

Wat de informatie aan het publiek betreft is in eerste instantie gekozen voor een actieve informatie via de dagbladen, radio en televisie. Na de eerste dag kwamen er echter bij de betrokken departementen zoveel verzoeken om meer gedetailleerde informatie binnen dat bij het Bestuurlijk Coördinatiecentrum besloten werd om een informatiecentrum open te stellen voor het publiek.

Aanvankelijk werd gewerkt met dertig telefoonlijnen. Deze capaciteit bleek echter al snel onvoldoende. Daarom werd besloten vijftig telefoonaansluitingen in te zetten. De vragen die werden gesteld hadden aanvankelijk voor het merendeel betrekking op reizen in het buitenland, zwangere vrouwen en kleine kinderen. Daarna verschoof het patroon naar onderwerpen als groente in de tuin, meetresultaten en de veranderingen daarin. Vanaf 3 mei `avonds kwamen vooral de boeren met hun specifieke, bedrijfsgerichte vragen. Naar schatting zijn tot en met 6 mei ruim 30.000 telefonische vragen gesteld.

De veelheid van vragen op agrarisch gebied heeft ertoe geleid dat vanaf de avond van 6 mei op het ministerie van Landbouw en Visserij een informatiecentrum voor boeren, tuinders, vissers alsmede de agrarische handel en industrie is ingericht. Hiervoor is een apart telefoonnummer met twintig lijnen geïnstalleerd.

Internationale actie

Ter uitvoering van het gestelde in de laatste alinea van de brief van de minister van Economische Zaken en van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer dd 1 mei jl., zijn al de volgende initiatieven genomen:

a. Nederland heeft namens de EG op 1 mei een démarche uitgevoerd bij de Sovjetautoriteiten in Moskou, waarbij naast een aanbod tot hulpverlening nadere informatie over het ongeval werd gevraagd;

b. Nederland heeft namens de EG op 2 mei een démarche bij het Internationaal Atoom Energie Agentschap (IAEA) uitgevoerd Daarin werd aangedrongen op een evaluatie van het ongeval en een maximale druk op de Sovjet-Unie om alle noodzakelijke informatie te geven.

Daarnaast werd gevraagd om het onderwerp reactorveiligheid nader te beschouwen en te bezien hoe de wederzijdse consultatie en informatie bij ongevallen verbeterd kan worden. Mede op grond van deze initiatieven is het volgende gebeurd:

a. Vanaf 1 mei heeft de Sovjet-Unie meer informatie gegeven, zij het dat deze nog als onvoldoende moet worden beschouwd.

b. Op 5 mei is de directeur-generaal Blix van het IAEA, met twee deskundigen naar de Sovjet-Unie vertrokken, op uitnodiging van Moskou.

c. Door het IAEA zijn de volgende suggesties gedaan naar aanleiding van het ongeval:
   - entameren op korte termijn van een deskundigenbijeenkomst voor het uitwisselen van informatie en het evalueren van het ongeval;
   - bespreking van de stand van de reactorveiligheid in de z.g. (beperkte) International Safety Advisory Group (INSAG);
   - creëren van een conventie inzake informatieverstrekking en -samenwerking bij grensoverschrijdende nucleaire ongevallen (d.w.z. de huidige niet-bindende richtlijnen uitbreiden en verplichtend te doen zijn);
   - versterken van adviserings- en hulpverleningsmechanismen binnen het secretariaat.

d. In het kader van de EG vindt ten tijde van het afronden van deze notitie nog overleg plaats over de vraag of er aanleiding is import van producten in het bijzonder die welke bestemd zijn voor humane consumptie, te verbieden. Voorts is aan de orde de vraag hoe het intracommunautaire handelsverkeer onder de huidige omstandigheden aan een zo gering mogelijk aantal belemmeringen kan worden onderworpen.

e. In IAEA-kader vindt op 12 mei een eerste voorlopige deskundigendiscussie plaats, terwijl in het kader van de NEA (Nucleair Energy Agency van de OECD) op 9 mei een eerste uitwisseling van informatie over de reactorveiligheidsaspecten plaatsvindt. Verder zal het IAEA tijdens de zitting van de Beheersraad in juni verder discussiëren over de hierboven genoemde suggesties.

De reactoren in de centrale te Tsjernobyl

Enige kenmerken

De reactoren waarmee de centrale van Tsjernobyl is uitgerust zijn van een type dat alleen in Rusland wordt toegepast en worden aangeduid als RBMK-reactoren. De feitelijke reactor bestaat uit 1693 verticale

koelkanalen in de vorm van drukbuizen, die omgeven worden door grafiet. In elk koelkanaal bevinden zich boven elkaar twee splijtstofelementen die tijdens bedrijf kunnen worden gewisseld. De splijtstofelementen dragen hun warmte over aan het koelmiddel. Dit koelmiddel is normaal water (licht water).

Door warmteopname gaat het water, dat van beneden naar boven door de kern stroomt, koken. Buiten de feitelijke reactor wordt stoom van het water gescheiden en aan de turbine toegevoerd. Het water wordt tezamen met het condensaat door een achttal hoofdkoelmiddelpompen (inclusief twee reserve) weer in de onderkant van de reactor gebracht, waarmee de kringloop is gesloten. Voor de aan- en afvoer van water en stoom zijn aan boven- en onderzijde vele pijpenbundels aanwezig. de koelkanalen in de kern worden omgeven door een grafietstapeling, die de functie heeft de bij de kernsplijtingen vrijkomende snelle neutronen af te remmen (te modereren). Pas als de neutronen afgeremd zijn, kunnen ze in de regel een volgende splijting bewerkstelligen. Het regelen van de reactor kan met de hand of automatisch geschieden. Er is een noodregelsysteem aanwezig, dat indien nodig een noodstop verzorgt. Dit gebeurt door de stel/stopstaven (waarvan er 179 zijn) in de hiertoe in het grafiet aangebrachte regelkanalen te brengen.

Voorts geeft het regelsysteem aan de operator informatie over de waarde van een aantal karakteristieke parameters, alsmede over de conditie van de splijtstofelementen. Zo wordt per koelkanaal het debiet van het koelmiddel en de integriteit van de drukbuizen en splijtstofstaven geregistreerd. Voor de regeling zijn tenslotte nog afsluiters aan de onderzijde van elk koelkanaal van belang. De operator kan bij toenemende versplijting van de splijtstofelementen deze afsluiters verder dichtdoen, waardoor het koelmiddeldebiet in het koelkanaal verminderd en de stroomproductie verhoogd wordt.

RBMK-reactoren en enkele elementaire verschillen met lichtwaterreactoren

1. Essentieel is dat in de Westerse wereld een drukbestendige gasdichte veiligheidsomhulling (containment) wordt geëist. Voor Nederland en voor sommige andere landen moet zelfs sprake zijn van een dubbele veiligheidsomhulling. De RBMK-reactoren hebben daarentegen geen drukbestendige gasdichte veiligheidsomhulling.
2. In de lichtwaterreactoren is er in het reactorvat in en om de reactorkern een grote hoeveelheid water aanwezig, dat in direct contact staat met de splijtstofelementen. De reactorkern kan pas oververhit raken nadat dit water is verdampt. Dit betekent dat bij ongevallen meer tijd beschikbaar is voor het nemen van maatregelen. Tevens is dit water dat elders in het containment condenseert in staat om een deel van de radioactieve stof te binden binnen het containment. De RBMK-reactoren zijn watergekoeld, maar nabij de splijtstofelementen is veel minder water aanwezig. Dit impliceert dat de splijtstof veel sneller oververhit kan raken, te meer daar de temperatuur van het *waarbij 1 rem = 0,01 Joule per kg, zodat 1 rem ⍰ 0,01 Sv.* oververhitting van de splijtstofelementen kan het grafiet daardoor in brand geraken (zie voorts 5).
3. Indien het bij de lichtwaterreactor tot een kernsmeltproces zou komen, is de warmtebron beperkt tot die van de nucleaire vervalwarmte en warmte uit de chemische reacties met de splijtstofbekleding (Zirkonium). Waarin het geval van een lichtwaterreactor de gesmolten kern reeds aanzienlijk zou zijn afgekoeld, bestaat bij de RBMK-reactor nog steeds de warmtebron van de grafietband die er voor zorgt dat langdurige emissie van splijtstofproducten plaatsvindt. Welke interactie er kan bestaan tussen de "gesmolten" splijtstofelementen en het brandende grafiet is niet bekend.
4. De RBMK-reactoren zijn ter bescherming van het grafiet noodzakelijkerwijs uitgerust met een inertgassysteem. Dit systeem moet er voor zorgen dat vanwege de hoge temperatuur van de grafietmoderator er geen lucht of water in direct contact met het grafiet kan komen, waardoor

explosieve en brandbare gassen kunnen ontstaan. Lichtwaterreactoren zijn niet afhankelijk van een dergelijk systeem.

5. Ten grondslag aan het lichtwaterreactorconcept liggen risico- en betrouwbaarheidsanalyses, waarbij sterke nadruk wordt gelegd op redundantie en het ruimtelijke scheiding van veiligheidssystemen. In hoeverre bij de USSR-reactoren van deze beginselen wordt uitgegaan is onbekend bij gebrek aan gegevens op dit punt.

Beleid voor de nabije toekomst

Het ontbreken van voldoende informatie over de bron zelf en over de toestand in het omringend gebied daarvan leidt nog tot veel onzekerheden; waar mogelijk wordt getracht in deze lacune te voorzien. Uit het vorenstaande moge echter blijken dat onder meer door middel van een intensief meetprogramma voorzienbare factoren onder controle werden gehouden. De specifieke organisatorische maatregelen zullen - zij het wellicht in enigzins afgeslankte vorm - voorshands in stand blijven; waar nodig zullen voorbereidingen worden getroffen voor eventueel noodzakelijke maatregelen, waaromtrent u nader zal worden geïnformeerd.

0-0-0