

Stralingsincidenten veiligheidsregio's

Achtergrondinformatie



Instituut Fysieke Veiligheid
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.ifv.nl
info@ifv.nl
026 355 24 00

Een handreiking is een publicatie die de status heeft van een adviserend document. In een handreiking wordt organisatie- en/of toepassingsgerichte methodiek vastgelegd. Het gaat daarbij om leerervaringen en leerpunten, best practices, deskundigen-, beleids- en uitvoeringsadviezen.

Ondanks de aan de samenstelling van de tekst bestede zorg kan het IFV geen aansprakelijkheid aanvaarden voor de eventuele schade die zou kunnen voortvloeien uit fouten en/of onzorgvuldigheden die in deze handreiking kunnen voorkomen.

Indien u opmerkingen en/of suggesties heeft met betrekking tot deze handreiking, verzoeken wij u vriendelijk om uw commentaar te e-mailen naar info@ifv.nl o.v.v. *Handreiking Stralingsincidenten veiligheidsregio's*.

Colofon

Titel: Handreiking Stralingsincidenten veiligheidsregio's
Achtergrondinformatie

Datum: 24 december 2021

Status: Definitief

Versie: December 2021

Oorspronkelijke auteur: Manon Oude Wolbers (IFV)

Geactualiseerd door: Peter den Outer (vz.projectgroep RIVM), Chris Twenhöfel (RIVM), Teetske van Gorcum (RIVM), Herman Schreurs (RIVM)

Klankbordgroep: Peter van Beek (VR Zeeland/CKV), Doreth Valk (SZW), Frans Greven (GGD Groningen), Ard van Pelt (GGD Zeeland), Jan Jacobs (Vakgroep IBGS Brw NL/IFV), Martina Duyvis (IFV), Mark van Bourgondiën (ANVS)

Projectleider: Oscar Koebrugge (IFV)

Voorwoord

Deze handreiking *Stralingsincidenten veiligheidsregio's - versie 2021* vervangt de handreiking *Stralingsincidenten veiligheidsregio's - versie 2017*. Dit geactualiseerde en multidisciplinaire kennisdocument bevat achtergrondinformatie over potentiële incidenten met radioactieve stoffen, het mogelijk vrijkomen van ioniserende straling en het optreden door publieke hulpverleningsdiensten bij dit soort incidenten, ook wel stralingsincidenten genoemd. Dit document is primair bedoeld voor medewerkers van operationele publieke hulpverleningsdiensten en veiligheidsregio's.

Op verzoek van het IFV heeft het RIVM de publicatie *Stralingsincidenten veiligheidsregio's - versie 2017* gecontroleerd op actualiteit. De conclusie hiervan was, dat dit document niet meer actueel was door de komst van nieuwe NEN-normen en wijzigingen in wet- en regelgeving, zoals het vervallen van het Besluit stralingsbescherming (Bs) en de invoering van het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs). Ook zijn er sinds 2017 inzetten geweest en oefeningen uitgevoerd waaruit blijkt dat verschillende uitgangspunten en teksten uit 2017 over zaken waar de hulpverleners (direct) mee te maken hebben, aangepast moeten worden.

In 2021 heeft het RIVM daarom, op verzoek van het IFV, het document waar nodig geactualiseerd. In het kader hiervan de actualisatie heeft het RIVM, na afstemming met het IFV, een klankbordgroep samengesteld, waarin relevante partijen – met inhoudelijk mandaat namens hun eigen organisatie – vertegenwoordigd waren. Het betreft de volgende personen en partijen: Peter van Beek (VR Zeeland / CKV), Ard van Pelt (GAGS, Zeeland), Doreth Valk (SZW), Frans Greven (GGD Groningen), Jan Jacobs (vz. Vakgroep IBGS Brw NL / IFV) en Mark van Bourgondiën (ANVS).

Tot slot: ik vertrouw erop dat deze handreiking haar weg vindt naar alle professionals en andere belanghebbenden die een rol spelen bij de voorbereiding op en bestrijding van stralingsincidenten in veiligheidsregio's.

Arnhem,



I.J.J. Stelstra
Algemeen directeur Instituut Fysieke Veiligheid

Inhoud

Inleiding	7
Doelgroep en opbouw	8
Leeswijzer	8
1 Ioniserende straling	10
1.1 Notatie en eenheden	12
1.1.1 Notatie isotopen	12
1.1.2 Eenheden	12
1.2 Soorten straling	13
1.2.1 Alfastraling	14
1.2.2 Bètastraling	15
1.2.3 Gammastraling	17
1.2.4 Röntgenstraling	18
1.2.5 Neutronenstraling	19
1.2.6 Combinatie	20
1.3 Eigenschappen van ioniserende straling	22
1.3.1 Halfwaardetijd	22
1.3.2 Dracht	22
1.3.3 Halveringsdikte	25
1.4 Vervalreeksen en emissiewaarschijnlijkheid	28
2 Stralingsdosimetrie	32
2.1 Basisgrootheden	32
2.1.1 Activiteit, A	32
2.1.2 Geabsorbeerde Dosis, D	33
2.1.3 Dosistempo, D	33
2.2 Limiterende grootheden	33
2.2.1 Effectieve dosis en weegfactoren	33
2.3 Operationele grootheden	37
2.3.1 Kwadratenwet	38
3 Bronnen ioniserende straling	45
3.1 Dagelijkse blootstelling	45
3.1.1 Dagelijkse blootstelling aan natuurlijke bronnen	45
3.1.2 Dagelijkse blootstelling aan kunstmatige bronnen	45
3.2 Mogelijke extra blootstelling	46
3.2.1 Medische blootstelling	46
3.2.2 Kosmische straling op vlieghoogte	46
3.2.3 Radioactiviteit in consumentenproducten	46
3.3 De gemiddelde stralingsbelasting	48
3.4 Mogelijke toepassingen van radioactieve stoffen	50
3.5 Identificatie van radioactieve stoffen	53
3.5.1 Etiketten	53
3.5.2 Bebording voertuigen	56

3.5.3	Vervoersdocumenten	57
3.5.4	Waarschuwingssymbool	58
4	Gezondheidseffecten	59
4.1	Deterministische effecten	60
4.2	Stochastische effecten	64
4.3	Inwendige besmetting	65
4.4	Medische behandeling	66
5	Blootstellingspaden voor radioactieve stoffen	67
5.1	Incidenten met een gesloten bron: externe straling	67
5.2	Incidenten met een open bron: besmetting en straling	68
5.3	Samenvatting blootstellingspaden	69
5.4	Gevaarlijke stoffen versus radioactieve stoffen	71
6	Stralingsbescherming	72
6.1	Dosislimitering in een geplande blootstellingssituatie	73
6.2	Dosisbeperkingen voor hulpverleners bij een radiologische noodsituatie	74
7	Metten door hulpverleners	78
7.1	Metten van het gammastralingsniveau	78
7.1.1	Automess 6150AD1	79
7.1.2	ADOS	80
7.2	Externe sondes	81
7.2.1	Sonde 6150AD-15: γ -sonde, hoog bereik	81
7.2.2	Sonde 6150AD-18: γ -sonde, laag bereik	82
7.3	Oppervlaktebesmettingsmetingen	83
7.3.1	Sonde 6150AD-17: $\alpha\beta\gamma$ -sonde, besmettingsmonitor, klein meetoppervlak	83
7.3.2	Sonde 6150AD-k: $\alpha\beta\gamma$ -sonde, besmettingsmonitor, groot meetoppervlak	84
7.4	Landelijk meetnet	87
7.4.1	Nationaal meetnet radioactiviteit (NMR)	87
7.4.2	Landelijk meetnet radioactiviteit in voedsel (LMRV)	89
7.4.3	Oppervlaktewater en drinkwater	90
7.5	Meetstrategie bij kernongevallen	90
8	Stralingsincidenten	96
8.1	A-scenario's	96
8.2	B-scenario's	99
8.3	Daadwerkelijk voorgekomen stralingsongevallen en incidenten	103
8.4	Achtergrondinformatie specifieke A-incidenten	104
8.4.1	Kernreactor	104
8.4.2	Nucleair en radiologisch defensiemateriaal	111
8.4.3	Vuile bom	112
9	Interventie	115
9.1	Maatregelen voor het optreden van de brandweer	116
9.1.1	Algemene maatregelen bij stralingsincidenten: gesloten bron	116
9.1.2	Specifieke maatregelen bij het vrijkomen van radioactieve stoffen: open bron	117
9.1.3	Specifieke maatregelen bij brand met radioactieve stoffen: bron in brand	118
9.1.4	Adembescherming	119

9.2	Maatregelen A-incidenten	119
9.2.1	Directe maatregelen	123
9.2.2	Indirecte maatregelen	125
9.2.3	Maatregelzones en de rol van de hulpdiensten	126
9.3	Besmettingscontrole en verwijderen van besmetting	126
9.3.1	Besmettingscontrole	127
9.3.2	Normen voor de besmetting van personen	127
9.3.3	Verwijderen van besmetting	131
9.3.4	Behandelprotocollen GHOR	133
9.3.5	Besmette omgeving	137
Bijlage 1 Begrippenlijst		138
Bijlage 2 Afkortingenlijst		147
Bijlage 3 Bronnen		152
Bijlage 4 Toelichting bij Radionuclidentabel		153
Bijlage 5 Radionuclidentabel		155

Inleiding

Operationele hulpdiensten kunnen te maken krijgen met incidenten waarbij ioniserende straling en/of radioactieve stoffen vrij kunnen komen. Voorbeelden van stralingsincidenten zijn: een brand in een laboratorium waar met radioactieve stoffen wordt gewerkt of een ongeval tijdens het transport van radioactieve stoffen. Het kan ook gaan om incidenten met veel grotere gevolgen, zoals een incident in een kernenergiecentrale of een terroristische actie met radioactieve stoffen. Een belangrijk onderscheid daarbij is dat het vrijkomen van radioactieve stoffen het doel is van de terroristische actie, terwijl de andere incidenten voorbeelden zijn van ongelukken.

Het grootste deel van de bevolking vindt straling eng en gevaarlijk, zo ook veel hulpverleners. Het is goed mogelijk dat het handelen van hulpverleners bij stralingsincidenten bepaald wordt door de risicobeleving in plaats van door een goede risico-inschatting. In de meeste gevallen is hulpverlening bij stralingsincidenten goed mogelijk, zonder grote persoonlijke risico's voor hulpverleners. Het is belangrijk dat hulpverleners radiologische basiskennis kunnen toepassen om de risico's van een stralingsincident in te schatten, operationele procedures toe te passen en stralingsincidenten op een juiste manier af te handelen. Dit geldt zeker voor leidinggevendenden van de brandweer en stralingsdeskundigen, omdat zij verantwoordelijk zijn voor de veiligheid van het eigen personeel en van de andere hulpverleners. Ook moeten zij hen goed kunnen voorlichten over stralingsrisico's. Daarnaast speelt de veiligheidsregio een belangrijke rol in de voorlichting en de bescherming van de bevolking.

Dit document beschrijft theoretische, radiologische basiskennis die bruikbaar is om sneller en eenvoudiger te kunnen beslissen over de wijze van optreden bij stralingsincidenten. Deze handreiking helpt bij het kunnen afwegen van het resultaat van de inzet tegen de risico's voor het in te zetten personeel. De handreiking beschrijft alleen onderwerpen die specifiek zijn voor stralingsincidenten. Reguliere werkwijzen en procedures – zoals de procedure incidentbestrijding gevaarlijke stoffen, decontaminatie, meetprincipes en registratie en nazorg voor hulpverleners, slachtoffers en bevolking – staan beschreven in andere handreikingen of procedures en worden als bekend verondersteld.

Deze publicatie bevat gebundelde informatie uit de bronnenlijst en vervangt (de betreffende hoofdstukken uit) deze bronnen. De handreiking *Stralingsincidenten veiligheidsregio's* bevat geen operationele procedures en rampbestrijdingsplannen, maar de kennis achter deze plannen en procedures.

Tot slot: het stralings- en besmettingsrisico is nooit terug te brengen tot nul. Het is wel mogelijk om het stralingsrisico aanvaardbaar klein te houden. De wijze waarop is natuurlijk afhankelijk van de situatie. Bij incidentbestrijding worden hulpverleners nu eenmaal blootgesteld aan een hoger risico dan andere leden van de bevolking. Bij brandbestrijding vinden hulpverleners het aanvaardbaar om een hoger risico te lopen voor het redden van mensen. Voor het optreden bij stralingsincidenten is dat echter nog niet vanzelfsprekend. De uitgangspunten die hulpverleners hanteren bij het optreden bij incidenten zijn vergelijkbaar

voor brandbestrijding en stralingsincidenten: het risico is nooit nul maar wel aanvaardbaar klein. Deze publicatie ondersteunt bij het inschatten en vergelijken van deze risico's.

Doelgroep en opbouw

Deze handreiking is samengesteld voor het personeel van operationele hulpdiensten en veiligheidsregio's en bestaat uit drie delen:

1. *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Achtergrondinformatie*

Dit document is geschreven voor AGS, GAGS, stralingsdeskundigen en andere geïnteresseerden. Het bevat zowel basisinformatie als meer specialistische informatie. De hoofdtekst in dit document (tekst is zwart-gedrukt in het lettertype Arial) bevat basisinformatie die relevant kan zijn voor operationeel leidinggevenden.

Aanvullende informatie voor stralingsdeskundigen

In dit type kaders vindt u aanvullende informatie voor AGS, GAGS, stralingsdeskundigen, en anderen. De nummering van de tabellen en figuren bedoeld voor deze doelgroep wordt voorafgegaan door de letter 'S' van stralingsdeskundige.

2. *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Basisinformatie voor operationeel leidinggevenden*

De basisinformatie uit het document *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Achtergrondinformatie* is uitgebracht als apart deel. Deze informatie is geschreven voor operationeel leidinggevenden zoals bevelvoerders en officieren van dienst (OvD) van de verschillende kolommen. De basisinformatie is letterlijk dezelfde tekst als de hoofdtekst uit *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Achtergrondinformatie*.

3. *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Operationele handreiking*

Dit document is samengesteld voor beide doelgroepen en bestaat uit een aantal aandachtscaroten en formulieren. Ook hier is onderscheid gemaakt in een algemeen deel en een deel met aandachtscaroten voor stralingsdeskundigen. De informatie op deze kaarten kan zowel van toepassing zijn tijdens stralingsincidenten als bij de operationele voorbereiding (zowel planvorming als vakbekwaamheid) daarop. De inhoud is overgenomen uit *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Achtergrondinformatie*.

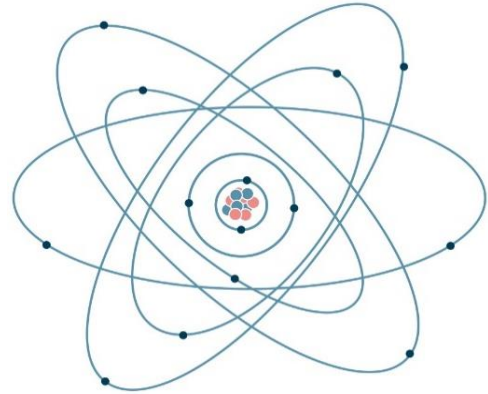
Leeswijzer

Hoofdstuk 1 beschrijft de achtergrondprincipes van ioniserende straling, kenmerken van de verschillende stralingstypen en de risico's. Hoofdstuk 2 gaat dieper in op de stralingsdosimetrie en beschrijft diverse belangrijke grootheden, zoals de activiteit en dosis. Vervolgens geeft hoofdstuk 3 een beschrijving van de stralingsbelasting van de gemiddelde Nederlander, een overzicht van mogelijke toepassingen van radioactieve stoffen en de wijze waarop ioniserende straling te herkennen is. Welke gezondheidseffecten ioniserende straling kan veroorzaken, wordt duidelijk in hoofdstuk 4, waarna hoofdstuk 5 beschrijft op welke wijze een persoon blootgesteld kan worden aan radioactieve stoffen en/of externe straling. Het gaat in dit hoofdstuk vooral om de verschillen tussen 'bestraling' en 'besmetting' en tussen directe en indirecte blootstelling. Het beleid in Nederland is erop gericht om de blootstelling aan straling zoveel mogelijk te beperken. Hoe dat wordt uitgevoerd staat beschreven in hoofdstuk 6. Hoofdstuk 7 bevat een overzicht van de meetapparatuur die in gebruik is bij de

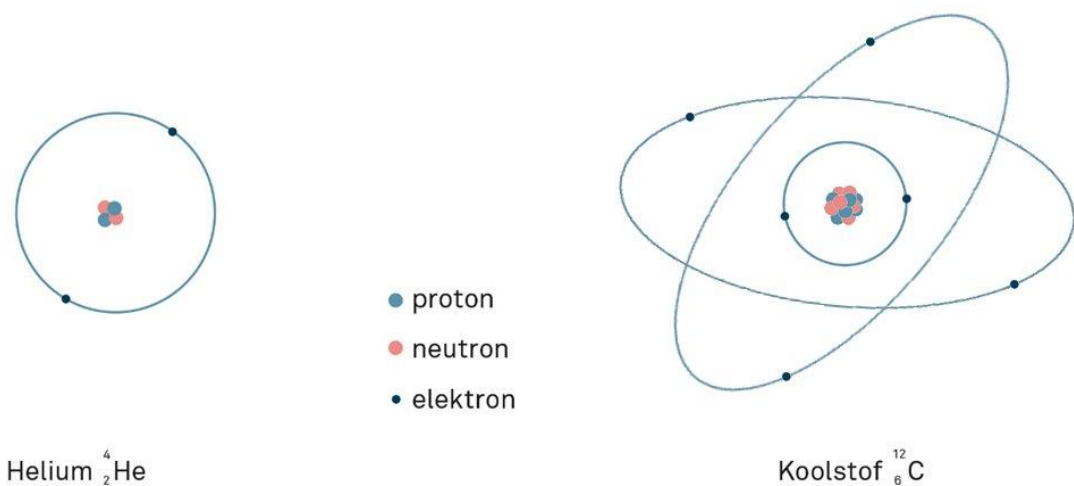
brandweer en de (on)mogelijkheden hiervan. Stralingsincidenten die zich voor kunnen doen staan beschreven in hoofdstuk 8. Mocht er, tot slot, een stralingsincident plaatsvinden, dan zijn er verschillende maatregelen die getroffen kunnen worden om de effecten van blootstelling te beperken; een overzicht hiervan staat beschreven in hoofdstuk 9.

1 Ioniserende straling

Elke stof is opgebouwd uit uiterst kleine deeltjes, de atomen. Atomen zijn de kleinste bouwstenen van een chemisch element. Er bestaan ruim honderd verschillende soorten atomen. Voorbeelden van atomen zijn: helium, koolstof, zuurstof, ijzer, waterstof, uranium. Atomen bestaan uit een kern van protonen en neutronen. Protonen zijn positief geladen deeltjes en neutronen zijn niet geladen. Op relatief grote afstand van de kern bevinden zich schillen van elektronen. Elektronen zijn negatief geladen en cirkelen als het ware om de atoomkern (zie Figuur 1.1). Het aantal protonen bepaalt het soort atoom en het chemisch gedrag.



Figuur 1.1 Opbouw van een atoom



Figuur 1.2 Opbouw van een heliumatoom en een koolstofatoom

Helium bestaat uit een kern van 2 protonen en 2 neutronen, dus in totaal 4 deeltjes in de kern. Daaromheen cirkelen 2 elektronen in een elektronenschil. Koolstof bestaat uit 6 protonen, 6 neutronen en 6 elektronen die rondom de atoomkern bewegen (zie Figuur 1.2).

Voor één atoomsoort heeft de atoomkern altijd hetzelfde aantal protonen, maar het aantal neutronen kan wel verschillen. Stoffen met een gelijk aantal protonen en verschillende aantallen neutronen worden isotopen genoemd. Van één atoomsoort kunnen verschillende isotopen bestaan. Verschillende isotopen van een stof hebben dezelfde fysisch-chemische eigenschappen (zoals kookpunt en vlampunt) en hetzelfde aantal protonen, maar verschillen dus in het aantal neutronen.

De atoomsoort koolstof heeft drie relevante isotopen: koolstof-12 (6 protonen en 6 neutronen) en koolstof-13 (6 protonen en 7 neutronen) en koolstof-14 (6 protonen en 8 neutronen).

Koolstof-12 en koolstof-13 zijn stabiel, maar koolstof-14 heeft een instabiele kern. Sommige combinaties van protonen en neutronen in atoomkernen zijn dus stabiel, maar andere niet. Atomen met meer dan 83 protonen in de kern zijn van nature instabiel.

Periodiek systeem

De verschillende soorten atomen vormen samen de elementen. Elementen worden gerangschikt naar het aantal protonen in de kern; deze rangschikking vormt het periodiek systeem van de elementen. De som van alle kerndeeltjes, dus het aantal protonen (Z) en het aantal neutronen (N), wordt het massagetal (A) genoemd: $A = N + Z$. Behalve isotopen (aantal protonen gelijk) kennen we ook isobaren. Dat zijn atomen waarvan het massagetal gelijk is.

Een instabiele kern zal uit elkaar vallen; dit wordt ook wel radioactief verval genoemd. Het woord 'radio' betekent straling. Radioactieve stoffen zijn stoffen met een instabiele kern die op den duur in stukken uiteenvalt, waarbij ioniserende straling wordt uitgezonden. Isotopen die radioactief vervallen, worden ook wel radionucliden genoemd ofwel 'radioactieve kern' (nuclide = kern). De instabiele, radioactieve kern gaat over naar een of meerdere stabielere atoomkern(en) via desintegratie of splijting. Stoffen kunnen dus radioactief zijn en daardoor ioniserende straling uitzenden; de straling zelf is niet radioactief maar ioniserend. De straling kan bestaan uit deeltjes uit de atoomkern of elektronenschil, of uit fotonen (zie paragraaf 1.2).

De snelheid waarmee of het tempo waarin de kernen van een radioactieve bron vervallen, heet activiteit. Activiteit is het aantal atomen dat per seconde vervalft. De snelheid waarmee het verval plaatsvindt, is afhankelijk van de stof. Zo zijn er stoffen die binnen een fractie van een seconde hun radioactiviteit kwijtraken, terwijl andere stoffen daar miljoenen jaren over doen.

De ioniserende straling die vrijkomt bij het verval heeft een bepaalde energie. Deze energie wordt overgedragen aan andere materie tijdens interacties of botsingen. De energie per foton of deeltje van ioniserende straling is voldoende om elektronen uit atomen of moleculen te verwijderen van het voorwerp dat wordt getroffen door de straling; dit worden ionisaties genoemd. Dit wil zeggen dat er één of meerdere elektronen uit de schillen van het atoom worden gestoten. Elektronen zijn elektrisch geladen; er wordt dus elektrische lading vrijgemaakt, maar er blijven ook elektrisch geladen deeltjes (ionen) achter.

De mogelijkheid van straling om ionisaties te veroorzaken hangt af van de energie van die straling. Bij een hoge energie per foton of deeltje kunnen zelfs atoomkernen worden aangetast. Door blootstelling aan ioniserende straling treden chemische veranderingen op in de bestraalde moleculen en kan blijvende schade worden aangericht. De energie per foton of deeltje bepaalt dus de schade die kan worden aangericht; dit betekent dat een groot aantal fotonen of deeltjes met weinig energie niet gelijkwaardig is aan een klein aantal met een hoge energie per stuk. Bij het absorberen van ioniserende straling ontstaat ook warmte.

Ioniserende straling is in tegenstelling tot sommige niet-ioniserende straling zoals (zon)licht onzichtbaar. Ioniserende straling is niet te ruiken, niet te proeven, niet te voelen en niet te zien.

Ioniserende straling kan ook opgewekt worden met bepaalde toestellen, zoals röntgen-apparaten en CT-scanners of deeltjesversnellers. In de medische wereld wordt dankbaar

gebruikgemaakt van de beschadigende werking van ioniserende straling, bijvoorbeeld om kankercellen te doden (therapie). Ioniserende straling wordt ook toegepast om 'in de mens te kunnen kijken' (diagnostiek). De hoeveelheid straling (stralingsintensiteit) die gebruikt wordt voor therapie is grofweg tot 1 miljoen maal groter dan die voor het maken van een simpele röntgenfoto.

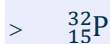
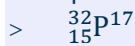
1.1 Notatie en eenheden

1.1.1 Notatie isotopen

Isotopen kunnen op verschillende manieren genoteerd worden. Het aantal protonen bepaalt om welk atoom het gaat. Als voorbeeld het isotoop Fosfor-32: dit is het atoom dat met de letter P (van het Engelse Phosphor) wordt aangegeven. 32 staat voor het totaal aantal protonen en neutronen in de kern. Fosfor heeft atoomnummer 15, dus de kern bevat 15 protonen. In dit geval bevat de kern dus: $32 - 15 = 17$ neutronen.

Volledige notatie

Isotopen worden als volgt genoteerd: ${}^A_ZX^N$. Voorbeeld:



In de bovenstaande notatie staat overbodige informatie, omdat het aantal protonen (15) uit de atoomnaam volgt, en het aantal neutronen (17) uit de combinatie van het massagetal en het aantal protonen.

De volgende vereenvoudigde notaties worden daarom meestal gebruikt:

> Fosfor-32

> P-32

> ${}^{32}\text{P}$

Vervalreeks en isomeren

Een radionuclide dat vervalt in een reeks stappen wordt aangegeven met een * achter het atoom, bijvoorbeeld de vervalreeks uranium-238: ${}^{238}\text{U}^*$. De * betekent dat de hele reeks van vervalproducten in beschouwing wordt genomen (zie paragraaf 1.4 en 2.1.1).

Isomeren zijn aangeslagen isotopen waarvan de halfwaardetijd lang genoeg is om ze te kunnen meten en als zelfstandig radionuclide te kunnen aanmerken (zie voor verdere uitleg paragraaf 0). Aangeslagen wil zeggen dat ze een teveel aan energie hebben. Ze vervallen naar de grondtoestand door afgifte van het teveel aan energie via uitzending van één of meerdere fotonen. Isomeren worden aangegeven met de letter 'm' van metastabiel achter de elementnaam, bijvoorbeeld de radiofarmaca technetium en indium: technetium-99m of Tc-99m of ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ en indium-113m of In-113m of ${}^{113\text{m}}\text{In}$.

1.1.2 Eenheden

Vaak worden voorvoegsels gebruikt om de grootte aan te geven; zie Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Voorvoegsels voor eenheden

afkorting	betekenis	factor	afkorting	betekenis	factor
n	nano	1 / 1.000.000.000	k	kilo	1.000
μ	micro	1 / 1.000.000	M	mega	1.000.000
m	milli	1 / 1.000	G	giga	1.000.000.000
c	centi	1 / 100	T	tera	1.000.000.000.000
d	deci	1 / 10	P	peta	1.000.000.000.000.000

Dus 1 Sv = 1000 mSv en 1 mSv = 1000 μSv; 1 TBq = 1000 GBq en 1 GBq = 1000 MBq.

1.2 Soorten straling

Ioniserende straling kan onderverdeeld worden in vijf stralingstypen die vaak in combinatie voorkomen. Ionisatie kan op twee manieren gebeuren: direct of indirect. Directe ionisatie kan alleen door geladen deeltjes veroorzaakt worden. Indirecte ionisatie vindt plaats in stappen. Een ongeladen deeltje gaat een reactie aan met een atoom of een atoomkern. Hierbij ontstaan geladen deeltjes die op hun beurt andere atomen ioniseren.

Indirecte ionisatie kan veroorzaakt worden door elektromagnetische straling (fotonen, zie de volgende alinea) met een hoge frequentie (golflengte < 100 nanometer) en dus veel energie per deeltje. Elektromagnetische straling van lagere frequentie, van radiostraling tot en met ultraviolette straling, heeft een te lage energie om ionisaties te veroorzaken en wordt daarom ook wel niet-ioniserende straling genoemd.

Een foton is een 'pakketje energie', een verschijningsvorm van elektromagnetische straling; een foton heeft geen massa of lading. Dit onderscheid is bijvoorbeeld belangrijk voor de mogelijk schadelijke werking van de straling. De mate waarin ioniserende straling schadelijk kan zijn, is afhankelijk van het doordringend vermogen van de straling. Dit doordringend vermogen is weer afhankelijk van het type straling. De afstand die ioniserende straling kan afleggen in materie (bijvoorbeeld lucht, water of het menselijk lichaam) heet de dracht (zie verder paragraaf 1.3).

Radioactief verval

Welk type radioactief verval plaatsvindt, hangt af van de oorspronkelijke combinatie van N en Z. De belangrijkste vervalsoorten zijn β⁻-verval, β⁺-verval en α-verval. De deeltjes die bij radioactief verval vrijkomen, hebben een kinetische energie die uitgedrukt wordt in keV of MeV.¹

Er bestaan verschillende overzichten die laten zien hoe een bepaald radionuclide verval. Meest bekend zijn de softwareapplicatie RadDecay, het *Handboek Radionucliden* (Keuveling Buisman) en de Karlsruher Nuklidkarte (beschikbaar op poster of A4-formaat).

¹ 1 eV = 1,60219x10⁻¹⁹ J

Ook voor de smartphone zijn apps beschikbaar, onder andere de IsotopeBrowser van de IAEA. Op de Karlsruher Nuklidkarte wordt in de x-richting het aantal neutronen (N) weergegeven en in de y-richting het aantal protonen (Z). Deze kaart is met zijn heldere kleurstelling erg inzichtelijk.

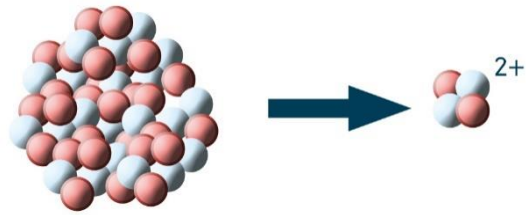
Kleuren Nuklidkarte:

- > Zwart: stabiel nuclide
- > Geel: α -stralers
- > Cyaan (lichtblauw): β^- -stralers
- > Roze/rood: β^+ -stralers
- > Wit deelvakje: isomeren (zie paragraaf 0).

1.2.1 Alfastraling

Alfastraling (α -straling) bestaat uit geladen deeltjes die relatief groot en zwaar zijn.

α -deeltjes hebben de hoogste lading van de verschillende stralingstypen. Ze bestaan uit twee protonen en twee neutronen en zijn $2+$ geladen. α -deeltjes zijn in feite heliumkernen, maar hebben dan wel een hoge kinetische energie.



Figuur 1.3 α -deeltje splitst af uit kern

Een α -deeltje is erg zwaar ten opzichte van elektronen (zie β -straling). Hoofdzakelijk zware radioactieve kernen zenden α -straling uit (zie Figuur 1.3). Door de grootte van de α -deeltjes is de weerstand groot en geven ze snel hun energie af. De dracht van α -deeltjes is daarom heel klein, slechts enkele centimeters in lucht. De grootte van de deeltjes zorgt er ook voor dat het beschadigend vermogen van α -straling groot is; bij contact wordt de energie direct volledig geabsorbeerd. Het spoor van een α -deeltje door materie kan vergeleken worden met het spoor van een ontspoorde goederenlocomotief: *'Hij komt niet erg ver maar hij trekt wel een (rechtlijnig) spoor van vernieling achter zich aan'*. Het doordringend vermogen van α -straling is dus heel klein. α -straling is daarom alleen dicht bij de bron te meten en eenvoudig af te schermen; vaak is een vel papier, gewone kleding of het buitenste laagje van de huid (de opperhuid) al voldoende. Een bekende toepassing van een α -straler is het gebruik in rookmelders.

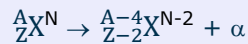
Kenmerken van α -deeltjes zijn:

- > groot
- > tweevoudige lading ($2+$)
- > hoge snelheid
- > geven snel energie af
- > laag doordringend vermogen
- > richten veel schade aan
- > directe ioniserende straling.

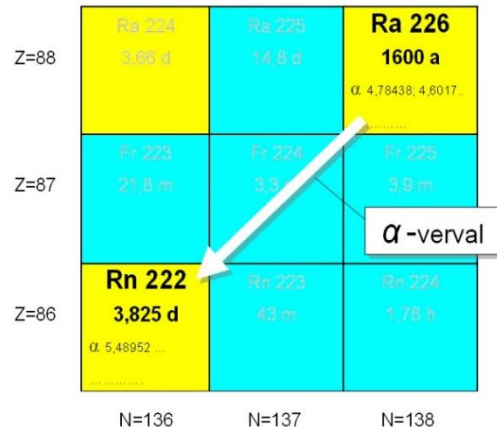
Voorbeelden van α -stralers zijn: uranium-238, radium-226, radon-222, polonium-218, -214 en -210, plutonium-239 en americium-241.

Eigenschappen α -verval

Dit type verval komt voor bij atomen met een zeer hoge Z-waarde. In formule:



Op de Karlsruhe Nuklidkarte vervallen α -stralers naar de radionuclide dat twee hokjes naar beneden ($Z \rightarrow Z-2$) en twee hokjes naar links ($N \rightarrow N-2$) staat (zie Figuur S1.1). In totaal zijn er dus vier kerndeeltjes verdwenen ($A \rightarrow A-4$). Als voorbeeld:



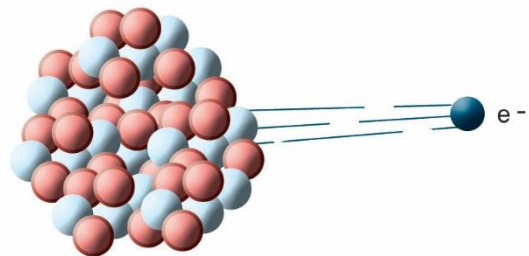
Figuur S1.1 Voorbeeld α -verval

De energie van het uitgezonden α -deeltje ligt voor elke α -straler precies vast. Voor de meeste α -stralers ligt deze energie tussen 4 – 8 MeV.

Bijvoorbeeld: voor ${}^{238}\text{U}$ bedraagt de energie 4,197 MeV en voor ${}^{210}\text{Po}$ 5,304 MeV. Door het meten van de stralingsenergie met specialistische apparatuur kunnen α -stralers geïdentificeerd worden (α -spectrometrie).

1.2.2 Bètastraling

Bètastraling (β -straling) is ioniserende straling waarbij kleine geladen deeltjes (elektronen of positronen) worden uitgezonden (zie Figuur 1.4). Elektronen zijn negatief (1-), en positronen zijn positief (1+) geladen. Deze deeltjesstraling heeft een groter doordringend vermogen dan α -straling. De dracht van β -straling is ook groter, namelijk 3 tot 10 meter in lucht.



Figuur 1.4 β -deeltje splitst af uit de kern

β -deeltjes botsen met vergelijkbare deeltjes in het voorwerp (namelijk elektronen) dat ze treffen; het spoor dat ze achterlaten is daarom veel langer en grilliger dan dat van α -deeltjes. Zo'n botsing is te vergelijken met een poolbiljartspel. β -straling is eenvoudig af te schermen: 1 cm perspex, enkele millimeters aluminium of een laag water van 1 cm is al voldoende. Gewone kleding levert voor β -straling onvoldoende afscherming. Een volledige brandweeruitrusting (uitrukpak, helm en gelaatsbescherming) beschermt het lichaam wel goed af tegen β -straling van buitenaf. β -deeltjes kunnen bij uitwendige besmetting enkele millimeters door de huid dringen en verbranding veroorzaken. Een toepassing van β -straling is de diktemeting van papier in de papierproducerende industrie. In zogenaamde radionuclidenlaboratoria (C-laboratoria) in ziekenhuizen en academische instellingen wordt vaak radioactief fosfor gebruikt om biologische moleculen radioactief te maken; de radioactieve moleculen zijn dan in een proefdier of proefopstelling goed te volgen.

Kenmerken van β -deeltjes zijn:

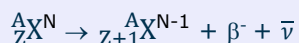
- > klein
- > enkelvoudige lading (1+ of 1-)
- > hoge snelheid
- > geven snel energie af
- > gemiddeld doordringend vermogen
- > kunnen bij uitwendige besmetting door de huid dringen
- > directe ioniserende straling.

Voorbeelden van β -stralers zijn: fosfor-32, lood-214 en -210, bismuth-214 en -210.

Eigenschappen β^- -verval

β^- -verval komt voor bij radionucliden met te veel neutronen. Bij β^- -verval blijft het massagetal A gelijk, maar 'verandert' er in de kern een neutron in een proton: het atoomgetal wordt met 1 verhoogd. Gelijktijdig worden een β^- -deeltje (elektron) en een zogenaamd antineutrino ($\bar{\nu}$) uitgezonden.

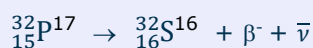
In formule:



De bekende molybdeen/technetium-generator (${}^{99}\text{Mo}/{}^{99\text{m}}\text{Tc}$) is een voorbeeld van een β^- -straler.

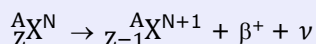
Op de [Karlsruher Nuklidkarte](#) vervallen β^- -stralers (cyaan/lichtblauwkleurig) naar de (radio)nuclide dat er linksboven staat (zie Figuur S1.2). Bij β^- -verval schuiven ze over de schuine isobarenlijn naar linksboven op, in de richting van de stabiele (zwarte) nucliden.

Als voorbeeld:



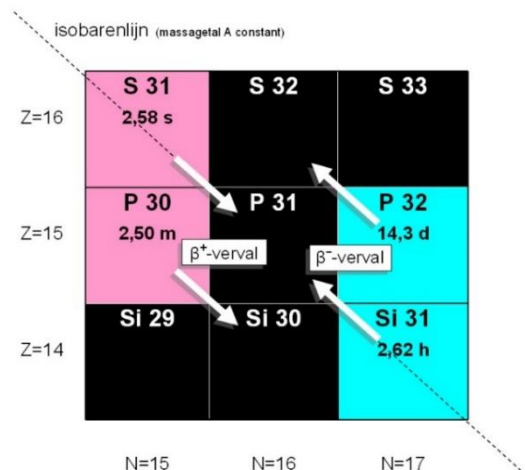
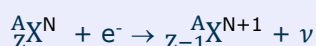
Elektronvangst en β^+ -verval

β^+ -verval komt voor bij radionucliden met te veel protonen. Bij β^+ -verval gaat er in de kern een proton over in een neutron. Gelijktijdig worden een β^+ -deeltje (positron) en een neutrino uitgezonden. In formule:



Positronen ('positieve elektronen') zijn antimaterie en hebben maar een korte levensduur (zie paragraaf 0). Voorbeelden van β^+ -stralers zijn ${}^{11}\text{C}$ en ${}^{18}\text{F}$.

Een vervalreactie die hier een beetje op lijkt, is elektronvangst. Daarbij wordt een elektron ingevangen in de atoomkern, waarna er een proton in een neutron verandert. In formule:



Figuur S1.2 Schema β^- - en β^+ -verval

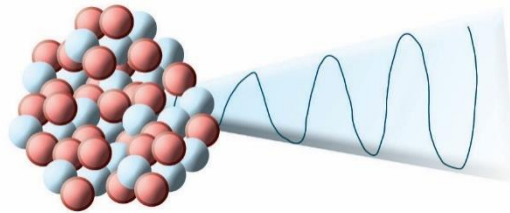
Op de Karlsruher Nuklidkarte vervallen radionucliden die vervallen via β^+ -verval of elektronvangst (roze/roodkleurig), naar de (radio)nuclide dat er rechtsonder staat (zie Figuur S1.2). Bij β^- -verval schuiven ze over de schuine isobarenlijn naar rechtsonder in de richting van de stabiele atoomkernen; in vergelijking met β^- -stralers in tegengestelde richting. Als voorbeeld:



Bij β^- -verval wordt de vrijkomende energie verdeeld over het elektron (of positron) en het (anti)neutrino. De vrijkomende β^- -deeltjes kunnen dus verschillende energieën (E_β) hebben. Wel is er sprake een maximum energie, $E_{\beta,\text{max}}$. Het β^- -deeltje heeft dan alle energie overgedragen gekregen, en het (anti)neutrino niets. De gemiddelde energie van de β^- -deeltjes is ongeveer één derde van de maximale energie. Elke β^- -straler kent zijn eigen karakteristieke $E_{\beta,\text{max}}$; deze ligt typisch tussen 0,1 en 10 MeV.

1.2.3 Gammastraling

Gammastraling (γ -straling) bestaat, net als licht, uit pakketjes energie (fotonen); het is elektromagnetische straling met een zeer kleine golflengte en hoge energie. De fotonen dringen diep in weefsels en andere stoffen door of gaan er dwars doorheen. De verzameling van fotonen die bij radioactief verval vrijkomt, noemen we γ -straling.



Figuur 1.5 γ -straling komt vrij uit kern

γ -straling heeft een hoger doordringend vermogen dan α - en β -straling en is vaak moeilijk af te schermen. γ -straling geeft haar energie af bij het botsen met materie. Omdat fotonen geen massa en geen lading hebben is de kans op een botsing kleiner dan voor α - en β -deeltjes. De kans op een botsing is het grootst bij materiaal met een grote soortelijke massa zoals lood. Daarom worden γ -stralers vaak bewaard in een loden omhulsel van 10-25 cm dik. Ook worden betonnen muren van 1 meter of dikker toegepast als afscherming. Enkele toepassingen van γ -straling zijn bronnen voor de controle van lasnaden in pijpleidingen en ijk- en referentiebronnen. Sommige bestralingsbronnen in ziekenhuizen bevatten ook grote hoeveelheden γ -stralers.

Kenmerken van γ -straling:

- > energiepakketjes
- > geen deeltjes dus moeilijker af te schermen
- > geen lading
- > hoog doordringend vermogen
- > indirecte ioniserende straling.

Voorbeelden van γ -stralers zijn: technetium-99m en indium-113m.

Energie γ -straling

Fotonen die vrijkomen bij radioactief verval hebben een hoge energie; deze ligt typisch tussen 10 keV – 10 MeV.

Isomeren

Bij radioactief verval kan het voorkomen dat de nieuwgevormde kern nog enige tijd in een aangeslagen toestand (een toestand van hogere energie) verkeert. Radionucliden met dezelfde samenstelling, maar verkerend in verschillende energietoestanden, noemen we isomeren. Een isomeer vervalt meestal heel snel naar een lagere energietoestand waarbij een foton wordt uitgezonden. Isomeren die langer in de aangeslagen toestand verblijven en daarom meetbaar zijn, worden aangeduid met een 'm' achter het massagetal. Een bekend isomeer is ^{99m}Tc , dat ontstaat uit ^{99}Mo . ^{99m}Tc vervalt met een halfwaardetijd van ongeveer 6 uur naar ^{99}Tc . Daar komt γ -straling bij vrij met een energie van 141 keV. Op de Karlsruher Nuklidkarte zijn isomeren aangeduid met een wit deelvakje.

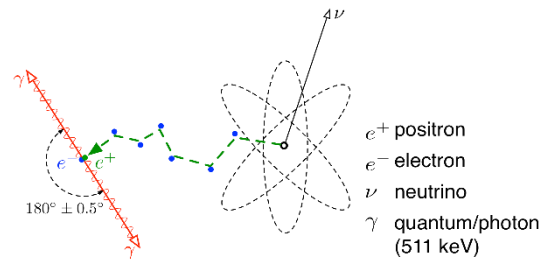
Remstraling

Wanneer β -deeltjes met een hoge energie langs zware atoomkernen scheren, worden ze door de elektrische lading van de atoomkern afgebogen en afgeremd. Daarbij ontstaat remstraling. Remstraling is een vorm van elektromagnetische straling, en gedraagt zich hetzelfde als γ -straling. Het deel van de β -stralingsenergie dat wordt omgezet in remstraling neemt vrijwel evenredig toe met zowel het aantal protonen in de zware atoomkern als met de maximale energie $E_{\beta, \text{max}}$ van de langs scherende β -deeltjes. Van β -deeltjes met $E_{\beta, \text{max}} = 2$ MeV wordt in perspex maar 1% van de totale energie omgezet in remstraling, maar in lood bedraagt die fractie al meer dan 10%. Houd dus bij zuivere β -stralers ook rekening met remstraling, γ -straling, zeker als gebruik wordt gemaakt van een loden afscherming.

Annihilatiefotonen

Bij β^+ -verval worden positronen uitgezonden. Elk positron gaat in zeer korte tijd samen met een elektron en deze vormen samen twee fotonen van elk 511 keV, die in tegengestelde richting worden uitgezonden (zie Figuur S1.3). Dit proces wordt annihilatie genoemd en is karakteristiek voor β^+ -straling.

De fotonen met een energie van 511 keV worden ook wel annihilatiefotonen genoemd. Van dit verschijnsel wordt bijvoorbeeld gebruikgemaakt in de medische diagnostiek (PET = Positron Emission Tomography).



Figuur S1.3 Annihilatie

1.2.4 Röntgenstraling

Röntgenstraling wordt ook wel X-straling of X-ray genoemd en is vergelijkbaar met γ -straling, maar heeft een lagere energie. Röntgenstraling wordt opgewekt in een röntgentoestel voor diagnostiek. Het grote verschil met γ -straling is dat röntgenstraling uit te schakelen is maar een γ -bron niet. Stoffen met een hogere dichtheid houden röntgenstraling beter tegen dan stoffen met een lagere dichtheid.

Een bot in het menselijk lichaam houdt meer ioniserende straling tegen dan een stukje vet of een spier. De röntgenstraling die doorgelaten wordt en op een fotografische film komt, zorgt ervoor dat de film zwart wordt. Dat betekent dat op de plaats van het bot minder straling de

film bereikt, zodat de film hier wit blijft (zie Figuur 1.6). Het gevolg is dat botten goed zichtbaar zijn en het omliggende zachtere weefsel moeilijker of niet te zien is.

De opgewekte straling in een röntgentoestel noemen we kunstmatig, omdat we het toestel in en uit kunnen schakelen. Een röntgentoestel is voorzien van een radiologische gevaarsaanduiding (geel driehoekig etiket met zwarte rand, zie paragraaf 0), maar wekt alleen straling op als het toestel ingeschakeld is. Als bij een incident of een brand de stekker van een röntgentoestel uit het stopcontact wordt getrokken, is er geen gevaar meer voor ioniserende straling van dat toestel!



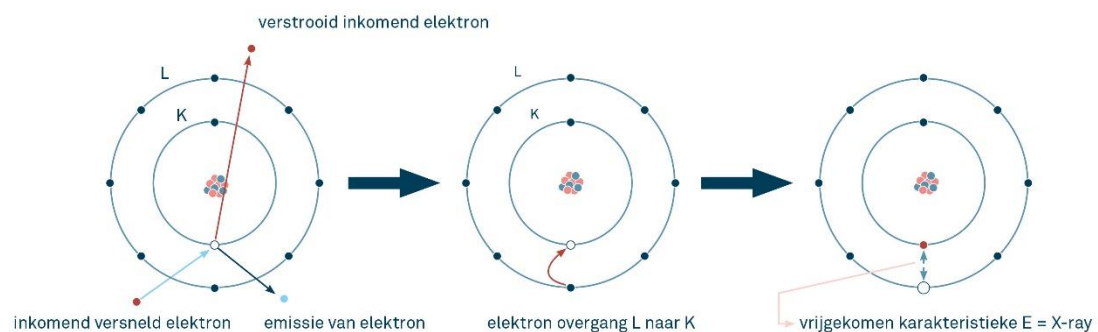
Figuur 1.6 Röntgenfoto van een hand

Kenmerken van röntgenstraling zijn:

- > vergelijkbaar met γ -straling
- > lagere energie
- > in- en uit te schakelen.

Röntgenapparaten

In röntgenapparaten worden elektronen door een gloeikathode vrijgemaakt, in een elektrisch veld versneld en vervolgens op een trefplaat (anode) geschoten. Daarbij ontstaan zowel remstraling als karakteristieke röntgenstraling. Remstraling ontstaat wanneer elektronen sterk worden afgeremd of afgebogen in de trefplaat. De remstraling heeft een continue energieverdeling tot een zekere maximum energie. De karakteristieke röntgenstraling ontstaat wanneer elektronen uit de elektronenwolk rond de atoomkern uit hun baan worden gestoten. Hierbij ontstaat een 'gat' in een van de binnenste elektronenschillen van het atoom (bijvoorbeeld de K-schil), dat vrijwel meteen ingevuld wordt door een elektron uit één van de buitenste schillen (zie Figuur S1.4). Bij deze overgang wordt een karakteristieke hoeveelheid energie uitgezonden die gelijk is aan het verschil in bindingsenergie tussen het elektron in de binnenschil en die in de buitenschil die het 'gat' opvult. Deze karakteristieke energie is de bekende röntgenstraling. De energie van röntgenstraling bedraagt 100 tot 300 keV. De combinatie van de rem- en röntgenstraling geeft een breed spectrum.



Figuur S1.4 Ontstaan van karakteristieke röntgenstraling

1.2.5 Neutronenstraling

Neutronenstraling bestaat uit (elektrisch) neutrale, ongeladen neutronen met een groot doordringend vermogen. Neutronenstraling ontstaat onder andere bij het uiteenvallen van atoomkernen en is moeilijk af te schermen: de beste bescherming tegen neutronenstraling

wordt geboden door water of een kunststof zoals polyetheen. Neutronenstraling kan in de zwaarste kernen doordringen en een splijtingsreactie veroorzaken. Hiervan wordt gebruikgemaakt in kernenergiecentrales waar neutronenstraling vrijkomt bij de kernsplijting van uranium. Neutronenstraling kan zeer schadelijk zijn en is in staat om niet-radioactieve stoffen te 'activeren' en dus radioactief te maken. Neutronenstraling komt relatief weinig voor (voornamelijk in kernenergiecentrales) en de typische radioactieve stoffen die bij stralingsincidenten vrijkomen, zijn geen neutronenstralers.

Kenmerken van neutronenstraling zijn:

- > kleine ongeladen deeltjes
- > extreem hoog doordringend vermogen
- > kan niet-radioactieve stoffen activeren
- > indirecte ioniserende straling.

Brandweermeetapparatuur kan geen neutronenstraling meten; deze wordt daarom niet verder behandeld in dit document.

1.2.6 Combinatie

Veel radioactieve stoffen zenden verschillende typen ioniserende straling uit. Er is bijna nooit sprake van één type straling, maar meestal van een combinatie van verschillende typen. Zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** voor een aantal voorbeelden.

Tabel 1.2 Overzicht van soort ioniserende straling die wordt uitgezonden

radionuclide	notatie	α	β	γ
americium	Am-241	X	–	X
uranium-reeks	U-238	X	X	X
radon-reeks	Ra-226	X	X	X
jodium	I-131	–	X	X
molybdeen – technetium	Mo-99/Tc-99m	–	X	X
krypton	Kr-85	–	X	X
kobalt	Co-60	–	X	X

Bijlage 5 Radionuclidentabel

De *Bijlage 5 Radionuclidentabel* achterin dit deel geeft informatie over de belangrijkste radioactieve stoffen en de straling die deze radionucliden uitzenden. Deze tabel bevat ook de energie van de α - en β -straling. Tabel S1.1 op de volgende pagina geeft een overzicht van de eigenschappen van de verschillende stralingssoorten.

Tabel S1.1 Overzicht eigenschappen stralingssoorten

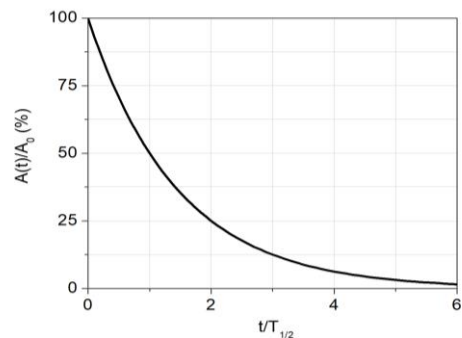
soort straling	massa	lading	max. energie [MeV]	max. dracht			soort gevaar ¹⁾	afscherming
				lucht	weefsel	aluminium		
alfa α	zwaar, 7300x massa elektron of 4x massa proton	2+ ${}^4_2\text{He}^{2+}$	7,7	7 cm	60 μm	5 μm	inademing en direct uitwendig contact ²⁾	papier
bèta β ³⁾	licht, 1/1836 ^e deel proton	1+ of 1- positron e^+ elektron e^-	2,3 ⁴⁾	10 m	13 mm	5 mm	inademing en direct uitwendig contact, externe straling	perspex, alumi- nium
halveringsdikte								
				lood	beton	water		
gamma γ	geen	0 fotonen, elektromag- netisch	foto-elektrisch: < 100 keV compton: < 5 MeV paarvorming: 1,022 MeV (2x 511 keV)	1 cm	5 cm	10 cm	externe straling, bij open bron ook inadem- ing en direct uitwendig contact	beton, lood
röntgen rö	geen			1 cm	5 cm	10 cm	externe straling	beton, lood
neutro- nen n	zwaar 1x massa proton	0 ongeladen deeltjes	thermisch: 0,01 – 0,3 eV middel: 0,3 eV – 0,2 MeV snel: 0,2 – 20 MeV				externe straling	water, poly- etheen

- 1) **Let op:** de gevaren *inademing en direct uitwendig contact* gelden voor een open bron en contact met de radioactieve stof.
- 2) Voor α -deeltjes is effect van direct uitwendig contact gering, tenzij de stof in het lichaam komt door inademing; bij inwendige besmetting (vaak de longen) is het effect 20x groter dan bij eenzelfde dosis β - of γ -straling.
- 3) Alleen voor β -deeltjes, niet voor de eventueel gevormde fotonen.
- 4) Als praktische bovengrens is de maximale β -energie van ${}^{90}\text{Y}$ genomen.

1.3 Eigenschappen van ioniserende straling

1.3.1 Halfwaardetijd

Elk radionuclide heeft zijn eigen vervalsnelheid. Er bestaat een specifieke tijd waarbinnen de helft van het aantal instabiele kernen vervalst. Dit is de halfwaardetijd (of halveringstijd), aangeduid met $T_{1/2}$. De activiteit van een hoeveelheid radioactief materiaal, $A(t)$, neemt in de tijd exponentieel af (zie Figuur 1.7). Typisch voor exponentieel verval is dat altijd na steeds eenzelfde hoeveelheid tijd, de activiteit gehalveerd is. Dat betekent dat na het verstrijken van één halfwaardetijd de helft van de kernen is vervallen en de activiteit van de stof gehalveerd is.



Figuur 1.7 Radioactief verval

Na $2 \times T_{1/2}$ is dus nog maar een kwart over, na 5 halfwaardetijden nog ongeveer 3% (want $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = 0,03$). Dit is ook af te lezen in de figuur. Na tien halfwaardetijden is minder dan één duizendste van de oorspronkelijke activiteit nog over.

Halfwaardetijden van radionucliden kunnen variëren van microsecondes (bijvoorbeeld polonium-212: $T_{1/2} = 3 \cdot 10^{-7}$ s) tot vele miljarden jaren (bijvoorbeeld uranium-238: $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ j). De eenheid varieert dus ook van milliseconde (ms) tot megajaar (Mj). Deze eigenschappen worden bijvoorbeeld gebruikt bij het bepalen van de leeftijd van koolstofhoudende voorwerpen.

1.3.2 Dracht

Het doordringend vermogen van ioniserende straling is afhankelijk van de deeltjesgrootte en de lading van de ioniserende straling. Grote geladen deeltjes worden sneller tegengehouden en komen minder ver. De maximaal af te leggen weg van een hoogenergetisch geladen deeltje in bepaalde materie heet de maximale dracht, R . Dit is dus een maat voor het doordringend vermogen. De dracht voor α -straling in lucht is maximaal 7 centimeter, in weefsels $60 \mu\text{m}$, en in vaste stoffen slechts $10 \mu\text{m}$. Het verschil wordt veroorzaakt door de soortelijke massa van de materie waardoor de α -straling beweegt. α -straling wordt dus door kleding en zelfs door de (dode) opperhuid tegengehouden. Daarom is α -straling ook niet gemakkelijk te meten.

Omdat β -deeltjes (elektronen) lichter en kleiner zijn dan α -deeltjes, kunnen ze een grotere afstand afleggen en verder doordringen in materie. In lucht is de dracht van een β -deeltje maximaal 10 meter, terwijl deze in vaste stoffen en weefsel hooguit 13 millimeter bedraagt. Er zijn een paar weinig voorkomende β -stralers met een hoge energie en een grotere dracht, maar in alle gevallen geldt dat een opstellijs op een gangbare afstand van 25 meter van een onafgeschermd β -bron voldoende veilig is.

Direct ioniserende straling

Of straling direct of indirect ioniserend is, is afhankelijk van het wel of niet elektrisch geladen zijn van de deeltjes: α - en β -straling zijn direct ioniserend en fotonen en neutronen zijn ongeladen en dus indirect ioniserend. Dit heeft consequenties voor de manier waarop straling door materie wordt beïnvloed, en daarmee dus ook voor de dracht van de verschillende soorten straling. Wanneer geladen deeltjes zich met een hoge

kinetische energie door materie (bijvoorbeeld lucht of weefsel) bewegen, geven ze via botsingen beetje bij beetje hun energie af. Dat komt door de elektromagnetische wisselwerking tussen het geladen deeltje en de elektronenwolken rond atomen en moleculen. Het resultaat van zo'n 'botsing' is dat een elektron uit de elektronenwolk rond een atoomkern weggeschoten kan worden (ionisatie), of in een hogere energietoestand kan worden gebracht (aangeslagen toestand); α - en β -deeltjes trekken dus ionisatiesporen door materie. Die sporen zien er voor α - en β -deeltjes geheel verschillend uit. Dat komt door het verschil in massa tussen α - en β -deeltjes.

Dracht van α -deeltjes

Een proton is ongeveer 1836 x zwaarder dan een elektron: de massa van een proton en die van een neutron zijn ongeveer gelijk aan elkaar. Dus de massa van een α -deeltje (2 protonen en 2 neutronen) is 4 x 1836 keer zwaarder dan de massa van een β -deeltje. Het verlies van energie per afgelegde weglengte is voor een α -deeltje redelijk constant, maar hangt wel af van de eigenschappen van de materie waardoor het beweegt. Een hogere dichtheid of soortelijke massa zorgt voor meer interactie en een afname van de dracht.

Dracht van β -deeltjes

Een β -deeltje is even zwaar als de elektronen waarmee de interacties plaatsvinden. Als vuistregel kunnen we voor de dracht van elektronen R_β (cm) de volgende formule gebruiken:

$$R_\beta \times \rho \approx 0,5 E_{\beta,\max} \quad \text{dus} \quad R_\beta \approx 0,5 E_{\beta,\max} / \rho$$

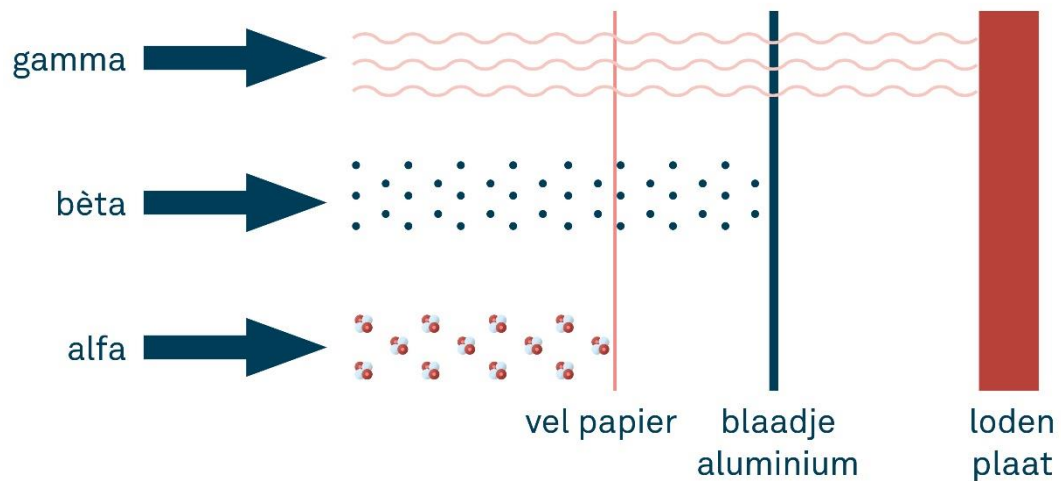
Met: R_β = de dracht [cm]
 $E_{\beta,\max}$ = de maximale energie van de β -deeltjes [MeV]
 ρ = de soortelijke dichtheid van de materie [g/cm³].

Deze formule klopt goed voor $E_{\beta,\max} > 1$ MeV. Als $E_{\beta,\max} \ll 1$ MeV leidt deze formule tot een overschatting van de dracht.

Als voorbeeld de combinatie ⁹⁰Sr / ⁹⁰Y: de β -deeltjes van ⁹⁰Sr hebben een maximale energie $E_{\beta,\max} = 0,546$ MeV. In lucht ($\rho = 1,29 \times 10^{-3}$ g/cm³) levert dit een dracht op van $\pm 2,3$ meter en in weefsel ($\rho = 1,2$ g/cm³) komen ze niet verder dan $\pm 2,3$ millimeter. De β -deeltjes van ⁹⁰Y hebben een veel hogere maximale energie: $E_{\beta,\max} = 2,284$ MeV. Voor lucht vinden we nu een dracht van bijna negen meter en voor weefsel van ongeveer een centimeter.

Van alle in de praktijk gangbare β -stralers levert ⁹⁰Y β -deeltjes met de hoogste energie ($E_{\beta,\max} = 2,3$ MeV). Deze komen in lucht hooguit 9 meter ver. Er bestaan een paar exotische radionucliden met hardere β 's en dus hogere energie dan die van ⁹⁰Y; zoals aangegeven levert een afstand van 25 meter tot de bron afdoende bescherming.

De energiepakketjes (fotonen) in γ -straling hebben geen massa en geen lading en gaan daarom minder makkelijk interacties aan. Er is daarom eigenlijk geen echte dracht aan toe te kennen. γ -straling wordt door honderden meters lucht nauwelijks tegengehouden, maar wordt wel verzwakt als het door materie gaat. Alleen zware materialen zoals lood of metersdik beton, zijn voldoende om γ -straling voldoende af te schermen, maar zelfs daar kan nog straling doorheen komen (zie Figuur 1.8).



Figuur 1.8 Dracht van verschillende soorten ioniserende straling: α -straling wordt tegengehouden door een vel papier, β -straling door een blaadje aluminium en γ -straling door een loden plaat.

Indirect ioniserende straling

Voor deeltjes zonder elektrische lading is de kans op interactie met materie veel kleiner. Dat resulteert in een veel grotere dracht, en maakt dat deze soorten van straling veel moeilijker (volledig) zijn af te schermen.

Interactie tussen fotonen en materie

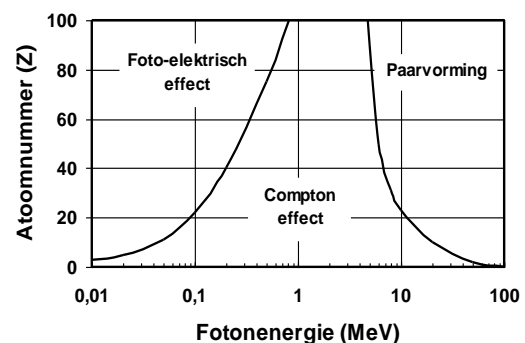
Een foton kan bij één interactie een groot deel van zijn energie afgeven. Bij zo'n interactie ontstaan elektronen die met grote snelheid uit een atoom of molecuul geschoten worden. Die elektronen gedragen zich vervolgens als β -deeltjes. Elk door een foton vrijgemaakt elektron trekt vervolgens weer een eigen ionisatiespoor.

Er bestaan drie verschillende soorten wisselwerking tussen fotonen en materie, namelijk het foto-elektrisch effect, het Compton-effect en paarvorming. In Figuur S1.5 is aangegeven welk proces dominant is als functie van fotonenergie en atoomnummer.

Foto-elektrisch effect

Bij het foto-elektrisch effect wordt de volledige fotonenergie in één keer overgedragen aan een elektron uit een atoomschil. Dit elektron krijgt daarmee een kinetische energie die gelijk is aan die van het invallende foton, verminderd met zijn oorspronkelijke bindingsenergie. Dat elektron verliest zijn energie vervolgens weer stapsgewijs via botsingen zoals beschreven voor β -deeltjes.

De kans dat het foto-elektrisch effect optreedt, neemt sterk toe met toenemend Z-getal en bij lage fotonenergieën.



Figuur S1.5 Dominantie van interactieprocessen tussen kern en foton, als functie van fotonenergie en atoomnummer

Compton-effect

Bij het Compton-effect wordt slechts een deel van de fotonenergie afgegeven aan een elektron. Het nieuwgevormde foton heeft niet alleen een lagere energie dan het oorspronkelijke (verdwenen) foton, maar is ook van richting veranderd. Het Compton-effect is dominant bij lichte atoomkernen en fotonenergieën rond 1 MeV.

Paarvorming

Fotonen met een energie groter dan 1022 keV ($= 2 \times 511$ keV, de rustmassa² van een elektron of positron) kunnen onder invloed van wisselwerking met een atoomkern opgaan in een elektron-positron paar. De resterende energie wordt als kinetische energie in een gelijke verdeling aan deze deeltjes meegegeven. Deze deeltjes gedragen zich vervolgens als een β^- - en een β^+ -deeltje. Uiteindelijk zal het positron weer samen met een elektron opgaan in twee annihilatiefotonen van elk 511 keV. Die fotonen geven hun energie vervolgens weer aan de omliggende materie af via het foto-elektrisch effect of het Compton-effect. In materie met $Z > 20$ is paarvorming dominant bij fotonenergieën boven 5 à 10 MeV.

Verstrooiing van fotonen

Naast de bovengenoemde effecten bestaan er ook nog processen waarbij nauwelijks energie wordt overgedragen, maar die wel bijdragen aan de verstrooiing van fotonen. De verstrooiing van fotonen is verantwoordelijk voor effecten als sky-shine en build-up. Dit merken we bijvoorbeeld wanneer een sterke γ -bron onafgeschermd om zich heen straalt; omstanders zullen dan niet alleen rechtstreeks vanaf de bron bestraald worden, maar ook vanuit de omgeving door verstrooiing van de fotonen. Door verstrooiing van fotonen in het afschermingsmateriaal ontstaat er naast een afgezwakte primaire stralingsbundel ook een secundaire stralingscomponent die uit allerlei richtingen nadert. Build-up is vergelijkbaar met het verstrooiingseffect van zonlicht: het is mogelijk om op een onbewolkte dag bruin te worden of te verbranden onder een parasol door aan deeltjes verstrooide UV-straling die vanuit allerlei richtingen komt.

Neutronen

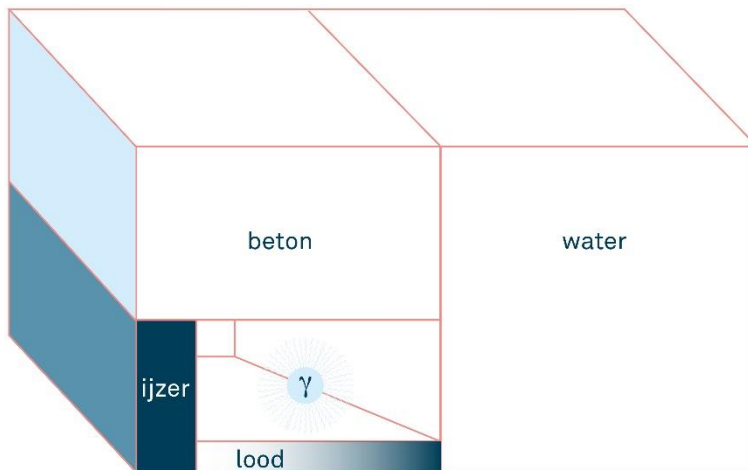
Omdat neutronen ongeladen zijn, is de kans op interactie met omliggende materie klein. Als een interactie plaatsvindt, is dat een wisselwerking met een atoomkern. Zo'n atoomkern kan een deel van de neutronen-energie opnemen, of zelfs het gehele neutron invangen. Bij deze processen kunnen fotonen of andere hoogenergetische deeltjes vrijkomen, die hun energie afgeven. Bij neutronenvangst kan de nieuwgevormde kern radioactief zijn; er is dan sprake van activering. Soms kan een atoom zelfs splijten na vangst van een neutron. Op dat principe berust de kernreactor.

1.3.3 Halveringsdikte

Voor het afschermen van ioniserende straling kunnen verschillende materialen worden toegepast, zoals lucht, beton, perspex of lood. Voor elk afschermingsmateriaal is er een bepaalde dikte waarbij nog maar de helft van de stralingsintensiteit passeert; dit noemen we de halveringsdikte van het materiaal voor dat type straling. De dikte van de afscherming wordt zo gekozen dat er uiteindelijk een aanvaardbaar lage stralingsintensiteit door de afscherming heen komt. Ter illustratie staan in Figuur 1.9 verschillende halveringsdikten van

² Het verband tussen energie en massa wordt weergegeven door de Wet van Einstein: $E = mc^2$.

afschermingsmaterialen voor een γ -bron afgebeeld. Hoe dichter het materiaal is (meer massa per volume) hoe meer moeite de straling heeft om er doorheen te komen.



Figuur 1.9 Illustratie van halveringsdiktes van verschillende afschermingsmaterialen voor een γ -bron.

Afscherming β -deeltjes

Met de formule voor dracht kan ook de benodigde dikte van een bepaald materiaal voor de afscherming van β -deeltjes berekend worden, namelijk:

$$d > 0,5 E_{\beta, \max} / \rho$$

Met: d = dikte afschermingsmateriaal [cm]

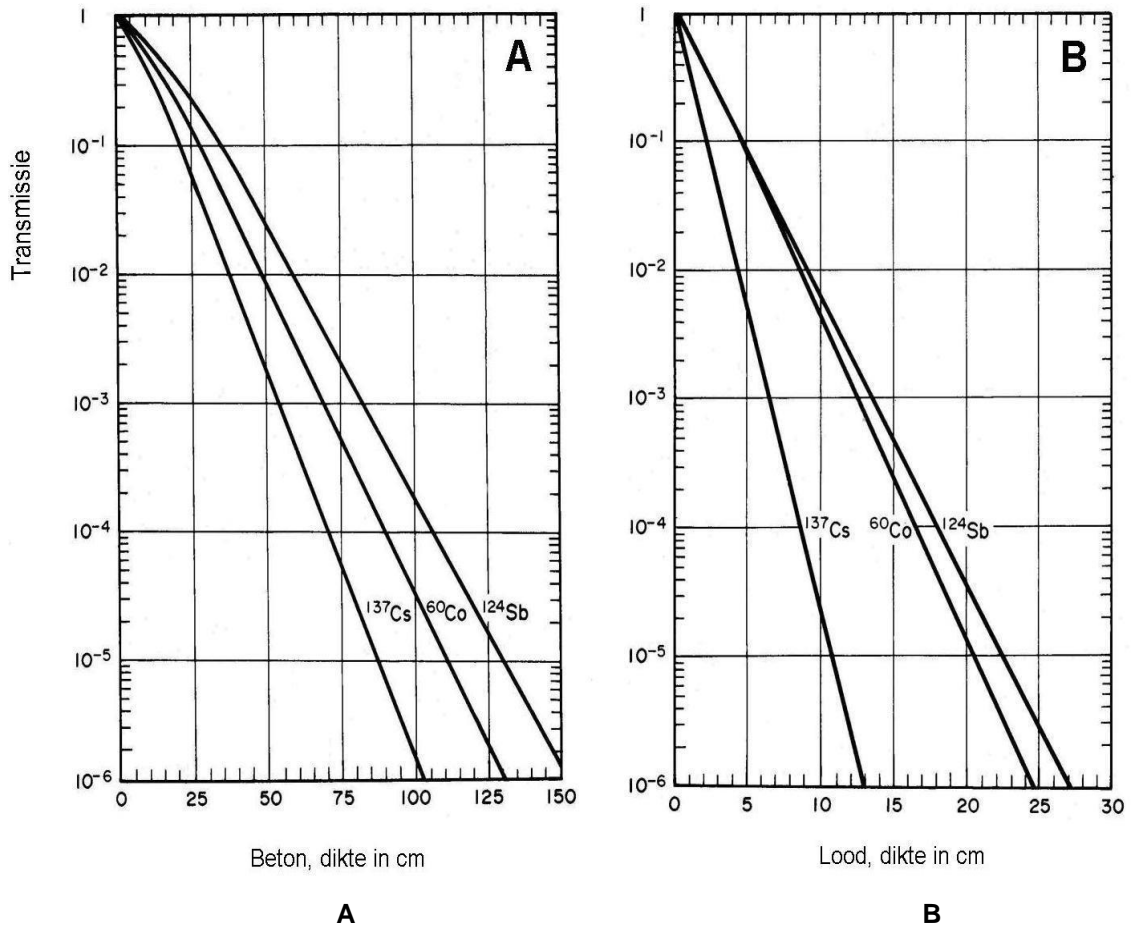
$E_{\beta, \max}$ = de maximale energie van de β -deeltjes [MeV]

ρ = de soortelijke dichtheid van de materie [g/cm^3].

Voor het tegenhouden van β -deeltjes van ^{90}Y met aluminium ($\rho = 2,7 \text{ g}/\text{cm}^3$) is een dikte van 0,43 cm (= 4,3 mm) nodig. De meest gangbare β -stralers kunnen volledig afgeschermd worden met 5 mm aluminium. Ook 1 cm perspex ($\rho = 1,2 \text{ g}/\text{cm}^3$) voldoet goed; perspex lijkt qua samenstelling erg op weefsel en wordt daarom 'weefselequivalent' genoemd. Voor de afscherming van β -straling zijn materialen met zware kernen zoals lood niet zo geschikt, omdat er dan remstraling geproduceerd wordt. Bij de afscherming van β^+ -stralers moet ook rekening gehouden worden met het annihilatieproces (zie paragraaf 0): rond β -bronnen wordt daarom vaak een eerste mantel van perspex gebruikt waardoor alle β -straling wordt gestopt, met daaromheen een laagje lood voor de afscherming van remstraling en annihilatiefotonen.

Verzwakking van fotonen

De dracht van α - en β -deeltjes kent een maximale waarde, die afhankelijk is van hun energie en de eigenschappen van de materie waarin ze zich voortbewegen. Voor fotonen geldt dat niet: bij benadering neemt de intensiteit van γ -straling exponentieel af met de afstand. De mate van verzwakking is afhankelijk van de fotonenergie en de eigenschappen van het absorptiemateriaal. Als praktische maat voor de verzwakking wordt vaak de halveringsdikte, $d_{1/2}$ genomen. Voor fotonen van 1 MeV varieert de halveringsdikte van 10 mm (lood) tot 100 mm (water). Beton zit daar met 50 mm tussenin. Merk op dat voor een verzwakking van een factor 1000 zeker 10 halveringsdiktes nodig zijn. Bij gebruik van beton wordt dat dus een muur van een halve meter dik! Hierbij is geen rekening gehouden met build-up.



Figuur S1.6 Transmissie van brede bundels γ -straling van respectievelijk ^{137}Cs , ^{60}Co en ^{124}Sb door beton (A) en lood (B) [ICRP82]

De verzwakking van fotonen gaat beter bij fotonen met een lage energie, ofwel de fotonen met lage energie verzwakken sneller. Bij toepassing van een halveringsdikte zal de gemiddelde energie van de uittredende fotonen daarom hoger zijn, met als gevolg dat voor elke volgende halvering van de fotonenstroom de benodigde halveringsdikte toeneemt. Voor de bepaling van de gewenste afscherming van γ -straling wordt gebruikgemaakt van transmissiegrafieken of tabellen. Figuur S1.6A toont de afscherming van beton voor γ -straling van ^{137}Cs , ^{60}Co en ^{124}Sb als functie van de dikte van het afschermingsmateriaal beton. Figuur S1.6B laat hetzelfde zien voor lood.

Voor afscherming van zware γ -stralingsbronnen wordt meestal lood gebruikt. In de *Radionuclidentabel* is de halveringsdikte van lood gegeven. Hierin is duidelijk te zien dat de hoeveelheid afscherming die nodig is, afhankelijk is van de hardheid van de γ -straling. Hoe harder de straling is, dus hoe hoger de energie van de γ 's is, hoe meer afscherming er nodig is.

Een gangbare ^{192}Ir -bron voor gammagrafie weegt inclusief collimator (bundelrichter) en afscherming nog geen 20 kg, maar bij een ^{60}Co -bron bedraagt de totale massa al gauw zo'n 200 kg. Voor de afscherming van een 67 TBq ingekapselde $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ -bron (in gebruik bij een Nederlandse bloedbank) wordt 1200 kg lood gebruikt. Het bronmateriaal zelf weegt maar enkele tientallen grammen.

In formulevorm

De verzwakking van fotonen verloopt bij benadering exponentieel:

$$\Phi(z) = \Phi_0 \exp(-\mu z)$$

Met: z = indringdiepte

$\Phi(z)$ = het aantal passerende fotonen op indringdiepte z

Φ_0 = het aantal passerende fotonen op indringdiepte 0

μ = de zogenaamde lineïeke verzwakkingscoëfficiënt.

$\exp(-\mu z)$ = de transmissiefactor.

Deze formule geldt voor een zogenaamde 'smalle bundel geometrie'. In de praktijk komen deze 'smalle bundel geometrieën' echter weinig voor, en moet ook rekening gehouden worden met de verstrooiing van fotonen ofwel build-up (zie voor uitleg het kader *Indirect ioniserende straling* onder het kopje *Verstrooiing van fotonen*).

Het verband tussen de halveringsdikte en de lineïeke verzwakkingscoëfficiënt (dat heel veel lijkt op het verband tussen $T_{1/2}$ en λ) luidt als volgt:

$$\Phi(d_{1/2}) = \Phi_0 \exp(-\mu d_{1/2}) = 0,5 \Phi_0 \Rightarrow \exp(-\mu d_{1/2}) = 0,5 \Rightarrow d_{1/2} = \ln 2 / \mu$$

De halveringsdikte en lineïeke verzwakkingscoëfficiënt zijn afhankelijk van de foton-energie en de eigenschappen van het absorptiemateriaal.

1.4 Vervalreeksen en emissiewaarschijnlijkheid

Vervalreeksen

Als het vervalproduct van een radionuclide zelf ook weer radioactief is, spreken we van een vervalreeks. De eerste radionuclide wordt dan de moeder (index m) genoemd, en de tweede de dochter (index d).

In de natuur komen zeer ingewikkelde vervalreeksen voor, die uit 10 tot 20 radionucliden bestaan. De belangrijkste is de uraniumreeks $^{238}\text{U}^*$. Het verval verloopt via ^{234}Th naar achtereenvolgens ^{234}Pa , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{210}Po en uiteindelijk tot het stabiele ^{206}Pb .

De belangrijkste radionucliden zijn:

- > ^{238}U ($T_{1/2} = 4,5$ miljard jaar)
- > ^{226}Ra ($T_{1/2} = 1600$ jaar)
- > het gasvormige ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,8$ dagen)
- > de kortlevende dochters:
 ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi en ^{214}Po
- > ^{206}Pb (stabiel lood).

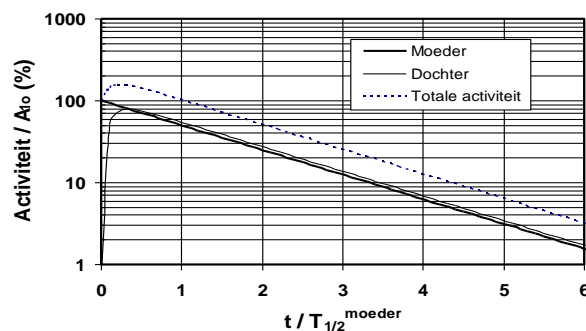
Radon (^{222}Rn) en de kortlevende dochterproducten daarvan leveren het grootste aandeel aan de stralingsbelasting van de mens (zie paragraaf 3.3), uitgezonderd de medische toepassingen. Andere natuurlijke reeksen zijn de thoriumreeks ($^{232}\text{Th} - ^{208}\text{Pb}$) en de actiniumreeks ($^{235}\text{U} - ^{207}\text{Pb}$). Het sterretje achter de nuclidenaam geeft aan dat naast de moedernuclide ook alle vervalproducten in beschouwing worden genomen.

Dochter vervalt sneller

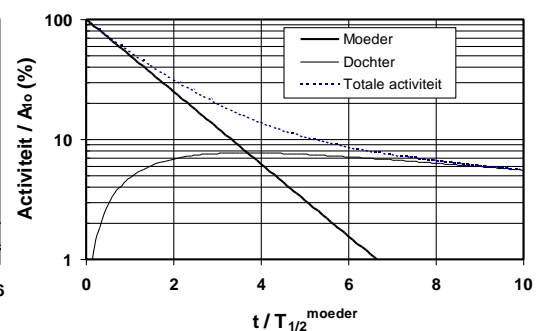
Als de dochter sneller vervalt dan de moeder ($T_{1/2}^d < T_{1/2}^m$), ontstaat na verloop van tijd een evenwicht: na een periode van ingroei volgt de dochter het verval van de moeder. De activiteiten van moeder en dochter zijn dan vrijwel gelijk (zie Figuur S1.7, let op de logaritmische schaal van de y-as waardoor de exponentiele afname een rechte lijn wordt). Dat is bijvoorbeeld het geval bij de reeks ^{99}Mo ($T_{1/2} = 66,0$ uur) en $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ($T_{1/2} = 6$ uur). Als de vervaltijd van de dochter veel sneller is dan van de moeder ($T_{1/2}^d \ll T_{1/2}^m$), dan zijn de activiteiten van moeder en dochter na verloop van tijd precies gelijk. Dat is het geval bij de reeks ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28,5$ jaar) / ^{90}Y ($T_{1/2} = 64,1$ uur).

Dochter vervalt langzamer

Vervalt de dochter langzamer dan de moeder ($T_{1/2}^d > T_{1/2}^m$), dan is op een bepaald moment de moeder vervallen. De dochter vervalt vervolgens als een opzichzelfstaande radionuclide (zie Figuur S1.8). De totale activiteit is dan gelijk aan de dochteractiviteit. Er ontstaat dus geen evenwicht.



Figuur S1.7 Moeder en dochter in evenwicht



Figuur S1.8 Moeder en dochter *niet* in evenwicht

Radioactief verval in formule

Wanneer één radioactieve atoomkern vervalt is niet bekend, maar voor een grote groep gelijke radionucliden geldt dat het aantal atomen dat per tijdseenheid vervalt altijd een vast 'percentage' is van het (nog) aanwezige aantal radionucliden. Wiskundig kan dat als volgt geschreven worden:

$$\frac{dn}{dt} = -\lambda n$$

met: $\frac{dn}{dt}$ = het aantal atomen dat per tijdseenheid vervalt

n = het aantal radionucliden

λ = de zogenaamde vervalconstante [s^{-1}]; deze vervalconstante is voor elk radionuclide anders.

De oplossing van deze differentiaalvergelijking is:

$$n(t) = n_0 \exp(-\lambda t)$$

met: $n(t)$ = het aantal radionucliden op tijdstip t

n_0 = het aantal radionucliden op tijdstip $t = 0$.

Het aantal radionucliden neemt dus exponentieel af met de tijd.

De activiteit A van een bepaalde stof is gedefinieerd als het aantal atomen in die hoeveelheid materie die per seconde spontaan verval, ofwel:

$$A = \lambda n$$

Radioactiviteit heeft als eenheid becquerel [Bq]. De activiteit van een verzameling radionucliden neemt dus ook exponentieel af, volgens:

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda t)$$

met: $A(t) (= \lambda n) =$ de activiteit op tijdstip t

$$A_0 (= \lambda n_0) = \text{de activiteit op tijdstip } t = 0.$$

Voor het verband tussen de halfwaardetijd ($T_{1/2}$) en de vervalconstante (λ) vullen we in bovenstaande formule voor $t = T_{1/2}$ in:

$$A(T_{1/2}) = A_0 \exp(-\lambda T_{1/2}) = 1/2 \times A_0 \Rightarrow \exp(-\lambda T_{1/2}) = 1/2 \Rightarrow T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

Om die reden wordt in de praktijk voor het berekenen van de activiteit de volgende formule gehanteerd:

$$A(t) = A_0 \times (1/2)^N \quad \text{met: } N = \text{het aantal halveringstijden}$$

Ofwel:

$$A(t) = A_0 \times 1/2^{(t / T_{1/2})}$$

In een vervalreeks verloopt het verval van de moeder zoals boven beschreven, maar bij het verval van de dochter vinden we nu een extra term die de ingroei beschrijft:

$$\text{moeder:} \quad dn_m / dt = -\lambda_m n_m$$

$$\text{dochter:} \quad dn_d / dt = \lambda_m n_m \quad - \quad \lambda_d n_d$$

ingroei vanuit de moeder verval van de dochter

Het oplossen van de differentiaalvergelijking voor het verval van de moeder en invullen van de formules $A_m = \lambda_m n_m$ en $A_d = \lambda_d n_d$, geeft onderstaande formule voor de activiteit van de dochter:

$$A_d(t) = [\lambda_d / (\lambda_d - \lambda_m)] A_{m,0} [(\exp(-\lambda_m t) - \exp(-\lambda_d t))] + A_{d,0} \exp(-\lambda_d t)$$

De laatste term (met $A_{d,0}$) heeft alleen een waarde als er op tijdstip $t = 0$ al enige dochteractiviteit aanwezig is.

Emissiewaarschijnlijkheid

Sommige radionucliden kunnen op verschillende manieren vervallen. De kansen op verval volgens de verschillende mogelijkheden zijn verschillend: dit wordt de emissiewaarschijnlijkheid, ook wel opbrengst genoemd. De afkorting hiervan is 'y' van het Engelse yield (verwar deze y niet met γ !). De som van alle emissiewaarschijnlijkheden is 100%. Radionucliden die op verschillende manieren kunnen vervallen, bijvoorbeeld 90% via β^+ -verval en 10% via α -verval, hebben op de Karlsruher Nuklidkarte dubbele kleuraanduidingen.

Voor incidentbestrijding is ^{137}Cs één van de belangrijkste radionucliden. Deze radionuclide vervalst met een halfwaardetijd van 30,2 jaar via β^- -verval, via twee vervalmogelijkheden:

- > 5,4% vervalst naar ^{137}Ba en zendt een β^- -deeltje uit met een maximale energie van 1,17 MeV: ^{137}Ba is stabiel.

- > 94,6% vervalft naar ^{137m}Ba en zendt een β^- -deeltje uit met een maximale energie van 0,5 MeV: ^{137m}Ba is niet stabiel. Binnen een paar minuten vervalft ^{137m}Ba naar ^{137}Ba : in 90% van dit verval wordt een foton uitgezonden met een energie van 662 keV. De halfwaardetijd is 2,55 min.

Deze vervalreeks van $^{137}\text{Cs}/^{137m}\text{Ba}$ is onlosmakelijk met elkaar verbonden; de γ -straling met een energie van 662 keV wordt vaak aan ^{137}Cs toegekend. ^{137}Cs en ^{137m}Ba raken snel met elkaar in evenwicht. Bij een emissiewaarschijnlijkheid van 100% zouden de activiteiten van moeder en dochter precies gelijk zijn aan elkaar, omdat $\lambda_d \gg \lambda_m$. De opbrengst van de moeder en dus van de dochter is in dit geval 94,6%. De overige 5,4% bestaat uit β^- -deeltjes met een maximale energie van 1,17 MeV. De gemiddelde energie van die β^- -deeltjes bedraagt ongeveer 0,4 MeV; E_{gem} is namelijk ongeveer $E_{\beta, \text{max}} / 3$.

Uitgewerkt voorbeeld

Vraag

^{137}Cs wordt meestal beschikbaar gesteld in de vorm van $^{137}\text{CsCl}$, een witte poederachtige substantie. Stel we hebben 1 gram van dat poeder. Hoeveel fotonen van 662 keV komen daaruit per seconde vrij?

Antwoord

Het massagetal van het molecuul $^{137}\text{CsCl}$ is 172,5 (137 + 35,5).

(Natuurlijk chloor heeft een isotopenverhouding van 75% ^{35}Cl en 25% ^{37}Cl .)

Eén gram bevat dus $N_A / 172,5 \approx 3,5 \times 10^{21}$ ^{137}Cs -deeltjes

met: N_A = het getal van Avogadro = $6,0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

De activiteit (A) van 1 gram volgt uit: $A = \lambda n$.

Met $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ en $T_{1/2} = 30 \text{ jaar} = 30 \times 365 \times 24 \times 3600 = 9,5 \times 10^8 \text{ sec}$.

Dus $A = (\ln 2 \times 3,5 \times 10^{21}) / 9,5 \times 10^8 \approx 2,5 \times 10^{12} \text{ Bq} = 2,5 \text{ TBq}$.

De waarschijnlijkheid op een foton van 662 keV is het product van de emissiewaarschijnlijkheid voor de overgang naar ^{137m}Ba (94,6%) en de emissiewaarschijnlijkheid voor een foton van 662 keV bij verval van ^{137m}Ba naar grondtoestand ^{137}Ba (90%). Dus de waarschijnlijkheid is ongeveer 0,85 ($0,946 \times 0,9$).

Dus 1 gram CsCl straalt per seconde ongeveer 2130 miljard fotonen van 662 keV uit. Daarnaast worden er nog vele β^- -deeltjes en andere fotonen uitgezonden.

2 Stralingsdosimetrie

Om de schadelijke invloed van straling op levende organismen te kunnen kwantificeren zijn er speciale grootheden gedefinieerd. Dit hoofdstuk beschrijft de belangrijkste.

Typen grootheden

In de stralingsdosimetrie wordt onderscheid gemaakt in drie typen grootheden: de basis-, limiterende en operationele grootheden. De basisgrootheden, zoals activiteit A en dosis D, zijn geschikt om natuurkundige processen te beschrijven, maar vormen niet altijd een goede maat voor de biologische schadelijkheid van straling. Dosislimieten en interventie-niveaus zijn vrijwel altijd uitgedrukt in limiterende grootheden; de belangrijkste zijn de equivalente dosis H_T en de effectieve dosis E. Limiterende grootheden zijn gedefinieerd in het menselijk lichaam en zijn daarom niet meetbaar. Limiterende grootheden moeten berekend worden. Daarom zijn er operationele grootheden gedefinieerd die wel meetbaar zijn. De belangrijkste is het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ die als (conservatieve) schatting gebruikt wordt voor de niet-meetbare limiterende grootheid effectieve dosis bij externe straling.

2.1 Basisgrootheden

2.1.1 Activiteit, A

De activiteit van een radioactieve bron is het aantal atomen dat per seconde vervalst. De eenheid van radioactiviteit is $[s^{-1}]$, Becquerel [Bq] genoemd naar de ontdekker van radioactiviteit (Henry Becquerel). Deze eenheid geeft het aantal deeltjes dat per seconde vervalst en daarbij ioniserende straling uitzendt. In totaliteit wordt de radioactiviteit bepaald door de hoeveelheid van de aanwezige radioactieve stof en de halfwaardetijd van de stof.

37 MBq Fosfor-32, betekent dat er elke seconde 37 miljoen atomen fosfor-32 vervallen waarbij tenminste 37 miljoen stralingsdeeltjes worden uitgezonden. Dus 37 MBq is de bronsterkte of activiteit van de 32-fosforbron.

Een indicatie voor de sterkte van bronnen:

MBq \approx hoeveelheid gebruikt in radionuclidenlaboratoria

GBq \approx hoeveelheid gebruikt in nucleaire geneeskunde

TBq \approx hoeveelheid gebruikt in bestralingsbronnen

PBq \approx hoeveelheid gebruikt in kernenergiecentrales.

Bronnen met een activiteit boven de 100 MBq behoren tot de zeer sterke bronnen.

In formulevorm

In Hoofdstuk 1 is uitgelegd dat het aantal atomen dat per tijdseenheid vervalst evenredig is met de hoeveelheid atomen n van de radioactieve stof, $A = \lambda n$.

De evenredigheidsconstante is de vervalconstante λ ($= \ln 2 / T_{1/2}$).

Verder is afgeleid dat: $A(t) = A_0 \times (1/2)^{(t / T_{1/2})}$.

Het aantal desintegraties wordt dus uitgedrukt in een tijdseenheid, meestal de seconde.

En $1 \text{ Bq} = 1$ desintegratie per seconde.

2.1.2 Geabsorbeerde Dosis, D

Ioniserende straling geeft haar energie af via interacties. Bij blootstelling aan ioniserende straling neemt het lichaam deze energie op, net zoals een lichaam warmte opneemt als iemand voor een kachel staat. De geabsorbeerde dosis is de hoeveelheid stralingsenergie die geabsorbeerd wordt door het lichaam, symbool: D. De geabsorbeerde dosis wordt weergegeven in Joule per kilogram. Hiervoor wordt de eenheid Gray (Gy) gebruikt. Dus $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

2.1.3 Dosistempo, \dot{D}

Niet alleen de totale dosis die een persoon op kan lopen is van belang, maar ook binnen welke tijdsduur iemand een bepaalde dosis oploopt. Dit is dus de geabsorbeerde dosis per tijdseenheid, ook wel dosistempo genoemd. Het dosistempo wordt uitgedrukt in Gray per uur [Gy/u] en aangeduid met een 'stip' boven de D. Omdat dosistempo's meestal laag zijn, worden zij vaak in milliGray (duizendste Gy) of microGray (miljoenste Gy) weergegeven; de eenheid wordt dan mGy/u of $\mu\text{Gy/u}$. Vaak wordt voor uur ook het Engelse hour gebruikt. De schrijfwijze wordt dan mGy/hr en $\mu\text{Gy/hr}$ of mGy/h en $\mu\text{Gy/h}$.

Voorbeeld: iemand die 30 minuten werkt in een omgeving waar op het werkpunt een dosistempo van 100 mGy/u wordt waargenomen, wordt blootgesteld aan een dosis van 50 mGy. En na een uur is dit 100 mGy. Hoe korter iemand in de omgeving blijft, hoe lager de stralingsdosis.

2.2 Limiterende grootheden

2.2.1 Effectieve dosis en weegfactoren

Het effect van ioniserende straling op het lichaam is afhankelijk van het soort straling dat wordt geabsorbeerd, maar ook van het soort weefsel dat de straling absorbeert. Het ene weefsel is gevoeliger dan het andere en het ene type straling is schadelijker dan het andere. Grofweg kan gesteld worden dat α -straling 20 keer schadelijker is dan β - en γ -straling. Om de schade voor verschillende stralings- en weefselsoorten met elkaar te kunnen vergelijken wordt deze uitgedrukt in de effectieve dosis. Deze wordt berekend met weegfactoren.

Er wordt onderscheid gemaakt in stralingsweegfactoren (w_R , met de R van 'radiation' of straling) en weefselweegfactoren (w_T , met de T van tissue of weefsel); de stralingsweegfactor is een maat voor de schadelijkheid van de straling en de weefselweegfactor voor de gevoeligheid van het bestraalde weefsel (zie Tabel 2.1). De weegfactoren zijn dimensieloos; ze hebben geen eenheid.

De effectieve dosis kan in een aantal stappen worden afgeleid.

Stap 1 is het bepalen van de orgaandosis D_T . De orgaandosis wordt gebruikt om de schadelijkheid in te kunnen schatten van straling in een bepaald orgaan of weefsel, zoals de dikke darm of de huid. De orgaandosis is de hoeveelheid straling die in een orgaan of weefsel geabsorbeerd is, gedeeld door de massa van het bestraalde orgaan of weefsel. De eenheid van orgaandosis is $\text{J/kg} = \text{Gy}$.

Stap 2 brengt de schadelijkheid van de straling in rekening door het berekenen van de equivalente orgaandosis, H_T . Dit is de orgaandosis D_T vermenigvuldigd met de stralingsweefactor w_R . De eenheid is Sievert [Sv]. Omdat de stralingsweefactor dimensieloos is, geldt $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$.

Equivalente dosis, H_T

Bij het bepalen van H_T wordt rekening gehouden met verschillende typen straling, R. De equivalente dosis wordt berekend volgens:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

Hebben we bijvoorbeeld tegelijkertijd te maken met α - en γ -straling, dan wordt de orgaandosis door α -straling vermenigvuldigd met 20, en die door γ -straling met 1, en de resultaten worden opgeteld. Is er alleen maar β - en γ -straling aanwezig (en dat is vaak het geval), dan is de equivalente dosis, H_T , gelijk aan de orgaandosis, D_T . Een uitgebreid overzicht van stralingsweefactoren is opgenomen in Tabel S2.1.

Dosisgrootheden die volgens hun definitie op een of andere manier de biologische schadelijkheid van straling in rekening brengen, worden uitgedrukt Sievert [Sv].

De eenheid Sv is beperkt tot stralingsbeschermingsdoeleinden en mag alleen worden toegepast voor een lage dosis ($E < 100 \text{ mSv}$), bijvoorbeeld een dosis die tijdens normale werkzaamheden wordt ontvangen.

Dosis (D) is een meetbare grootheid, maar geen goede maat voor de biologische schadelijkheid van straling. Het relatief biologische effect van een soort ioniserende straling voor een bepaald effect is de verhouding van de dosis röntgen- of γ -straling die nodig is voor dit effect en de dosis van de soort ioniserende straling in kwestie die nodig is voor hetzelfde effect.

Stap 3 brengt de gevoeligheid van het bestraalde orgaan of weefsel in rekening; de equivalente orgaandosis H_T wordt vermenigvuldigd met de weefselweefactor w_T . Zo wordt een indicatie verkregen van de biologische schade aan het bestraalde orgaan of weefsel. De factor w_T geeft

Tabel 2.1 Stralings- en weefselweefactoren (Bbs, 2017)

straling	stralingsweefactor w_R
α -deeltjes	20
β -deeltjes	1
γ -straling	1
weefsel of orgaan T	weefselweefactor w_T voor elk orgaan:
1. rood beenmerg	0,12
2. dikke darm	0,12
3. longen	0,12
4. maag	0,12
5. borstweefsel	0,12
6. overige weefsels/organen	0,12
1. geslachtsorganen	0,08
1. blaas	0,04
2. lever	0,04
3. slokdarm	0,04
4. schildklier	0,04
1. huid	0,01
2. botoppervlak	0,01
3. hersenen	0,01
4. speekselklieren	0,01
TOTAAL	1,00

Tabel S2.2 Uitgebreid overzicht van stralingsweefactoren

straling	stralingsweefactor w_R
α -deeltjes, splijtingsfragmenten, zware kernen	20
β -deeltjes, alle energieën	1
γ -straling, röntgen	1
Neutronen	
$E_n < 1 \text{ MeV}$	$2,5+18,2 \exp(-\ln(E_n)^2 / 6)$
$E_n = 1 \dots 50 \text{ MeV}$	$5,0+17,0 \exp(-\ln(2E_n)^2 / 6)$
$E_n > 50 \text{ MeV}$	$2,5+3,25 \exp(-\ln(0,04E_n)^2 / 6)$
protonen	2

de relatieve bijdrage van weefsel T aan het totale risico wanneer het gehele lichaam wordt blootgesteld aan het stralingsveld.

Stap 4 is het berekenen van de effectieve dosis E. Dit is de totale dosis opgelopen over het hele lichaam, dus voor alle weefsels en organen en alle stralingssoorten. De effectieve dosis E is dus $E = w_T \times H_T = w_T \times w_R \times D_T$ opgeteld voor alle weefsels en organen.

De effectieve dosis geeft eigenlijk het gewogen effect van alle ioniserende straling op het hele lichaam weer. De effectieve dosis wordt net als de dosis uitgedrukt in de stralings-energie (Joule) per kilogram. De eenheid voor de effectieve dosis is de Sievert [Sv].

Voorbeeld: iemand wordt bestraald op de lever met een gemiddelde dosis van 8 Gy γ -straling. De stralingsweegfactor (w_R) voor γ -straling is 1 en de weefselweegfactor (w_T) voor de lever is 0,04. Dus de equivalente dosis $H_T = 8$ Sv ($= w_R \times D_T = 1 \times 8$) en de effectieve dosis E is na toepassing van de weegfactoren: $E = 0,04 \times 8 = 0,32$ Sv ($= w_T \times w_R \times D_T$). Daarna wordt een borstfoto gemaakt waarbij de longen, borsten en schildklier een equivalente dosis van 1 mSv ontvangen. De effectieve dosis voor de borstfoto is dan: $E = w_{\text{long}} \times 1 \text{ mSv} + w_{\text{borstweefsel}} \times 1 \text{ mSv} + w_{\text{schildklier}} \times 1 \text{ mSv} = 0,12 \times 1 + 0,12 \times 1 + 0,04 \times 1 = 0,28$ mSv.

Effectieve dosis, E

In formulevorm is de effectieve dosis, E, dus:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

Bij de laatste uitdrukking is voor H_T de definitie van equivalente dosis ingevuld.

Equivalente volg dosis, $H_T(\tau)$

Nadat een radioactieve stof in het lichaam terecht is gekomen (inwendige besmetting, zie hiervoor Hoofdstuk 5), treedt langdurige bestraling van binnenuit plaats. Om gezondheidsschade door inwendige besmetting te kunnen bepalen is de equivalente volg dosis gedefinieerd. De equivalente volg dosis, $H_T(\tau)$ is de totale equivalente dosis die gedurende een periode τ wordt opgelopen. De periode waarover dit wordt berekend is 70 jaar voor kinderen en 50 jaar voor volwassenen. De equivalente volg dosis wordt uitgedrukt in Sievert [Sv].

Effectieve volg dosis, $E(\tau)$

De effectieve volg dosis, $E(\tau)$ is op dezelfde manier als de effectieve dosis gedefinieerd:

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau)$$

Zowel effectieve dosis E als effectieve volg dosis $E(\tau)$ worden uitgedrukt in [Sv]. Om de effectieve volg dosis te kunnen berekenen moet het metabolisme (het gedrag van de stof in het lichaam) van de ingenomen radioactieve stof bekend zijn. Hiervoor zijn dosisconversiecoëfficiënten e_{50} bepaald. Deze zijn afhankelijk van de radionuclide, de deeltjesgrootte, de chemische vorm waarin de radionuclide zich bevindt en de leeftijd van de blootgestelde. In Nederland wordt voor e_{50} ook wel de afkorting DCC gebruikt. De effectieve volg dosis is dan simpelweg het product van de ingenomen activiteit [Bq] en de bijbehorende e_{50} [Sv/Bq]. Deze dosisconversiecoëfficiënten zijn opgenomen in de *Radionuclidentabel*.

De e_{50} 's zijn afgeleid door de ICRP³. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen werknemers en leden van de bevolking. Voor stralingsbescherming bij incidenten waarbij niet alle gegevens bekend zijn, is het advies om de meest conservatieve (dus grootste) e_{50} te nemen.

In de stralingsbescherming wordt de effectieve volg dosis in zijn geheel toegekend aan het moment (of jaar) van inname. Voor het toepassen van de stralingslimieten is er dan geen onderscheid tussen effectieve dosis en effectieve volg dosis. Dit speelt vooral een rol bij een inwendige besmetting: in de berekeningen wordt gerekend met een acute bestraling, terwijl inwendige besmetting zorgt voor een langdurige bestraling.

De effectieve dosis is een praktisch hanteerbare maat om de kans op het ontstaan van kanker (dit wordt een stochastisch effect genoemd; zie voor uitleg paragraaf 4.2) door blootstelling aan straling uit te drukken: in deze grootheid worden de specifieke eigenschappen van alle typen straling en alle weefsels en organen meegenomen. Een aantal belangrijke interventieniveaus en dosis limieten voor hulpverleners wordt dan ook in effectieve dosis uitgedrukt. In één getal wordt de totale stralingsbelasting van het lichaam uitgedrukt, die bestaat uit:

- > externe bestraling met verschillende stralingssoorten
- > inhalatie van verschillende radionucliden
- > ingestie van verschillende radionucliden
- > besmetting van de huid met verschillende radionucliden.

Let op: het gaat om de kans op stochastische effecten; deze grootheid is niet bedoeld als maat voor deterministische gezondheidseffecten (zie voor nadere uitleg Hoofdstuk 4).

Omdat in de totale effectieve dosis alle risico's op stochastische effecten meegenomen zijn, kan de effectieve dosis (in Sv) vertaald worden naar de kans op een effect. Voor volwassen werknemers is de kanscoëfficiënt voor het totale detriment door straling $0,042 \text{ Sv}^{-1}$ [ICRP103]. Het detriment is hier gedefinieerd als de gevolgen voor de gezondheid ten gevolge van schadelijke stochastische effecten (fatale en niet-fatale kankers, erfelijke effecten) van blootstellingen aan lage doses en lage dosistempo's (ioniserende) straling. Het detriment houdt rekening met de waarschijnlijkheid van optreden en de ernst (letaliteit, levenskwaliteit, verloren levensjaren) van deze effecten. Het aandeel van de erfelijke effecten in het risicogetal is klein ($0.1\%/Sv$). Hoewel het risicogetal eigenlijk niet op individuen mag worden toegepast, is het interessant om toch eens een individuele risicoschatting uit te voeren. Als een hulpverlener tijdens een interventie een effectieve dosis oploopt van 50 mSv , loopt hij een extra risico van 1 op 400 ($0,25\%$) om gedurende de rest van leven een fatale of niet-fatale kanker te ontwikkelen. Het aandeel fatale kankers is hierin ongeveer 80% .

Radiotoxiciteitsklassen

De mate waarin een radioactieve stof gezondheidsschadelijke effecten kan veroorzaken wordt aangegeven met de radiotoxiciteitsklasse. Deze klasse-indeling is gebaseerd op het gevaar van inhalatie van de radionuclide. De indeling loopt van zeer hoog (klasse 1), hoog (klasse 2), normaal (klasse 3) naar laag (klasse 4).

³ Uitgegeven in ICRP Publication 119 Corrigenda. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP 60. Ann. ICRP 41 (Suppl.)

2.3 Operationele grootheden

Te meten grootheden

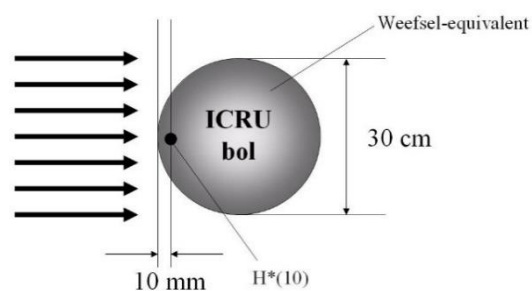
De effectieve dosis is niet direct te meten, maar wordt bepaald door optelling van blootstelling via verschillende paden. Deze kan wel worden afgeleid uit metingen van andere grootheden en andere informatie:

- > De externe-stralingsbijdrage E_{Ext} aan de effectieve dosis kan worden geschat aan de hand van de meetbare grootheid omgevingsdosisequivalent, $H^*(10)$.
- > De inhalatiebijdrage E_{Inh} levert tijdens het overtrekken van een radioactieve wolk veruit de grootste bijdrage aan de effectieve dosis. Om deze bijdrage te kunnen bepalen moet de concentratie van de verschillende radioactieve stoffen in de lucht bekend zijn (nuclidespecifieke metingen).
- > Ook de ingestiebijdrage E_{Ing} van radioactief materiaal telt mee in de effectieve dosis, maar dit indirecte blootstellingspad zal pas in latere fasen na het vrijkomen of overtrekken van een radioactieve wolk een rol spelen.

Als input hiervoor zijn operationele grootheden gedefinieerd die wel meetbaar zijn. De belangrijkste worden hieronder behandeld.

Omgevingsdosisequivalent, $H^*(10)$

Het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ is de equivalente dosis die bij een evenwijdig stralingsveld aanwezig is op 10 mm diepte in een weefsel-equivalente bol (de zogenaamde ICRU-bol). Figuur S2.1 toont de ICRU-bol; dit is een simpele versie van een menselijk fantoom. De punt in de figuur ligt op 10 mm diepte en is een maat voor de gemiddelde ligging van organen.



Figuur S2.1 ICRU-bol en definitie van $H^*(10)$

Het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ wordt toegepast als schatting van de effectieve dosis. De relatie tussen deze twee hangt af van de precieze stralingsveldgeometrie. $H^*(10)$ is eigenlijk gedefinieerd voor de situatie dat iemand van voor naar achteren doorstraald wordt door een vrijwel vlakke stralingsbundel; dit wordt de AP-geometrie (van anterior-posterior) genoemd. Een AP-geometrie geldt bijvoorbeeld als iemand kijkt in de richting van een op afstand geplaatste stralingsbron. De werkelijke effectieve dosis, E_{AP} , is in deze situatie voor fotonen met energieën boven 70 keV⁴ ongeveer 80 à 90% van $H^*(10)$. De overschatting van de effectieve dosis bij een AP-geometrie is door het toepassen van $H^*(10)$ dus ongeveer 15% in het relevante gedeelte van het spectrum.

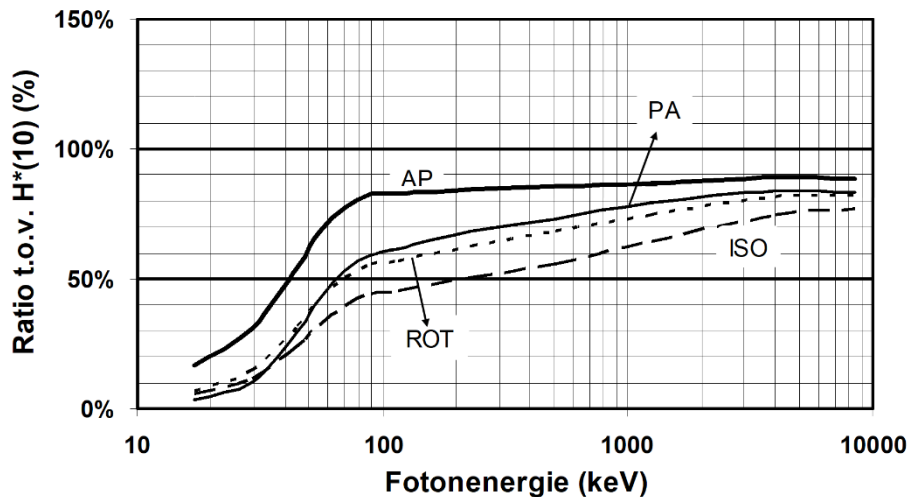
Als iemand door dezelfde bundel van achteren wordt bestraald (PA-geometrie), dan liggen de meest gevoelige organen dieper in het lichaam. Dit maakt dat de effectieve dosis, E_{PA} , minder groot is. $H^*(10)$ overschat E_{PA} met zo'n 75% voor fotonen met energieën van 70 keV tot een kleine 20% bij 10 MeV. Voor een stralingsveld dat in een horizontaal vlak ligt en gelijkmatig uit alle richtingen komt, geldt ongeveer hetzelfde; dit wordt de ROT-

⁴ Fotonen met een energie lager dan 70 keV dragen maar weinig bij aan de effectieve dosis; dit gebied is dus minder relevant.

geometrie (van rotatie-invariant) genoemd. Dit is bijvoorbeeld het geval als de bodem na een stralingsincident egaal besmet is met radioactiviteit.

Als de straling in gelijke mate van alle kanten komt (dus ook van boven en beneden), is sprake van ISO-geometrie (van isotroop). Dit geldt bijvoorbeeld voor iemand die zich in een radioactieve wolk bevindt. Bij een ISO-geometrie overschat $H^*(10)$ de effectieve dosis, E_{ISO} , het meest. Bij 70 keV is die overschatting een factor $2\frac{1}{2}$ en bij 10 MeV ongeveer 25%.

In Figuur S2.2 is voor de vier genoemde veldgeometrieën het verband tussen $H^*(10)$ en de effectieve dosis grafisch weergegeven als functie van de fotonenergie.



Figuur S2.2 Verhouding tussen effectieve dosis en $H^*(10)$ voor de veldgeometrieën AP, PA, ISO en ROT als functie van de fotonenergie.

Persoonsdosisequivalent $H_p(d)$

De persoonsdosisequivalent $H_p(d)$ is het dosisequivalent gemeten op d mm diepte (meestal $d = 10$ mm) in zacht weefsel onder een bepaald punt van een menselijk lichaam. Voor organen die dieper in het lichaam liggen dan 10 mm wordt de effectieve dosis onder normale omstandigheden enigszins overschat door de persoonsdosis. In de praktijk wordt de persoonsdosis vergeleken met de stralingslimieten.

$H_p(d)$ kan worden benaderd met een meetapparaat op het lichaam of via een meting met de Automess 6150AD1 (zie paragraaf 7.1.1). Deze laatste geeft een goede schatting van de op te lopen dosis. De afwijking tussen meetresultaat en effectieve dosis is maximaal 35%; het meetresultaat onderschat de effectieve dosis en is dus maximaal 35% te laag. De mate van onderschatting is afhankelijk van de energie van de gemeten straling en van het wel of niet gebruiken van externe sondes.

2.3.1 Kwadratenwet

Ioniserende straling verspreidt zich bolvormig, net als licht, warmte, etc. Dit betekent dat eenzelfde hoeveelheid straling zich verdeelt over een oppervlakte die evenredig is met het kwadraat van de afstand tot een puntbron. Dit is de zogenaamde kwadratenwet, zie

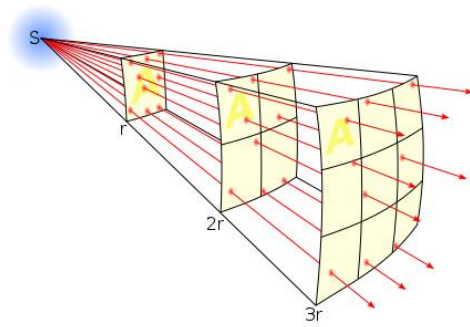
Figuur 2.1. Deze wet zegt dus dat met het vergroten van de afstand de stralingsdosis kwadratisch afneemt.

Dus:

$$D_1 \times r_1^2 = D_2 \times r_2^2$$

Met: D_1 = gemeten dosis (of dosistempo) op afstand r_1 van de bron

D_2 = gemeten dosis (of dosistempo) op afstand r_2 van de bron.



Figuur 2.1 Bolvormige verspreiding van straling: kwadratenwet

Tweemaal verder weg ($r_2 = 2 \times r_1$) geeft een viermaal zwakkere uitstraling per oppervlak. Driemaal verder weg ($r_2 = 3 \times r_1$) geeft een negenmaal zwakkere uitstraling per oppervlak (in Figuur 2.1 blijft het aantal lijnen gelijk). Dus als iemand in plaats van op 1 meter op 2 meter gaat staan, dan wordt de afstand 2x zo groot en wordt de dosis 2×2 is 4 maal zo laag.

Let op: de kwadratenwet geldt voor puntbronnen, dus stralingsbronnen met een afmeting die erg klein is ten opzichte van de afstand r . Bij een grote oppervlaktebesmetting, bijvoorbeeld na een kernramp, geldt deze regel niet.

Voorbeeld

Stel je hebt te maken met een onafgeschermd bron van iridium-192. De activiteit van de bron is 1 TBq (Tera = 10^{12}). Op 1 meter afstand bedraagt het dosistempo 140 mSv per uur. Op 2 meter afstand is het dosistempo met een factor $2^2 = 4$ afgenomen tot 35 mSv per uur. Op 10 meter afstand is het dosistempo een factor $10^2 = 100$ lager. In een onbekende situatie is het dan ook verstandig om het dosistempo op ruime afstand te meten, en dan via de kwadratenregel het dosistempo op kortere afstand in te schatten.

In Tabel 2.3 is de kwadratenwet toegepast voor het berekenen van de maximale tijd voor de inzet van hulpverleners. De tabel gaat uit van een maximaal op te lopen dosis van 2 mSv en een alarmniveau van $25 \mu\text{Sv/u}$. De brandweer hanteert een dosisbeperking van 2 mSv voor een operationele inzet onder leiding van een bevelvoerder.

Tabel 2.3 Berekenende maximale inzettijd op een bepaalde afstand tot de bron met kwadratenwet

Afstand tot bron bij meten $25 \mu\text{Sv/u}$	Inzettijd tot dosis 2 mSv bij een inzet op afstand tot de bron van:		
	1 meter	5 meter	10 meter
10 meter	48 min	20 uur	80 uur
20 meter	12 min	5 uur	20 uur
30 meter	5 min	132 min	9 uur
40 meter	3 min	75 min	5 uur

Stel er moet een inzet uitgevoerd worden op 1 meter van de bron en bij de verkenning is op 20 meter afstand van de bron het alarmniveau bereikt. Met de kwadratenwet kan uit-

gerekend worden dat de inzettijd op 1 meter van de bron dan 12 minuten bedraagt (zie rood-gearceerde cellen in de tabel).

De berekening ziet er als volgt uit: $D_1 = 25 \mu\text{Sv/u}$, $r_1 = 20$ meter, $r_2 = 1$ meter en D_2 wordt uitgerekend. Dus $25 \times 20^2 = D_2 \times 1^2 \Rightarrow D_2 = 25 \times 20^2 / 1^2 = 10.000 \mu\text{Sv/u} = 10 \text{ mSv/u}$. De maximaal op te lopen dosis is 2 mSv en wordt bereikt na $t = 2 / 10 = 0,2 \text{ u} = 0,2 \times 60 \text{ min/u} = 12$ minuten.

γ -stralingsbron

Een niet afgeschermd γ -stralingsbron met activiteit A levert op een afstand r een omgevingsdosis-equivalenttempo, $\dot{H}^*(10)$, van:

$$\dot{H}^*(10) \text{ (op afstand } r) = \Gamma_{H^*(10)} \times A/r^2$$

Met: $\Gamma_{H^*(10)}$ = de bronconstante in [$\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{u}$]
 A = de activiteit van de bron in [MBq]
 r = de afstand r van de bron in [m].

Deze formule laat zien dat het stralingsniveau kwadratisch afneemt met de afstand (zie de kwadratenwet). Elk radionuclide heeft een eigen bronconstante (zie de *Radionucliden-tabel*). Als onbekend is welke γ -straler aanwezig is, kan voor $\Gamma_{H^*(10)}$ als veilige waarde 0,5 ingevuld worden.

Bijvoorbeeld: bij een incident is een molybdeen/technetium-generator beschadigd geraakt. De activiteit is 90 GBq; dat betekent in dit geval dat 90 GBq ^{99}Mo in evenwicht is met $^{99\text{m}}\text{Tc}$. De bronconstante uit de nuclidetabel bevat de gesommeerde bronconstanten van ^{99}Mo en $^{99\text{m}}\text{Tc}$ in evenwicht. Zonder verdere afscherming bedraagt het dosistempo op 1 meter afstand:

$$\dot{H}^*(10) \text{ op 1 meter} = \Gamma_{H^*(10)} \times A/r^2 = 4,6 \times 10^{-2} \times 90 \times 10^3 / 1^2 = 4140 \mu\text{Sv/u}$$

En op 25 m (grens gevarengedebied, zie Tabel 8.):

$$\dot{H}^*(10) \text{ op 25 meter} = \Gamma_{H^*(10)} \times A/r^2 = 4,6 \times 10^{-2} \times 90 \times 10^3 / 25^2 = 6,6 \mu\text{Sv/u}$$

Of met de kwadratenwet: $4140 / 25^2 = 6,6 \mu\text{Sv/u}$.

β -stralingsbron

Het equivalente dosistempo van een β -bron kan ingeschat worden met de volgende vuistregel:

$$\dot{H}_T \text{ (op afstand } r) \approx 10 \times A/r^2 \quad \text{met: } r \ll \text{ de maximale dracht}$$

Met: \dot{H}_T = equivalente dosistempo in [$\mu\text{Sv/u}$]
 A = activiteit van de bron in [MBq]
 r = afstand r van de bron in [m]
en $E_\beta > 0,4 \text{ MeV}$.

Het bovenstaande geldt in benadering voor een puntbron die 1 bètadeeltje per desintegratie uitzendt en zonder verzwakking tussen bron en ontvanger. De afleiding geldt voor water of zacht weefsel. Indien personen worden blootgesteld dan gaat het hier om de lokale huiddosis; dat wil zeggen de equivalente dosis gemiddeld over 1 cm^2 huidoppervlak. De afstand tussen bron en ontvanger moet klein zijn ten opzichte van de dracht van de elektronen in lucht, zodat de elektronen nagenoeg ongeremd de huid binnendringen. Veel β -stralers geven ook γ -straling af. Ook kan er in het bronmateriaal

zelf remstraling ontstaan. De blootstelling aan deze vormen van straling moeten afzonderlijk in rekening worden gebracht.

α -stralingsbron

Een onbeschadigde gesloten α -bron levert geen gevaar op. Daarvoor is het doordringende vermogen van α -straling te gering. Ook bij een open bron is het gevaar beperkt, omdat de dracht van de α -deeltjes in lucht zeer gering is. Wel is er besmettingsgevaar door aanraking van de bron.

Berekening van de inhalatiedosis bij open bronnen met verspreiding in lucht

Wanneer verspreiding van radioactieve stoffen in lucht mogelijk is, dan bestaat er een risico op inname van radioactieve stoffen door inhalatie. De brandweer beschikt over onvoldoende middelen om de (potentiële) inhalatiedosis voor omstanders en onbeschermde hulpverleners precies in te kunnen schatten. Het Crisis Expert Team straling (CET straling en nucleair of CETsn) kan hierbij adviseren (zie *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Operationele handreiking, Operationele Netwerkaart*).

Voorbeeld luchtemissie radioactieve stoffen

Bij een brand in een opslagplaats voor radioactieve rookmelders gaan 1000 rookmelders in vlammen op. Elke rookmelder bevat 40 kBq aan ^{241}Am . Aangenomen wordt dat 3% van de radioactiviteit in de vorm van inhaleerbare deeltjes vrijkomt. In totaal is dat dus 1,2 MBq.

Uit verspreidingsberekeningen volgt dat op de locatie met de hoogste activiteitsconcentratie op leefniveau de tijdsgeïntegreerde concentratie ongeveer $0,01 \text{ Bq}\cdot\text{u}\cdot\text{m}^{-3}$ bedraagt. Omstanders (ademventilatievoud: ongeveer $1 \text{ m}^3/\text{u}$) die daar een uur staan kijken, ademen dus ongeveer 0,01 Bq aan ^{241}Am in. De e_{50}^{Inh} van ^{241}Am is $9,6 \times 10^{-5} \text{ Sv/Bq}$ (volwassenen uit het publiek). Uit deze berekening volgt dat de inhalatiedosis voor omstanders dus ten hoogste $1 \mu\text{Sv}$ bedraagt. Deze stralingsbelasting is verwaarloosbaar.

Voor het inschatten van de inhalatiedosis moet bekend zijn welke radionucliden er precies aanwezig zijn, en hoe de luchtactiviteitsconcentratie zich door de tijd heen ontwikkelt. Met de luchtactiviteitsconcentratie kan de vertaling gemaakt worden van ingenomen radioactiviteit naar effectieve (volg)dosis. In formulevorm:

$$E_{\text{Inh}} = A_{\text{Inh}} \times e_{50}^{\text{Inh}} = \{C_{\text{gem}} \times \Delta t\} \times V \times e_{50}^{\text{Inh}}$$

Met: A_{Inh} = de totale geïnhaleerde van activiteit [Bq]
 $\{C_{\text{gem}} \times \Delta t\}$ = de geïntegreerde luchtactiviteit [$\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$]; versimpeld voorgesteld
 C_{gem} = gemiddelde concentratie van de radioactieve stof in lucht [$\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$]
 Δt = de blootstellingstijd [u]
 V = het ademventilatievoud [m^3/u]; dit is afhankelijk van leeftijd, geslacht en inspanningsniveau. De ICRP hanteert voor:

- werknemers bij lichte werkzaamheden: $1,5 \text{ m}^3/\text{u}$
- werknemers bij zware inspanningen: $3 \text{ m}^3/\text{u}$
- 'rustig zitten' en 'slapen': $0,5 \text{ m}^3/\text{u}$
- voor omstanders geldt als vuistregel: $1 \text{ m}^3/\text{u}$

e_{50}^{Inh} = dosisconversiecoëfficiënt [Sv/Bq] (zie *Radionuclidentabel*).

Door de totale inname te vermenigvuldigen met de dosisconversiecoëfficiënt voor inhalatie (e_{50}^{Inh}), wordt de effectieve volgdosis bepaald.

Als bij een incident meerdere radionucliden vrijkomen, dan is de totale inhalatiedosis de som van de inhalatiedosis per radionuclide.

Bijvoorbeeld het incident met de beschadigde molybdeen/technetium-generator met een activiteit van 90 GBq. Alle afscherming is verdwenen en een deel van de inhoud is op de weg beland. Hierbij is 90 GBq ^{99}Mo in evenwicht met ^{99m}Tc en de e_{50}^{Inh} geldt voor de combinatie $^{99}Mo/^{99m}Tc$. De e_{50}^{Inh} voor de combinatie is: $1,0 \times 10^{-9}$ Sv/Bq. De effectieve (volg)dosis E die chauffeur heeft opgelopen als hij 0,01% van de activiteit heeft ingeademd bedraagt:

$$E_{Inh} = A_{Inh} \times e_{50}^{Inh} = 0,01\% \times 90 \times 10^9 \text{ Bq} \times 1 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq} = 9 \times 10^{-3} \text{ Sv} = 9 \text{ mSv}.$$

Berekening van de besmetting

Veronderstel dat de besmetting van de molybdeen-technetium-generator over een groot gebied homogeen is verspreid en 5 Bq/cm^2 bedraagt. De e_{Ext}^{bodem} voor deze combinatie is: $8,8 \times 10^{-5}$ Sv/j per Bq/cm^2 . De besmetting is 5 Bq/cm^2 . De effectieve dosis door de externe straling die door deze besmetting wordt veroorzaakt is dan:

$$E_{Ext}^{bodem} = 5 \times 8,8 \times 10^{-5} = 0,44 \text{ mSv/j}$$

Vuistregel voor het effectieve dosistempo

Vuistregel voor het effectieve dosistempo in $\mu\text{Sv/u}$ voor:

- > een puntvormige bron met een activiteit van A in [MBq]
- > een bron die per desintegratie één foton uitzendt
- > op 1 meter afstand van de bron.

De afscherming door lucht wordt verwaarloosd.

Voor een γ -bron ($E = 0,5\text{-}5 \text{ MeV}$):

$$E_{\gamma}(1\text{m}) \sim 1/8 A \times E \quad (= \text{Energie} = 0,5\text{-}5 \text{ MeV})$$

Een γ -bron met een activiteit van $A = 1 \text{ MBq}$ en energie $E_{\gamma} = 2 \text{ MeV}$:

- > $0,25 \mu\text{Sv/u}$ op 1 meter afstand van de bron
- > $1 \mu\text{Sv/u}$ op 50 cm afstand van de bron.

Vuistregel voor de bijdrage van de lokale huiddosis aan de effectieve dosis

Vuistregel voor het effectieve huiddosistempo in $\mu\text{Sv/u}$ voor:

- > een puntvormige bèta-bron met een activiteit van A in [MBq]
- > een energie van $E_{\beta} > 0,4 - 10 \text{ MeV}$
- > een bron die per desintegratie één bèta uitzendt.

De verzwakking door lucht wordt verwaarloosd ($r \ll \text{dracht}$).

Er geldt:

$$\dot{E}(r) \approx 10 \times (A / r^2) \times w_T \times \text{blootgesteld oppervlak} / \text{totale oppervlak}$$

Met: $\dot{E}(r)$ in [$\mu\text{Sv/u}$]

A : Activiteit van de bètabron in [MBq]

$w_T = 0,01$: de weefselweefactor voor huid

r : afstand van de receptor tot de bron in [m]

Blootgesteld oppervlak: het aan ioniserende straling blootgesteld huidoppervlak

in cm^2 (beperkt tot het UV-blootgestelde deel van het huidoppervlak)
Totale oppervlak: het totale aan UV blootgestelde huidoppervlak ($=3.000 \text{ cm}^2$).

Vermenigvuldigen van de lokale equivalente huiddosis H_T (paragraaf 2.3.1) ten gevolge van de bètabron met de weefselweegfactor ($w_T = 0,01$) en de fractie van het aan ioniserende straling blootgestelde huidoppervlak ten opzichte van het totale huidoppervlak levert de bijbehorende bijdrage aan de effectieve huiddosis.

Het blijkt dat een UV-blootgestelde huid een factor 1000 hogere gevoeligheid heeft voor de ontwikkeling van een basaalcelcarcinoom dan een niet-UV blootgestelde huid. Het aandeel van de niet-UV blootgestelde huid kan daarom worden verwaarloosd in de afleiding van de effectieve huiddosis. De totale UV-blootgestelde huid wordt op 3000 cm^2 geschat. Uiteraard is het aan ioniserende straling blootgestelde oppervlak van de huid in bovenstaande formule beperkt tot het UV-blootgestelde deel.

Voorbeeld:

Een β -bron met een activiteit van $A = 1 \text{ MBq}$, $E > 0,4 \text{ MeV}$ op 10 cm afstand bestraalt een onbedekt (UV-blootgesteld) deel van de huid van 100 cm^2 . De bijdrage van de huid aan de effectieve dosis is bij benadering:

$$\dot{E} \approx 10 \times 1 \times 0,01 \times 100 / ((0,1)^2 \times 3000) = 0,33 \text{ } \mu\text{Sv/u}$$

Andere eenheden

Tabel S2.2 geeft een overzicht van nog gangbare Amerikaanse/Engelse eenheden.

Tabel S2.2 Conversie van Amerikaanse/Engelse eenheden naar SI eenheden

Eenheid van	US/UK	SI	Opmerking / uitleg
radioactiviteit: Activiteit A	Curie: 1 Ci	≡ 37GBq	≈ aantal desintegraties per seconde van 1 gram ²²⁶ Ra*
exposie X ¹⁾	1 R	≡ 2,58x10 ⁻⁴ C/kg	R = röntgen, de totale hoeveelheid elektrische lading die door γ- of röntgenstraling in kg lucht ontstaat
geabsorbeerde dosis D	100 rad 1 Röntgen	= 1 Gy = 1 J/kg = 8,7 mGy	hoeveelheid geabsorbeerde energie die door straling op 1 kg materie wordt overgedragen
dosistempo \dot{D}		μGy/u	dosistempo
dosisequivalent en equivalente dosis H _T : ²⁾ H _T = w _R x D	100 rem H = 1 mSv	= 1 Sv = H _T = 1 mSv	hoeveelheid ioniserende straling geabsorbeerd per massa-eenheid bestraald materiaal vermenigvuldigd met de stralingsweefactor, w _R
equivalente dosistempo \dot{H}_T		μSv/u	equivalente dosistempo N.B. dosistempometers geijkt op γ-straling
effectieve dosis E $E = \sum_T w_T \times H_T =$ $\sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$		Sv	equivalente dosistempo keer de weefselweefactor, w _T = optelsom van alle lootstellingspaden voor het hele lichaam van alle typen straling voor 1 nuclide, alleen voor stochastische effecten = maat voor chronische bestraling door inwendige besmetting, gecorrigeerd voor gevoeligheid van organen
effectieve volg dosis E _T		Sv	$E_{inh} = A_{inh} \times e_{50}^{inh}$ A _{inh} is hoeveelheid ingeademde activiteit in Bq Als niet alle gegevens bekend zijn: neem meest conservatieve (dus grootste) e ₅₀ ^{inh} (zie Radionucliden-tabel)
exposie en omgevings- dosisequivalent	X = 1 μR	≈ H*(10) = 10 nSv	

- 1) Exposie X is maat voor hoeveelheid lading (onder één teken) die door ioniserende straling wordt vrijgemaakt.
- 2) Gelijkwaardigheid geldt voor α-, β- en γ-straling. De voorloper van de equivalente dosis, H_T, was het dosisequivalent, H. Deze grootheid is iets anders gedefinieerd dan de equivalente dosis, maar kan voor de meeste praktijkgevallen daaraan gelijkgesteld worden. De voorloper van de effectieve dosis, E, was het effectief dosisequivalent, H_E (ook wel als H_{eff} weergegeven). De definitie van effectief dosisequivalent lijkt sterk op die van effectieve dosis, maar er zijn – soms behoorlijke – getalsmatige verschillen tussen de oude [ICRP77] en nieuwe [ICRP91] weefselweefactoren. Uitkomsten van oude en nieuwe berekeningen kunnen significant verschillen.

3 Bronnen ioniserende straling

Iedereen staat de hele dag bloot aan straling. Deze is vooral afkomstig van natuurlijke bronnen van ioniserende straling, maar ook van kunstmatige bronnen.

3.1 Dagelijkse blootstelling

3.1.1 Dagelijkse blootstelling aan natuurlijke bronnen

Er zit van nature radioactiviteit in de bodem. Bouwmaterialen die gemaakt zijn van grondstoffen uit de bodem zijn ook een bron van straling omdat deze natuurlijke radionucliden bevatten. Uit bouwmaterialen zoals beton komt, naast gammastraling, het radioactieve gas radon (en thoron) vrij. De vervalproducten van radon, ook wel de radonochters genoemd, kunnen zich in de lucht hechten aan stofdeeltjes. Bij het inademen van deze stofdeeltjes kunnen de radonochters achterblijven in de luchtwegen en daar hun straling afgeven. Hierdoor wordt de kans op longkanker groter. Als er niet voldoende wordt geventileerd kan de straling in gebouwen vele malen hoger zijn dan buiten. Radonochters dragen veel bij aan de jaarlijks ontvangen dosis door ioniserende straling. Door nieuwe inzichten⁵ is de dosiswaarde hoger dan in eerdere jaren vermeld maar het is onveranderd gebleven dat radon voor de hoogste dosis zorgt van alle natuurlijke bronnen.

Met honderden doden per jaar in Nederland vormt radon na roken de belangrijkste oorzaak van longkanker.

Ook voedsel en drinkwater bevatten radioactieve stoffen die van nature op aarde aanwezig zijn. Via bodem, water en lucht zijn deze stoffen op en in onze planten en dieren gekomen.

Niet alleen vanuit de bodem maar ook vanuit de kosmos komt straling op ons af. De atmosfeer zorgt voor afscherming maar toch ontvangen we in Nederland op leefniveau nog 0,22 mSv/jaar aan kosmische straling.

De gemiddelde Nederlander die normaal ademt, eet en drinkt, ontvangt een vrijwel onvermijdelijke dosis van ongeveer 2,4 mSv/jaar. Ventileren zorgt voor een lagere dosis.

3.1.2 Dagelijkse blootstelling aan kunstmatige bronnen

Kunstmatige bronnen (door mensen gemaakt) dragen maar voor een klein deel bij aan de dagelijkse blootstelling aan straling. Bovengrondse kernwapenproeven en incidenten met nucleaire installaties hebben radioactiviteit in de atmosfeer gebracht. De jaardosis per inwoner van Nederland als resultaat van deze bronnen wordt geschat op minder dan

⁵ Voor deze dosisschattingen zijn de dosisconversiefactoren van radon en thoron gebruikt zoals vermeld in ICRP (2017). Voorheen werden dosisconversiefactoren op basis van UNSCEAR gegevens toegepast voor dosisschattingen.

0,02 mSv. Ook industriële handelingen met stralingsbronnen dragen maar voor een klein deel bij aan de gemiddelde stralingsbelasting. Blootstelling komt door lozing en/of door externe straling. Nucleaire installaties en sommige procesindustrieën in Nederland lozen radioactieve stoffen in de lucht en/of in het open water. Toepassingen van (gamma)straling binnen sommige instellingen leiden door strenge regelgeving bij de terreingrens tot een niet of nauwelijks meetbare verhoging van de blootstelling. De gemiddelde jaardosis per inwoner van Nederland door de industriële bronnen is kleiner dan 0,01 mSv.

3.2 Mogelijke extra blootstelling

Naast de veelal onvermijdelijke blootstelling in ons dagelijks leven, kunnen sommige Nederlanders ook door andere oorzaken blootstaan aan straling. Dit kan bijvoorbeeld bij een medisch onderzoek of therapie, door een vliegreis of vakantie in de bergen en bij het gebruik van artikelen waar radioactiviteit inzit. Wie regelmatig een CT-scan ondergaat, veel vliegt of beroepsmatig met straling werkt, ontvangt jaarlijks een hogere dosis dan de meeste andere Nederlanders.

3.2.1 Medische blootstelling

Medische toepassingen zoals het maken van een röntgenfoto of een CT-scan leveren een bijdrage aan de stralingsbelasting. De blootstelling is per persoon erg verschillend. Bij sommige mensen worden regelmatig CT-scans gemaakt, terwijl andere alleen een röntgenfoto bij de tandarts hebben laten maken. Een röntgenfoto bij de tandarts geeft een dosis van ongeveer 3 μ Sv, terwijl de dosis bij een CT-scan van de onderbuik kan oplopen tot 10 mSv. Gemiddeld ontvangt de Nederlander bijna 1,2 mSv/jaar door alle medische onderzoeken. Daarbij is de dosis die patiënten ontvangen bij therapeutische behandeling in ziekenhuizen dus niet meegenomen.

3.2.2 Kosmische straling op vlieghoogte

Op grote hoogte wordt kosmische straling minder afgeschermd door de atmosfeer. Tijdens een vliegreis of op wintersport staan mensen daarom tijdelijk bloot aan een hogere dosis kosmische straling dan op zeeniveau. Een vliegreis Amsterdam-New York (retour) op 10 kilometer hoogte levert ongeveer 72 μ Sv effectieve dosis op en een retour naar London 4,4 μ Sv. Gemiddeld maken Nederlanders 1,3 retourvluchten per jaar en ontvangen daardoor een gemiddelde effectieve dosis van ongeveer 40 μ Sv. Vliegtuigbemanning ontvangt per jaar gemiddeld 1,9 mSv en maximaal 5 mSv.⁶

3.2.3 Radioactiviteit in consumentenproducten

De jaardosis per inwoner van Nederland door radioactiviteit in gebruiksartikelen (consumentenproducten) is zeer beperkt. Radioactieve stoffen werden vooral in het verleden toegepast in rookmelders, wijzerplaten, cameralenzen en gloeikousjes. Veel van deze producten zijn inmiddels uit de handel genomen.

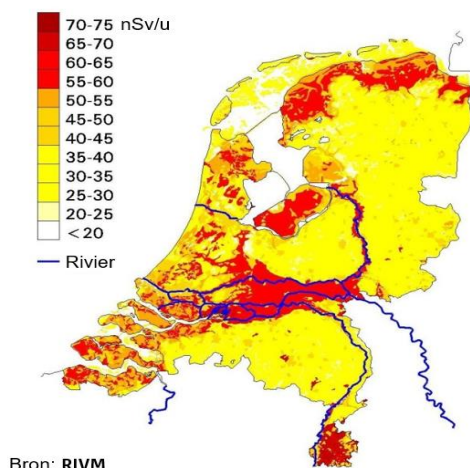
⁶ Dit zijn waarden uit 2019, voor de komst van het Coronavirus dat grote invloed heeft gehad op het vliegverkeer.

Kosmische straling

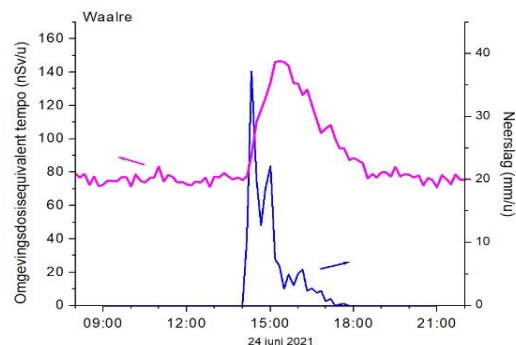
Primaire kosmische straling bestaat uit protonen en atoomkernen. De primaire straling dringt de atmosfeer van de aarde binnen en reageert daar met de kernen van luchtmoleculen. Daarbij ontstaan diverse reactieproducten (secundaire kosmische straling). De kosmische straling die het aardoppervlak bereikt, is secundaire straling. De secundaire straling bestaat vooral uit muonen en elektronen. In de atmosfeer wordt de kosmische straling gehinderd door de aanwezige luchtmassa: de intensiteit hangt daarom af van de geomagnetische breedtegraad, de luchtdruk en de hoogte boven zeeniveau. Luchtdrukverschillen zorgen voor variaties van $\pm 10\%$.

Terrestrische straling

Terrestrische straling wordt voornamelijk veroorzaakt door ^{40}K en de zogenaamde primordiale (sinds de oorsprong van de aarde aanwezige) vervalreeksen. De belangrijkste zijn de thorium ($^{232}\text{Th}^*$)- en uranium ($^{238}\text{U}^*$)-reeksen. De gassen die uit de bodem ontsnappen, zijn vooral radioactieve edelgassen zoals radon (^{222}Rn) en thoron (^{220}Ra). Verschillende bodemsoorten hebben verschillende concentraties radioactiviteit; de terrestrische γ -stralingsniveaus zijn dus afhankelijk van de bodemsoort. Figuur S3.1 toont de terrestrische stralingskaart van Nederland. Het omgevingsdosisequivalenttempo varieert van enkele tientallen (veen- en zandgronden) tot ongeveer 75 nSv/u (zeeklei, rivierklei, löss).



Bron: RIVM



Figuur S3.1 Terrestrische stralingskaart Nederland

Figuur S3.2 Effect van neerslag op het omgevingsdosisequivalenttempo na een droge periode

Eén van de vervalproducten van de $^{238}\text{U}^*$ -reeks is $^{226}\text{Ra}^*$. De radionucliden $^{232}\text{Th}^*$, $^{238}\text{U}^*$ en $^{226}\text{Ra}^*$ vormen het begin van een ingewikkelde natuurlijke (sub)reeks. De mate waarin deze reeksen in evenwicht zijn, hangt sterk af van de omstandigheden, maar meestal is tenminste een deel van de reeks ingegroeid. Dat betekent dat ook de dochterproducten een potentieel gevaar vormen. Radium ($^{226}\text{Ra}^*$) heeft een halfwaardetijd van 1600 jaar. Het vervalproduct van $^{226}\text{Ra}^*$ is het gasvormige radon (^{222}Rn) dat vrijkomt uit de bodem. ^{222}Rn heeft vier kortlevende vervalproducten die ook wel radondochters genoemd worden. Dit zijn ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi en ^{214}Po . Deze radionucliden komen in de lucht terecht als vrije deeltjes of gebonden aan stofdeeltjes en vervallen daar na enige tijd: de radondochters zijn niet gasvormig. Radon en dochters zenden zowel α -, β - als γ -straling uit. Dit vormt niet alleen terrestrische straling via de bodem (mineralen, ertsen en gesteentes) en

bouwmaterialen (gips, beton) maar wordt ook aangetroffen in pijpleidingen uit de gas- en olie-industrie en in sommige ouderwetse isolatiematerialen zoals glaswol.

Vaste deeltjes in lucht kunnen neerslaan op de ondergrond; dit verloopt sneller als het regent. Tijdens een hevige regenbui zien we het omgevingsdosisequivalenttempo daarom oplopen. Zo'n verhoging, veroorzaakt door het uitregenen van de kort levende vervalproducten van ^{222}Rn , is na enkele uren weer verdwenen. Figuur S3.2 laat dit effect van een regenbui op het omgevingsdosisequivalenttempo zien. In het buitenmilieu wordt normaal gesproken een omgevingsdosisequivalent-tempo tussen 60 en 115 nSv/u gemeten, met een gemiddelde waarde van 80 nSv/u. Na hevige regenval kan de achtergrondwaarde enige uren verhoogd zijn.

Verhogingen tot boven 200 nSv/u zijn echter zeer zeldzaam. In het Nationaal Meetnet Radioactiviteit (NMR) fungeert 200 nSv/u daarom als signaleringsdrempel voor ongewone situaties. De hoogste 'natuurlijke' NMR-meetwaarde tot nu toe bedraagt 236 nSv/u (gemeten op 11 augustus 2002 in Rijssen na een hevige wolkbreuk voorafgegaan door een langere droge periode).

Voedsel

De belangrijkste bijdrage in ons voedsel wordt geleverd door ^{40}K ; maar ook ^{210}Pb en ^{210}Po zijn belangrijke radionucliden in ons voedsel. De gemiddelde activiteit van ^{40}K in ons lichaam is ongeveer 4.000 Bq.

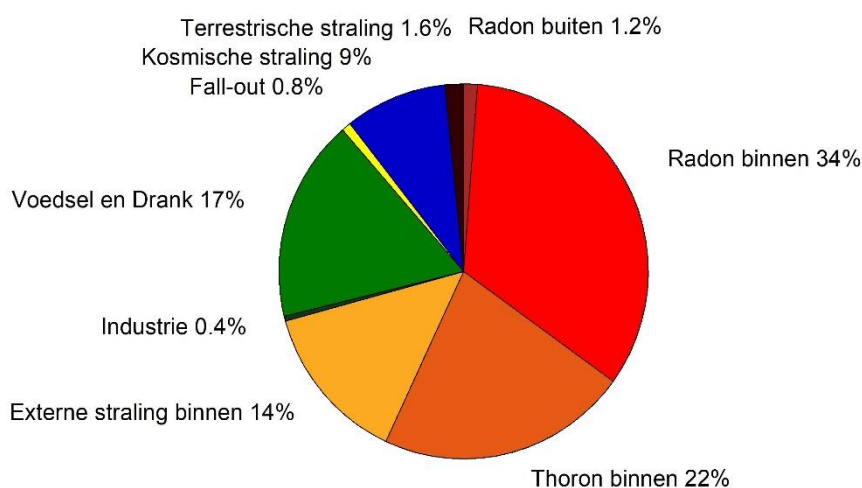
3.3 De gemiddelde stralingsbelasting

De gemiddelde stralingsbelasting wordt bepaald door de stralingsdoses die Nederlanders ontvangen bij elkaar op te tellen (de collectieve dosis) en te delen door het aantal inwoners van Nederland, zie Tabel 3.1. Merk op dat deze achtergrondstraling een optelsom is van externe straling en inwendige besmetting (zie ook Hoofdstuk 5). Vanzelfsprekend worden sommige mensen meer blootgesteld aan straling dan andere. De limiet voor beroepsmatige werknemers is 1 mSv. Deze dosis komt bovenop de dosis ontvangen door achtergrondstraling (2,5 mSv) en bovenop de eventueel ontvangen dosis door medisch onderzoek of vliegvluchten. Indien er erg veel vliegvluchten voor het werk gemaakt moeten worden, dient dit formeel wel in de Risico-Inventarisatie en -Evaluatie (RI&E) opgenomen te worden.

De jaardosis kan worden weergegeven in een cirkeldiagram (zie Figuur 3.1). De figuur laat zien in welke verhoudingen de bronnen bijdragen aan de 2,5 mSv die Nederlanders per hoofd van de bevolking jaarlijks in ontvangen. Hieruit blijkt dat de grootste bijdrage door de straling van radon(dochters) wordt geleverd. Toch is in vergelijking met de omliggende landen de stralingsdosis van radon(dochters) laag, omdat de radonconcentratie in Nederlandse woningen laag is. Verder geldt in Nederland een relatief laag gemiddelde stralingsbelasting door medisch diagnostisch onderzoek.

Tabel 3.2 Jaarlijkse gemiddelde dosis door blootstelling aan ioniserende straling in 2021 [Bron: RIVM]

	Bron	Jaardosis (mSv)
Elke Nederlander ontvangt een effectieve dosis van ongeveer 2,5 mSv/jaar	Radon(dochters) buitenshuis	0,03
	Radon(dochters) binnenshuis	0,83
	Thoron(dochters) binnenshuis	0,54
	Externe straling binnenshuis	0,34
	Blootstelling door industrie	0,01
	Natuurlijke radioactiviteit in voedsel en drank	0,43
	Fall-out	0,02
	Kosmische straling op leefniveau	0,22
	Terrestrische straling buitenshuis	0,04
	Totaal	2,46
Daarbij komt een effectieve dosis die per persoon erg varieert. Ongeveer 1 mSv/jaar	Medische blootstelling (diagnostiek)	1,20
	Kosmische straling op vlieghoogte	0,04
	Blootstelling door consumentenproducten	n.v.t.



Figuur 3.1 Onderverdeling gemiddelde stralingsbelasting (peiljaar 2021, RIVM). De medische stralingsbelasting is niet meegenomen in het cirkeldiagram.

3.4 Mogelijke toepassingen van radioactieve stoffen

Een aantal voorbeelden van toepassingen van radioactieve bronnen of instellingen waar radioactieve stoffen voorkomen, zijn:

- > Industrie:
 - vulhoogtemetingen.
 - diktemetingen, onder andere papier of metaalfolie (bijvoorbeeld in hoogovens)
 - controle van lasnaden in leidingwerk: met sterke γ -stralingsbronnen (tot activiteiten van 200 TBq) worden fotografische opnames gemaakt; dit wordt gammagrafie of NDO (van niet-destructief onderzoek) genoemd.
 - inrichtingen met cyclotrons en andere deeltjesversnellers.
 - voedselindustrie: doorstralen van voedsel in verpakking voor het doden van bacteriën en kwaliteitscontrole.
- > Ziekenhuizen:
 - röntgentoestellen voor het maken van röntgenfoto's en voor bestraling van tumoren; voor bestraling wordt gebruikgemaakt van zware radioactieve kobalt-60-bronnen of cesium-137-bronnen.
 - monitoren van de werking van organen, bijvoorbeeld de schildklier; door de patiënt een radioactieve jodiumoplossing te laten drinken wordt de schildklier radioactief; de patiënt is dan enigszins radioactief en zit een aantal dagen in quarantaine.
 - behandelen van tumoren.
- > Landbouw:
 - gebruik van radioactieve atomen (tracers) in bijvoorbeeld voedsel, kunstmest en bestrijdingsmiddelen.
 - bestraling van planten voor het veranderen van eigenschappen, bijvoorbeeld kleur of grootte.
 - bestrijden van dierplagen.
- > (Wegen)bouwkundige controles:
 - vocht- en diktemetingen van asfalt (bijvoorbeeld Troxler).
 - controle van lasnaden in pijpleidingen.
 - aanbod van radioactief schroot.
 - Transport.
- > Radionuclidenlaboratorium: onderzoek naar gedrag van stoffen in bijvoorbeeld proefdieren, celculturen of chemische reacties.
- > Kernenergiecentrales: energieopwekking uit splijtbare stoffen, bijvoorbeeld uranium. De enige operationele kernenergiecentrale in Nederland ligt in Borssele (EPZ, zie Figuur 3.2).
- > Kernreactoren bij onderzoeksinstellingen, zoals NRG in Petten en IRI (Interfacultair Reactor Instituut) in Delft.
- > Installaties voor uraniumverrijking bij Urenco Nederland in Almelo. Verwerking en opslag van radioactief afval bij de COVRA (Centrale organisatie voor radioactief afval, zie Figuur 3.3) in Nieuwdorp (gemeente Borsele).



Figuur 3.2 Kernenergiecentrale Borssele



Figuur 3.3 Opslag bij COVRA

Industriële toepassingen

De *Radionuclidentabel* bevat enkelvoudige radionucliden, moeder/dochter combinaties en reeksen van radionucliden die groepsgewijs naar de aard van hun toepassing behandeld worden. Sommige radionucliden komen in meerdere categorieën voor.

Stralingsbronnen

Radionucliden die toegepast worden in stralingsbronnen zijn, in volgorde van toenemende hardheid van de straling: ^{169}Yb , ^{75}Se , ^{192}Ir , $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ en ^{60}Co (zie ook Tabel S1.2 voor gegevens). De eerste drie worden toegepast als stralingsbron met een activiteit tot enkele TBq. Deze bronnen worden onder meer gebruikt voor gammagrafie op locatie.

Voor zwaardere bestralingsdoeleinden wordt meestal $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ of ^{60}Co gebruikt. Gebruikte activiteiten variëren van enkele tientallen (^{137}Cs) tot enkele honderden TBq (^{60}Co). Extreem zware ^{60}Co -bronnen zijn in gebruik bij Synergy Health in Ede en Etten-Leur. Deze bronnen kunnen een veel groter gevaar opleveren dan ^{169}Yb , ^{75}Se en ^{192}Ir , omdat de uitgezonden γ -straling harder is en de toegepaste bronactiviteit groter. Deze bronnen worden meestal op een vaste locatie gebruikt, maar mobiele toepassingen komen ook voor.

^{241}Am wordt als ijkbron of, in combinatie met ^9Be , als neutronenbron gebruikt. Activiteiten lopen op tot 700 GBq. Intact levert een Am/Be-bron zowel neutronen als hoogenergetische γ -straling (4,4 MeV). Als deze bron betrokken raakt bij een brand, kan ^{241}Am in de vorm van inhaleerbare deeltjes vrijkomen. Deze α -straler is ingedeeld in radiotoxiciteitsklasse 1 (= zeer hoog).

Andere industriële toepassingen

Naast de zware stralingsbronnen past de industrie diverse radionucliden toe in bijvoorbeeld laagdiktemeters, ijk- en referentiebronnetjes, thoriumhoudende laselektroden, lichtbronnen (β -lights'), merkers in allerlei chemische processen en onderdelen van specialistische analyseapparatuur. Gebruikte radionucliden zijn: ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{40}K , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}/^{90\text{Y}}$, ^{125}I , $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$, $^{226}\text{Ra}^*$, $^{232}\text{Th}^*$, $^{238}\text{U}^*$ en ^{241}Am . Deze lijst is niet uitputtend. De hoeveelheid activiteit per toepassing is meestal beperkt. Van de radionucliden $^{232}\text{Th}^*$, $^{238}\text{U}^*$ en $^{226}\text{Ra}^*$ vormen ook de dochterproducten een potentieel gevaar. In de eerste helft van de twintigste eeuw werd ^{226}Ra gebruikt in veel toepassingen, variërend van stralingsbron tot levenselixer en radioactieve bliksemafleider. Dit is inmiddels verboden.

Het restproduct van het verrijgingsproces van uranium wordt verarmd uranium genoemd; dit bevat minder ^{235}U en ^{234}U dan normaal. Verarmd uranium is licht radioactief en wordt (of werd) zowel in de industrie als voor militaire doeleinden gebruikt. Toepassingen zijn: contragewicht in boten en vliegtuigen, als pantser en als 'penetrator' in munitie. Diverse studies hebben aangetoond dat de radiologische (en chemische) risico's van verarmd uranium minimaal zijn. Het gaat dan om de gezondheidseffecten na blootstelling aan verarmd uranium, vooral door de inhalatie van fijne stofdeeltjes die gevormd worden bij verbranding (bijvoorbeeld tijdens de Bijlmerramp en oorlogen).

Radiofarmaca

De volgende radionucliden worden binnen de nucleaire geneeskunde gebruikt voor diagnostiek en therapie: ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F , ^{32}P , ^{51}Cr , ^{68}Ga , ^{75}Se , $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$, ^{82}Rb , ^{89}Zr , ^{89}Sr , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{111}In , ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I , ^{131}I , ^{133}Xe , $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$, ^{153}Sm , ^{177}Lu , ^{186}Re , ^{192}Ir , ^{201}Tl , en ^{223}Ra . De lijst is geen volledige opsomming, gezien de continue ontwikkelingen binnen de nucleaire geneeskunde. In veel gevallen zijn het radionucliden die straling uitzenden met een beperkt doordringend vermogen, en relatief kort leven met halfwaardetijden variërend van enkele uren tot hooguit vier maanden. $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ en $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ vormen hierop een uitzondering. De radionucliden $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (voor planaire opnamen en SPECT-opnamen) en ^{18}F (voor PET-opnamen) worden het meest gebruikt bij diagnostische onderzoeken.

De genoemde radionucliden zijn aan te treffen in radionuclidenlaboratoria in ziekenhuizen, maar ook in productiecentra en tijdens vervoer. Een zeer grote producent van radiofarmaca is het NRG, gevestigd in Petten. Vandaar uit worden dagelijks grote hoeveelheden radiofarmaca vervoerd, zowel over de weg als per vliegtuig (via Schiphol). Sommige radiofarmaca worden aangeboden in de vorm van een 'generator'. De beoogde radionuclide is dan de (kortlevende) dochter van een (langer levende) moeder. Het bekendste voorbeeld is de molybdeen/technetium-generator ($^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$).

Bij een incident met radiofarmaca is het stralingsgevaar normaliter niet groot omdat:

- > de hoeveelheid activiteit op basis van regelgeving (voor laboratoria of vervoer) beperkt is
- > het doordringend vermogen van de uitgezonden straling doorgaans laag is
- > de radiotoxiciteit relatief laag is: de meeste radiofarmaca vallen in de radiotoxiciteitsklasse 3 (= normaal) of 4 (= laag).

Voor medische toepassingen kan iemand aan een relatief hoge dosis worden blootgesteld. De foto in Figuur 3.4 laat zien hoe een brandweerman een meting doet ter hoogte van zijn blaas, nadat hij een injectie heeft gehad met een radioactieve vloeistof (technetium-99m) voorafgaand aan het maken van een botscan. Zie voor uitleg over meten Hoofdstuk 7. Bij een botscan wordt de vloeistof opgenomen door afwijkend weefsel, zoals een ontsteking of een tumor. Het dosistempo op de foto bedraagt $469 \mu\text{Sv}/\text{u}$, maar is later opgelopen tot bijna 800. De blootstelling is wel kortdurend, omdat de halfwaardetijd van deze radionuclide 6 uur is. Het lichaam zorgt zelf voor het verwijderen van de stof uit het lichaam; door veel te drinken wordt dit proces versneld.



Figuur 3.4 Stralingsmeting na injectie met radioactieve vloeistof voor een botscan

Er bestaan vele honderden verschillende radionucliden, maar niet alle radionucliden zijn even gangbaar. Er is een selectie gemaakt van 40 gangbare radionucliden waar de brandweer bij de bestrijding van een incident mee in aanraking kan komen. Deze radionucliden zijn samengevoegd in de *Bijlage 5 Radionuclidentabel* (bijlagen 4 en 5); deze tabel bevat relevante gegevens van deze radionucliden.

3.5 Identificatie van radioactieve stoffen

Radioactieve stoffen zijn ingedeeld in gevarenklasse 7 en het GEVI-nummer begint met 7. Radioactiviteit komt in de GEVI-code niet voor als bijkomend gevaar, maar radioactieve stoffen kunnen wel een bijkomend gevaar hebben (bijvoorbeeld 70, 74, 75 en 78; maar 77 komt niet voor). Als een verpakking intact is, bestaat er geen gevaar voor de omgeving! Intacte verpakkingen kunnen eenvoudig veiliggesteld worden uit de gevarezone, bijvoorbeeld wanneer ze door brand bedreigd worden.

Er bestaan geen chemiekaarten voor radioactieve stoffen; wel zijn er vier algemene ERIC-kaarten (ERIC 7-01 t/m 7-04). Voor vervoer van radioactieve stoffen over de weg is het ADR van toepassing; voor een volledige beschrijving van de vervoersbepalingen wordt verwezen naar het ADR en de NVS-publicatie 26A, 2000 (*Vervoer van radioactieve stoffen over de weg in Nederland en België – Handleiding voor de praktijk*).

3.5.1 Etiketten

Elke verpakking die radioactieve stoffen bevat, moet voorzien zijn van vervoersetiketten (zie Figuur 3.5) als de activiteitsconcentratie en de totale activiteit van de zending aangegeven waarden overschrijden. Er moeten twee etiketten aangebracht worden op tegenoverliggende zijden van de verpakking; op een container zelfs aan vier zijden. Verpakkingen voor vervoer zijn in drie klassen ingedeeld, aangeduid met een rood cijfer I, II of III. De klasse geeft aan hoeveel straling er aan de buitenkant van de verpakking maximaal te meten is.

- 7A. Wit etiket, klasse **I** (met rode I op etiket): maximaal 5 $\mu\text{Sv/u}$ aan het oppervlak.
- 7B. Bovenkant geel, onderkant wit, klasse **II** (met rode II op etiket): tussen 5 $\mu\text{Sv/u}$ en maximaal 500 $\mu\text{Sv/u}$ aan het oppervlak en maximaal 10 $\mu\text{Sv/u}$ op 1 meter afstand.
- 7C. Bovenkant geel, onderkant wit, klasse **III** (met rode III op etiket): tussen 0,5 mSv/u en maximaal 2 mSv/u aan het oppervlak en maximaal 100 $\mu\text{Sv/u}$ op 1 meter afstand.
- 7D. Algemeen etiket: wordt alleen op het voertuig geplaatst; het stralingsniveau is maximaal 100 $\mu\text{Sv/u}$ op 2 meter afstand.
- 7E. Etiket voor splijtstoffen, met opschrift *Fissile* op etiket: alleen voor splijtstoffen.

De etiketten 7A, 7B en 7C bevatten de opschriften *Content* en *Activity*. De afzender van de verpakking vermeldt hier het type bron en de activiteit op het moment van transport. Deze



Figuur 3.5 Etiketten voor het vervoer van radioactieve stoffen

informatie is ook terug te vinden in de vervoersdocumenten. De etiketten 7B en 7C vermelden ook de Transport Index (TI).

Aanvullende informatie etiketten

Etiketten en opschriften die op een verpakking zijn aangebracht, hebben betrekking op de verpakking als geheel. Dus op de aard van de verpakking, op de inhoud en op het stralingsrisico. Alle colli, oververpakkingen en containers moeten voorzien zijn van minimaal twee etiketten, met uitzondering van vrijgestelde verpakkingen en van LSA-I (stoffen met geringe activiteitsconcentratie) en SCO-I (voorwerpen met besmetting aan het oppervlak). Zie voor uitleg over de gebruikte terminologie de *Bijlage 1* Begrippenlijst in Hoofdstuk 0 onder de kop *Terminologie ADR*. Zie voor een overzicht van de etiketten en het bijbehorende stralingsniveau Tabel S3.1.

Elk etiket van het type 7A, 7B of 7C moet zijn aangevuld met de volgende informatie:

1. **Inhoud (radionuclide):**

- > de naam (namen) van de radionuclide(n) met gebruikmaking van de symbolen
- > voor LSA-I stoffen (met geringe activiteit) voldoet de aanduiding LSA-I
- > bij mengsels van radionucliden moeten de nucliden zijn aangegeven waarvoor de meest restrictieve waarde geldt, voor zover de beschikbare ruimte op de regel daartoe plaats biedt.

Achter de naam (namen) van de radionuclide(n) moet de LSA- of SCO-groep zijn vermeld (LSA-II, LSA-III, SCO-I of SCO-II).

2. **Activiteit:** De maximale activiteit van de radioactieve inhoud gedurende het vervoer, uitgedrukt in becquerel (Bq) met het bijbehorend SI-voorvoegsel (bijvoorbeeld MBq). Voor splijtbare stoffen kan in plaats van de activiteit, de massa splijtbare stoffen in de eenheid gram (g) of in een veelvoud daarvan worden aangegeven.

3. **Transportindex:** Behalve voor categorie I-WIT moet ook de transportindex vermeld worden.

Transportindex TI

De transportindex (TI) voor een verpakking wordt bepaald door het hoogste stralingsniveau op een afstand van 1 meter van de uitwendige oppervlakken van de verpakkingen. De TI wordt bepaald met de volgende rekenregels:

- > $TI = \text{hoogste dosistempo op 1 meter afstand in microsievert per uur } (\mu\text{Sv/u}) \times 0,1$ of
- > $TI = \text{hoogste dosistempo op 1 meter afstand in microsievert per uur } (\mu\text{Sv/u}) / 10$ of
- > $TI = \text{hoogste dosistempo op 1 meter afstand in millisievert per uur } (\text{mSv/u}) \times 100$.





De hoogste TI-waarde van pakketten (zonder exclusief gebruik) is 10. Voor exclusief gebruik of vervoer is ontheffing nodig. Niet-exclusief gebruik is regulier gebruik en mag dus zonder ontheffing. Bij vervoer van een aantal pakketten met radioactieve stoffen in hetzelfde vervoermiddel mag (zonder exclusief gebruik) de som van de TI's van deze pakketten niet groter zijn dan 50.

De TI voor oververpakkingen, containers of voertuigen wordt bepaald door de som van de TI's van alle daarin aanwezige verpakkingen óf door rechtstreekse meting van het stralingsniveau. De TI van geen enkele verpakking of oververpakking mag hoger zijn dan 10, behalve voor zendingen die vallen onder exclusief gebruik.

Maximaal toelaatbaar stralings- en besmettingsniveau

Er gelden criteria voor het stralingsniveau aan het oppervlak van de verpakking en voor niet-vrijgestelde verpakkingen op 1 meter afstand van het oppervlak. Voor voertuigen gelden criteria voor het stralingsniveau aan het buitenoppervlak van het voertuig en op 2 meter afstand van het oppervlak van het voertuig (zie Tabellen S3.1 en S3.2). De afwrijfbare besmetting op de buitenkant van een verpakking of voertuig moet op een zo laag mogelijk niveau worden gehouden en mag de grenswaarden in Tabel S3.3 niet overschrijden. De maximale grenswaarde is 4 Bq/cm². Voor α -stralers geldt de zwaardere norm van 0,4 Bq/cm².

Tabel S3.1 Overzicht stralingsniveau en etiket

Categorie	Etiket	Maximaal stralingsniveau \dot{H}^* op	Categorie etiket	Transport-index TI ¹⁾
7A		oppervlak: $\dot{H}^* \leq 5 \mu\text{Sv/u}$ 1 meter: $\dot{H}^* = 0 \mu\text{Sv/u}$	I-WIT 1 rode I	TI = 0 ²⁾
7B		oppervlak: $5 \mu\text{Sv/u} < \dot{H}^* \leq 500 \mu\text{Sv/u}$ of $0,005 \text{ mSv/u} < \dot{H}^* \leq 0,5 \text{ mSv/u}$ 1 meter: $10 \mu\text{Sv/u}$	II-GEEL 2 rode II	$0 < \text{TI} < 1$
7C		oppervlak: $500 \mu\text{Sv/u} < \dot{H}^* \leq 2000 \mu\text{Sv/u}$ of $0,5 \text{ mSv/u} < \dot{H}^* \leq 2 \text{ mSv/u}$ 1 meter: $100 \mu\text{Sv/u}$	III-GEEL 3 rode III	$1 < \text{TI} < 10$
7D		oppervlak: $2 \text{ mSv/u} < \dot{H}^* \leq 10 \text{ mSv/u}$ 2 meter: $100 \mu\text{Sv/u}$	III-GEEL ³⁾	TI > 10

- 1) TI = transportindex = dosistempo $\mu\text{Sv/u}$ / 10 op 1 meter afstand van verpakking en \dot{H}^* = gemeten dosistempo.
- 2) De Transportindex moet naar boven worden afgerond op 1 cijfer achter de komma, behalve wanneer het getal 0,05 of minder is. Dan moet worden afgerond op 0.
- 3) Moet bovendien onder exclusief vervoer worden vervoerd.

Tabel S3.2 Maximaal toelaatbaar stralingsniveau

Vervoer	Dosistempo [mSv/u]			
	opper-vlak	op 1 meter	op 2 meter	
vrijgestelde colli	0,005			
verpakking	niet-exclusief	2	0,1	-/-
	exclusief	10	2	-/-
voertuig	niet-exclusief	2	-/-	0,1
	exclusief	2	-/-	0,1

Tabel S3.3 Maximaal toelaatbaar afwrijfbaar besmettingsniveau

Vervoer		Besmettings-niveau [Bq/cm ²]
verpakking	α-stralers	0,4
	β- en γ-stralers	4
tanks en IBC's	α-stralers	0,04
	β- en γ-stralers	0,4
voertuig	α-stralers	0,4
	β- en γ-stralers	4

Beveiligingsklassen nucleair transport

De klassen op de etiketten zijn niet dezelfde als de beveiligingsklassen voor nucleair materiaal. Deze beveiligingsklassen worden bepaald op basis van de categorie-indeling van nucleair materiaal, en deze categorie-indeling is weer afhankelijk van de aard en hoeveelheid van het nucleair materiaal. Daarbij is het transport ingedeeld in (beveiligings)categorie I, het transport met mogelijk het grootste gevaar; dit is dus tegengesteld aan de klasse-indeling op de etiketten (daar is het stralingsniveau voor klasse I het laagst). Per klasse geldt een aantal specifieke beveiligingsmaatregelen. Hieronder volgt de beschrijving van de fysieke beveiliging voor de verschillende klassen. Overigens gelden op basis van de indeling ook beveiligingsmaatregelen tijdens de opslag van nucleaire stoffen, maar deze worden hier buiten beschouwing gelaten.

Categorie II- en III-materiaal

Het vervoer vindt plaats met inachtneming van bijzondere voorzorgsmaatregelen, met inbegrip van voorafgaande overeenkomsten tussen afzender, ontvanger en vervoerder, alsmede een voorafgaande overeenkomst tussen natuurlijke personen of rechtspersonen, onderworpen aan de rechtsmacht en de voorschriften van de uitvoerende en de invoerende staten, met vermelding van tijd, plaats en procedures voor de overdracht van de verantwoordelijkheid voor het vervoer.

Categorie I-materiaal

Het vervoer vindt plaats met inachtneming van de bijzondere voorzorgsmaatregelen zoals hierboven zijn vastgesteld voor het vervoer van categorie II- en III-materiaal, met daarbij voortdurend toezicht door begeleiders en onder omstandigheden die nauw contact waarborgen met de autoriteiten die bevoegd zijn handelend op te treden.

3.5.2 Bebording voertuigen

Bij vervoer van verpakkingen moeten voertuigen en containers voorzien zijn van:

- > de algemene oranje waarschuwingsborden voor het vervoer van gevaarlijke stoffen

- > aan de twee lange zijden en aan de achterzijde waarschuwborden van het type 7D of 7E (zie Figuur 3.5).

Bij zeecontainers moeten er naast vier stuks 7D ook vier stuks 7A, 7B of 7C borden zijn geplaatst. Alternatief is alléén vier stuks 7A, 7B of 7C, maar dan in groot formaat. Bij transporten met UN-nummers 2912, 3321 of 3322 moet dit vermeld worden op het onderste paneel van het oranje bord. Op het bovenste paneel moet dan de aanduiding 70 vermeld zijn.

Enkele relevante UN nummers bij nucleair transport

UN2912	Radioactieve stoffen met geringe specifieke activiteit (LSA-1), niet splijtbaar of splijtbaar, vrijgesteld.
UN 3321	Radioactive material, low specific activity (LSA-II), non-fissile or fissile excepted.
UN 3322	Radioactive material, low specific activity (LSA-III), non-fissile or fissile excepted.

3.5.3 Vervoersdocumenten

De afzender moet elke zending voorzien van een vervoersdocument.

Inhoud vervoersdocument

Het vervoersdocument bevat algemeen voorgeschreven informatie, zoals:

- > naam en adres van de afzender
- > naam en adres van de geadresseerde(n).

Bij vervoer van klasse-7-materialen moet het vervoersdocument de volgende informatie bevatten:

- > het UN-nummer dat is toegekend aan de stof, voorafgegaan door de letters 'UN'.
- > de juiste vervoersnaam.
- > het klassennummer '7'.
- > de naam of het symbool van elke radionuclide of, voor mengsels van radionucliden, een van toepassing zijnde algemene omschrijving of een lijst van de meest beperkende nucliden.
- > een beschrijving van de fysische en chemische toestand van de stof, of de aanduiding dat het een radioactieve stof in speciale toestand of een gering verspreidbare radioactieve stof betreft; een chemische verzamelaanduiding is aanvaardbaar voor de chemische hoedanigheid.
- > de maximale activiteit van de radioactieve inhoud gedurende het vervoer (in Bq); voor splijtbare stoffen mag de totale massa splijtbare stof in de eenheid gram (g) of in een geschikt veelvoud daarvan worden aangegeven in plaats van de activiteit.
- > de categorie van het collo, dat wil zeggen I-WIT, II-GEEL of III-GEEL.
- > de transportindex (alleen bij de categorieën II-GEEL en III-GEEL).
- > voor zendingen van splijtbare stoffen anders dan zendingen die zijn vrijgesteld onder ADR-artikel 6.4.11.2, de criticaliteits-veiligheidsindex.
- > het identificatiekenmerk voor elk goedkeuringscertificaat van een bevoegde autoriteit (radioactieve stoffen in speciale toestand, gering dispergeerbare radioactieve stoffen, speciale regeling, model van collo of verzending) van toepassing zijnde op de zending.

- > voor zendingen van colli in een oververpakking of container, een gedetailleerde opgave van de inhoud van elk collo binnen de oververpakking of container en, indien van toepassing, van elke oververpakking of container in de zending; als colli op een tussenliggende losplaats verwijderd moeten worden uit de oververpakking of de container, moeten de daarvoor vereiste vervoerdocumenten beschikbaar worden gesteld.
- > wanneer een zending moet worden verzonden onder exclusief gebruik, de opmerking 'VERZENDING ONDER EXCLUSIEF GEBRUIK'.
- > voor LSA-II, LSA-III stoffen, SCO-I en SCO-II de totale activiteit van de zending als een veelvoud van A2.

3.5.4 Waarschuwingssymbool

De aanwezigheid van radioactieve stoffen, bronnen of röntgenapparatuur wordt aangegeven met een waarschuwingssymbool (gele driehoek met zwarte rand, zie Figuur 3.6). Dit symbool kan voorkomen in gebouwen, bijvoorbeeld op toegangsdeuren van laboratoria of de ruimten waar röntgenfoto's worden gemaakt in een ziekenhuis. Ook röntgenapparaten zijn voorzien van dit symbool. Veelal is met een onderbord is aangegeven om welk type stralingsbron (radioactieve stoffen of toestellen) het gaat

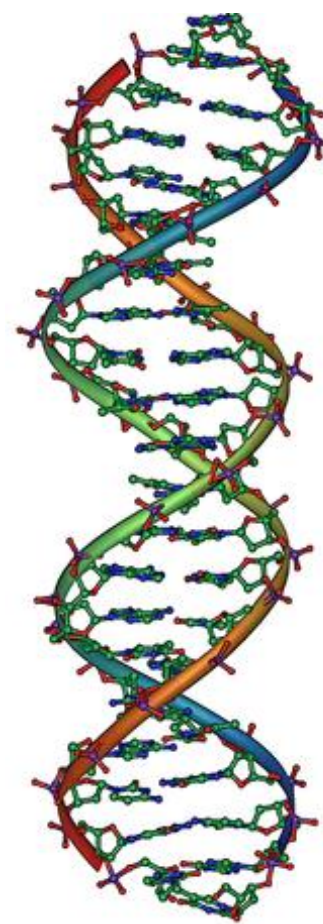


Figuur 3.6 Waarschuwing

4 Gezondheidseffecten

Blootstelling aan ioniserende straling kan invloed op de gezondheid hebben. Dit kan variëren van roodheid van de huid tot brandblaren en zelfs het ontstaan van kanker.

Alle biologische organismen bestaan uit levende cellen. Er zijn eencellige organismen en hoger georganiseerde meercellige organismen, zoals een kikker of een mens, die uit verschillende soorten gespecialiseerde cellen bestaan. Een cel is het kleinste onderdeel van een organisme of levend wezen dat alle genetische, erfelijke informatie van dat organisme bevat. De belangrijkste drager van die erfelijke informatie is DNA, desoxyribonucleïnezuur (zie Figuur 3.1). DNA is de biologische computercode voor de vele processen die in het levende organisme plaatsvinden. Om als organisme te groeien of om te blijven leven is het noodzakelijk dat er voortdurend celdeling plaatsvindt.



Figuur 3.1 DNA

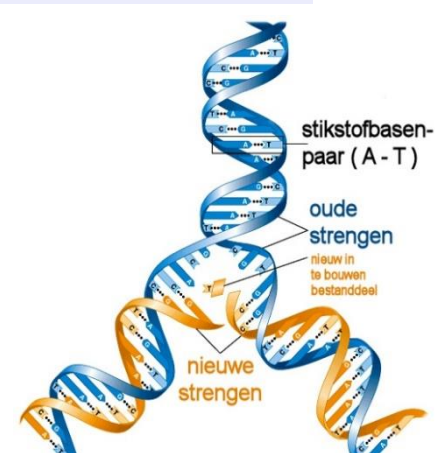
Celdeling

Het proces van celdeling wordt gestuurd door het DNA dat in de celkern zit. Een DNA-molecuul bestaat uit twee om elkaar heen gedraaide strengen waaraan naast elkaar een lange serie van stikstofbasen hangt. Er zijn vier verschillende basen: adenine (A), guanine (G), thymine (T) en cytosine (C). Van deze stikstofbasen zijn er twee koppels die (via waterstofbruggen) verbindingen kunnen vormen: A-T en C-G.

De twee strengen van het DNA-molecuul zitten via waterstofbruggen aan elkaar, als een soort getordeerde ritssluiting (zie Figuur 3.1). De volgorde van de stikstofbasen aan het DNA is van wezenlijk belang.

Celdeling begint met het 'openen van de ritssluiting'. Tegenover elke DNA-streng wordt vervolgens een spiegelbeeld opgebouwd, waarvoor de oorspronkelijke streng de matrijs levert (zie Figuur S4.1). Op deze manier verdubbelt het DNA-molecuul zich. Vervolgens vindt celdeling plaats, waarbij iedere cel zijn eigen DNA krijgt. Als alles goed gaat, is het nieuwe DNA een perfecte kopie van de oorspronkelijke versie.

Door straling kan schade in alle delen van een cel optreden, dus ook in het DNA. De schade wordt veroorzaakt door de ioniserende werking van straling. De meeste mutaties worden door een herstelmechanisme gerepareerd, maar in sommige gevallen leidt de stralingsschade tot celdood of mutaties.



Figuur S4.1 Schematische weergave DNA-deling

Celdood

Als een cel beschadigd wordt door ioniserende straling kan de schade niet altijd goed gerepareerd worden. Dit kan leiden tot het doodgaan van de cel. Met het toenemen van de dosis of stralingsbelasting, neemt het aantal gedode cellen ook toe. Als in een orgaan of weefsel een beperkte hoeveelheid cellen dood is, hoeft dat nog geen probleem voor dat orgaan of weefsel op te leveren om goed te kunnen blijven functioneren. Bloedcellen sterven bijvoorbeeld continu af en worden ook weer aangemaakt. Maar als er te veel cellen tegelijk doodgaan in een orgaan zal dat leiden tot verlies van de functie van het orgaan. Celdood kan dus grote gevolgen hebben voor het functioneren van bestraalde organen en zelfs voor het hele lichaam, met mogelijk de dood tot gevolg.

Celdeling

Celdood treedt op als een cel niet meer kan delen door het falen van herstelmechanismen. Deze schade uit zich vaak pas als de cel aan deling toe is. Dat kan uren, dagen of weken na het ontstaan van de schade zijn, afhankelijk van het type cel.

Mutatie

Soms repareert het lichaam de schade aan het DNA niet goed. Dit noemen we muteren (veranderen) van het DNA. Bij een mutatie in het DNA kan de cel zich nog wel gewoon delen, maar zit er een weeffoutje in de code. Op de lange termijn *kan* dit, in samenhang met andere gebeurtenissen, tot het ontstaan van kanker leiden. Hier ligt veel nadruk op de kans, want de kans dat blootstelling aan straling leidt tot kanker, neemt toe met de dosis.

Invloed van stralingstype en dosistempo

Een voorbeeld van zware schade aan het DNA is de zogenaamde dubbelstrengsbreuk, waarbij de 'ritssluiting' aan twee kanten is gebroken. Zo'n dubbelstrengsbreuk is veel moeilijker foutloos te repareren dan een enkelstrengsbreuk, vooral als er tegelijkertijd meerdere gebroken DNA-moleculen in de celkern aanwezig zijn. Ook is het herstel van DNA-schade bij een kortdurende blootstelling aan een hoge stralingsintensiteit ('acute bestraling') moeizamer dan bij langdurige blootstelling aan een overeenkomstig lagere stralingsintensiteit ('chronische bestraling').

Zowel celdood als mutaties kunnen leiden tot gezondheidsschade. De ernst van de gevolgen hangt af van het type schade en het type orgaan. In het algemeen geldt dat snel delende cellen (zoals in bloed, beenmerg, testes) het meest gevoelig zijn. Ook de ooglen is zeer gevoelig voor externe straling. Kinderen zijn over het algemeen gevoeliger voor straling dan volwassenen, omdat ze meer snel delende weefsels hebben (en omdat stralingseffecten nog veel meer tijd hebben om tot problemen te leiden).

4.1 Deterministische effecten

Deterministische effecten zijn directe effecten die worden veroorzaakt door functieverlies van weefsels of organen. Deze effecten kunnen kort na de bestraling optreden, variërend van enkele uren tot één à twee maanden, maar ze kunnen zich ook pas jaren na de blootstelling openbaren. Deterministische effecten worden veroorzaakt door het verlies van vele cellen door celdood. Deze effecten treden pas op boven een bepaalde dosis, de zogenaamde drempeldosis. Boven deze drempeldosis neemt de ernst van het effect sterk toe met een toenemende stralingsdosis. Deterministische effecten zijn sterk afhankelijk van de hoogte van de dosis en het type blootgestelde weefsel; de dosis wordt daarom uitgedrukt in Gy.

Kenmerken van deterministische effecten

Deterministische effecten worden tegenwoordig meestal 'tissue reactions' genoemd (ICRP). Kenmerkend voor deterministische effecten is dat:

- > ze pas optreden boven de drempeldosis, uiteindelijk wel in alle gevallen.
- > de ernst van het effect toeneemt met een toenemende dosis.
- > de effecten vrij kort (binnen een maand) na blootstelling optreden, met uitzondering van de deterministische effecten staar (vertroebeling van de ooglenzen) en hart- en vaatziekten die vaak op langere termijn optreden.

Tot een equivalente stralingsdosis van 1 Gy is het lichaam meestal goed in staat om de schade te repareren (via herstelmechanismen). Er zijn dan meestal geen acute, negatieve effecten waar te nemen. Beneden de 1 Gy ontstaat wel schade aan de cellen van organen, maar deze is meestal zo gering dat het orgaan geen functieverlies leidt of zichzelf herstelt. Het maximale effect van een dosis die hoger is dan 750 mGy is het beste zichtbaar in het bloed. Er is dan tijdelijk een afname van de witte bloedcellen te zien. Dit tekort wordt door het lichaam zeer snel weer aangevuld.

Bij bestraling van het lichaam met een hogere dosis ioniserende straling gaan binnen korte tijd zeer veel cellen van organen en weefsels kapot. De effecten van hoge doses bestraling zullen altijd optreden en in sommige gevallen zelfs tot sterfte leiden. Een eerste zichtbaar effect van overbestraling is diarree en braken (zie Tabel 4.1).

Op grond van de dosis worden de stralingssyndromen onderscheiden in:

- > beenmergsyndroom
- > darmsyndroom
- > hersensyndroom of centraal zenuwstelselsyndroom.

Het beenmergsyndroom ontstaat doordat het rode beenmerg te weinig bloedcellen produceert. Als geen medische zorg wordt verleend, kan vanaf een equivalente dosis van 4 Gy sterfte optreden door acute effecten op het bloedvormend weefsel. Bij een hogere dosis (10-50 Gy) treedt ook het darmsyndroom op. Het darmsyndroom ontstaat sneller dan het beenmergsyndroom en wordt veroorzaakt door celdood (van stamcellen en andere cellen die zich delen). Als een slachtoffer herstelt van het darmsyndroom kan het alsnog overlijden door het later optredende beenmergsyndroom. Vanaf een dosis van 50 Gy en hoger treedt het hersensyndroom op. Sterfte treedt dan op tussen 1 uur en 2 dagen na bestraling.

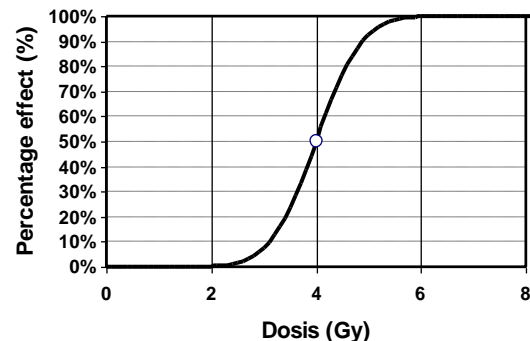
Tabel 4.1 Vroege of acute effecten die optreden na bestraling van het hele lichaam

Dosis [Gy]	Effect
0,2-1	geen ziekteverschijnselen, vermindering van het aantal witte bloedlichaampjes
1-2	verminderde weerstand, vermoeidheid, braken, diarree, herstel na enkele weken
2-3	ernstige stralingsziekte door beschadiging van o.a. beenmerg
3-4	ernstige stralingsziekte, sterfttekans binnen een maand zonder medische behandeling maximaal 50%
4-10	beenmergsyndroom: er kunnen geen nieuwe bloedcellen aangemaakt worden in het beenmerg, omdat deze cellen ernstig beschadigd of dood zijn; in bijna alle gevallen sterfte binnen een maand zonder medische behandeling
10-50	maag-darm syndroom: er kan geen nieuw slijmvlies in de darmen aangemaakt worden, omdat deze cellen ernstig beschadigd of dood zijn; sterfte binnen een week
>50	centraal zenuwstelselsyndroom: de zenuwcellen sterven en kunnen niet vervangen worden; sterfte binnen enkele uren tot dagen

Als voorbeeld: bij een niet-afgeschermd 500 TBq kobalt-60-bron ontvangt een omstander op 1 meter afstand al binnen enkele minuten een dodelijke dosis (ook wel lethale dosis genoemd, afgekort tot LD).

Dosis-effect relatie

De relatie tussen stralingsdosis en deterministisch effect wordt gegeven door een zogenaamde S-curve (zie Figuur S4.2). Bij lage equivalente doses (lager dan de drempeldosis) is er bij niemand een effect waarneembaar, en bij hoge doses vinden we het effect in 100% van de gevallen. De stralingsdosis die karakteristiek is voor een bepaald effect wordt vaak weergegeven door de dosis waarbij het effect in 50% van de gevallen wordt waargenomen. Als we als effect sterfte nemen, dan spreken we in dit verband over LD₅₀ (letale dosis voor 50% van de gevallen). De LD₅₀ is afhankelijk van diverse factoren zoals wel of niet medisch behandelen, geslacht, leeftijd, etc. Tabel S4.1 geeft de drempeldoses voor een aantal gevoelige organen. Ook de blootstellingstijd is van invloed op het effect. Het effect van een hoge dosis die over een periode van maanden of jaren ontvangen wordt, is veel milder dan van eenzelfde dosis in zeer korte tijd (een acute dosis). In combinatie met de dosis speelt dus het dosistempo ook een rol. In onderstaande voorbeelden gaan we uit van een acute dosis.



Figuur S4.2 Dosis-effect relatie volgens de S-curve; het karakteristieke 50%-punt is aangegeven met het open rondje

Volledige lichaamsbestraling

Bij volledige bestraling van het lichaam openbaren de eerste symptomen zich boven een equivalente dosis van 1 Gy. De LD₅₀ waarde voor totale lichaamsbestraling ligt tussen de

3 Gy en 10 Gy afhankelijk van het kunnen toepassen van een geschikte medische behandeling.

Tabel S4.1 Drempeldosis voor weefsels en organen

weefsel en deterministisch effect	drempeldosis bij kortdurende blootstelling [Gy]
testes	
- tijdelijke steriliteit	0,15
- blijvende steriliteit	3,5 – 6
eierstokken	
- steriliteit	2,5 – 6
ooglenzen	
- aantoonbare vertroebeling (begin van staar)	0,5 – 2,0
- verminderd gezichtsvermogen (staar)	5,0
beenmerg	
- onderdrukking van de bloedvorming	0,5

Als het lichaam *gedeeltelijk* bestraald is met een hoge dosis straling, kunnen de effecten veel minder ernstig zijn. De aanmaak van bloedcellen in de niet-bestraalde delen van het beenmerg kan dan gewoon doorgaan en er is dan voldoende capaciteit om dit op te vangen. Dit geldt niet als bij zo'n gedeeltelijke bestraling vitale organen beschadigd raken. Bij gedeeltelijk blootgestelde delen van het lichaam ontstaan na enkele uren brandwonden.

Partiële bestraling

Ook bij partiële bestraling treden deterministische effecten op. Het bestralen van een deel van de huid met een γ -stralingsbundel met een acute equivalente dosis boven 3-5 Gy leidt al na een paar uur tot het rood worden van de huid. Dit effect verdwijnt weer, maar na enkele weken raakt het bestraalde deel van de huid onthaard. Ook dit effect is tijdelijk. Als de huiddosis hoger is dan 6-8 Gy, dan is de ontharing blijvend. Bij nog hogere huiddoses treedt zweervorming op of sterft de huid zelfs af. Verder zijn vooral het beenmerg en de ooglenzen relatief gevoelig voor straling; al vanaf een acute equivalente doses boven 0,5 Gy worden afwijkingen in de ooglenzen waargenomen.

Ons lichaam kan alleen in zeer uitzonderlijke gevallen aan een hoge dosis ioniserende straling worden blootgesteld. De behandeling van kanker is een bekend voorbeeld; het lichaam wordt dan plaatselijk met een hoge dosis bestraald. Dit gebeurt met tussenpozen en in kleinere fracties. Dit leidt (meestal) tot het verschrompelen van de tumor. Hierbij wordt straling dus bewust toegepast.

Maar ook bij ongelukken met kernenergiecentrales kunnen hoge stralingsniveaus voorkomen als zeer grote hoeveelheden radioactieve stoffen vrijkomen. Dit was het geval in Tsjernobyl en Fukushima. Daar is gebleken dat hulpverleners die dichtbij de reactor ingezet worden een relatief hoge dosis kunnen oplopen. De kans op een incident van deze omvang is zeer klein. Incidenten waarbij ioniserende straling vrijkomt, zullen meestal een zeer lage stralingsbelasting voor de hulpverleners opleveren. Door het gebruik van meetapparatuur wordt gezorgd dat de dosis die hulpverleners oplopen, beperkt blijft.

4.2 Stochastische effecten

Bij een lagere dosis ioniserende straling ontstaan geen deterministische effecten, maar na verloop van tijd kunnen wel stochastische (kansgebonden) effecten optreden. Het belangrijkste stochastische effect is een verhoogde kans op kanker. Eventuele stochastische effecten openbaren zich pas jaren na blootstelling. Voor de typische latentietijd (de tijd tussen het oplopen van de dosis en het optreden van een ziekte) van leukemie wordt 3 tot 10 jaar aangehouden en voor die van solide tumoren 25 jaar; de verdeling is echter heel breed.

Blootstelling aan een lage dosis ioniserende straling verhoogt de *kans* op het ontstaan van kanker. Blootstelling aan straling betekent dus niet dat er kanker ontstaat. Sterker nog, de kans dat dat niet gebeurt, is veel groter dan de kans dat het wel gebeurt. Het is als principe vergelijkbaar met het kopen van loten in een loterij, hoewel men in een loterij wel hoopt te winnen en bij bestraling natuurlijk niet. Veel loten kopen vergroot de kans op het winnen van een prijs. Toch kan het voorkomen dat iemand met slechts één lot de hoofdprijs wint en een ander met vele tientallen loten helemaal niets krijgt. Overigens geldt voor lage doses (vergelijkbaar met de jaarlijkse stralingsbelasting) dat de kans op het ontstaan van kanker niet aantoonbaar hoger ligt dan de kans op het 'normale' ontstaan van kanker.

In de eerste helft van de twintigste eeuw werden cijfers en wijzers van uurwerken met de hand geschilderd met een radiumhoudende verf, zodat de klok in het donker afgelezen kon worden. Dit werk werd vaak gedaan door jonge vrouwen. Zij brachten de verf aan met een penseeltje dat zij met de mond spitsten. Zo kregen deze vrouwen schadelijke hoeveelheden radioactief radium binnen. Een opmerkelijk groot aantal zogenoemde 'dial painters' is gestorven aan de gevolgen van botkanker. Blootstelling aan straling speelde hierbij een rol.

De LNT-aanname

Het ontstaan van kanker is een bijzonder complex proces, dat uit meerdere stappen bestaat en waarbij mutaties in het DNA een essentiële rol spelen. Omdat straling in staat is om mutaties te veroorzaken, vormt het een extra risicofactor voor het ontstaan van kanker. Omdat toeval in het ontstaan van kanker zo'n grote rol speelt, worden deze effecten stochastische effecten genoemd.

Voor hoge stralingsdoses is het verband tussen straling en kanker bewezen en zijn de risicogetallen vrij goed bekend. Vertaling naar lagere doses blijft echter moeilijk. De huidige kennis is afgeleid van fundamenteel biologisch onderzoek, dierexperimenteel onderzoek en de (epidemiologische) analyse van mensen die in het verleden aan hoge stralingsdoses zijn blootgesteld (bijvoorbeeld atoombomslachtoffers, uraniummijnwerkers en 'dial painters').

Voor stralingsbeschermingsdoeleinden gelden de volgende aannames:

- > de relatie tussen de ontvangen stralingsdosis en de (extra) kans op het ontstaan van kanker is lineair: 4% per Sv (voor volwassen werknemers).
- > er is geen drempeldosis.

Dit model wordt ook wel het LNT-model genoemd, van 'linear-no-threshold', zie Figuur S4.3. Het LNT-model is een systematiek die in de praktijk goed toepasbaar is in het stralingsbeschermingsmodel (van de ICRP). De LNT-aanname is niet bewezen, maar ook niet ontkracht. Er zijn zelfs onderzoekers die beweren dat een lage stralingsdosis de kans

op kanker verkleint ('hormese'). Dit zou komen door het stimuleren van herstelmechanismen. Het principe van 'hormese' is omstreden.

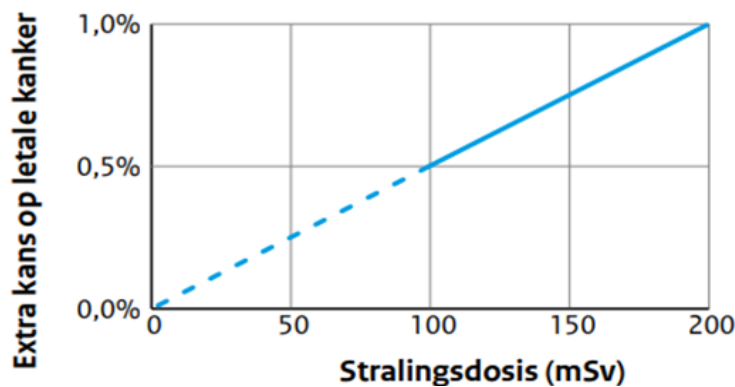
Genetische en teratogene effecten

Bij genetische effecten gaat het om stralingsschade die is aangebracht vóór de conceptie, en die overgedragen wordt op het nageslacht.

De effecten die optreden door bestraling van de ongeboren vrucht (prenatale bestraling) worden teratogene effecten genoemd. De gevoeligheid van de foetus voor straling hangt af van de ontwikkelingsfase waarin deze zich bevindt. Bestraling van de foetus

- > in de eerste drie weken na conceptie: geen effect bij levendgeborenen
- > 3-8 weken na conceptie: misvorming van organen
- > 8-25 weken na conceptie: verlaging van de intelligentie
- > vanaf week 4: mogelijk mutaties die op de langere termijn tot kanker leiden.

Voor zwangere vrouwen gelden daarom extra restricties voor blootstelling aan straling in arbeidssituaties (zie Hoofdstuk 6).



Figuur S4.3 De "linear-no-threshold (LNT)" hypothese, extrapoleert de door straling toegevoegde kans op kanker bij lage dosis lineair naar 0%

Samengevat komt het hierop neer:

- > iedereen heeft kans op kanker, wel of niet blootgesteld aan ioniserende straling
- > bij een hogere dosis wordt de kans op kanker groter; de kans op kanker is 4% per Sv (voor volwassen werknemers)
- > over het type kanker dat zich ontwikkelt, is weinig bekend; dat varieert.

4.3 Inwendige besmetting

Radionucliden die iemand heeft ingeademd of opgegeten zullen geheel of gedeeltelijk opgenomen worden in bepaalde organen en weefsels van het lichaam. Iedere keer als er daarna in het lichaam een radioactief deeltje vervalst, wordt er straling uitgezonden en (deels) geabsorbeerd. α -deeltjes kunnen lokaal zwaardere schade aan het DNA toebrengen dan β -deeltjes en fotonen door de grootte van de deeltjes en de lading. Bij inwendige besmetting worden organen gedurende langere tijd bestraald. Hoe lang dat precies is, heeft te maken met de halfwaardetijd van de radioactieve stof en de tijd die het lichaam nodig heeft om die stof kwijt te raken. Maar in sommige gevallen vindt er na een éénmalige inname zelfs

levenslang interne bestraling plaats. Bij een inwendige besmetting kan een aantal algemene maatregelen genomen worden:

- > tegengaan van opname van de stof in het lichaam (bijvoorbeeld door toedienen van actieve kool, laten braken, spoelen van neus en keel, et cetera)
- > bevorderen van de eliminatie (het verwijderen) van de stof uit het lichaam (bijvoorbeeld vocht toedienen bij besmetting met tritium, maar ook na een medische behandeling met radioactieve vloeistof)
- > symptoombestrijding.

4.4 Medische behandeling

Een specifieke behandeling die gericht is op de aard van de opgenomen radioactieve stof is maar zelden mogelijk. Alleen voor de volgende radionucliden zijn gerichte maatregelen te nemen:

- > Bij inwendige besmetting met radioactief jodium kunnen kaliumjodaat- of kaliumjodidetabellen voorgeschreven worden (jodiumprofylaxe). Het innemen van jodiumtabletten zorgt ervoor dat de schildklier verzadigd wordt door stabiel jodium, zodat radioactief jodium niet opgenomen wordt. Dit is alleen zinvol als dit kort vóór of binnen enkele uren na de besmetting gebeurt en alleen voor jongere mensen (< 40 jaar).
- > Bij besmetting met radioactief cesium kan Pruisisch of Berlijns Blauw worden toegediend om absorptie in het lichaam te verhinderen.
- > Bij besmetting met plutonium en americium kunnen chelatoren de uitscheiding van het metaal uit het lichaam bevorderen. Chelatoren zijn stoffen die metalen binden, bijvoorbeeld di-ethyleentriaminepenta-azijnzuur (DTPA) dat plutonium bindt.

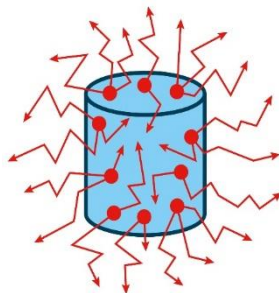
5 Blootstellingspaden voor radioactieve stoffen

Bij incidenten met radioactieve stoffen maken we onderscheid tussen incidenten waarbij de radioactieve bron wel of niet open is. Als de verpakking niet beschadigd is of de omhulling aanwezig is, spreken we van een gesloten bron; de radioactieve stof blijft in de bron. Als de verpakking of omhulling beschadigd of niet aanwezig is, hebben we te maken met een open bron; de radioactieve stof kan dan vrijkomen in de omgeving.

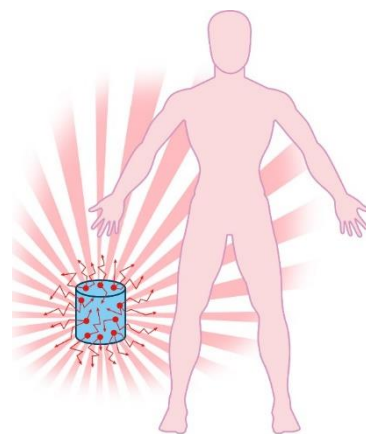
5.1 Incidenten met een gesloten bron: externe straling

Zolang de omhulling of verpakking van een gesloten radioactieve bron intact is, kan alleen γ -straling vanwege het grote doordringend vermogen buiten de bron een stralingsveld veroorzaken (Figuur 5.1). Een persoon kan dan aan externe straling worden blootgesteld, in de volksmond ook wel 'bestraling' genoemd. De radioactieve stoffen en zowel α - als β -straling komen, vanwege de beperkte dracht, dus niet vrij uit de bron. De stralingsbron bevindt zich buiten het lichaam en personen kunnen dus alleen extern bestraald worden over het hele lichaam (zie Figuur 5.2). Als de stralingsbron verwijderd of afgeschermd wordt of als de persoon weggaat, houdt de bestraling op.

Personen die bestraald zijn, worden NIET radioactief en zijn niet in contact geweest met een gevaarlijke stof en kunnen NIET besmet raken. Zij hoeven dus niet schoongemaakt te worden! De stralingsbelasting is afhankelijk van de bronsterkte, de afstand tussen de bron en de persoon, de afscherming (inclusief persoonlijke beschermingsmiddelen) en de blootstellingstijd.



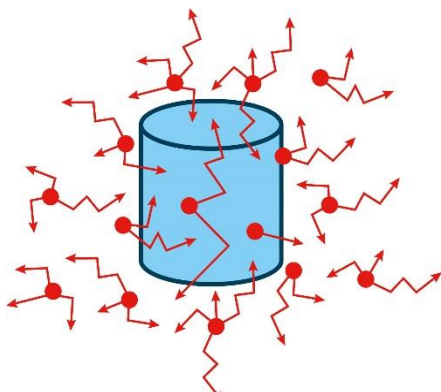
Figuur 5.1 Gesloten bron: radioactieve deeltjes blijven in de bron, alleen externe straling buiten bron



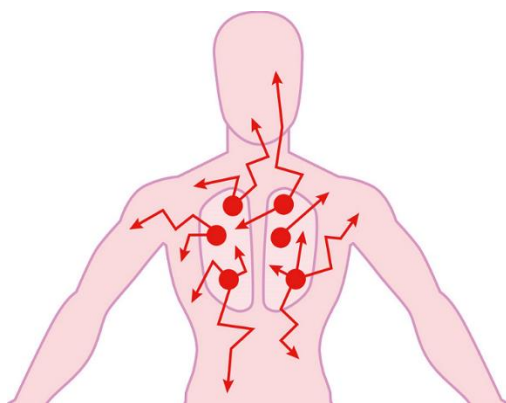
Figuur 5.2 Persoon bevindt zich in extern stralingsveld: GEEN direct contact met radioactieve stof en GEEN besmetting

5.2 Incidenten met een open bron: besmetting en straling

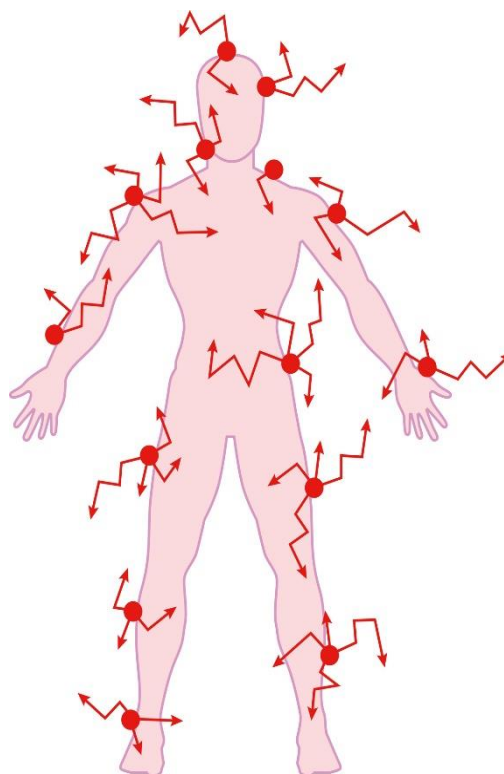
Bij een beschadigde, open bron (bijvoorbeeld bij een kernongeval of een terroristische aanslag met een 'vuile' bom) verspreidt het radioactief materiaal zich in eerste instantie in de lucht (zie Figuur 5.3). Radioactieve deeltjes in lucht zijn eigenlijk kleine stralingsbronnen; ze zenden ioniserende straling uit. Bij een open bron is dus, net als bij een gesloten bron, altijd sprake van externe straling.



Figuur 5.3 Open bron: radioactieve deeltjes komen buiten de bron, zowel externe straling als radioactieve stof buiten bron



Figuur 5.4 Inwendige besmetting én bestraling door inademing (inhalatie)
NB: inwendige besmetting is ook mogelijk via het maag-darmkanaal of door de huid (hier niet getekend)



Figuur 5.5 Uitwendige besmetting én bestraling op het lichaam

De vrijgekomen radioactieve stoffen kunnen ingeademd of ingeslikt worden (via besmet voedsel of drinkwater) en komen zo in het lichaam (zie Figuur 5.4). Er ontstaat zo direct contact tussen de radioactieve stof en menselijke cellen IN het lichaam: dit is inwendige besmetting door inademing of inslikken. De α - en/of β -deeltjes kunnen dan vrijwel ongehinderd de cellen binnendringen en deze beschadigen. Vooral jodium dat in de schildklier gaat zitten en cesium dat zich via het bloed verspreidt over alle organen, zijn gevaarlijke isotopen.

Inwendige besmetting kan NIET afgespoeld of verwijderd worden. Afhankelijk van de chemische samenstelling van de radioactieve deeltjes zal een deel het lichaam via uitscheiding (uitademing, zweten, urine en ontlasting) verlaten, maar het gedeelte dat achterblijft, zal het lichaam langdurig van binnenuit bestralen.

Na verloop van tijd zullen de radioactieve deeltjes neerslaan, waardoor de omgeving met alle aanwezige personen, dieren, en objecten, besmet kan worden. Neergeslagen radioactieve deeltjes in de omgeving worden ook wel 'fall-out' genoemd.

Radioactieve stoffen kunnen ook op het lichaam (huid, slijmvliezen, haren) of kleding terecht komen en daar achterblijven (zie Figuur 5.5). Ook hier ontstaat direct contact tussen de radioactieve stoffen en menselijke cellen, maar buiten het lichaam: dit is uitwendige besmetting. Eenmaal op het lichaam kan de radioactieve stof ioniserende straling uitzenden en vindt bestraling van buitenaf plaats. Dit kan 'verbranding' van de huid veroorzaken als de intensiteit voldoende hoog is. Uitwendige besmetting kan eenvoudig verspreid worden door contact met andere objecten of personen. Uitwendige besmetting moet afgespoeld of verwijderd worden! Het meest effectief is snel uittrekken van besmette kleding (niet over het hoofd!), omdat de externe bestraling dan snel verminderd wordt.

Via wonden kan uitwendige besmetting het lichaam binnendringen en zo leiden tot een inwendige besmetting. Van tritium en jodium is bekend dat deze radioactieve stoffen door de intacte huid kunnen dringen. Besmetting is gevaarlijk bij alle soorten radioactieve stoffen.

Neergeslagen materiaal kan opnieuw in de lucht vrijkomen, bijvoorbeeld door opwarrelen. Dit wordt ook wel resuspensie genoemd. Resuspensie kan opnieuw inwendige besmetting veroorzaken (door inademing, inslikken of binnendringen door de huid). Vooral in een droge stoffige omgeving is dit relevant.

5.3 Samenvatting blootstellingspaden

De mogelijke blootstellingspaden zijn dus:

1. *Externe straling*: directe blootstelling aan externe straling, stralingsgevaar
 - a. vanuit een wolk met radioactieve deeltjes
 - b. vanuit de omgeving door radioactieve deeltjes die neergekomen zijn.
2. *Uitwendige besmetting*:
 - a. *direct of primair*: neerslaan van radioactieve deeltjes op personen. Deze personen worden uitwendig besmet en extern bestraald
 - b. *indirect of secundair (via-via)*:
 - i. door onderling aanraken kunnen personen elkaar uitwendig besmetten
 - ii. door resuspensie kunnen personen uitwendig besmet worden.

3. *Inwendige besmetting:*

- a. *direct of primair:* door inademing van radioactieve deeltjes
- b. *indirect of secundair (via-via):*
 - i. via wondjes kan besmetting het lichaam binnendringen: uitwendige besmetting leidt zo tot inwendige besmetting
 - ii. via hand-mond-contact kunnen radioactieve deeltjes in de mond komen en ingeslikt worden
 - iii. door inslikken van radioactieve deeltjes op besmet voedsel of in drinkwater
 - iv. door resuspensie kunnen personen eerder neergekomen radioactieve deeltjes inademen.

Afhankelijk van de omstandigheden kunnen de verschillende blootstellingspaden gelijktijdig optreden.

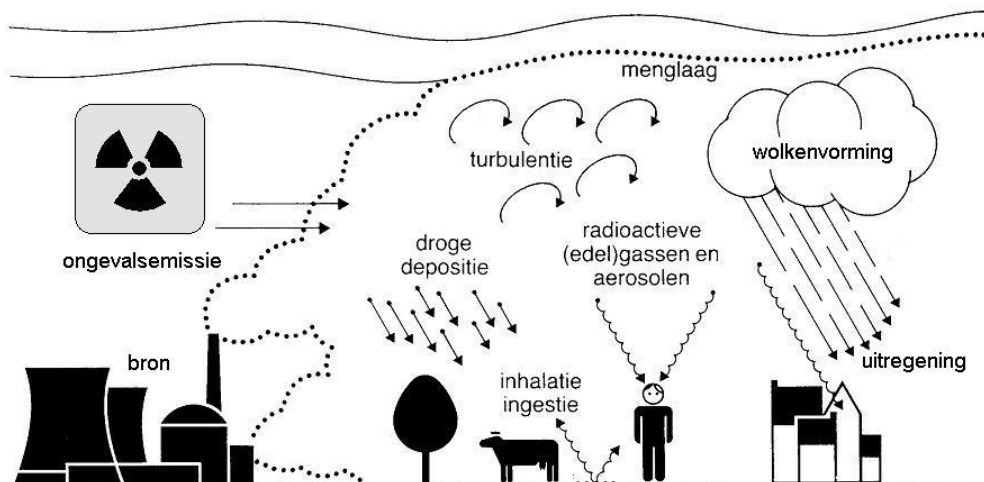
Tussen het vrijkomen van stoffen en uiteindelijk het oplopen van een dosis zitten nog vele processen die behoorlijk ingewikkeld kunnen zijn (zie Figuur 5.6). Dit geldt zeker als het gaat om verspreiding van radioactiviteit over een zeer groot gebied (denk daarbij bijvoorbeeld aan Tsjernobyl en Fukushima).

Processen die een rol spelen zijn:

- > Pluimstijging die afhankelijk is van de hoogte waarop de lozing plaatsvindt en van de warmte-inhoud van de bron.
- > Horizontaal en verticaal transport in de lucht: afhankelijk van de meteorologische ofwel weerscondities, aanwezigheid van bebouwing of obstakels.
- > Depositie ofwel het neerslaan van deeltjes: dit is onder andere afhankelijk van de fysische/chemische eigenschappen van de deeltjes, de oppervlakteruwheid van het terrein en de mate van regenval.

Er is een groot verschil tussen de depositie bij droog en bij nat weer: tijdens (hevige) regenval kan de depositie van radioactiviteit een factor 10-100 hoger zijn dan onder droge omstandigheden. Bij buiige regen tijdens het overtrekken van de wolk kan dat leiden tot 'hot spots' in het depositiepatroon.

- > Gedrag van personen: verblijf binnen of buiten, bewegen door/in besmette omgeving, gebruik beschermende kleding of adembescherming.
- > In een latere fase speelt de voedselketen een rol, omdat de radioactieve stoffen in landbouwproducten terecht kunnen zijn gekomen.



Figuur 5.6 Schematische voorstelling van de verspreiding van radioactieve stoffen na een stralingsincident in een kernenergiecentrale

5.4 Gevaarlijke stoffen versus radioactieve stoffen

Bij het vrijkomen van gevaarlijke stoffen kan de omgeving besmet raken. Personen in die omgeving kunnen de gevaarlijke stof inademen of inslikken. Ook kan de stof op het lichaam (huid, slijmvliezen, haren) terechtkomen. Dit geldt ook voor radioactieve stoffen. De wijze van blootstelling en de blootstellingsroutes voor besmetting zijn hetzelfde. De bescherming tegen blootstelling dus ook!

Het belangrijke verschil tussen radioactieve stoffen en andere gevaarlijke stoffen heeft te maken met de ioniserende straling die radioactieve stoffen uitzenden. Deze straling kan schade aanrichten zonder direct contact met het lichaam. Voor andere gevaarlijke stoffen is direct contact nodig om gezondheidsschade op te lopen (tenzij het om warmtestraling en drukeffecten gaat).

De bijzondere eigenschappen van radioactieve stoffen kunnen als volgt omschreven worden:

- > Radioactieve stoffen zenden ioniserende straling uit (α -, β - en/of γ -straling); dit is vaak een combinatie van verschillende soorten straling en niet maar één type.
- > Radioactieve stofdeeltjes zijn kleine stralingsbronnen.
- > Radioactieve stoffen zijn stoffen die verspreid kunnen worden, maar ook ingeademd of ingeslikt kunnen worden en/of op het lichaam terecht kunnen komen (net als andere gevaarlijke stoffen).
- > De blootstelling aan externe straling neemt af door afscherming van de bron, voldoende afstand tot de bron (kwadratenregel) en door er minder lang in de buurt te blijven.
- > Radioactieve stoffen zijn gezondheidsschadelijk als een hoge stralingsdosis wordt opgelopen; meestal is daar een relatief lange blootstellingstijd voor nodig.
- > De stralingsintensiteit van een stralingsbron neemt met een voor die radioactieve stof specifieke snelheid af (halfwaardetijd); de halfwaardetijd kan variëren van fracties van seconden tot miljoenen jaren. Is de halfwaardetijd voor een stof seconden, dan kan de radioactieve besmetting snel verdwenen zijn.
- > Uiteraard neemt een besmetting ook af afhankelijk van de snelheid waarmee de radioactieve stof het lichaam op een natuurlijke wijze verlaat via uitscheiding (eliminatie).
- > Let ook op mogelijk andere gezondheidsschadelijke effecten van de stof; een stof kan bijvoorbeeld naast radioactief ook bijtend zijn.

6 Stralingsbescherming

Stralingsbescherming is er op gericht om de risico's van blootstelling aan ioniserende straling te beperken. De Kernenergiewet en de daarop gebaseerde regelgeving bevatten alle wettelijke bepalingen over ioniserende straling in Nederland. In verband met de schadelijke effecten van straling is het altijd belangrijk om de dosis zoveel mogelijk te beperken. In Nederland is de bescherming tegen straling geregeld in het Besluit basisveiligheidsnormen (Bbs). Het Bbs is gebaseerd op Europese regelgeving, waarin aanbevelingen van de Internationale Commissie voor Radiologische Bescherming (ICRP) zijn doorgevoerd. Het Bbs onderscheidt drie blootstellingsituaties: geplande blootstelling, bestaande blootstelling en een radiologische noodsituatie. In een geplande blootstellingsituatie gaat het om de (vooraf) geplande toepassing van een stralingsbron of wijziging van een blootstellingsroute. Een radiologische noodsituatie is een onverwachte blootstelling, waarvoor maatregelen nodig zijn om blootstelling te voorkomen of te verminderen. In een bestaande situatie is de blootstelling al aanwezig op het moment dat een besluit over de controle daarvan wordt genomen. De blootstelling van de bevolking na beëindiging van een radiologische noodsituatie valt hier ook onder, indien niet meer aan de reguliere limieten voor blootstelling van de bevolking kan worden voldaan.

Uitgangspunt van de stralingsbescherming is dat acute effecten moeten worden voorkomen en de kans op kanker zoveel mogelijk beperkt moet worden. Hierbij gelden de grondbeginselen van de stralingsbescherming:

- > **Rechtvaardiging** betreft een afweging van voor- en nadelen voor het invoeren of wijzigen van de blootstelling. Voor geplande situaties (handelingen) wordt een blootstelling geïntroduceerd en dit mag alleen plaatsvinden als dat nut heeft; de voordelen moeten de nadelen overtreffen, de baten moeten opwegen tegen de kosten. In noodsituaties gaat het om het rechtvaardigen van de beschermingsmaatregelen. Doen ze meer goed dan kwaad? Is er een netto positief individueel of maatschappelijk effect? De consequentie is dat in een rechtvaardiging niet alleen radiologische factoren, maar ook sociale en economische factoren in beschouwing worden genomen.
- > **Optimalisatie** is het proces gericht op verdere reductie van de blootstelling; dat wil zeggen dat de kans op blootstelling, de individuele dosis en het aantal blootgestelde personen zo laag als redelijkerwijs mogelijk is worden gehouden. Optimalisatie heeft het ALARA (As Low As Reasonably Achievable)-principe vervangen, maar betekent in feite hetzelfde. Ook in het proces van optimalisatie worden sociale en economische factoren betrokken.
- > **Dosislimitering** wil zeggen dat de door personen ontvangen doses de vastgestelde dosislimieten niet mogen overschrijden; deze limieten zijn zodanig gekozen dat acute effecten worden vermeden en de kans op het ontstaan van kanker wordt beperkt. In een radiologische noodsituatie en in bestaande blootstellingsituaties zijn dosislimieten niet van toepassing en worden referentieniveaus ingevoerd als 'richtlijn' voor de optimalisatie van de bescherming van de bevolking en hulpverleners.

Een referentieniveau (RN) is bedoeld als een hulpmiddel voor de optimalisatie. Het RN is gedefinieerd als een residuele effectieve dosis (acuut of in een jaar); dat wil zeggen een potentiële effectieve dosis over één jaar, rekening houdend met de te verwachten reductie

van dosis na implementatie van maatregelen ter bescherming van de bevolking of herstel van de leefomgeving. Het RN fungeert dan als een 'benchmark' voor de beoordeling van de effectiviteit van het pakket aan maatregelen voor de bescherming van de bevolking. Optimalisatie gaat door totdat de residuele jaardosis zo laag mogelijk onder het referentieniveau komt. In Nederland is het referentieniveau voor de bevolking tijdens een radiologische noodsituatie vastgesteld op 100 mSv. Na afloop van een radiologische noodsituatie is dat 20 mSv. Een residuele effectieve jaardosis van 20 mSv of lager is daarmee een voorwaarde voor een overgang van een radiologische noodsituatie naar een bestaande blootstellingssituatie. De referentieniveaus kunnen overigens op basis van de feitelijke situatie naar beneden worden bijgesteld.

6.1 Dosislimitering in een geplande blootstellingssituatie

Bij een geplande blootstellingssituatie gaat het om een bewuste beslissing om een blootstellingssituatie te introduceren of te wijzigen. Rechtaardiging en optimalisatie zijn ook hier van toepassing; er is voldoende gelegenheid om tot een afweging te komen. Dosislimieten zijn ingesteld om te voorkomen dat door een groot aantal individueel gerechtvaardigde handelingen de ontvangen dosis toch ontoelaatbaar hoog wordt. Er zijn dosislimieten voor de bevolking en voor de bijzondere groep van werknemers die beroepshalve werken met ioniserende straling, de zogenaamde blootgestelde werknemers. Voor de bevolking en niet-blootgestelde werknemers geldt een dosislimiet van 1 mSv per jaar. Voorbeelden van planbare blootstellingssituaties zijn het controleren van lasnaden met een γ -bron of de werkzaamheden van een radiologisch medewerker in een ziekenhuis.

Dosislimieten blootgestelde werknemers in een geplande blootstellingssituatie

Voor de groep blootgestelde werknemers geldt een maximaal toelaatbare effectieve dosis van 20 mSv per jaar. Deze waarde is zo gekozen dat een werknemer gedurende diens gehele werktijd, ongeveer 35-40 jaar, in totaal nooit boven de 1 Sv uit zal komen. Blootgestelde werknemers worden ingedeeld in A- en B-werknemers. Deze indeling is bedoeld om verschil te maken in de individuele monitoring en het gezondheidskundig toezicht. Voor blootgestelde A- en B-werknemers gelden dezelfde dosislimieten (zie Tabel S6.1 onder blootgestelde A-werknemers). Het grootste gedeelte van de blootgestelde werknemers (> 99%) zal de dosislimiet van 20 mSv echter nooit bereiken. Voor indeling in de groep B-werknemers geldt een dosisbeperking van 6 mSv effectieve dosis per kalenderjaar. Alle andere werknemers, die dus geen blootgestelde werknemer zijn, mogen in hun werkomgeving niet meer dan 1 mSv per jaar ontvangen. Ook zijn voor werknemers dosislimieten vastgesteld voor de huid, ogen en extremiteiten (handen-onderarmen-voeten-enkels). De jaardosislimieten staan vermeld in Tabel S6.1.

De limiet voor de individuele effectieve dosis van een lid van de bevolking is 1 mSv per jaar voor het totaal van alle geplande blootstelling aan ioniserende straling (dat wil zeggen als gevolg van alle handelingen in Nederland). Deze limiet is ter vergelijking opgenomen in de tabel.

Tabel S6.1 Effectieve en equivalente dosislimieten voor leden van de bevolking en blootgestelde werknemers in een geplande blootstellingssituatie.

De dosislimieten gelden per kalenderjaar. Voor blootgestelde B-werknemers gelden dezelfde limieten als A-werknemers, de hier opgegeven waarden gelden als dosisbeperkingen.

Categorie	Effectieve dosislimiet ¹⁾	H _{ooglens}	H _{huid} ²⁾	H _{extremiteit}
		[mSv per kalenderjaar]		
blootgestelde A-werknemer	20	20	500	500
blootgestelde B-werknemer ³⁾	6	15	150	150
studerenden 16-18 jaar die uit hoofde van hun opleiding verplicht zijn een handeling te verrichten	6	15	150	150
werknemer die geen blootgestelde werknemer is	1	15	50	50
ongeboren kind van zwangere werknemer gedurende de periode van de zwangerschap	1	-/- ⁴⁾	-/- ⁴⁾	-/- ⁴⁾
leden van de bevolking	1	15	50	-/-

- 1) De effectieve dosislimiet geeft voldoende bescherming tegen stochastische effecten
- 2) De huiddosis is gedefinieerd als de equivalente dosis in mSv in een kalenderjaar gemiddeld over enig blootgesteld huidoppervlak van 1 cm².
- 3) De opgegeven waarden gelden als dosisbeperkingen voor B-werknemers. In het Bbs hebben de A- en B-werknemers dezelfde limieten.
- 4) Voor de equivalente dosis van de ooglenzen, huid en extremiteiten geldt hier zo laag als redelijkerwijs mogelijk.

6.2 Dosisbeperkingen voor hulpverleners bij een radiologische noodsituatie

Bij een radiologische noodsituatie valt het personeel van de hulpdiensten, zowel beroepsmedewerkers als vrijwilligers, onder de definitie van een hulpverlener zoals vastgelegd in het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming. Hieronder vallen bijvoorbeeld ook verkenningseenheden van de brandweer. Het Bbs definieert voor deze groep een getrappt systeem van dosislimitering en referentieniveaus. Voor de hulpverleners in een radiologische noodsituatie betekent dit dat in eerste instantie moet worden uitgegaan van een dosislimiet van 20 mSv effectieve dosis, gelijk aan de limiet voor een blootgestelde A-werknemer in een geplande (niet-ongevals)blootstellingssituatie (zie Tabel S6.1). De gedachte hierachter is dat de inzet van hulpverleners tijdens een noodsituatie tot op zekere hoogte gepland kan worden en daarom maatregelen ter voorkoming en vermindering van blootstelling kunnen worden genomen.

Voor radiologische noodsituaties waarin niet aan de dosislimiet kan worden voldaan, is in het Bbs een referentieniveau vastgesteld van 100 mSv effectieve dosis⁷ voor bijvoorbeeld het ondersteunen of uitvoeren van taken in het kader van openbare orde en veiligheid, het

⁷ Een aantal personen zijn in het Bbs uitgezonderd van deelname: personen onder 18 jaar, leerlingen, zwangere werknemers en werknemers die borstvoeding geven.

uitvoeren van metingen of het behalen van gezondheidswinst bij een persoon of bevolkingsgroep.

In uitzonderlijke situaties gelden hogere referentiewaarden van 250 en 500 mSv effectieve dosis door uitwendige bestraling van werknemers die als hulpverlener optreden voor het redden of veiligstellen van uitermate grote materiële belangen (250 mSv) en voor levensreddend werk, het voorkomen van ernstige gezondheidseffecten door straling of om de ontwikkeling van catastrofale omstandigheden te voorkomen (500 mSv).

Dosisbeperkingen voor de bevolking (interventieniveaus) worden behandeld in Hoofdstuk 9.

Tabel 6.1 Referentieniveaus en dosislimiet voor hulpverleners tijdens een radiologische noodsituatie

Taak	[mSv]
Referentieniveau voor levensreddend werk, het voorkomen van ernstige gezondheidseffecten of ter voorkoming van catastrofale omstandigheden <i>in aanwezigheid van een AGS (stralingsbeschermingsdeskundige op (minimaal) het niveau van Coördinerend Deskundige, CD)</i>	500
Referentieniveau voor het redden of het veiligstellen van uitermate belangrijke materiële belangen <i>in aanwezigheid van een AGS (stralingsbeschermingsdeskundige op (minimaal) het niveau van Coördinerend Deskundige, CD)</i>	250
Referentieniveau voor ondersteuning of uitvoering van metingen, evacuatie, jodiumprofylaxe, openbare orde en veiligheid, indien niet aan de 20 mSv dosislimiet voor beroepsmatige blootstelling voor werknemers kan worden voldaan <i>in aanwezigheid van een AGS (minimaal opgeleid als Toezichthoudend Medewerker Stralingsbescherming voor verspreidbare radioactieve stoffen niveau D (TMS-VRS-D))</i>	100
Dosislimiet voor beroepsmatige blootstelling van werknemers die als hulpverlener ¹⁾ optreden in een radiologische noodsituatie <i>in aanwezigheid van een AGS (minimaal opgeleid als Toezichthoudend Medewerker Stralingsbescherming voor verspreidbare radioactieve stoffen niveau D (TMS-VRS-D))</i>	20

1) De 20 mSv geldt in beginsel per jaar, omdat hier feitelijk de reguliere dosislimiet voor radiologisch werknemers van toepassing wordt verklaard.

Hierbij geldt dat een hulpverlener die activiteiten zou kunnen ondernemen waarbij een effectieve dosis van meer dan 100 mSv kan worden ontvangen:

1. vooraf duidelijk en uitvoerig is ingelicht over de gezondheidsrisico's
2. de betreffende activiteit vrijwillig uitvoert
3. de activiteit uitvoert in aanwezigheid van tenminste een Coördinerend Deskundige, CD (dit is een aanvullende eis ten opzichte van het Besluit stralingsbescherming)
4. daarnaast is dosisregistratie per persoon en medisch toezicht geregeld.

Naast de vereisten uit het Besluit basisveiligheidsnormen hanteert de brandweer een aantal aanvullende eisen bij een operationele inzet.⁸ Er geldt als inzetprocedure een operationele alarmwaarde bij een dosistempo van 25 µSv/uur en er wordt een dosisbeperking van 2 mSv

⁸ Deze aanvullende eisen zijn gebaseerd op oude circulaires van BZK (EB62-386, EB65-1609, EB81-U1619).

externe straling voor een operationele inzet gehanteerd door de brandweer.⁹ De meetapparatuur van de brandweer is hierop afgesteld. De afspraken die hiervoor gelden zijn:

1. Stralingsniveaus > 25 µSv/u betekenen dat de situatie ongewoon is.
2. Voor werkzaamheden bij stralingsniveaus > 25 µSv/u vraagt de bevelvoerder eerst advies aan de AGS.
3. Bij stralingsniveaus > 25 µSv/u mag een bevelvoerder besluiten tot een inzet waarbij mensenlevens gered kunnen worden.
4. De stralingsbelasting die bij een inzet onder leiding van een bevelvoerder mag worden opgelopen door hulpverleners is maximaal 2 mSv per inzet¹⁰; dit komt ongeveer overeen met de gemiddelde stralingsbelasting per jaar van de bevolking in Nederland (zie Hoofdstuk 3).
5. Bij meerdere inzetten per jaar geldt een maximale totale dosis van 20 mSv per jaar.
6. De bevelvoerder plaatst een opstellijn op minimaal 25 meter bovenwinds van de locatie waar een stralingsniveau van 25 µSv/u wordt gemeten of daar waar een stralingsniveau < 1 µSv/u wordt gemeten met de Automess.
7. De bevelvoerder weegt altijd het resultaat van de inzet af tegen het risico en beperkt de stralingsbelasting tot een minimum (bij voorkeur < 25 µSv/u).

Voor werkzaamheden bij hogere stralingsniveaus en besmettingsgevaar is de aanwezigheid van een stralingsdeskundige vereist. Dit is meestal de AGS die adviseert over de inzet, de risico's en de te nemen maatregelen voor het beperken van de blootstelling (zie hiervoor Hoofdstuk 9). De AGS is minimaal opgeleid tot Toezichthoudend Medewerker Stralingsbescherming voor verspreidbare radioactieve stoffen niveau D (TMS-VRS-D).¹¹ Voor een inzet met een mogelijke blootstelling aan externe straling boven het referentieniveau van 100 mSv is dat bij voorkeur minimaal een Coördinerend Deskundige, CD (voorheen Niveau 3). De GAGS adviseert, communiceert en geeft voorlichting over de mogelijke gezondheidsrisico's.

De waarde van 25 µSv/u is gekozen om de grens aan te geven tussen 'normaal' en 'ongewoon'. Vaak wordt deze waarde ten onrechte gezien als de grens tussen 'veilig' en 'onveilig'. De grens van 25 µSv/u is zeer laag in vergelijking met de dosisbeperkingen die gelden voor een hulpverlener. Overschrijding van de alarmwaarde van 25 µSv/u of een persoonlijke dosis van 2 mSv is daarom geen argument om af te zien van levensreddende werkzaamheden of andere vormen van spoedeisend handelen waarbij uitermate grote belangen in het geding zijn.

Als operationele vuistregel is de alarmwaarde van 25 µSv/u echter goed bruikbaar ter bescherming van de hulpverleners zolang blootstelling via inhalatie door afwezigheid van radioactiviteit in de lucht of door afdoende adembescherming kan worden uitgesloten. De alarmwaarde beschermt dan tegen uitwendige bestraling. Als inhalatie niet kan worden

⁹ Deze dosisbeperking is in 1981 vastgelegd door het ministerie BZK in een circulaire (EB81-U1619) en daarna vertaald in inzetprocedures en les- en leerstof voor de brandweer.

¹⁰ Circulaire EB81-U1619 stelt dat de brandweerstalingsdeskundige inzetten met een stralingsbelasting tot 2 mSv mag leiden. Het verwijderen van besmetting en besmettingscontrole moet vervolgens onder leiding van een (externe) (bedrijfs)stralingsdeskundige niveau C (nu Coördinerend Stralingsdeskundige) plaatsvinden. Dit is in de praktijk vertaald naar de aanwezigheid van een Coördinerend stralingsdeskundige en dat mag een AGS zijn. Formeel vinden deze werkzaamheden plaats onder leiding van de AGS als stralingsdeskundige.

¹¹ Het stralingsdeskundighedeniveau is in de praktijk inmiddels aangepast van niveau 3 naar niveau 5b. Dit is dus een lager niveau dan oorspronkelijk bedoeld in de circulaires van BZK. Niveau 5A is niet voldoende, omdat dit alleen over toestellen gaat, terwijl 5B ook open en gesloten bronnen bevat.

uitgesloten, kan door inademing een aanzienlijke dosis worden opgelopen zonder waarschuwing van de Automess via de ingestelde alarmwaarde.

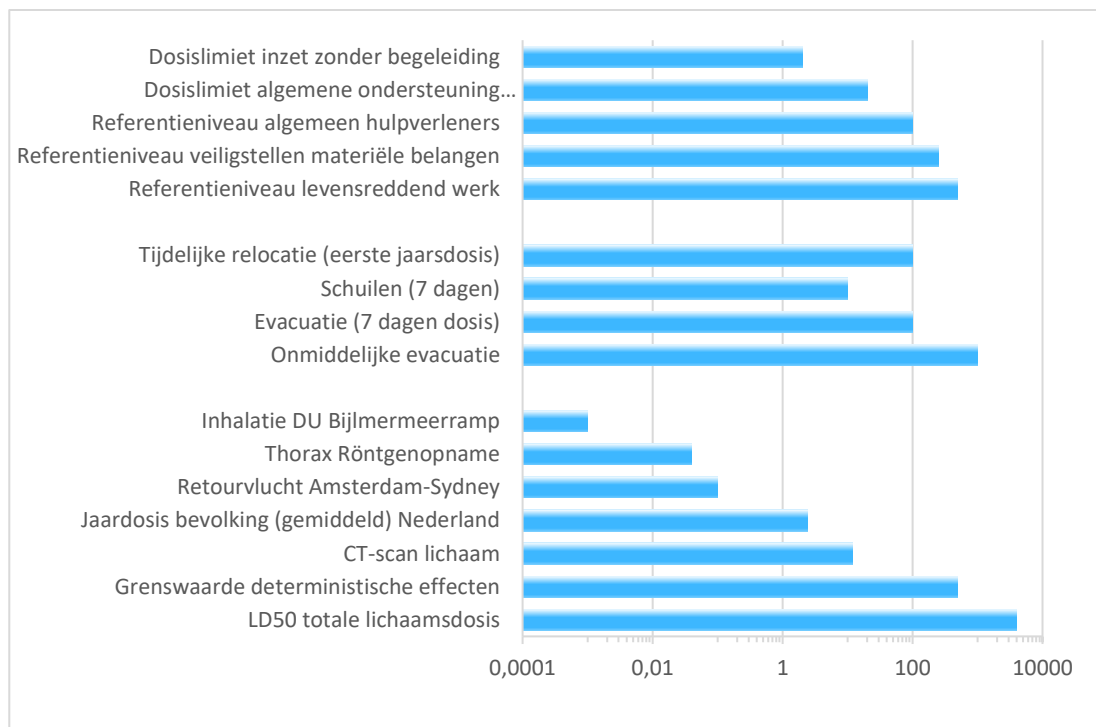
Interventie in relatie tot handelingen

Tijdens incidenten is de dosislimiet voor hulpverleners een factor 5 tot maximaal 25 maal (bij levensreddend werk) hoger dan voor de reguliere blootgestelde werknemers. Hogere blootstellingswaarden zijn gerechtvaardigd vanwege het bijzondere karakter van de werkzaamheden. Besef ook dat het bij noodsituaties om een eenmalige blootstelling gaat, terwijl reguliere werknemers de blootstelling gedurende meerdere jaren achtereen oplopen.

Overzicht van interventieniveaus

Figuur S6.1 toont, gegroepeerd van beneden naar boven, een overzicht van:

- > belangrijke referentieniveaus en grenswaarden voor (typische) blootstellingen en effecten
- > interventieniveaus voor directe maatregelen (bij A-incidenten, zie Hoofdstuk 8)
- > dosisbeperkingen voor de inzet van hulpverleners bij stralingsincidenten



Figuur S6.1 Overzicht van typische dosislimieten, referentieniveaus en interventieniveaus voor bevolking en hulpverleners vergeleken met een aantal reguliere en uitzonderlijke situaties. Let op de logaritmische schaal van de dosiswaarden. De waarden zijn weergegeven in mSv.

7 Meten door hulpverleners

De grootste beperking van de meetapparatuur van de brandweer is dat *uitsluitend* de externe straling gemeten wordt! Inwendige besmetting kan de brandweer niet meten; hiervoor is speciale meetapparatuur (de 'whole body counter') nodig. Ook voor het meten van neutronenstraling is speciale apparatuur nodig. Specialistische meetapparatuur is beschikbaar bij enkele onderzoekscentra zoals het RIVM, bij kernenergiecentrales, onderzoeksreactoren, instituten met deeltjesversnellers of losse neutronenbronnen.

We maken onderscheid in verschillende soorten metingen, namelijk:

1. Externe stralingsmetingen
 - a. omgevingsmeting (externe straling): ROMEO-meting
 - b. persoonsdosismeting: DELTA-meting bij elke inzet
2. Uitwendige besmettingsmetingen
 - a. in kaart brengen neergeslagen radioactieve deeltjes, de zogenaamde 'fall out' en/of 'hot spots': FOXTROT-meting (dus meten op oppervlakken)
 - b. besmettingscontrole van mogelijk besmette personen: SIERRA-meting
 - c. besmettingscontrole van hulpverleners: SIERRA-meting (dus meten op personen).

Metingen vinden plaats onder leiding van een brandweerstralingsdeskundige; dit is meestal de AGS. De stralingsdeskundige zal de meetresultaten interpreteren en vertalen naar een inzetadvies. Doel is altijd om het gevareng gebied, het effectgebied en persoonlijke risico's in kaart te brengen.

Dit hoofdstuk is een beschrijving van de meetapparatuur en het werkingsprincipe daarvan; voor de bediening van de meetapparatuur wordt verwezen naar de gebruiks- of instructiekaarten. Voor het verstrekken van een meetopdracht en het rapporteren van meetresultaten zijn meetformulieren beschikbaar (zie *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Operationele handreiking, Meetformulier RA*).

7.1 Meten van het gammastralingsniveau

De brandweer maakt gebruik van twee type stralingsmeters, de Automess en de ADOS. Beide meters meten eigenlijk hetzelfde, namelijk het stralingsniveau van γ -straling op de meetlocatie: de externe stralingsdosis (ook wel gammastralingsniveau). Het gemeten gammastralingsniveau kan de dosis met 35% onderschatten, afhankelijk van de manier van kalibreren en de samenstelling van de radioactieve besmetting; de dosis is dan in werkelijkheid hoger. Beide meters meten ook het dosistempo. Meetresultaten kunnen weergegeven worden in Gy of in Sv op het display; voor γ -straling zijn de waarden gelijk (zie paragraaf 2.2).

De brandweer gebruikt de Automess vooral als stralingsmeter voor de omgeving en de ADOS als persoonlijke dosismeter. Bij overschrijding van bepaalde waarden geven de meters een akoestisch en optisch alarm af.

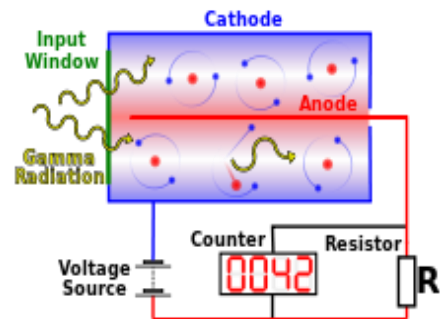
De alarmwaarden zijn ingesteld op:

- > dosistempo: 25 $\mu\text{Sv/u}^{12}$
- > dosis: 2 mSv.

De werkafpraak hiervoor is: markeer de locatie waar het alarm afgaat en keer terug naar de opstellijn. Op de achterzijde van de meetapparatuur staat een korte bedieningsinstructie.

Meetprincipe: Geiger-Müllertelbuis

Het meetprincipe van de Automess 6150AD1 en de ADOS is gebaseerd op een interne meetcel: een Geiger-Müllertelbuis (zie Figuur S7.1). Dosis(tempo)meters zijn erg gevoelig voor de energie van de ioniserende straling. Afhankelijk van de apparatuur is deze bruikbaar in het energiegebied van grofweg, 45 keV tot 3 MeV. Straling met een lagere energie wordt grotendeels door de behuizing geabsorbeerd en zal dus niet worden gemeten. Straling met een energie hoger dan de bovengrens zal 'door de meter heengaan' zonder een puls te genereren.



Figuur S7.1 Geiger-Müllerteller

7.1.1 Automess 6150AD1

De Automess 6150AD1 of het identieke type AD5 of AD6 (zie Figuur 7.1) gebruikt de brandweer voor het meten van het externe dosistempo; deze meter wordt de Automess genoemd. De Automess meet het dosistempo en de opgelopen dosis aan γ -straling (en röntgenstraling). De meter bestaat uit een stalen kast waar de straling op verdunde, geel-gemarkeerde punten doorheen dringt. Met deze meter is het alleen mogelijk om γ -straling te meten omdat het doordringend vermogen van α - en β -straling te klein is. Het gemeten dosistempo wordt standaard weergegeven op de meetschaal in $\mu\text{Sv/h}$ (met h van hour = uur). Het meetbereik is 1 $\mu\text{Sv/u}$ tot 999 mSv/u.



Figuur 7.1 Automess 6150AD1

De Automess kan ook gebruikt worden voor het meten van de opgelopen dosis, maar daarvoor gebruikt de brandweer in principe de ADOS (zie paragraaf 7.1.2). De Automess meet in tegenstelling tot de ADOS de dosis vanaf het moment dat het apparaat wordt ingeschakeld.

De oorspronkelijke AD1 gaf de meetresultaten weer in $\mu\text{Gy/h}$ en was voorzien van een grijze sticker aan de voorzijde. De meters zijn geactualiseerd waarna de meetresultaten in $\mu\text{Sv/h}$ worden weergegeven en de meter meestal is voorzien van een gele sticker aan de voorzijde. Inmiddels is de AD1 niet meer leverbaar en wordt vervangen door de AD5; de specificaties, werking en bediening van de AD5 zijn hetzelfde als die van een geactualiseerde AD1. De AD5 is herkenbaar aan de grijze sticker aan de voorzijde met opschrift 6150 AD 5/H.

¹² Dit is voor de ADOS 30 $\mu\text{Sv/u}$ in verband met het meetbereik van deze meter.

Aanvullende informatie

De Automess meet het externe stralingsniveau uitgedrukt in omgevingsdosisequivalent-tempo, $\dot{H}^*(10)$ in $\mu\text{Sv/u}$. De AD1 is bruikbaar bij energieën van 45 keV tot 3 MeV. Het meetbereik voor de dosis is maximaal 1 Gy. Bij meetapparaten met meetresultaat in Gy kan Sv worden gelezen waar Gy staat (de stralingsweegfactor is 1).

Er is nog meetapparatuur van Automess in gebruik bij de brandweer waarbij de metingen van het externe stralingsniveau uitgelezen wordt in luchtkermatempo; deze meters geven de meetresultaten in $\mu\text{Gy/h}$. Beide metingen geven een benadering van de werkelijkheid. Hier wordt uitgegaan van meetapparatuur met het meetresultaat in Sv.

De Automess-apparatuur is energieafhankelijk en is gekalibreerd voor ^{137}Cs (662 keV). Bij energieën tussen 60 en 1250 keV wordt de effectieve dosis in de AP-geometrie met maximaal 35% onderschat door de Automess, waarbij de metingen van het externe stralingsniveau uitgelezen wordt in luchtkermatempo ($\mu\text{Gy/h}$). Voor deze situatie is de gemeten waarde van de Automess 6150AD1 een minder veilige beschermingsmaat dan het omgevingsdosisequivalent(tempo). Voor stralingsbeschermingsdoeleinden is deze (on)nauwkeurigheid acceptabel. Beneden 60 keV loopt de respons van de apparatuur snel terug. Ook dit is aanvaardbaar, omdat ook het menselijk lichaam minder gevoelig is voor laag-energetische straling. De energierespons van de meetapparatuur volgt in redelijke benadering de $H^*(10)$ -curve (zie Figuur S2.2).

Voor operationele doeleinden kan het meetresultaat één op één geïnterpreteerd worden als veilige maat voor de effectieve dosis of het effectieve dosistempo door externe bestraling.

Let op bij een buitenmeting in een bebouwde omgeving: door de afscherming van bebouwing kan het meetresultaat lager uitvallen dan de werkelijke waarde of een meting in het vrije veld.

Let er ook op dat geen rekening wordt gehouden met een eventuele inhalatiedosis. In het geval van een nucleaire ramp komen via fall-out veel nucliden vrij in de lucht. Voor mensen zonder adembescherming (slachtoffers en bevolking) betekent dit een flinke extra inhalatiedosis. Als vuistregel wordt dan de (met de Automess) gemeten externe stralingsdosis in $\mu\text{Sv/u}$ (of $\mu\text{Gy/h}$) vermenigvuldigd met een factor 20. Dit is een snelle schatting van de totale dosis als gevolg van externe straling plus de dosis als gevolg van inhalatie.

7.1.2 ADOS

Een persoonlijke dosismeter is een meter die de opgelopen stralingsdosis van iemand meet gedurende een inzet. Voor het meten van de persoonlijke dosis wordt de ADOS gebruikt (zie Figuur 7.2). Deze meter waarschuwt als een bepaalde stralingsbelasting (externe dosis van 2 mSv) bereikt is, maar biedt geen bescherming tegen ioniserende straling. De ADOS meet alleen γ -straling. Dat is voldoende, want de werkkleding van de brandweer is voldoende dik om α - en β -straling af te schermen. Inwendige besmetting komt bij het dragen van bluskleding in combinatie met adembescherming niet voor. De ADOS geeft dus een goed beeld van de opgelopen dosis tijdens een inzet.



Figuur 7.2 ADOS

De ADOS is meestal niet beschikbaar voor de eerste eenheden, maar wel voor verkennings-eenheden. De ADOS wordt *onder* de werkkleding gedragen (vaak in een zak van de uitruk-kleding), omdat op die plaats het beste de werkelijk opgelopen externe dosis gemeten kan worden. Het alarm moet natuurlijk wel te horen zijn! Een bijkomend voordeel is dat de dosis-meter daar beschermd is tegen vuil, water en verlies. Vaak wordt per team van twee personen één dosismeter uitgereikt.

De meetschaal van de ADOS is in mGy. Voor γ -straling is dit gelijk aan mSv, want de stralingsweegfactor is 1. Het meetbereik is 0,001 - 9999 mGy. Op het display in Figuur 7.2 staat de waarde 0,005 mGy; dat is dus 5 μ Gy. Het is belangrijk om de beginstand van de meter voor de inzet te (laten) noteren. De ADOS telt namelijk door en kan niet op 0 worden gesteld. Zorg ook dat geregistreerd wordt wie welke meter meeneemt. Na controle moet de meter ingenomen worden, het meetresultaat uitgelezen en geregistreerd op een registratie-formulier voor de hulpverlener (= standaardprocedure). Zie hiervoor *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Operationele handreiking, Registratie persoon*.

De ADOS meet niet alleen de dosis, maar ook het dosistempo. Bij overschrijding van de alarmwaarde voor het dosistempo geeft de ADOS een alarm af.

Alarmniveau ADOS

Het ingestelde alarmniveau van de ADOS is 30 μ Gy/u; dit heeft te maken met het meet-bereik van de meter voor het dosistempo, namelijk 0,03 - 999 mGy/u. Als dit alarm wordt weggedrukt, schakelt de ADOS automatisch door naar een hoger alarmniveau.

7.2 Externe sondes

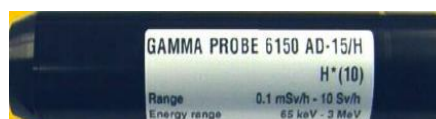
De Automess kan uitgebreid worden met verschillende sondes. De brandweer maakt gebruik van sondes om de gevoeligheid van de meter aan te passen voor het meten van hoge of lage dosistempo's en van sondes waarmee oppervlaktebesmetting gemeten kan worden. Ook om α - en β -straling te kunnen meten, is een externe sonde nodig, zie hiervoor paragraaf 7.3. Een sonde wordt via de sondekabel gekoppeld aan de Automess (zie Figuur 7.3).



Figuur 7.3 Sonde via sondekabel aangekoppeld

7.2.1 Sonde 6150AD-15: γ -sonde, hoog bereik

De AD-15 (zie Figuur 7.4) wordt gebruikt voor het meten van hoge stralingsniveaus γ -straling. Het bereik is 0,1 mSv/u tot 10 Sv/u. Het energiebereik is 65 keV – 3 MeV. Het alarmniveau voor het dosis-tempo bedraagt 0,1 mSv/u. Ook kan de totaal opgelopen dosis bepaald worden.

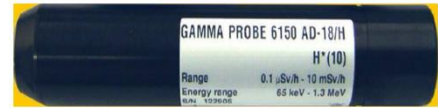


Figuur 7.4 Sonde AD-15

Dergelijk hoge stralingsniveaus zijn alleen mogelijk in zeer extreme situaties zoals bij een uitstoot van een kernenergiecentrale.

7.2.2 Sonde 6150AD-18: γ -sonde, laag bereik

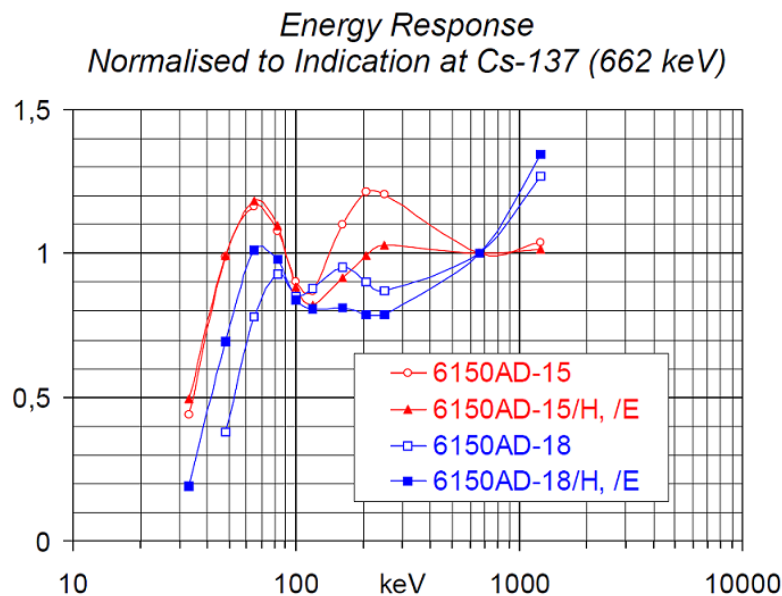
De AD-18 (zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**) wordt gebruikt als de AD1 geen of onvoldoende uitslag geeft. Deze sonde is namelijk veel gevoeliger en heeft een meetbereik van 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ – 10 mSv/h. Het energiebereik is 65 keV – 1.3 MeV. Het alarmniveau voor dosistempo bedraagt 1 $\mu\text{Sv/u}$. Ook kan de totaal opgelopen dosis bepaald worden.



Figuur 7.5 Sonde AD-18

AD-15 en AD-18

Bij plaatsing van een sonde AD-15 of AD-18 wordt de AD1 functie inactief. De telbuis bevindt zich in de sonde en alleen het telwerk van de AD1 wordt gebruikt. De sondes AD-15 en AD-18 zijn energieafhankelijk en moeten gekalibreerd worden (zie voor de energierespons Figuur S7.2). Het is niet mogelijk alle radionucliden te detecteren met de Automess AD1 en AD-18. Lagenergetische γ -stralers zijn niet tot nauwelijks meetbaar.



Figuur S7.2 Respons van de sondes AD-15 en AD-18 als functie van de energie, genormaliseerd voor Cs-137

Teletector

De Teletector of de Automess 6150AD-t is een soort telescoop of 'hengel' waarmee extra afstand wordt gecreëerd tussen de bediener van het meetapparaat en de bron. Zie Figuur S7.3 voor een afbeelding van de Teletector. De maximale uitschuiflengte van de telescoop is 4 meter.



Figuur S7.3 Teletector

7.3 Oppervlaktebesmettingsmetingen

Het meten van α - en β -straling is vooral van belang als de radioactieve stof zich aan een oppervlak gehecht heeft. Door de beperkte dracht van de ioniserende straling zijn α - en β -stralers op grotere afstand niet schadelijk voor de gezondheid. Om α - en β -straling te meten wordt een oppervlaktebesmettingsmonitor gebruikt; hiermee kan uiteraard ook γ straling gemeten worden. Een besmettingsmonitor meet de externe straling in lucht veroorzaakt door de radioactieve besmetting op het te controleren oppervlak. De meting wordt uitgevoerd op korte afstand van dit oppervlak; voor α -straling is dit 2 mm en in andere gevallen 1 cm.

Let op!

Raak bij besmettingsmetingen het oppervlak NIET aan, omdat de sonde dan besmet kan raken; dan lijkt of het hele oppervlak besmet is. Een besmettingsmonitor wordt vooral gebruikt om personen, kleding en materiaal te controleren, maar kan ook gebruikt worden om zogenaamde 'hot spots' op te sporen (ook van α - en β -stralers).

Een besmettingsmonitor registreert de radioactieve besmetting in aantal tikken per seconde of counts per second (cps). Op het display wordt dit aangegeven met s^{-1} . Elke tik geeft de absorptie van stralingsenergie weer. Als bekend is om welke radionuclide het gaat en wat de efficiency van de meter voor die radionuclide is, kan omgerekend worden hoe groot de oppervlaktebesmetting is (in Bq/cm^2).

Besmettingsmonitoren zijn gevoelig afgesteld. Het meten van besmetting is alleen mogelijk als er geen andere ioniserende straling in de omgeving aanwezig is dan de straling die van de besmetting afkomstig is. Aan deze voorwaarde wordt niet voldaan als de achtergrond te veel besmet is of als iemand kort geleden een medische behandeling met radioactieve stoffen heeft ondergaan.

Telrendement

Niet ieder stralingsdeeltje dat uitgezonden wordt, wordt door de sondes geregistreerd. Het telrendement van dit soort sondes is sterk afhankelijk van de stralingssoort en de stralingsenergie. Ook het wel of niet plaatsen van het RVS-filter of de beschermkap is van invloed. Om het teltempo om te rekenen naar oppervlaktebesmetting [Bq/cm^2] moet gebruikgemaakt worden van isotoop-specifieke omrekenfactoren. Deze omrekenfactoren zijn gegeven in Bq/cm^2 per s^{-1} . Dit betekent dat het afgelezen teltempo vermenigvuldigd moet worden met de omrekenfactor die geldt voor de meetmethode (type sonde, met/zonder kap). De omrekenfactor houdt rekening met de gevoeligheid van de meter voor de specifieke radionuclide. De belangrijkste omrekenfactoren zijn te vinden in de *Radionuclidentabel*.

Als voorbeeld: meting van een teltempo van $10 s^{-1}$ met de AD-k in de ' $\alpha\beta\gamma$ '-stand en zonder RVS-filter voor ^{60}Co komt overeen met een oppervlaktebesmetting van $\sim 1 Bq/cm^2$. De omrekenfactor bedraagt namelijk $0,11 Bq/cm^2$ per s^{-1} .

7.3.1 Sonde 6150AD-17:

$\alpha\beta\gamma$ -sonde, besmettingsmonitor, klein meetoppervlak

De sonde AD-17 (zie Figuur 7.6) bevat een venster op de sondekop die deeltjesstraling doorlaat. Met de sonde AD-17 kan α -, β - en (beperkt) γ -straling gemeten worden, mits de plastic kap van de sonde verwijderd wordt. Op het moment dat de sonde wordt aangesloten,

verandert de meetschaal en worden vorige meetresultaten gewist (zie Figuur 7.7). Het meetbereik is $0,01 \text{ s}^{-1} - 9,999 \text{ ks}^{-1}$ (= 9999 cps) en het alarmniveau is 1 s^{-1} . De achtergrondstraling is afhankelijk van de locatie en bedraagt $0,1 - 1 \text{ s}^{-1}$ gemeten met de AD-17.



Figuur 7.6 Automess met AD-17



Figuur 7.7 Display met sonde AD-17 meet $2,06 \text{ kS}^{-1}$ = ong. 2000 cps; in de linkerbovenhoek van het display staat de gebruikte sonde

Gevoeligheid AD-17

De AD-17 heeft een klein meetoppervlak van $6,2 \text{ cm}^2$ en is de minst gevoelige van de twee sondes die door de brandweer gebruikt worden. Bij extreem hoge besmettingen kan de AD-17 *met kap* gebruikt worden. Als de AD-17 met kap wordt gebruikt, wordt de β -straling afgeschermd. Vlak bij het oppervlak ligt het teltempo dan een factor 20 lager dan gemeten zonder kap. Op één meter afstand is het teltempo een factor 40 lager. Daardoor wordt de gevoeligheid lager: 23 Bq/cm^2 per cps voor ^{60}Co en 140 Bq/cm^2 per cps voor $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$.

7.3.2 Sonde 6150AD-k:

$\alpha\beta\gamma$ -sonde, besmettingsmonitor, groot meetoppervlak

De sonde AD-k (k van het Duitse Kontamination) heeft een veel groter oppervlak en is ruim 10x gevoeliger dan de AD-17. Deze meter wordt ook wel het 'strijkijzer' genoemd en meet ook besmettingen met een lagere intensiteit (zie Figuur 7.8). Het meetbereik is $0,01 \text{ s}^{-1}$ tot 20 ks^{-1} (= 20.000 cps) en het alarmniveau is 25 cps. Tot 40 ks^{-1} registreert de AD-k nog wel tikken, maar is de meting minder betrouwbaar.



Figuur 7.8 Automesst met AD-k; links de meter in de $\alpha\beta\gamma$ -sonde met aangesloten kabel en rechts de onderzijde van de sonde zonder kap, het meetoppervlak

Gevoeligheid AD-k

De AD-k heeft een meetoppervlak van 170 cm² en is dus veel gevoeliger. Gebruik daarom zo mogelijk de AD-k! Op de AD-k bevindt zich een schakelaar die in twee standen gezet kan worden: stand ' α ' en de stand ' $\alpha\beta\gamma$ '. De monitor kan op drie manieren gebruikt worden:

- > in de stand ' α ' voor alleen α -straling
- > in de stand ' $\alpha\beta\gamma$ ' voor alle aanwezige $\alpha\beta\gamma$ -straling
- > in de stand ' $\alpha\beta\gamma$ ' met de RVS-beschermkap die alle α - en β -straling tegenhoudt, voor alleen γ -straling.

Na het uitvoeren van deze drie metingen kan de β -straling berekend worden uit de resultaten. Als de AD-k met de RVS-afdekkap wordt gebruikt, is de gevoeligheid (in de stand ' $\alpha\beta\gamma$ ') 0,60 Bq/cm² per cps voor ⁶⁰Co en 3,5 Bq/cm² per cps voor ¹³⁷Cs/^{137m}Ba.

Let op: het meetbereik van de AD-k (40.000 cps) kan beperkend werken bij hoge besmettingsniveaus! Voor ¹³¹I is een activiteit van 1 kBq/cm² namelijk gelijk aan een teltempo van 16.000 cps. De meter is dan te gevoelig om het besmettingsniveau HOOG te kunnen meten. De meter is wel geschikt voor de het niveau LAAG (zie voor de interventieniveaus paragraaf 9.3.1).

Meten van uitwendige besmetting

Bij B-incidenten is besmetting alleen te verwachten bij slachtoffers, ingezet personeel en in de directe omgeving. De besmettingscontrole kan uitgevoerd worden met de AD-17 door een verkenningseenheid of met de AD-k. Bij grootschalige A-incidenten (zie Hoofdstuk 8) kan een groot (vele kilometers) gebied besmet zijn, waar niet alleen de bodem en infrastructuur besmet zijn, maar ook mensen en voertuigen, et cetera. Dit grote gebied moet op besmetting worden gecontroleerd. Voor het in kaart brengen van het besmette gebied volstaat de standaard werkwijze.

Zo nodig moet schoongemaakt worden om verdere dosisbelasting en verdere verspreiding van besmetting te voorkomen of te beperken. Voor de besmettingscontrole van grotere

groepen moeten stralingscontroleposten (in combinatie met schoonmaakplaatsen) worden ingericht. Zie hiervoor paragraaf 9.3.

Tabel 7.1 geeft een overzicht van de mogelijkheden van de stralingsmeetapparatuur bij de brandweer.

Tabel 7.1 Overzicht van stralingsmeters en sondes

	Meetbereik	Toepassing	Alarmniveau	Beschikbaarheid ¹⁾
AD1 / 5 (intern)	1 $\mu\text{Sv/u}$ – 999 mSv/u	normaal gebruik	dosistempo: 25 $\mu\text{Sv/u}$ dosis: 2 mSv	TS ²⁾ , VE, AGS
AD-15	0,01 mSv/u – 9,99 Sv/u	γ -straling: hoog stralingsniveau voor extreme stralingssituaties	dosistempo: 0,1 mSv/u = 100 $\mu\text{Sv/u}$	AGS
AD-18	0,01 $\mu\text{Sv/u}$ – 9,99 mSv/u	γ -straling: grotere gevoeligheid voor laag stralingsniveau; bv. opsporen van bronnen	dosistempo: 1 $\mu\text{Sv/u}$	VE, AGS
AD-17 ³⁾	0,01 s^{-1} – 9,999 ks^{-1} meetopp: 6,2 cm^2	$\alpha\beta\gamma$ -sonde, lage gevoeligheid / meetoppervlak, besmettingsmeting	aantal tikken/counts: 1 cps	VE, AGS
AD-k ³⁾	0,01 s^{-1} – 40 ks^{-1} meetopp: 170 cm^2	$\alpha\beta\gamma$ -sonde, grotere gevoeligheid / meetoppervlak, besmettingsmeting, sneller zoeken	aantal tikken/counts: 25 cps	AGS
ADOS	0,001 mGy – 9999 mGy 0,03 mGy/u – 999 mGy/u	persoonsdosismeter	dosistempo: 30 $\mu\text{Sv/u}$ dosis: 2 mSv	VE, AGS

1) TS = tankautospuit, VE = Verkenningseenheid (voorheen meetploeg), AGS = Adviseur gevaarlijke stoffen.

2) Volgens het *Branchevoorschrift standaardbepakking brandweervoertuigen* is dit een alarmdosismeter: een personendosimeter waarmee nog een aantal dosistempoalarmniveaus ingesteld kunnen worden; dit mag ook een andere meter dan de AD1 zijn, zoals de ADOS.

3) ks^{-1} = 1000 cps.

7.4 Landelijk meetnet

7.4.1 Nationaal meetnet radioactiviteit (NMR)

Het Nationaal Meetnet Radioactiviteit (NMR) is het nationale stralingsmeetnet. Het NMR is een geautomatiseerd meet- en datacommunicatienetwerk. Het NMR heeft als hoofddoel het vroegtijdig signaleren van grootschalige stralingsincidenten: overschrijding van een drempelwaarde leidt tot een alarmering van het RIVM en/of de veiligheidsregio('s). Na beoordeling van de situatie kan dat leiden tot landelijke opschaling. Tijdens een grootschalig incident levert het NMR een landelijk beeld van de actuele besmetting van bodem en lucht.

Het NMR bestaat uit:

- > een landelijk gespreid netwerk van ruim 165 γ -monitoren (zie Figuur 7.9): ongeveer een meetpaal per 25 km². Deze meten continu het γ -stralingsniveau. De meetgegevens komen binnen bij werkstations bij de regionale meldkamers en worden doorgegeven aan de landelijke centrale (bij het RIVM).
- > 14 α/β -monitoren. De meetgegevens van deze monitoren worden rechtstreeks aan de landelijke centrale doorgegeven.
- > 1 radionuclide-specifieke monitor die bij het RIVM is geplaatst.



Figuur 7.9 NMR-meetpost

NMR

Het NMR bestaat uit drie modules:

Alfabètamodule

De alfabètamodule bestaat uit een landelijk gespreid netwerk van luchtstofmonitoren voor de bepaling van aan luchtstof gebonden (kunstmatige) α - en β -activiteit. Deze module heeft een meetlocatiedichtheid van circa 50 km. De alfabètamodule waarschuwt het RIVM alleen bij een overschrijding van de waarschuwingdrempel voor kunstmatige β -activiteit in lucht (3 Bq/m³). Voor vroegtijdige signalering van stralingsincidenten is de bètamodule het gevoeligste onderdeel van het NMR.

Gammamodule

De gammamodule bestaat uit monitoren met Geiger-Müller-telbuizen die iedere 10 minuten het omgevingsdosis-equivalenttempo, $\dot{H}^*(10)$ bepalen. De gemiddelde meetnetdichtheid is ongeveer 15 km, de locaties van de alfabètaluchtstofmonitoren vallen samen met de locaties van de monitoren van de gammamodule. De gammamodule is verdund rond belangrijke nucleaire installaties, langs de grens en bij grote bevolkingscentra. Als bij een meetlocatie een omgevingsdosis-equivalenttempo van meer dan 200 nSv/u wordt gemeten, leidt dit bij het RIVM tot een alarmering in de vorm van een semafoonoproep. De waarde van 200 nSv/u zal door natuurlijke fluctuaties in het achtergrondniveau zelden overschreden worden. Na beoordeling van de situatie vindt zo nodig nader onderzoek plaats. Het waarschuwniveau van 200 nSv/u ligt zo laag, dat er bij overschrijding (nog) geen sprake is van direct gevaar voor de volksgezondheid.

Het alarmniveau voor de brandweer is 2000 nSv/u. Vanaf dat moment gaat een stralingsdeskundige van de brandweer de situatie volgen en zo nodig passende maatregelen nemen.

Nuclidenspecifieke module

De nuclidenspecifieke module bij het RIVM in Bilthoven bestaat uit een monitor voor γ -stralers die aan aerosolen gebonden zijn. Deze monitor is 24 uur per dag operationeel en bepaalt volautomatisch de samenstelling aan radionucliden in lucht. Tijdens een calamiteit kunnen deze gegevens worden aangevuld met vergelijkbare meetgegevens. Onderdelen van het NMR worden periodiek gemoderniseerd.

NMR alarm afhandeling meldkamer

Acties Centralist

1. Het alarm komt binnen bij de meldkamer (een gesproken bericht via de telefoon van de meldkamer), het alarmeringsniveau is 2000 nSv/h. Dit telefoonbericht wordt elke 10 minuten herhaald, totdat het alarm door de AGS bevestigd wordt.
2. De centralist alarmeert vervolgens de AGS en geeft door dat één of meerdere meetposten van het NMR in de regio verhoogd zijn.

Acties AGS

3. De AGS bevestigt het alarm en neemt contact op met de NMR-deskundige van het RIVM. In overleg wordt besloten of het wenselijk is om een meetploeg naar de NMR-metpost te sturen voor controle en meting. In het geval van een bevestigd alarm kan met het RIVM overlegd worden hoe verder te handelen. Bij vertrek naar de locatie is het aan te bevelen de stralingsmeetinstrumenten aan te zetten.

Gebruik NMR door de brandweer

De brandweer kan de NMR-gegevens via een beveiligde internet-omgeving inzien. Daarbij wordt gebruikgemaakt van een data-presentatie-module (zie Figuur S7.4). Op deze kaart zijn meetposten met een normale achtergrondwaarde groen. Als de meetwaarde de drempel overschrijdt, verandert de kleur in rood of paars. Bij voldoende inzoomen verschijnen ook de meetdata in beeld. Meetposten die tijdelijk niet operationeel zijn, zijn grijs of blauw. De meetdata van een meetpost kunnen ook grafisch weergegeven worden; dit kan voor maximaal 40 meetposten tegelijkertijd. De taken voor de brandweer worden meestal uitgevoerd door de Coördinator Verkenningseenheden (CVE) of de AGS.



Figuur S7.4 Kaartoptie van de NMR-presentatiemodule

Mobiele meetmethoden

Het RIVM heeft radiologische meetwagens die op strategische posities extra meetinformatie kunnen verzamelen. Het gaat dan om het omgevingsdosistempo en de nucliden-specifieke radioactiviteit in lucht, vooral ^{131}I . Daarnaast zijn er overeenkomsten met acht zogenaamde Waakvlaminstituten (WVI); deze WVI's nemen tijdens een stralingsincident volgens een standaardprocedure lucht- en depositie monsters en analyseren die vervolgens met eigen meetapparatuur. Het RIVM beschikt verder over meetapparatuur met veel lagere detectiegrenzen, maar daarvan is ook de meetfrequentie lager. De drie modules van het NMR, de meetwagens en de WVI's leveren bij een stralingsincident gezamenlijk een complete set meetgegevens. De meetgegevens gecombineerd met modelberekeningen geven een landelijk beeld van de stralingsdosis door externe bestraling. Uit de data van de alfabètamodule (dynamisch, landelijk gespreid maar een totaalmeting) en de nucliden-specifieke gegevens van NMR, meetwagens en WVI's (minder dynamisch, minder locaties maar wel specifiek) wordt de inhalatiedosis afgeleid.

7.4.2 Landelijk meetnet radioactiviteit in voedsel (LMRV)

De Nederlandse Voedsel- en Warenautoriteit (NVWA) en het Wageningen Food Safety Research (WFSR) controleren op de radioactiviteit in levensmiddelen. Hiervoor is een landelijk meetnet radioactiviteit in voedsel (LMRV) opgericht en zijn laboratoriumfaciliteiten beschikbaar. Het LMRV netwerk bestaat uit circa 45 vaste meetopstellingen (voedsel-monitoren) verspreid over Nederland. Het LMRV wordt beheerd door het WFSR en meet vier productgroepen:

1. melk(producten)
2. vlees, vis en schelpdieren
3. groente, fruit, granen en afgeleide producten
4. land- en tuinbouwgronden, gras, kuilvoer, organische meststoffen en bassinwater.

7.4.3 Oppervlaktewater en drinkwater

Rijkswaterstaat (RWS) en de waterschappen controleren op de besmetting van oppervlaktewater, zwevend slib, waterbodems, aquatische organismen en zuiverings-slib van rioolzuiveringsbedrijven. RWS voert zo nodig maatregelen uit en adviseert over het minimaliseren van besmetting. Op een aantal strategische locaties (bij grensovergangen en drinkwaterinlaatpunten) wordt het radioactiviteitsniveau periodiek bepaald. De besmetting van drinkwater wordt gecontroleerd door de drinkwaterbedrijven. In geval van een geconstateerde besmetting, of preventief, kan de inname van water voor de productie van drinkwater worden stilgelegd.

7.5 Meetstrategie bij kernongevallen

Het meten bij kernongevallen is een omvangrijke en complexe taak. Het effectgebied bij de zwaardere kernongevallen kan groot zijn (mogelijk tot wel 100 kilometer of verder van de bron) en er kan sprake zijn van grote dynamiek in lozing en weersomstandigheden. Het doel van meten in het veld tijdens en na een grootschalig stralingsincident is in eerste instantie het beschermen van de bevolking tegen stralingsrisico's. Met de meetresultaten kunnen prognoses van de verspreiding getoetst worden en kan een inschatting gemaakt worden van de dosis die per tijdsperiode door leden van de bevolking wordt opgelopen. Op basis daarvan kan worden berekend of en waar interventieniveaus kunnen worden overschreden en kunnen besluiten over beschermende maatregelen worden genomen om de dosis voor de bevolking te beperken. Daarnaast is het belangrijk om de daadwerkelijke blootstelling van de bevolking vast te kunnen stellen voor verantwoording achteraf en het instellen van latere maatregelen.

Maatregelen voor de bescherming van de bevolking worden beoordeeld op basis van vooraf vastgestelde interventieniveaus uitgedrukt in effectieve of equivalente dosis. De ontvangen dosis is een optelsom van alle blootstellingen door inhalatie, ingestie en externe straling door een voorbijtrekkende radioactieve wolk en besmette bodem. De effectieve en equivalente dosis worden door de meetapparatuur van de brandweer niet rechtstreeks gemeten, maar worden uit modelberekeningen afgeleid. Hiervoor zijn aanvullende specialistische metingen van onder andere de nuclidesamenstelling benodigd. Al deze radiologische metingen zijn daarom onderdeel van een landelijke meetstrategie bij kernongevallen. Hierin zijn de brandweer, defensie en het RIVM vertegenwoordigd. De landelijke meetstrategie voor kernongevallen is opgesteld voor de urgente (voor en tijdens de lozing) en (deels) de vroege fase (direct na de lozing) van de respons op een kernongeval en behandelt de meetinspanningen vanaf het moment van dreiging op een radioactieve lozing, de periode van de lozing waarin een radioactieve wolk het effectgebied passeert, en de periode direct na de lozing als het effectgebied in kaart wordt gebracht.

Verkenningseenheden van de brandweer worden ingezet voor het bepalen van externe stralingsniveaus, oppervlaktebesmettingen in stedelijk gebied en mogelijk ook voor het meten van uitwendige besmetting van personen. De meetplannen tijdens de drie responsfasen worden hieronder kort geschetst. Uitwendige besmettingsmetingen en ontsmetting zijn momenteel geen onderdeel van de meetstrategie en worden behandeld in hoofdstuk 9.

Meetplan

Op het moment dat bij kern- en/of stralingsongevallen het RIVM binnen het RGEN¹³ de meetstrategie coördineert, heeft het de voorkeur dat zoveel als mogelijk dezelfde radiologische meetapparatuur gebruikt wordt door de brandweer. Dit maakt een snelle interpretatie van de meetresultaten over de verschillende meetlocaties mogelijk en verkleint de kans op fouten in de metingen. De brandweer gebruikt voor het meten van het omgevingsdosisequivalenttempo (ROMEOMeting) de Automess AD1/AD5, eventueel met de AD18 sonde. Voor het meten van de oppervlaktebesmetting wordt de AD1/AD5 met AD17 sonde gebruikt, of de AD-k (FOXTROT-meting). Naast uniforme meetapparatuur is het van groot belang dat metingen op eenzelfde wijze worden uitgevoerd. Hierdoor zijn metingen beter met elkaar te vergelijken.

Het uitgangspunt voor deze metingen is de NEN 5639: Bepaling van het omgevingsdosisequivalenttempo met draagbare stralingsmeetapparatuur. Deze norm wordt gebruikt voor de bepaling van omgevingsdosis (ROMEOMeting).

NEN 5639 gaat onder andere over:

- > het meetplan
- > beschrijving vrije veld en object meting
- > de frequentie voor de controle van de meetapparatuur.

Het meetplan bevat ten minste de volgende onderdelen:

- > datum en tijdstip wanneer de meting wordt uitgevoerd
- > het doel van de meting en het daarbij benodigd aantal meetpunten
- > de (fysieke) begrenzing van het meetplan, indien mogelijk met een plattegrond
- > nummering van de meetpunten en de meetlocatie, bij voorkeur met behulp van Rijksdriehoekscoördinaten
- > randvoorwaarden waaraan de meting behoort te voldoen, zoals de afstand tot objecten
- > hoe vaak de meting op die locatie wordt herhaald
- > indien een nulmeting mogelijk/noodzakelijk is, een beschrijving waar deze wordt uitgevoerd
- > een beschrijving van de risico's verbonden aan het uitvoeren van de meting die op die locatie van toepassing is
- > de persoonlijke beschermingsmiddelen die benodigd zijn om op die locatie veilig een meting uit te voeren.

¹³ Het Radiologisch en Gezondheidskundig Expertise Netwerk (RGEN) is onderdeel van het Crisis Expert Team straling en nucleair (CETsn). RIVM voert de regie over het RGEN en over de landelijke meetstrategie. Het RGEN komt tijdens een crisis fysiek bijeen in Bilthoven.

Omgevingsdosis bepalen in het vrije veld

Veel van de ROMEO-metingen bij een kern- of stralingsongeval zullen zogenaamde vrije veldmetingen zijn, zie Figuur S7.5. Dat betekent dat een meting plaatsvindt:

- > op een afstand van minimaal 20 meter van objecten of 2x de hoogte van het object
- > terwijl de meter/sonde op 0,9 – 1,1 meter boven het maaiveld wordt gehouden
- > op minimaal 25 cm van het lichaam.

Indien niet aan decriteria kan worden voldaan, neem dan in het verslag van de meting op welke afwijkende factoren er waren (zoals de afstand tot versturende objecten en de aard van de bodem).



Figuur S7.5 ROMEO-meting

Het zal enige tijd duren voordat er een 'stabiele' meetuitslag wordt verkregen. Hou rekening met de traagheid van de meter. Zelfs als er sprake is van een stabiele situatie, is het mogelijk dat de meetuitslag enigszins blijft fluctueren.

Omgevingsdosis op een object bepalen

Naast de omgevingsdosis meting in het vrije veld kan ook gevraagd worden een omgevingsdosismeting uit te voeren aan objecten. *Let op:* dit is wat anders dan een besmettingsmeting!! (FOXTROT)

Voer de meting als volgt uit:

- > Hou de detector van de AD1/AD5 eventueel met AD18 op 10 cm van het te meten oppervlak.
- > Ga in een zigzagpatroon over het te meten oppervlak en noteer de laagste en hoogste waarde van het gemeten omgevingsdosisequivalenttempo.
- > Voer daarna op het punt waar de hoogste waarde is gemeten, een meting uit waarbij de afstand tussen detector en het oppervlak van het object 1 m bedraagt (± 10 cm).

Controle van de apparatuur

Voor het bepalen van de juiste werking moet de meter periodiek worden gecontroleerd. De frequentie waarmee deze controle moet plaatsvinden, hangt samen met de gebruiksintensiteit. De minimale frequentie is eenmaal per jaar.

Urgente fase; dreigende emissie

In de periode van dreiging van een radioactieve lozing komen er nog geen radioactieve stoffen vrij buiten het terrein van de kernenergiecentrale. Het is van belang om een eventuele (vroegtijdige) radioactieve lozing meteen te signaleren, zodat de bevolking tijdig kan worden gewaarschuwd en voorbereide maatregelen kunnen worden uitgevoerd. De tijd tussen een dreigende lozing en een daadwerkelijk lozing ligt naar verwachting tussen enkele uren en een aantal dagen. Deze tijd kan gebruikt worden om verkennings-eenheden (VE) te activeren en te positioneren in het aandachtsgebied. Hierbij zullen zoveel mogelijk de posities worden ingenomen die horen bij de strategie in de lozingsfase.

Op hoofdlijnen gelden in volgende uitgangspunten:

- > De brandweer meet op vaste locaties in het aandachtsgebied het omgevingsdosis-equivalenttempo. De focus ligt hierbij op metingen in of nabij bevolkingscentra, zodat uiteindelijk het daadwerkelijke dosisverloop van de bevolking vastgesteld kan worden. Het is van belang om te voorkomen dat, als de lozing start, een wolk tussen NMR-meetposten door trekt zonder opgemerkt te worden. Tot de aankomst van de Fuchsen van defensie (zie het 4^e aandachtstreepje) meet de brandweer ook dichtbij de centrale, zodat een aanvang van een radioactieve lozing vroegtijdig wordt opgemerkt.
- > Naast locaties bij bevolkingscentra positioneert de brandweer zich ook op de flanken van het aandachtsgebied. De metingen hier zijn bedoeld om eventuele windraaiing en daardoor een verschuiving van het effectgebied vroegtijdig te kunnen signaleren. De twee RIVM-meetwagens worden op de verwachte pluimas opgesteld, op relatief korte afstand. Niet alleen het omgevingsdosistempo wordt gemeten, maar ook de totale concentratie α/β -deeltjes in lucht wordt bepaald. Dit zal een nauwkeuriger aanwijzing geven van het al dan niet vrijkomen van radioactief materiaal uit de centrale dan de metingen van alleen het dosistempo.
- > Defensie zal ook, met verschillende meetploegen, stationaire metingen van het omgevingsdosistempo uitvoeren. De Fuchsen van defensie hebben een betere bescherming tegen stralingsniveaus en kunnen op kortere afstand van de centrale (afhankelijk van de situatie) het dosistempo meten. Ook kunnen ze rijdend meten. De Fuchsen lossen hierbij de brandweerverkenningseenheden af die op deze afstand meten. Op het moment dat het stralingsniveau duidelijk hoger wordt en er een overgang optreedt naar de lozingsfase zullen de Fuchsen zich verplaatsen naar de grens van het geëvacueerde gebied.
- > Het 'mobiele lab' van defensie heeft, voor zover de meetuitrusting dat toelaat, dezelfde taken als de RIVM-meetwagens, zie hierboven.

In principe wordt stationair gemeten, maar het is uiteraard van belang om het actuele bedreigd gebied (voornamelijk bepaald door de windrichting) te volgen en de meetlocaties daarop aan te passen.

In beginsel wordt er door de mobiele meetploegen niet gemeten in een gebied waar de maatregel evacuatie is afgekondigd en het publiek uit het gebied is geëvacueerd. Registratie van het dosistempo in dat gebied is van weinig belang.

Urgente fase; tijdens de lozing

In de lozingsfase worden met metingen de werkelijke omvang van de lozing en besmetting van de omgeving vastgesteld. Hierdoor kan worden vastgesteld of maatregelgebieden juist zijn ingesteld en kan achteraf een schatting worden gemaakt van de door de bevolking ontvangen dosis.

Op hoofdlijnen gelden de volgende uitgangspunten:

- > De brandweer meet op de vaste locaties in stedelijk gebied en op de flanken van het aandachtsgebied het omgevingsdosistempo. De nadruk bij de flanken ligt op het vaststellen of de maatregelzones goed zijn bepaald. De nadruk in stedelijk gebied ligt op het bepalen van de werkelijke stralingsniveaus. Een alternatief kan zijn om

- autonome, mobiele NMR-meetposten van het RIVM te plaatsen. De plaatsing, en zo nodig (ver)plaatsing, kan gebeuren door de brandweer (verkenningseenheden).
- > Met het Nationaal Meetnet Radioactiviteit (NMR) van het RIVM wordt op vaste locaties continu het omgevingsdosistempo gemeten.
 - > De twee RIVM-meetwagens meten naast het omgevingsdosistempo ook de totale concentratie α/β -deeltjes, de edelgasconcentratie en de nuclidesamenstelling in lucht. De RIVM-meetwagens zullen deze metingen uitvoeren in het gebied waar het stralingsniveau en/of de totale concentratie α/β -deeltjes al duidelijk verhoogd is. Ook de nuclidesamenstelling in lucht(stof) wordt bepaald. Met deze informatie wordt een vertaling gemaakt van omgevingsdosistempo naar effectieve dosis. Dit kan leiden tot een bijstelling van de maatregelzone voor bijvoorbeeld schuilen.
 - > Defensie zal ook stationaire metingen van het omgevingsdosistempo uitvoeren. De Fuchsen kunnen hierbij dichterbij de centrale worden ingezet dan de andere meetploegen; de minimale afstand tot de centrale is de overgang van evacuatiegebied naar schuilgebied. Het 'mobiele lab' van defensie heeft, voor zover de meetuitrusting dat toelaat, dezelfde taken als de RIVM-meetwagens.

Belangrijk

Om een goed beeld te krijgen van de situatie, ondanks de mogelijke variabiliteit in lozing en windrichting, worden verkenningseenheden zoveel mogelijk op een vaste locatie geplaatst. Verkenningseenheden rapporteren het verloop van het dosistempo of activiteitsconcentratie in de tijd door bijvoorbeeld iedere 10 minuten een meting door te geven aan de CVE; dit wordt ook wel *stationair meten* genoemd.

Tijdens het overtrekken van de radioactieve wolk worden de meetploegen blootgesteld aan straling vanuit de wolk. Beschermende maatregelen zijn bij de uitvoering van de metingen belangrijk. In een gebied waar de bevolking schuilt, schuilt in beginsel ook de brandweer. Beperk de tijd buiten de schuillocatie voor het doen van een meting zoveel mogelijk, draag altijd adembescherming (minimaal een filterbus) en beschermende kleding. Vooral de filterbus zal de opgelopen dosis tijdens de passage van de wolk aanzienlijk beperken.

Vroege fase; fase na de lozing (na overtrekken wolk)

Het doel van meten in deze fase is kunnen beoordelen of maatregelen (bijvoorbeeld schuilen) kunnen worden ingetrokken en of er verdere maatregelen moeten worden getroffen (bijvoorbeeld een tijdelijke relocatie). De voornaamste taak is het in kaart brengen van de bodembesmetting met aandacht voor eventuele 'hot spots': locaties met aanzienlijk hogere stralingsniveaus door bijvoorbeeld neerslag. In eerste instantie gebeurt dit in het gebied waarin ook tijdens de lozing al werd gemeten. Dit betekent dat de metingen van het omgevingsdosistempo zoals in de lozingsfase zijn uitgevoerd worden voortgezet. Aanvullend worden oppervlaktebesmettingsmetingen uitgevoerd, in eerste instantie op een aantal meetlocaties in de stedelijk gebieden. Mogelijk zijn verplaatsingen naar andere relevante locaties nodig. Het RIVM zal in deze fase de nuclidemetingen uitvoeren aan bodembesmetting. Ook zullen metingen aan lucht(stof) uitgevoerd worden om vast te stellen of door resuspensie alsnog activiteit in de lucht aanwezig is en beschermende maatregelen noodzakelijk.

Om daarna een (groter) gebied in meer detail in kaart te brengen wordt er niet meer alleen in de bevolkingscentra gemeten, maar wordt al rijdend het omgevingsdosistempo vastgesteld in het effectgebied. Hierbij wordt bij voorkeur gebruik gemaakt van een

voorziening om de resultaten automatisch te registreren en te plotten. De meetwagens van het RIVM en Defensie hebben deze voorziening, maar zijn mogelijk reeds ingezet voor uitvoering van specialistische metingen (zoals nuclidespecifieke bepaling van de bodembesmetting). Alternatief is om de verkenningseenheden van de brandweer in diverse regio's de metingen te laten uitvoeren en deze handmatig te verwerken.

Complex en multidisciplinair

Om meetresultaten te kunnen toetsen aan interventieniveaus zijn dus verschillende typen metingen nodig die pas in combinatie waardevol zijn. Hierom is multidisciplinair optreden van alle partijen met een meettaak in de vroege fase van een kernongeval noodzakelijk: dit betreft de brandweer, Defensie en RIVM. Ook is goede informatie-uitwisseling van groot belang. De samenwerking is daarom ook onderdeel van de landelijk meetstrategie kernongevallen. De verkenningseenheden van de brandweer worden aangestuurd door de CVE, AGS of stralingsdeskundige. De landelijke meetcapaciteit (RIVM en Defensie) wordt aangestuurd vanuit het RGEN in Bilthoven (middels RGEN Coördinator Meten RIVM). Dit betekent dat er intensief contact nodig is tussen de veiligheidsregio en de coördinator meten van het RIVM.

De Coördinator Meten van het RIVM voert regie over de meetstrategie. Dat wil zeggen: hij houdt overzicht over de gezamenlijke meetinspanningen, verzamelt en verwerkt de resultaten en stelt op basis daarvan het totale radiologische beeld samen, in samenhang met lozingsgegevens en modelberekeningen. De verantwoordelijkheid voor het opstellen en uitvoeren van de meetplannen en voor de veiligheid en bescherming van de eigen meetploegen ligt bij de afzonderlijke disciplines.

Werkwijze

Op basis van prognoses van het ongevalsverloop en de meteo zal het RGEN berekeningen maken om te zien waar en wanneer welke interventieniveaus kunnen worden overschreden. Dit wordt gedeeld met de veiligheidsregio en vormt de basis voor het meetplan. Het gezamenlijke meetplan wordt opgesteld in nauw overleg tussen de veiligheidsregio, de coördinator meten van het RIVM en van Defensie.

De meetresultaten worden door de veiligheidsregio met een afgesproken frequentie naar het RGEN gestuurd. Hiervoor wordt een speciaal format gebruikt om een snelle verwerking mogelijk te maken; dit is een eenvoudig format met de te gebruiken eenheid, coördinaten, datum en tijd.

In het RGEN worden alle meetdata (omgevingsdosistempen en α/β -waarden) geplott, en in combinatie met de nuclide-specifieke metingen kan dan een uitspraak worden gedaan over de dosis voor de bevolking en het al of niet overschrijden van bepaalde interventieniveaus. Dit beeld zal het RGEN terugkoppelen naar de veiligheidsregio (en intern aan Defensie). Het meetplan kan op basis hiervan, of op basis van een verandering in het ongevalsverloop, worden bijgesteld.

8 Stralingsincidenten

Stralingsincidenten worden onderverdeeld in twee categorieën: incidenten met categorie-A- en met categorie-B-objecten. Bij een (dreigend) incident met een categorie-A-object ontstaat er bestuurlijk, maatschappelijk en operationeel een complexe situatie, omdat bij dit type stralingsincident regio-overstijgende effecten te verwachten zijn. De bestrijding van een incident met een A-object vereist daarom een andere (landelijke) aanpak en deskundigheid dan incidenten met categorie-B-objecten. Een incident met een categorie-B-object heeft lokale effecten. Een incident met primair lokale fysieke effecten kan wel uitgroeien tot een crisis; de overheid kan dan besluiten over te gaan tot een landelijke aanpak. In dit hoofdstuk vindt u een overzicht van de ongevalsscenario's, zoals deze in het Landelijk Crisisplan Straling (LCP-S) zijn vastgesteld.

8.1 A-scenario's

Stralingsincidenten hebben betrekking op objecten van een categorie A- of B-objecten. Een ongeval met een categorie-A-object, een 'A-scenario', kan regio-overschrijdende gevolgen hebben en vraagt om bestuurlijke coördinatie door de Rijksoverheid (zie hiervoor het LCP-S). De betrokken veiligheidsregio's zorgen voor een adequate operationele voorbereiding.

A-objecten zijn:

- > binnenlandse of buitenlandse kernenergie installaties
- > nucleaire onderzoeksreactoren
- > nucleair aangedreven schepen
- > ruimteobjecten met een energievoorziening met radioactieve bron of reactor
- > transporten met nucleair defensiemateriaal.

Bij ongevallen met categorie A-objecten kan het treffen van directe maatregelen zoals evacuatie, schuilen in gebouwen, jodiumprofylaxe en bescherming van de landbouw noodzakelijk zijn. Eén van de grootste stralingsincidenten die kan plaatsvinden is een kernongeval, bijvoorbeeld in de kernenergiecentrale van Borssele. Het slechts denkbare scenario voor een kernenergiecentrale is het smelten van kernbrandstof in combinatie met het falen van het insluitsysteem, waardoor grote hoeveelheden radioactieve stoffen vrijkomen. Overigens is de kans dat een ongeval plaatsvindt uiterst gering, omdat voor kerncentrales strenge veiligheidseisen gelden.

De categorie A-objecten zijn in de Kernenergiewet vastgesteld. Tabel 8.1 laat een overzicht zien van preparatiezones die voor deze objecten zijn vastgesteld. De preparatiezones worden gebruikt voor de operationele voorbereiding op het uitvoeren van beschermende maatregelen. Tot op zekere hoogte zijn de preparatieafstanden voor nucleaire objecten in de grensregio met het buurland geharmoniseerd. Hierdoor worden gemeenschappelijke besluiten over beschermende maatregelen in de grensregio eenvoudiger gerealiseerd. Nederland kent een predistributie van jodiumtabletten voor kinderen tot 18 jaar en zwangeren in de preparatiezone tot 100 km rond de nucleaire objecten Borssele, Doel, Tihange en Emsland, 20 km rond Mol, 3 km rond de reactor in Petten en 0,5 km rond de

reactor in Delft. Voor volwassenen tot 40 jaar is er een predistributie van jodiumtabletten tot 20 km rond Borssele, Doel en Emsland.

Tabel 8.1 Overzicht A-scenario's met netto vermogen en preparatiezones

Weergegeven is het object (met de afstand tot de Nederlandse grens), het elektrisch of thermisch vermogen (MWe/MWth), de preparatieafstand schuilen, evacuatie en de preparatiezone jodiumprofylaxe voor kinderen/volwassenen in km, de afstand voor voedselmaatregelen en een schatting van het aantal te ontsmette personen voor controle en mogelijk besmet.

A-object (afstand tot grens)	Vermogen	Preparatie- zone Evacuatie	Preparatie- zone Jodium- profylaxe kind / volwassene	Preparatie- zone Schuilen	Aantal schoon te maken personen	Aantal personen besmet- tings- controle
	MWe/MWth	(km)	(km)	(km)		
A1 en A2: Kernenergiecentrales						
Borssele	512 MWe	10 ¹⁾	100 / 20	20	10	1000-en
Doel (2.8 km)	433 / 433 / 1006 / 1047 MWe	10	100 / 20	20		1000-en
Emsland (20 km)	1400 MWe	-	100 / 20	25		100-en
Mol (10.4 km)	4 / 120 MWth	-	20 / -	20		
Tihange (38 km)	962 / 1008 / 1015 MWe	-	100 / -	-		
A3: Onderzoeksreactoren						
Petten	45 MWth	3	3 / -	3	5	100-en
Delft	2 MWth	-	0,5 / -	0,5	5	100-en
A4: Nucleair aangedreven schepen						
Haven Rotterdam Den Helder	-	< 100 meter	400 meter	700 meter	10	100-en
A5: Transport nucleair defensiemateriaal						
Nederland	-	800 meter ²⁾	-	2000 meter ³⁾	10	100-en
A7: Moedwillig handelen (vuile bom)						
Nederland	-	400 meter	- / -	2000 meter	10	100-en

1) Voor evacuatie geldt dat de binnenste 5 km voorrang heeft boven het daarbuiten gelegen gebied.

2) Veiligheidszone: altijd ontruimen.

3) Alleen bij brand.

A1: Binnenlandse kernenergiecentrales

Borssele is de enige in werking zijnde kernenergiecentrale in Nederland: een incident kan leiden tot de emissie van radioactieve splijtingsproducten in het milieu. Er is een rampbestrijdingsplan en er zijn preparatiezones voor een aantal urgente maatregelen afgesproken. Bij mogelijke schade in een reactorkern wordt 'General Emergency' afgekondigd (dit geldt ook voor A2 en A3).

A2: Buitenlandse kernreactoren

- > A2a: nabij de Nederlandse grens: hiervoor gelden preparatiezones voor maatregelen.
- > A2b: ver van de Nederlandse grens: bij een zeer ernstig ongeval kunnen maatregelen ter bescherming van voedsel, water en gewassen nodig zijn.

A3: Nucleaire onderzoeksreactoren

Hoge Flux Reactor (45 MWth) in Petten en de Hoger Onderwijs Reactor (2 MWth) in Delft: bij mogelijke schade in de reactorkern wordt een 'General Emergency' afgekondigd. Hoge Flux betekent een hoge neutronendichtheid; deze is ongeveer 10 keer hoger dan in een kernenergiecentrale.

A4: Nucleair aangedreven schepen

Mogelijk in de havens van Rotterdam en Den Helder: zeer robuust en de emissie van radioactief materiaal is niet waarschijnlijk. Wel zijn preparatiezones voor maatregelen afgesproken.

A5: Transportongevallen met radiologisch defensiemateriaal

Bij transportongevallen met nucleair defensiemateriaal bestaat een risico op het vrijkomen van radioactief materiaal. Vooral inademing daarvan vormt een ernstig gezondheidsrisico. Meten op α -straling is noodzakelijk. Een nucleaire explosie is niet mogelijk. Zie voor verdere informatie paragraaf 0.

A6: Het neerstorten van nucleaire satellieten

Bij terugkeren van een satelliet in de atmosfeer kan bij neerstorten de radioactieve brandstof over een groot gebied verspreid worden. Er zijn geen verdere maatregelen vastgesteld.

A7: Moedwillige handelingen met radioactieve bronnen of stoffen

Deze categorie bestaat uit:

- > A7a: opzettelijke blootstelling van personen aan hoog radioactief materiaal
- > A7b: opzettelijke besmetting op een locatie
- > A7c: vuile bom (Radiological Dispersion Device)
- > A7d: opzettelijke besmetting van voedsel of water
- > A7fe: moedwillig handelen bij een nucleaire inrichting.

Maatregelen zijn afhankelijk van de aard en gevolgen van de handelingen. De aandacht gaat vooral uit naar het opsporen van de bron en het vaststellen van mogelijke besmetting. Voor scenario A7c, de vuile bom, is een werkgebied of hot zone van 400 meter vastgesteld.

8.2 B-scenario's

De bestrijding van ongevallen met B-objecten, B-scenario's, is per definitie beperkt van omvang en kan in principe op lokaal of regionaal niveau worden afgehandeld in samenwerking met de deskundigen van het B-object. Ongevallen met B-objecten worden ook wel radiologische ongevallen of incidenten genoemd. De stralingsbelasting voor hulpverleners en leden van de bevolking is bij deze ongevallen meestal beperkt. De noodzaak voor directe maatregelen zoals evacuatie, schuilen of jodiumprofylaxe is niet waarschijnlijk.

B-objecten zijn:

- > installaties voor uraniumverrijking
- > installaties voor de verwerking en opslag van radioactief afval
- > overige locaties met radioactief materiaal of stralingsgevaar
- > transporten met nucleair of radioactief materiaal
- > het aantreffen van radioactieve (zoekgeraakte) bronnen of besmettingen.

B1: Installatie voor uraniumverrijking

Urenco Nederland in Almelo verrijkt splijtstof voor nucleaire reactoren. Een ongeval zou kunnen leiden tot besmetting van de locatie zelf, waarbij het stralingsgevaar beperkt blijft tot de medewerkers. Een risico vormt hier het uraniumhexafluoride (UF₆).

B2: Verzamelen, verwerken en opslag van radioactief afval

COVRA (Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval) in Nieuwdorp (gemeente Borsele) conditioneert en slaat radioactief afval op. Het is zeer onwaarschijnlijk dat een incident 'off-site' effecten heeft.

B3: Overige inrichtingen met radiologisch materiaal of stralingsapparatuur

Dit betreft bijvoorbeeld een radionuclidelaboratorium van een ziekenhuis. Een realistisch scenario is brand waarbij radioactief materiaal zich in de omgeving verspreidt via de rook of het bluswater. Standaard beschermingsmaatregelen zijn hierbij voldoende. In uitzonderlijke gevallen kan het nodig zijn om landbouwmaatregelen te treffen.

B4: Transportongevallen met nucleair of radioactief materiaal

Hierbij gaat het bijvoorbeeld om het vervoer van bronnen of radiofarmaca. De wet- en regelgeving (hiervoor gelden zowel vergunning/meldingsplicht als eisen aan verpakkingen) zorgt ervoor dat bij transport het risico op besmetting bij ongevallen beperkt is.

B5: Het aantreffen van radioactieve (zoekgeraakte) bronnen of besmetting

Omgaan met hoog-radioactieve bronnen zonder bescherming levert gezondheidsrisico's op. Waarschuw in dit geval altijd direct de ANVS via het crisisnummer stralingsincidenten. Bij vermoeden van een kwaadwillende oorzaak (bijvoorbeeld een vuile bom) wordt het incident een A-scenario en als zodanig behandeld.

Maatgevend scenario

Het maatscenario voor ongevallen met B-objecten is een ongeval gevolgd door brand tijdens het vervoer van enkele honderden pakketten met radiofarmaca (zie Figuur 8.1).

Er is slechts één maatscenario voor ongevallen met B-objecten vastgesteld, omdat de gevolgen van de overige B-scenario's vergelijkbaar zijn. Dit geldt niet voor het gebied waar het dosistempo van 25 $\mu\text{Sv}/\text{u}$ overschreden kan worden; dat is het grootst voor het maatgevende scenario. Ook de scenario's voor B-inrichtingen lijken qua gevolgen op het maatscenario. Tabel 8. geeft een indicatie voor de te hanteren veiligheidsafstanden voor het optreden bij B-scenario's.



Figuur 8.1 Vervoer van radiofarmaca

Tabel 8.2 Indicatie voor veiligheidsafstanden voor B-scenario's

Situatie	Veiligheidsafstand	Optreden veiligheidsregio ¹⁾
Gevareng gebied: gebied direct rond plaats stralingsincident. Hier bevindt zich de bron en vindt bronbestrijding plaats.	25 meter cirkelvormig of uitbreiden tot gebied waar dosistempo van > 2 mSv/u wordt gemeten	Brongebied hot zone extra aandacht voor veiligheid / bescherming hulpverleners
Werkgebied: hier gelden procedurele maatregelen. In dit gebied kunnen noodzakelijke hulpverleningsacties uitgevoerd worden.	100 meter cirkelvormig of uitbreiden tot gebied waar dosistempo van > 25 $\mu\text{Sv}/\text{u}$ wordt gemeten	Brongebied hot zone extra aandacht voor veiligheid / bescherming hulpverleners
Aandachtsgebied: benedenwindse deel van de omgeving (vanaf de bron) dat mogelijk besmet is of dreigt te worden.	ongeveer 500 meter benedenwinds te bepalen met de startmal	Effectgebied kan hot, warm of cold zone zijn

- 1) In de kolom *optreden veiligheidsregio* zijn de benamingen van gebieden vertaald naar de procedure IBGS: het gevareng gebied en het werkgebied vormen samen het brongebied ofwel de hot zone waarbij de grens ligt bij de alarmwaarde van de Automess AD1 van 25 $\mu\text{Sv}/\text{u}$. Het aandachtsgebied is het effectgebied waarbinnen zowel een hot zone, een warm zone als een cold zone kunnen voorkomen; de laatste bijvoorbeeld bij psychosociale gevolgen. Als richtwaarde voor de warm zone kan een grens van 2x het niveau van de achtergrondstraling aangehouden worden. Voor de terminologie wordt verwezen naar de procedure IBGS, zie ook **Fout!**
Verwijzingsbron niet gevonden..

Aanvullende informatie voor stralingsdeskundigen

Het rapport *Maatgevende scenario's voor ongevallen met categorie B-objecten* beschrijft een aantal geselecteerde scenario's waarvoor de omvang van de te verwachten gevolgen is bepaald. Dit rapport bepaalt daarmee de omvang van de bestrijding van B-incidenten. De conclusie uit dit rapport is dat de maximale afstand tussen het object en de grens van het gebied waarbinnen nog controle op besmetting wordt uitgevoerd ongeveer 2 kilometer is. Dit betekent dat de organisatie van de bestrijding zich ten hoogste op regionaal niveau zal afspelen (wat betekent dat de effecten lokaal zullen zijn).

In dit rapport is gebruikgemaakt van de volgende criteria:

- > de landelijke interventieniveaus voor directe maatregelen
- > de alarmwaarde van 25 $\mu\text{Sv/u}$, die de brandweer operationeel hanteert bij incidenten waarbij blootstelling aan externe straling aan de orde kan zijn
- > een tweede grenswaarde van 2000 $\mu\text{Sv/u}$ wordt gehanteerd als afbakening van het gebied waarin veiligheidsmaatregelen aan de orde kunnen zijn, het brongebied genoemd
- > een criterium van 4 Bq/cm^2 voor β -/ γ -straling voor schoonmaken van de huid
- > een niveau voor de bodembesmetting als afbakening van het gebied waarin metingen uitgevoerd worden in het kader van nazorg.

In dit rapport zijn afstanden bepaald voor de volgende scenario's (zie Tabel S8.1):

- > Ongeval in een B-laboratorium in stedelijk gebied: brand in een handschoenenkast in een B-laboratorium waarbij in een half uur 20 TBq ^{57}Co activiteit in de omgeving vrijkomt (hierbij is verondersteld dat de ventilatie stopt en ruiten breken of dat de ventilatie blijft werken maar de filters falen). De meest ongunstige emissie is emissie op grondniveau. Het laboratorium bevindt zich in een stedelijke omgeving. De gebouwen rondom het laboratorium verhogen de lokale turbulentie (gekaracteriseerd door een ruwheidslengte gelijk aan 1 m), waardoor de mate van verspreiding van de bij de brand vrijgekomen activiteit groot is.
- > Ongeval in een opslag met ingekapselde bronnen: hevige brand in een opslag van ingekapselde bronnen waarbij een klein deel van de activiteit van de bron in de omgeving vrijkomt (42 GBq ^{137}Cs). De maximale (effectieve) dosis die door 24 uur blootstelling aan de verspreide activiteit (bij weertype D2) wordt ontvangen, is circa 0,005 mSv. Het belangrijkste gevolg van de brand is de kans op blootstelling aan externe straling van de bron waarvan de afscherming door de brand verdwenen is.
- > Ongeval met een mobiele NDO-opstelling: ernstig ongeval tijdens het vervoer van NDO-apparatuur met een bron van 2 TBq ^{192}Ir . Er wordt conservatief verondersteld dat door het ongeval de bron binnen de bronhouder is gaan schuiven, zodat deze niet meer wordt afgeschermd. Let op: Volledig vrijkomen van de bron zou alleen kunnen optreden als al eerder door de operator een fout was gemaakt bij het terughalen van de bron in de houder. Er komt geen activiteit in de omgeving vrij.
- > Ongeval met een vervoermiddel van radioactieve stoffen: brand na ongeval met een vervoermiddel met enkele honderden Tc-generatoren waarbij 2/3^e deel van de pakketten verbrandt en 1% van de activiteit uit de verbrande pakketten vrijkomt in de atmosfeer. De emissie duurt een half uur. Hierbij komt 60 GBq ^{99}Mo vrij in evenwicht met $^{99\text{m}}\text{Tc}$. De maximale dosis door de verspreiding van deze activiteit bij weertype D2 in open terrein is 0,2 mSv. De hoogste maximale dosis door de vrijgekomen activiteit treedt op bij weertype F1 (hoge concentraties door een geringe verdunning). De maximale dosis na 24 uur blootstelling bedraagt dan circa 0,6 mSv. Na emissie van activiteit uit de verbrande pakketten blijft het merendeel (99%) van de activiteit achter en veroorzaakt in de omgeving een verhoogd stralingsniveau, omdat de afscherming door de brand is beschadigd (gesmolten).

Tabel S8.1 Overzicht te verwachten afstanden voor B-scenario's bij weertype D2

Type	Scenario	Maximale dosis op afstand	Gebied met dosis-tempo > 2.000 $\mu\text{Sv/u}$ cirkelvorming ¹⁾	Gebied met dosistempo > 25 $\mu\text{Sv/u}$, cirkelvorming	Aandachtsgebied voor besmetting, sector benedenwinds $\geq 4 \text{ Bq/cm}^2$
ongeval in B-laboratorium in stedelijk gebied	wegvallen afscherming van ingekapselde 20 TBq ⁵⁷ Co-bron door brand	16 μSv op 10 meter	< 11 meter gebouw	< 96 meter	< 50 meter
ongeval in opslag met ingekapselde bronnen	vrijkomen 42 GBq ¹³⁷ Cs en aanwezigheid van onafgeschermd 4,2 TBq ¹³⁷ Cs-bron	6 μSv op 600 meter	< 10 meter gebouw	< 90 meter	direct rond gebouw
ongeval met mobiele NDO-opstelling	ontbreken afscherming 2 TBq ¹⁹² Ir-bron	- / -	< 12 meter	< 106 meter	beperkt tot gebied rond de bron, controle nadat bron verwijderd is
ongeval met vervoermiddel van radioactieve stoffen	emissie van 60 GBq ⁹⁹ Mo/Tc en blootstelling aan externe straling van 6 TBq ⁹⁹ Mo/Tc-bron	0,2 μSv op < 10 meter	< 12 meter	< 110 meter	< 750 meter

1) In het rapport van Verhoef en Van Hienen (2004) wordt brongebied ook wel gedefinieerd als het gebied waar dosistempo van > 2 mSv/u wordt gemeten.

Overige transportongevallen

Van de onderzochte B-scenario's leiden transportongevallen tot relatief de grootste gevolgen; deze zijn daarom maatgevend. Een ongeval tijdens het vervoer van bestraalde splijtstof komt niet in aanmerking als maatscenario. De kans dat bij dit ongeval radioactieve stoffen vrijkomen of de afscherming wordt beschadigd is namelijk zeer gering.

Een ongeval tijdens het vervoer van uraanhexafluoride, UF_6 , (zie Figuur 8.2) waarbij deze stof vrijkomt, zal een relatief lage dosis tot gevolg hebben en dus een klein effectgebied. De chemische toxiciteit van het waterstoffluoride, HF, dat vrijkomt bij reactie van UF_6 met vocht uit de lucht zal het grootste probleem vormen. Het overgebleven uranylfluoride (UO_2F_2) vormt een fijnverdeelde vaste stof en verwaait. Omdat de wet strenge eisen stelt aan de container die bij het vervoer van UF_6 wordt gebruikt, is de kans op een emissie klein, ook bij brand. De containers staan tijdens vervoer onder onderdruk en zullen eerst omgevingslucht aanzuigen. Pas als voldoende druk is opgebouwd door de reactie in de container zal HF ontsnappen; dit is te zien aan een witte nevel.



Figuur 8.2 Transport containers met UF_6 , UN 2978

8.3 Daadwerkelijk voorgekomen stralingsongevallen en incidenten

A-ongevallen

- > 1986: Tsjernobyl: Vrijkomen van een groot deel van de reactorinhoud na een explosie en brand in de reactor. Door de open verbinding van de reactor naar de omgeving zijn dagenlang grote hoeveelheden radioactief materiaal geloosd. Er was sprake van een letale dosis door externe bestraling tijdens werkzaamheden bij de brandende reactor.
- > 1999: Twee arbeiders komen om bij een ongeluk in de uraniumopwerkingsfabriek in het Japanse Tokaimura. Het is de ergste nucleaire ramp na Tsjernobyl (maar voor Fukushima). Medewerkers doen te veel uranium in een tank in een poging tijd te besparen. Meer dan zeshonderd mensen staan bloot aan radioactiviteit en meer dan 320.000 mensen moeten meer dan een dag binnen blijven. Twee arbeiders betrokken bij het incident sterven later in het ziekenhuis aan hun verwondingen (acute stralingsziekte).
- > 2011: Fukushima: Smelten van de kern door een volledige uitval van de koeling na een aardbeving en tsunami. Hulpverleners liepen brandwonden op door externe bestraling.

B-incidenten

- > 1987: Goiânia (Brazilië): Ondeskundig ontmantelen van een Cs-137-bron bij de sloop van een ziekenhuis, waardoor de inhoud vrijkwam en (on)bewust verspreid werd, met vier doden en 183 in-/uitwendig besmette personen tot gevolg.
- > 1997: Werkzaamheden bij een nucleaire faciliteit in Tokaimura in het noordoosten van de Japanse hoofdstad Tokio werden gedeeltelijk gestopt na een brand en een explosie waarbij 37 mensen bloot kwamen te staan aan radioactiviteit.

- > 2001: Drie houthakkers vonden in een bos in Georgië twee ingekapselde, maar niet afgeschermd Sr-90/Y-90-bronnen. Het waren zogenaamde RTG's, Radionuclide Thermoelectric Generators. Dit soort apparaten werden in de vroegere Sovjet-Unie vaak gebruikt om in afgelegen oorden elektriciteit op te wekken. Daarbij werd gebruikgemaakt van de warmte die ontstaat bij radioactief verval. Dit type RTG's heeft op het moment van productie een activiteit van 1 tot 15 PBq (Peta is 10^{15} !). Bij het vinden van de bronnen hadden ze allebei nog een Sr-90-activiteit van 1,5 PBq. De bronnen werden zijn meegenomen om als 'straalkacheltje' te gebruiken. Twee mannen lopen hierdoor in korte tijd zeer zware huidwonden op.
- > 2006: Bij een Belgische bestralingsfaciliteit werd een medewerker onbedoeld blootgesteld aan een hoge dosis van 4,5 Gy.
- > Antiek bureau waarop in het verleden een potje radiumhoudende vloeistof was omgevallen, die onzichtbaar geïmpregneerd was in het hout. De geschatte activiteit was 30 MBq aan Ra-226. In de studeerkamer waar het bureau stond, was sprake van een concentratie van 8000 - 9000 Bq/m³. Dat is gelijk aan 300 maal de binnenluchtconcentratie en 3000 maal de buitenluchtconcentratie.

Dit zijn uitzonderlijke situaties! Bij de meeste stralingsincidenten blijft de op te lopen stralingsdosis ver beneden de drempeldosis voor acute effecten. Dit geldt ook voor directe omstanders. Bij de vliegcrash in de Bijlmer (1992) heerste onrust over de mogelijke aanwezigheid van verarmd uranium. Gebleken is dat het extra risico op longkanker kleiner was dan 1 op 100 miljoen; dit is dus geen radiologisch incident.

8.4 Achtergrondinformatie specifieke A-incidenten

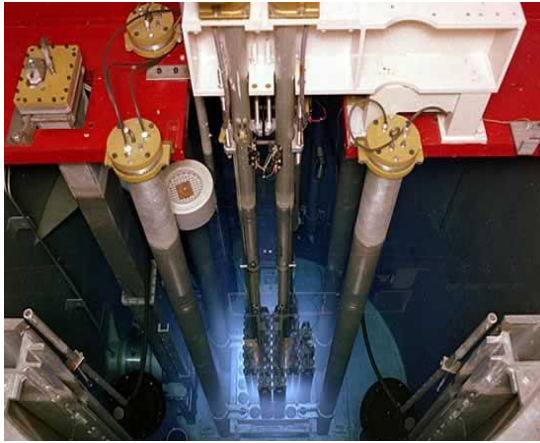
8.4.1 Kernreactor

In een kernreactor worden atoomkernen van uranium-235 gespleten; dit wordt de splijtstof genoemd. Bij de kernsplijting komt veel warmte vrij, die meestal wordt opgenomen in water. In een stoomgenerator wordt deze warmte omgevoerd tot stoom. De stoom onder hoge druk (ongeveer 60 bar) wordt gebruikt om via een stoomturbine een elektrische turbo-generator te laten draaien. Zo wordt de warmte van de kernreactor gebruikt om elektrische energie op te wekken. Kernreactoren leveren warmte voor de opwekking van elektriciteit en de voortstuwing van schepen en onderzeeërs. Ze kunnen ook toegepast worden als bron van neutronen voor bijvoorbeeld onderzoeksdoeleinden of voor het bereiden van diverse radioactieve isotopen voor nucleaire geneeskunde of industrieel gebruik.

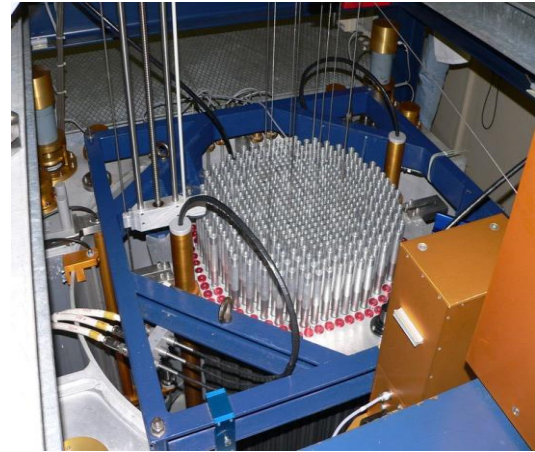
Het splijten van uranium-235 vindt plaats in een complexe installatie waaraan hoge veiligheidseisen worden gesteld. Het proces is een nucleaire kettingreactie van kernsplijtingen dat zichzelf in stand houdt en goed geregeld moet worden, omdat deze anders uit de hand loopt. Het kernsplijtingsproces vindt plaats onder gecontroleerde en stabiele omstandigheden.

Werkingsprincipe

Kernenergiecentrales zijn verplicht tot het treffen van vele veiligheidsmaatregelen, van goed opgeleid personeel tot technische voorzieningen. Zo is de splijtstof altijd fysiek gescheiden van de omgeving door een metalen pijp, het stalen reactorvat, een betonnen omhulsel, een gasdichte stalen buitenmantel en een betonnen koepel. Daarnaast gelden strikte procedures, wordt het stralingsniveau constant gemonitord en vindt besmettingscontrole van personen en omgeving plaats.



Figuur S8.2 De blauwe gloed rond de splijtstofelementen, Čerenkovstraling, ontstaat wanneer geladen deeltjes een grotere snelheid hebben dan de fasesnelheid van het licht in de materie



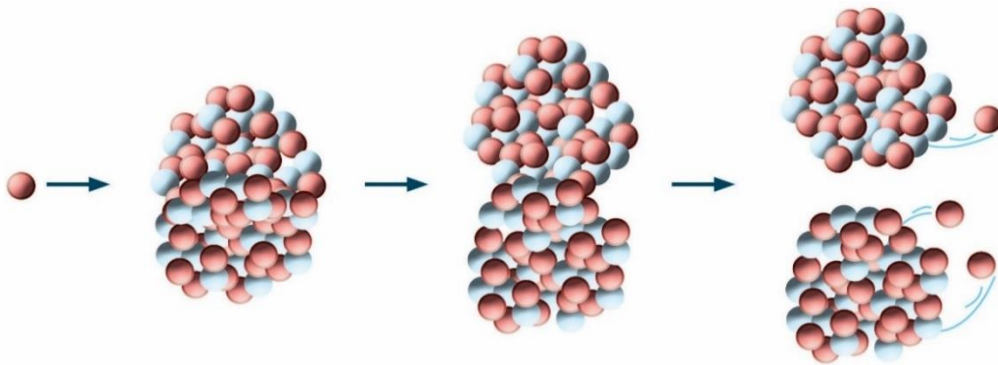
Figuur S8.3 Onderzoeksreactorkern

Bij kernsplijting absorbeert de kern van een zwaar atoom zoals uranium een langzaam bewegend ('thermisch') neutron. De kern wordt daardoor instabiel en splijt spontaan in twee kleinere atoomkernen. Bij de splijting van een uraniumkern ontstaan twee lichtere kernen, 2 à 3 snelle neutronen en een grote hoeveelheid energie. De lichtere kernen zijn radioactief en vallen weer uiteen, waardoor nog meer energie vrijkomt (zie Figuur S8.1). Uranium komt in de natuur voor in de volgende samenstelling: $^{238}\text{U}^*$ (99,3%), ^{235}U (0,7%) en ^{234}U (0,006%). Hiervan is alleen ^{235}U geschikt als splijtstof. Voor het op gang houden van een kettingreactie is een hoger percentage ^{235}U noodzakelijk dan in natuurlijk uranium aanwezig is. Het bereiken van een hoger percentage wordt verrijken genoemd; hiervoor bestaan allerlei processen (ultracentrifuge, gasdiffusie). Dit gebeurt bijvoorbeeld bij Urenco in Almelo. Voor kernenergie is uranium met een gehalte van 3 à 5 procent ^{235}U voldoende.

Verrijkt uranium wordt in een kernreactor gebruikt in de vorm van tabletjes opgesloten in dichtgelaste metalen pijpen, de splijtstaven (zie Figuren S8.2 en S8.3). De radioactieve stof en splijtingsproducten blijven binnen de splijtstaafpijp, alleen de neutronen en straling gaan door de wand. Splijtstaven zijn weer in groepen gekoppeld, het splijtstofelement. Vóór gebruik zijn deze elementen laag radioactief; de hoge radioactiviteit ontstaat pas als het verrijkt uranium met neutronen 'beschoten' wordt. Bij de splijting van uranium ontstaan meer neutronen dan er worden verbruikt. Daardoor kan de reactie zichzelf in principe onderhouden en zelfs versterken (nucleaire kettingreactie).

De neutronen die bij splijting van ^{235}U vrijkomen zijn te snel om op hun beurt splijting uit te lokken. Daarom worden deze neutronen vertraagd (moderatie), bijvoorbeeld met grafiet of water. Het risico van grafiet is het brandgevaar: bij de kernramp in Tsjernobyl werden de regelstaven betrokken bij de brand en was de kettingreactie niet meer te stoppen. Om te voorkomen dat er te veel langzame neutronen ontstaan en de reactie te snel gaat verlopen, kan het overschot worden weggevangen met materialen zoals cadmium en boor. De zogenaamde regelstaven bestaan uit deze materialen; door de regelstaven in of uit de reactorkern te schuiven kan het proces worden geregeld.

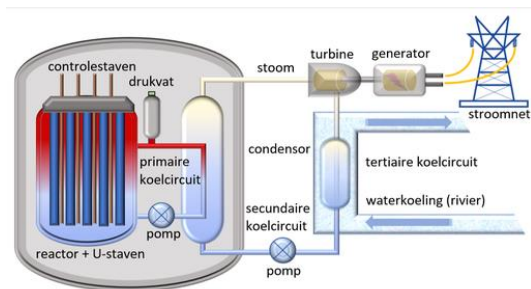
In geval van nood kan de nucleaire kettingreactie binnen een aantal seconden gestopt worden met een noodstop (scram: security rods axe man). Hierbij worden de regelstaven in enkele milliseconden volledig in de kern geschoten. Dit wordt gedaan bij storingen in de normale bedrijfsvoering, bijvoorbeeld als de stroomvoorziening van de koelsystemen uitvalt, of bij grote trillingen zoals bij een aardbeving. Het materiaal blijft dan nog wel geruime tijd warmte produceren door het radioactief verval van de splijtingsproducten die in de reactor aanwezig zijn. Deze warmte (in de eerste dagen is dat nog ongeveer 6% van de normale warmte) moet worden afgevoerd en bij veel (vooral oudere) reactortypen kan dat alleen door actieve koeling van het systeem. Zo leidde het uitvallen van de noodkoelsystemen tot grote problemen bij de kernenergiecentrale Fukushima I in Japan na de aardbeving en tsunami van 2011. Bij onvoldoende koeling kunnen de splijstofelementen in de reactorkern gaan smelten (kernsmelting of meltdown).



Figuur S8.1 Kernsplijting

Er zijn twee basistypen kernreactoren te onderscheiden als we kijken naar de snelheid van de gebruikte neutronen.

- > Thermische (langzame) reactoren gebruiken langzame neutronen. De meeste reactoren voor energieopwekking zijn van dit type. Ze gebruiken een moderator om de neutronen tot lage snelheden af te remmen om vangst van de neutronen door $^{238}\text{U}^*$ te voorkomen. Ze bestaan daarnaast uit brandstof (splijtbaar materiaal), omhulsels, drukvaten, stralingschilden en instrumenten om de systemen van de reactor te bewaken en te regelen. De Pressurized Water Reactors (PWR) zijn kernenergiecentrales waarbij het koelwater in het reactorvat onder hoge druk gehouden wordt (zie Figuur S8.4). Dit type wordt in het westen het meest toegepast, zoals:
 - Borssele (1 reactor, 512 MWe)
 - het nabijgelegen Doel (4 reactoren, waarvan 2 van 400 en 2 van 1000 MWe)
 - Emsland (1 reactor, 1400 MWe).
- > Snelle reactoren gebruiken snelle neutronen. Hiervoor is hoogverrijkte brandstof nodig, maar geen moderator. De brandstof is zo sterk verrijkt dat er weinig $^{238}\text{U}^*$ meer in voorkomt die anders snelle neutronen zou wegvangen. Dit type reactor wordt gebruikt in mobiele installaties waar weinig ruimte beschikbaar is (denk aan kernonderzeeërs) en voor de productie van plutonium.



Figuur S8.4 PWR kerncentrale

Reactoren voor thermische energieopwekking kunnen weer worden onderverdeeld in drie typen, afhankelijk van het type koeling. Dit zijn koelkanalen onder druk, een groot drukvat of gaskoeling (meestal helium, stikstofgas of koolstofdioxide).

Als de brandstof in sommige splijtstofelementen is 'opgebrand', wordt deze verwijderd en vervangen door nieuwe (verse) staven splijtstof. De hoeveelheid energie die gedurende hun levensduur aan de splijtstofstaven wordt onttrokken, wordt de 'burn up' genoemd en wordt uitgedrukt in termen van opgewekte warmte-energie per hoeveelheid aanvangs-brandstofgewicht. Een gebruikelijke eenheid is megawattdagen thermisch per metrieke ton zwaar metaal bij aanvang.

De splijtingsproducten (onder andere krypton en cesium) blijven achter in de opgebrande splijtstaven. Deze splijtstaven worden uiteindelijk afgevoerd naar de COVRA. Daarnaast worden sommige neutronen opgenomen in metalen onderdelen van de installatie die vervolgens geactiveerd en dus radioactief worden; uiteindelijk is ook dit metaal, bij afvoer, radioactief afval.

Bij een ernstig A-incident gaat het in bijna alle gevallen om technisch of menselijk falen (of een combinatie van beide) dat leidt tot onvoldoende koeling. Door oververhitting van de splijtstofstaven kan het splijtstofmateriaal vrijkomen. Binnen de installatie zijn nog vele barrières die moeten voorkomen dat radionucliden bij een incident vrijkomen in het milieu. Het is daarom moeilijk te voorspellen wat er precies vrijkomt en op welk tijdstip de emissie plaatsvindt.

Brontermen

Tijdens regulier bedrijf zijn er in de splijtstofstaven in het reactorvat vele honderden verschillende radionucliden gevormd, variërend van edelgassen tot stoffen met extreem hoge smelt- en kookpunten. Om te voorspellen welke radionucliden vrijkomen bij een emissie en het tijds- en emissieverloop dat daarbij hoort, wordt een indeling gemaakt naar de vluchtigheid van de radionucliden. Op basis van deze indeling worden lozingsfracties bepaald, waarbij rekening gehouden wordt met de hoeveelheid van de betreffende stof, het verval, de groei van dochterproducten en de invloed van veiligheidsvoorzieningen.

Simpel gesproken is wat er in het milieu terecht komt gelijk aan de inhoud van het reactorvat (de kerninventaris) vermenigvuldigd met de lozingsfractie. Deze lozingsfractie is afhankelijk van het scenario, ofwel de mate van de beschadiging van de splijtstofstaven, de vluchtigheid van de stof en de barrières die gepasseerd moeten worden. Bij een zeer ernstig incident kunnen er honderden verschillende radionucliden in meer of mindere mate vrijkomen. Deze radionucliden gedragen zich verschillend en leveren allemaal op een specifieke manier een bijdrage aan de stralingsdosis. Het inschatten van de stralingsdosis voor de bevolking tijdens een incident is dus een uitermate complex proces.

Op basis van modelberekeningen en evaluaties van stralingsincidenten zoals Tsjernobyl en Fukushima is redelijk goed bekend welke radionucliden bij een kernramp het sterkst bijdragen aan de stralingsdosis van de bevolking. Op de dag van de lozing is inhalatie het meest dominante blootstellingspad; belangrijke radionucliden zijn: ^{131}I , $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$, $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}$. Externe bestraling draagt voor 10-20% bij, vooral door edelgassen: $^{88}\text{Kr}/^{88}\text{Rb}$, ^{133}Xe , ^{135}Xe , en de aan stofdeeltjes gebonden: $^{132}\text{Te}/^{132}\text{I}$, $^{140}\text{Ba}/^{140}\text{La}$, ^{103}Ru . Op de langere termijn domineren de belastingspaden ingestie en externe bestraling vanuit de

omgeving. Vooral het eten van besmette bladgroente (bijvoorbeeld spinazie) kan sterk bijdragen. Op korte termijn zijn vooral ^{131}I , $^{132}\text{Te}/^{132}\text{I}$, $^{140}\text{Ba}/^{140}\text{La}$ en ^{103}Ru van belang en later ^{89}Sr , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{134}Cs en $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$. Welke radionucliden er precies vrijkomen, hangt af van het incidentverloop en de kerninventaris.

Om inzicht te krijgen in de meest waarschijnlijke scenario's en mogelijke gevolgen zijn voor veel kernenergiecentrales veiligheidsstudies uitgevoerd. Het resultaat van zo'n studie is een set van mogelijke scenario's met de kans op die verschillende scenario's. Elk scenario leidt tot een zekere bronterm. Een bronterm is een theoretische benadering van de te verwachten uitstoot.

Een bronterm bevat de volgende elementen:

- > welke fractie van de aanwezige radionucliden ontsnapt
- > de tijdsduur tussen het aanvankelijk falen en de emissie van radioactiviteit naar het milieu
- > de duur van de emissie
- > de hoogte van de emissie (schoorsteen of niet) en de warmte-inhoud.

Deze informatie is verwerkt in preparatiezones voor maatregelen voor kernreactoren in Nederland en nabij de Nederlandse grens. De meest actuele gegevens vindt u in het NCS.

STC-CON1

Vanaf 2008 hanteert Nederland in de voorbereiding op een kernongeval een maatramp¹⁴ met een lozingsomvang aangeduid met STC-CON1. De SCT-CON1 is een geconstrueerde bronterm voor de kernenergiecentrale Borssele en geeft de omvang van de lozing weer in relatie tot de lozingswaarschijnlijkheid. De STC-CON1 bronterm gaat uit van een tijdsverloop van 24 uur tussen de start van het incident en het moment dat er radioactiviteit naar het milieu geloosd wordt. Die emissie duurt dan 4 uur. De lozingshoogte is op grondniveau. De radioactieve lozing bestaat uit edelgassen, aerosol-gebonden isotopen afkomstig uit de kern van de reactor. Radiologisch gezien vormt het isotoop ^{131}I daarbij het grootste gevaar voor mens en milieu.

De STC-CON1 lozing met het behorende maatscenario is dus geen realistisch ongeval; het is een geconstrueerde bronterm die gebruikt wordt als referentiepunt voor de voorbereiding op kernongevallen in Nederland. Het daadwerkelijke tijdsverloop is moeilijk te voorspellen. De lozingsfracties, het bijbehorende tijdsverloop en de lozingscondities van de STC-CON1-lozing zijn daarom alleen bedoeld ter oriëntatie en voor de voorbereiding op kernongevallen in de vorm van responsplannen.

Het radioactieve materiaal wordt verspreid door de dan heersende wind. Over het algemeen geldt: hoe verder van de bron vandaan, hoe beperkter de effecten voor de omgeving. Uiteindelijk zal de radioactieve uitstoot zich tot een afstand van vele honderden kilometers hebben verspreid. Omdat straling zeer goed meetbaar is, zal de aanwezigheid ook daar kunnen worden vastgesteld. De specifieke weersomstandigheden bepalen de daadwerkelijke concentratie van radioactieve stoffen. Hierdoor kunnen zogenaamde 'hot spots' ontstaan (bijvoorbeeld door lokale regenbuien).

¹⁴ De status van de 'maatramp' is echter onduidelijk geworden, omdat deze niet meer is opgenomen in het LCP-S, en mogelijk worden andere referentiescenario's voor de beschermingsstrategie gekozen.

Om een idee te geven wat dit in een concreet geval kan betekenen, is in Tabel S8.2 per nuclidengroep de lozingsfractie weergegeven voor een aantal situaties:

- > Het stralingsincident in de Amerikaanse reactor op Three Mile Island in 1979, waar de oververhitting van kernsplijttingsmateriaal beperkt bleef: vrijwel alleen edelgassen zijn vrijgekomen. De hoogst ontvangen stralingsdosis voor leden van de bevolking was naar schatting 0,4 mSv.
- > Het stralingsincident in de Russische reactor in Tsjernobyl in 1986, waar de moderator verbrandde, met als gevolg het explosief vrijkomen van de reactorinhoud.
- > Het stralingsincident in Fukushima in 2011, waar het noodkoelsysteem uitviel en een deel van de reactorinventaris vrijkwam in de lucht en later ook in zee.
- > De STC-CON1 bronterm.

De vergelijking van de lozingsfracties laat zien dat het Three Mile Island incident ten opzichte van STC-CON1 vrij onbeduidend was, maar dat Tsjernobyl veel ernstiger uitpakte; dit kwam, omdat de moderator verbrandde. Bij de ramp in Fukushima was de lozingsfractie aan Cs beduidend hoger dan de STC-CON1-bronterm.

Tabel S8.2 Lozingspercentages (%) van de kerninventaris per radionuclidengroep voor verschillende ongevalsscenario's. Het STC-CON1-scenario is een hypothetisch scenario en dient als referentie voor de preparatie op kernongevallen in Nederland.

Radionuclidengroep	TMI (%)	Tsjernobyl (%)	Fukushima (%)	STC-CON1 (%)
edelgas: Kr, Xe	9	100	100	75
jodium: I	0,0001	50-60	0,5-24	1
cesium: Cs, Rb	-	20-40	2-8	0,7
antimoon: Sb	-	25-60		1
telluur: Te	-	25-60		0,5
molybdeen: Mo, Ru, Rh, Tc,...	-	> 3,5		0,1
barium: Ba	-	4-6		0,1
strontium: Sr	-	4-6		0,01
lanthaan: La, Am, Cm, Eu, Zr, Y,...	-	3,5		0,01
cerium: Ce	-	3,5		0,01
uraan: U, Pu, Np	-	3,5		0,001

Inschatten van de stralingsbelasting na een A-incident

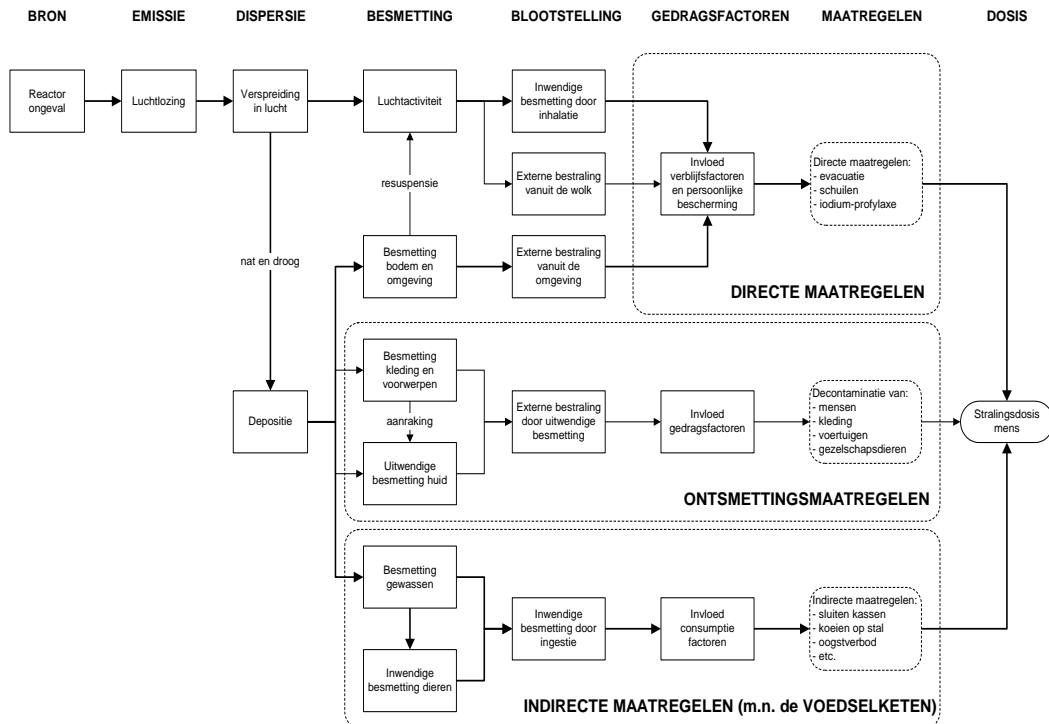
Het inschatten van de stralingsbelasting is lastig, zeker na een ernstig A-incident, omdat rekening gehouden moet worden met de verschillende blootstellingspaden, het radioactief verval van de verschillende radionucliden en de ingroei van dochterproducten. Ook is de benodigde informatie in de chaos van de situatie moeizaam beschikbaar. Vaak wordt een selectie gemaakt van de radionucliden die de belangrijkste bijdrage leveren aan de

stralingsbelasting. Als een blootstellingsroute leidt tot een stralingsbelasting, spreken we van een belastingspad. Dit is schematisch weergegeven in Figuur S8.5.

Aan de hand van rekenprogramma's kan het volgende geconcludeerd worden voor een STC-CON1-achtig scenario als GEEN rekening wordt gehouden met dosisreducerende maatregelen:

- > Tijdens het passeren van de radioactieve wolk (pluimpassage) is inhalatie veruit het meest dominante belastingspad.
- > ^{131}I en andere jodiumisotopen spelen daarbij een heel belangrijke rol: jodium wordt effectief opgenomen door de schildklier.
- > Externe bestraling (vanuit de wolk en de omgeving) en voedsel zijn verantwoordelijk voor het resterende deel.
Dit betekent dat meetresultaten van de Automess (waarmee alleen externe stralingsniveaus gemeten worden) in dit geval geen goede indicatie zijn van de totaal ontvangen effectieve stralingsdosis! Er is een extra vertaalslag nodig van de meting naar de effectieve dosis, zie hiervoor paragraaf 2.2.1.
- > In de eerste dagen na de ramp zijn (naast ^{131}I) de volgende radionucliden(reeksen) belangrijk: $^{132}\text{Te}/^{132}\text{I}$, $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$, $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}$, ^{103}Ru , $^{140}\text{Ba}/^{140}\text{La}$ en de edelgassen $^{88}\text{Kr}/^{88}\text{Rb}$, ^{133}Xe en ^{135}Xe .
- > Externe straling en besmetting van de voedselketen zijn op de langere termijn de belangrijkste belastingspaden; denk daarbij aan het invangen van radioactiviteit door bladgroente en besmetting van melk.
- > Gemeten over de lange termijn is de dosis door ^{131}I , ^{134}Cs en $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ dominant: ^{131}I levert zijn dosis in de eerste 8 dagen na de ramp en de Cs-isotopen pas geleidelijk over vele (tientallen) jaren.

Logischerwijs richten beschermingsmaatregelen zich op bovengenoemde belastingspaden.



Figuur S8.5 Overzicht van belastingspaden na een ernstig stralingsincident in een kernreactor. Paden die het meest kunnen bijdragen zijn vet weergegeven. De stippellijntjes geven aan waar de maatregelen kunnen ingrijpen.

8.4.2 Nucleair en radiologisch defensiemateriaal

Militaire transporten met nucleair of radiologisch defensiemateriaal kunnen op of boven Nederlands grondgebied plaatsvinden. Ondanks alle veiligheidsmaatregelen kunnen transportmiddelen betrokken raken bij een ongeval. Het meest complexe scenario daarbij is een crash van een militair transporttoestel dat nucleair of radiologisch defensiemateriaal vervoert.

Het mogelijke gevolg van een ongeval is de verspreiding van gevaarlijke stoffen in het milieu. In defensiemateriaal kunnen alfastralers aanwezig zijn; deze kunnen bijvoorbeeld via brand in de lucht verspreiden. Inademing daarvan vormt een ernstig gezondheidsrisico. Een nucleaire explosie van defensiemateriaal is echter niet mogelijk.

Bij ongevallen met militaire (transport)vliegtuigen zijn er bijkomende gevaren die de incidentbestrijding complexer maken, namelijk brandgevaar (kerosine), koolstofcomposiet, aanzuigen straalmotoren, gasaangedreven brandblussystemen, zelfbeschermingsmiddelen (lichtkogels en radar-storingsmunitie), explosief aangedreven systemen (schietstoel(en)) en handvuurwapens en munitie. Daarnaast bevat de overlevingsuitrusting van vliegtuigbemanningen veel licht explosief materiaal.

Maatregelen bij een transportongeval met nucleair of radiologisch defensiemateriaal zijn (zie Tabel 8.):

- > schuilen in een straal van 2 kilometer benedenwinds van de crashlocatie
- > ontruimen van een zone van 800 meter rondom de incidentlocatie als dit veilig kan en op advies van de AGS; deze zone wordt de veiligheidszone genoemd.

Bovenstaande maatregelen zijn eerste maatregelen die getroffen worden. Ontruiming van de veiligheidszone vindt plaats op advies van de AGS. Ontruim bij brand niet door de rook/pluim maar laat zo nodig schuilen totdat de brand geblust is. De AGS geeft advies over de afbakening van de veiligheidszone, het tijdstip van ontruimen en het gebruik van eventuele beschermende middelen. De maatregel schuilen wordt zo snel mogelijk door de AGS ingesteld in geval van brand of een vermoeden dat radiologisch materiaal kan zijn vrijgekomen.

Het optreden bij transportongevallen met radiologisch defensiemateriaal is vergelijkbaar met het optreden bij incidenten met gevaarlijke stoffen. In eerste instantie hebben de lokale autoriteiten de verantwoordelijkheid voor de rampenbestrijding. De prioriteiten van de lokale hulpverleningsdiensten zijn het bepalen van veilig en onveilig gebied, het redden van levens en het (zo nodig) bestrijden van de brand. Hierbij moet gemeten worden op bodembesmetting met α 's (Automess met sonde AD-17 of AD-k) en (indien mogelijk) laag-energetische γ -straling. Tijdens het optreden wordt gebruikgemaakt van bluskleiding en adembescherming, eventueel aangevuld met een vuilwerkpak. Let hierbij op mogelijke besmetting met en verspreiding van gevaarlijke stoffen en tref zo nodig schoonmaakmaatregelen (zie paragraaf 9.3.3).

Als een transportongeval met radiologisch defensiemateriaal plaatsvindt, zal de lokale brandweer specifieke instructies ontvangen over de te hanteren bestrijdingstactiek en te nemen veiligheidsmaatregelen. Als uitgangspunt kan gehanteerd worden: bij brand zo snel mogelijk blussen en de lading zo snel en lang mogelijk koelen. Bijstelling van de schuilzone vindt plaats op basis van analyses van het Crisis Expert Team straling en nucleair (CETsn). Deze analyses worden gebaseerd op meteorologische omstandigheden (bijstelling sectoren) of radiologische metingen (schuilafstanden).

Tabel 8.3 Initiële maatregelen bij een ongeval met radiologisch defensiemateriaal of een vuile bom

Scenario	Veiligheidszone ontruimen rondom	Schuilzone rondom	Jodiumprofylaxe
Crash militair transporttoestel mogelijk met nucleair of radiologisch defensiemateriaal	800 meter ¹⁾	2 km ²⁾	n.v.t.
Vuile bom	400 meter	2 km	n.v.t.

1) Als dit veilig kan, niet door de rook/pluim; advies AGS.

2) In sectoren benedenwinds en alleen bij brand of bij vermoeden van vrijkomen van radioactieve stoffen.

8.4.3 Vuile bom

Moedwillige incidenten met radioactieve stoffen kunnen plaatsvinden door bijvoorbeeld sabotage, een aanslag in inrichtingen waar radioactieve stoffen zijn opgeslagen (laboratoria, ziekenhuizen, industrie) of tijdens een transport van radioactieve stoffen. Kleine hoeveelheden radioactief materiaal kunnen ook vanuit een vliegtuig worden verspreid, gebruikt

worden om voedsel of water te besmetten of in een vuile bom worden verwerkt. Radioactieve materialen die geschikt zijn gemaakt voor en gebruikt worden om schade toe te brengen aan mensen en omgeving worden radiologische strijdmiddelen genoemd.

De bekendste vorm is misschien wel de vuile bom. Dit is een conventioneel explosief dat vervuild is met radioactief materiaal. Door de explosie van de bom worden de radioactieve isotopen verneveld of verdampt, zodat ze in de lucht terechtkomen en snel over een groot oppervlak verspreid worden. Na de ontploffing zal de omgeving dus radioactief besmet raken; de radiologische gevolgen zullen waarschijnlijk veel minder ernstig zijn dan die van een A-incident, maar ernstiger dan die van B-incident. Gevolgen van de verspreiding van radioactief materiaal over een relatief groot gebied zijn: chaos en paniek, schade in de omgeving, langdurig onbruikbaar zijn van terreinen en/of infrastructuren, relatief dure reinigungsoperaties en stochastische effecten zoals verhoogde kankercijfers (zie voor uitleg over gezondheidseffecten Hoofdstuk 4). Het dominante blootstellingspad is inademing van het fijn verdeelde stof.

De eerste actie bij het vermoeden van een vuile bom is het afzetten van een ruim gebied van minimaal 400 meter. Voor de maatregel schuilen wordt een afstand tot 2 kilometer benedenwinds aangehouden (zie Tabel 8.). Vervolgens wordt onderscheid gemaakt in twee situaties, namelijk de fase vóór en de fase ná de ontploffing. Een niet-ontplofte vuile bom is waarschijnlijk niet voldoende afgeschermd, zodat het gevaar van (over)bestraling rond de bom zeer waarschijnlijk is. De aanwezigheid van γ -straling is gemakkelijk aan te tonen met de Automess 6150AD1. Bovendien is de bom gevaarlijk als explosief. Deze situatie zal de brandweer benaderen volgens de procedure incidentbestrijding gevaarlijke stoffen en het protocol verdachte objecten; dit biedt bescherming tegen het radiologische en het explosiegevaar. De aanwezigheid van γ -straling vormt een extra complicerende factor bij de ontmanteling van het explosief.

De gevolgen na de ontploffing hangen af van de precieze constructie van de bom. Het radioactief materiaal zal zich verspreiden in de vorm van fijnstof (aerosolen). Daarna zijn de verspreiding en de depositie afhankelijk van de meteorologische condities en omgevingsfactoren (zie paragraaf 5.3). In de buurt van de explosie kunnen 'hot-spots' ontstaan die lokaal een hoog stralingsdosistempo veroorzaken. Daarop moet gecontroleerd worden. Eventuele slachtoffers vallen waarschijnlijk door de gevolgen van de ontploffing. Wel moet rekening gehouden worden met uitwendige besmetting (ook daar waar ze gewond geraakt zijn). De verwachte besmetting is laag en vormt geen belemmering voor het verlenen van spoedeisende hulp. Wel moeten de reguliere besmettingscontrole uitgevoerd en schoonmaakmaatregelen genomen worden (zie paragraaf 9.3). Ook de omgeving moet schoongemaakt worden (zie paragraaf 9.3.5).

Gevaren:

- > Het grootste risico is het explosief!
- > De kans op acute stralingsschade is minimaal.
- > De grootste effecten zijn psychische, sociale en economische schade.
- > De feitelijke omvang van het risicogebied is zeer sterk afhankelijk van de aard van de bebouwing. Veel hoge dichte bebouwing geeft weinig verspreiding. Daarom moeten zo spoedig mogelijk controlemetingen uitgevoerd worden om het feitelijke risicogebied te bepalen.
- > Hoe weet men of het een vuile bom is? Advies: bij een explosie op een onverwachte plaats en die mogelijk niet gas-gerelateerd is, standaard de Automess mee.

Constructie en effecten van een vuile bom

De onderdelen en kennis om een vuile bom te construeren zijn redelijk eenvoudig te verkrijgen. Voor het maken van een vuile bom kunnen alle radionucliden gebruikt worden. Om veel schade aan te kunnen richten, is een sterke γ -stralingsbron (bijvoorbeeld $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$, ^{60}Co of ^{192}Ir) nodig. De verwachting is dat de activiteit maximaal 500 TBq zal zijn. Ook α -stralers (bijvoorbeeld ^{241}Am), ^{235}U , kernafval in het algemeen en ^{239}Pu behoren tot de mogelijkheden. De α -stralers zijn voor detonatie (gesloten bron) nauwelijks aan te tonen en leveren dan ook nog geen gevaar voor de omgeving. Het gebruik van radioactief jodium als materiaal voor een vuile bom is minder waarschijnlijk vanwege de relatief korte halfwaardetijd van de meeste radioactieve jodiumisotopen (met uitzondering van ^{125}I). De maatregel jodiumprofylaxe is dus niet zinvol voor dit scenario.

Berekeningen hebben aangetoond dat (voor interventieniveaus zie Tabel S9.1):

- > het interventieniveau voor schuilen met de wind mee tot een afstand van ruim een kilometer overschreden kan worden,
- > het evacuatie niveau voor vroege evacuatie mogelijk zeer dicht bij de bronlocatie overschreden wordt: dit gebied zal in de praktijk ontruimd zijn of worden,
- > overschrijding van het interventieniveau voor relocatie alleen in de onmiddellijke nabijheid van het ontstekingspunt voorkomt.

Hierbij gelden de volgende uitgangspunten:

- > De radionucliden bevinden zich in een fijn verdeelde toestand (fijnstof) met een deeltjesgrootte van 0,01 – 5 μm .
- > De 48-uursdosis wordt gedomineerd door inhalatie van radioactieve aerosolen, relatief kort na de explosie.

Door de invloed van bebouwing kan deze waarde in de praktijk met enkele honderden meters afwijken. Een aandachtsgebied van 2 kilometer benedenwinds lijkt een veilige aanname. Probleem is dat de maatregel schuilen in de praktijk, afhankelijk van het verrassingselement en de (schrik)reactie van de bevolking, moeilijk uitvoerbaar zal zijn, tenzij het gevaar tijdig onderkend is. Na passage van de wolk zal het gedeponeerde radioactieve materiaal gedurende lange tijd bijdragen aan de stralingsbelasting.

9 Interventie

De kernenergiewet (KeW) en het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming geven richtlijnen voor interventies bij incidenten waarbij ioniserende straling vrijkomt. Het besluit stelt dat een interventie alleen wordt uitgevoerd als het resultaat voldoende is om de nadelige gevolgen te rechtvaardigen. Het resultaat is de te verwachten beperking van de (gezondheids)schade. De nadelige gevolgen zijn de sociale en maatschappelijke gevolgen veroorzaakt door de ioniserende straling en de kosten van de interventie.

Verantwoordelijkheden bij interventie

Een exploitant onder wiens verantwoordelijkheid handelingen of werkzaamheden worden verricht waarbij ioniserende straling kan vrijkomen, moet voorzieningen treffen ter voorbereiding op een interventie voor het geval zich binnen de locatie een radiologische noodsituatie voordoet. De exploitant stelt hiervoor een interventieplan op dat regelmatig getest wordt. Als een radiologische noodsituatie ontstaat, moet de exploitant alle passende maatregelen treffen om de gevolgen te beperken. Daarnaast moet de exploitant de noodsituatie melden via het crisisnummer stralingsincidenten van de ANVS en de burgemeester van de betrokken gemeente informeren.

Degene die verantwoordelijk is voor de interventie waarbij het gevaar van blootstelling bestaat en beperkt wordt, moet ervoor zorgen dat de volgende taken minimaal worden uitgevoerd:

- > de afbakening van het desbetreffende gebied
- > de invoering van een bewakingssysteem voor de blootstelling
- > de uitvoering van de interventie, volgens een goedgekeurd plan van aanpak
- > het regelen van de toegang tot of het gebruik van de locaties of gebouwen die zich in het afgebakende gebied bevinden.

Dienstdoend Ambtenaar Straling (DDA)

De Dienstdoend Ambtenaar Straling ANVS (DDA Straling) is een inspecteur van de ANVS die opgeroepen wordt als er sprake is van een incident of ongeval waarbij radioactieve stoffen, splijtstoffen of ertsen betrokken zijn. De DDA wordt opgeroepen door de AGS of door de vergunninghouder. In de praktijk zal dit bij een (mogelijk) incident met een B-object zijn, waarbij geen (verdere) verspreiding van radioactieve stoffen naar de omgeving plaatsvindt. De DDA handelt dit (telefonisch of ter plaatse) af en kan hierbij (meet)ondersteuning en expertise van het RIVM inroepen. Afhankelijk van de situatie kan het incident of ongeval met alleen de Veiligheidsregio en DDA Straling afgewikkeld worden. Het is de verantwoordelijkheid van de DDA Straling om de omgeving van het incident of het ongeval radiologisch vrij te geven. Indien noodzakelijk voert de DDA Straling met ondersteuning van het RIVM stralingsmetingen uit. De DDA Straling houdt waar nodig toezicht, geeft aanwijzingen voor het opruimen van de radioactieve stoffen en voor het onder een vergunning brengen hiervan.

Voor de brandweer geldt de Wet veiligheidsregio's onverminderd; de brandweer zal dus de taken redden, brandbestrijding, technische hulpverlening en incidentbestrijding gevaarlijke

stoffen uitvoeren, met inachtneming van de maatregelen beschreven in de volgende paragraaf.

9.1 Maatregelen voor het optreden van de brandweer

Het hanteren van de procedure incidentbestrijding gevaarlijke stoffen is voldoende om besmetting tegen te gaan. Hierbij moet specifiek rekening gehouden worden met de mogelijke risico's van externe straling; daarom zal bij de uitruk vanaf de kazerne direct de Automess aangezet worden.

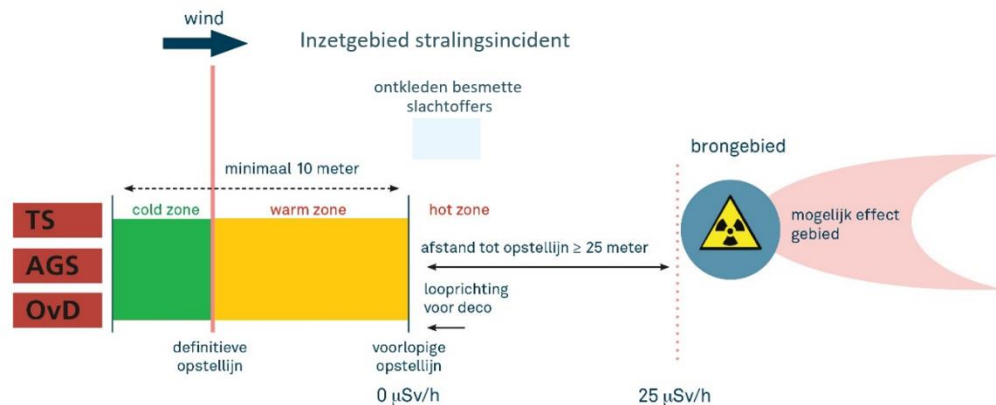
9.1.1 Algemene maatregelen bij stralingsincidenten: gesloten bron

Een overzicht van mogelijke maatregelen voor alle stralingsincidenten:

- > **Procedure incidentbestrijding gevaarlijke stoffen en Automess:** optreden conform de procedure IBGS en het stralingsniveau monitoren met de Automess (let op: deze meet alleen γ -straling).
- > **Afstand houden en opstelling:** de plaats van de opstelling hangt af van het dosistempo op de locatie en of bekend is of een open of (intacte) gesloten bron betreft. Om het niet onnodig complex te maken, is de indeling van het werkveld voor open en gesloten bronnen gelijk. Als bekend is dat het een *intacte* gesloten bron betreft, dan is decontaminatie en bovenwinds opstellen niet nodig. Het is handig het gebied te markeren waar de alarmwaarde van 25 $\mu\text{Sv/u}$ wordt gemeten (zie Figuur 9.1). De definitieve opstelling ligt daar waar minder dan 1 $\mu\text{Sv/u}$ (idealiter 0 $\mu\text{Sv/u}$) wordt gemeten. De stralingsdosis neemt kwadratisch af met het vergroten van de afstand (kwadratenwet, zie paragraaf 2.3.1): op 25 m afstand is het dosistempo al 10 keer lager dan op 8 meter afstand. Bij incidenten met γ -bronnen met een hoog dosistempo kan het nodig zijn om op 100 meter, of op nog grotere afstand, op te stellen. Voor B-objecten zal de alarmwaarde voor het dosistempo van 25 $\mu\text{Sv/u}$ zelden op een grotere afstand dan 100 meter rondom het object gemeten worden.
- > **Afscherming zoeken:** fysieke barrières houden een deel van de ioniserende straling tegen, denk hierbij aan het opstellen achter een muur of tankautospuit.
- > **Beoordeel de situatie:** als de verpakking intact is, is er geen besmettingsgevaar. Is de inzet noodzakelijk door brandgevaar, beknelling of een kans op beschadiging van de bron? Denk hierbij aan: dosisbeperkingen en ALARA (= As Low As Reasonably Achievable), en dat het resultaat zwaarder moet wegen dan het opgelopen risico.
- > **Persoonlijke bescherming:** het dragen van volledige uitrusting met adembescherming en gesloten nekflap; de ogen worden beschermd door het gelaatsstuk. (Let op: eigenlijk is dit pas relevant bij een open bron, maar het hoort bij het optreden conform procedure IBGS.)
- > **Blootstellingstijd en aflossing:** voorkom een hoge dosis voor personen; het is soms beter om meerdere hulpverleners een verwaarloosbare lage dosis op te laten lopen, dan één team van twee hulpverleners een hogere niet verwaarloosbare dosis.
- > **Metten:** continu meten van stralingsdosis(tempo) met Automess (alleen γ -straling) en blijven controleren van de individuele stralingsbelasting (persoonsdosismeting).
- > **Informatie en advies:** maak gebruik van de stralingsdeskundige van de instelling, de eigenaar van de stoffen, de AGS van de brandweer en de gezondheidkundig adviseur gevaarlijke stoffen (GAGS) van de GHOR.
- > **Nazorg en registratie:** de opgelopen dosis wordt in het persoonsdossier van de hulpverlener geregistreerd; hiervoor zijn registratieformulieren beschikbaar (zie *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Operationele handreiking, Registratie persoon*).

Uitleg over de inzet en de risico's is noodzakelijk. Bij grote onrust is medische controle aan te bevelen. Een nabespreking en/of evaluatie met andere hulpverleners en de eigenaar van het object kan zinvol zijn.

- > **Algemene hygiënemaatregelen:** handen wassen, niet roken, niet eten en drinken, et cetera.



Figuur 9.1 Indeling van het werkveld bij een stralingsincident

Als ezelsbruggetje wordt wel eens gesproken van de drie A's: afstand, afscherming, aflossing (blootstellingstijd). De vierde A van adembescherming is niet van toepassing als is vastgesteld dat het om een gesloten bron gaat; deze maatregel beschermt alleen bij het daadwerkelijk vrijkomen van de stof. In de praktijk zal bij optreden conform de procedure IBGS wel adembescherming toegepast worden. De vijfde A van Automess kan hieraan toegevoegd worden, maar dit kan misleidend zijn, omdat de Automess niet beschermt tegen straling, maar deze alleen monitort.

Aanvullende maatregelen voor de stralingsbescherming van niet-hulpverleners zijn:

- > **Ontruimen en afzetten:** houd het publiek op ruime afstand en zet het gebied af.
- > **Afscherming maken:** tref noodmaatregelen en maak zo mogelijk gebruik van toevallig aanwezig afschermingsmateriaal, zoals zand, stenen, water of gebouwen. Opstellen van een tankautospuit voor een bron leidt meestal al tot een flinke afname van het dosistempo.
- > **Voorlichting en communicatie:** de algemene opinie is dat straling eng is. Daarom is het belangrijk om tijdens en na het incident te zorgen voor goede voorlichting en communicatie.

Bij een gesloten bron is het is belangrijk om de externe *bestraling* van hulpverleners zo laag mogelijk en binnen de door de brandweer gestelde grenzen te houden. Hiervoor kan de brandweer bovenstaande maatregelen hanteren. Dit kan worden samengevat als werken volgens de inzetprocedure gevaarlijke stoffen, met als extra maatregel het zorgen voor afscherming.

9.1.2 Specifieke maatregelen bij het vrijkomen van radioactieve stoffen: open bron

Bij een open bron is er naast de kans op externe bestraling ook een kans op besmetting. Er is sprake van besmetting als radioactieve deeltjes zich ongecontroleerd in de omgeving verspreiden en neerslaan, waardoor een vooraf bepaalde grenswaarde wordt overschreden;

dit is onder andere afhankelijk van de weersomstandigheden. Bij een open of beschadigde bron is het belangrijk om uitwendige- en inwendige *besmetting* en verdere *verspreiding* van de radioactieve stoffen te voorkomen.

De indeling van het werkveld voor optreden bij een open bron is weergegeven in Figuur 9.1 . Aanvullende maatregelen (let op: aanvullend op bovenstaande algemene maatregelen voor het optreden bij een intacte gesloten bron) zijn:

- > **Beoordeel de situatie:** besmetting is mogelijk bij een kapotte verpakking of bronhouder, in een ziekenhuis, in een laboratorium of bij brand.
- > **Voorkomen van besmetting:** vermijd onnodig contact met de besmette omgeving en/of de bron. Let op bij het wisselen van ademlucht(flessen).
- > **Markeer het besmette gebied:** breng het besmette gebied zo goed mogelijk in kaart, markeer het en zet het af.
- > **Extra bescherming:** gebruik (naast adembescherming en een volledig uitruktenue) een vuilwerkpak dat makkelijk te verwijderen of af te spoelen is, ter bescherming van de uitrusting. Of maak gebruik van chemicaliënhandschoenen en/of laarzen.
- > **Voorkom verspreiding:** probeer zo mogelijk verspreiding van radioactieve stoffen te voorkomen door het afdekken van de bron (bijvoorbeeld met zand, zeil of eventueel schuim). Vraag hiervoor advies aan de AGS.
- > **Bescherm de omgeving:** plaats bij verspreiding benedenwinds een waterscherm benedenwinds van de bron.
- > **Voer een besmettingscontrole uit:** controleer na de inzet op mogelijke besmetting van personen, materieel en middelen. Zorg voor een effectieve en veilige afhandeling.
- > **Verwijderen van besmetting:** mocht er onbedoeld toch besmetting plaatsvinden, dan kan alleen uitwendige besmetting verwijderd worden. Adembescherming en hygiëne zorgen ervoor dat inwendige besmetting uitgesloten wordt. Uitwendig besmette personen moeten schoongemaakt worden (inwendige besmetting kan niet verwijderd worden!). Zorg voor opvang, controle en afvoer van het waswater. Zie verder paragraaf 9.3.3.

Aanvullende maatregelen voor de stralingsbescherming van niet-hulpverleners zijn:

- > **Voorkomen van besmetting:** radioactieve deeltjes kunnen in de omgeving en op voorwerpen terecht komen, die dan radioactief besmet raken. Het is zelfs mogelijk dat de hele omgeving besmet raakt. Mensen in die omgeving kunnen eveneens besmet raken.
- > **Voorkomen van verspreiding:** voorkom contact tussen besmette mensen onderling en voorkom het opwarrelen van besmetting in de omgeving. Voorkom onnodig bewegen door het gebied, zoals lopen of rijden met voertuigen.
- > **Besmettingscontrole:** controleer mensen uit het besmette gebied op mogelijke besmetting. Denk aan het organiseren van een eerste, snelle screening, omdat in de praktijk veel meer mensen gecontroleerd willen worden dan het aantal daadwerkelijk besmette personen. Verwijder eventuele besmetting en zorg voor nazorg.
- > **Verwijderen van besmetting:** grote groepen mensen kunnen schoongemaakt worden in zwembaden of sporthallen. Ook kan de grootschalige ontsmettingseenheid (GOE) hiervoor worden ingezet. Zie verder paragraaf 9.3.3.

9.1.3 Specifieke maatregelen bij brand met radioactieve stoffen: bron in brand

Bij een brand in bijvoorbeeld een radionuclidenlaboratorium kunnen radioactieve stoffen meegevoerd worden met de rookgassen. De lucht raakt dus radioactief besmet. De radioactieve deeltjes in de rook kunnen in de omgeving terecht komen. De omvang van de brand en de weersomstandigheden beïnvloeden de verdere verspreiding van de radioactieve

deeltjes. De blootstellingspaden zijn vergelijkbaar met die bij een open of beschadigde bron. Dat geldt ook voor de maatregelen.

De hoeveelheid radioactieve stoffen die bij zo'n brand mogelijk vrijkomt is *meestal* niet groot, omdat de maximale hoeveelheid radioactieve stoffen in een radionuclidelaboratorium zeer beperkt is. De bronhouders zijn meestal van goede kwaliteit en (redelijk) schok- en brandbestendig. Er is een stralingsdeskundige ter plekke die hierover informatie kan geven. Vooral de inademing van radioactieve rookgassen dichtbij de bron is een risicovolle blootstellingsroute; hier geldt dus dat adembescherming noodzakelijk is, zoals bij iedere brand.

Aanvullende maatregelen bij brand zijn:

- > houd de ontvangen externe stralingsdosis extra goed in de gaten,
- > wees alert op mogelijke verspreiding van radioactieve stoffen met als mogelijke gevolgen gevaar voor inhalatie, ontstaan van een besmet gebied na depositie en resuspensie,
- > wees alert op mogelijk radioactief besmet bluswater: gebruik zo min mogelijk bluswater en vang het zo mogelijk op om de verspreiding van radioactief bluswater te voorkomen.

Aanvullende zinvolle maatregelen voor de stralingsbescherming van niet-hulpverleners zijn:

- > **Ramen en deuren sluiten:** bij vermoeden van verspreiding van radioactieve stoffen kan het advies om binnen te blijven en ramen en deuren te sluiten zinvol zijn.

9.1.4 Adembescherming

De brandweer maakt standaard gebruik van onafhankelijke adembescherming in de vorm van het ademluchtmasker. Bij langdurige inzetten kan het nodig zijn om gebruik te maken van afhankelijke adembescherming in de vorm van een stofmasker of een gezichtsmasker met filterbus.

Om een indruk te geven van de bescherming die deze middelen bieden, is Tabel 9.1 opgenomen [1]. Deze tabel geeft een overzicht van de effectieve reductiefactoren van deze adembeschermingsmiddelen. Hierbij is rekening gehouden met een verhoogd ademventilatievoud door het gebruik van het adembeschermingsmiddel. De 'omgekeerde' waarde (de 'verlengingsfactor') geeft aan hoeveel langer het duurt voordat de dosis die via inademing ontvangen is, gelijk is aan de dosis die iemand zou ontvangen zonder adembescherming.

Tabel 9.1 Reductiefactoren van adembeschermingsmiddelen

Adembeschermingsmiddel	Reductiefactor ¹⁾	Verlengingsfactor
stofmasker	0,15	7
gelaatsmasker met filterbus	0,03	35
ademluchtmasker	0,0015	700

1) Hierbij is rekening gehouden met een verhoogd ademventilatievoud door het gebruik van een adembeschermingsmiddel.

9.2 Maatregelen A-incidenten

Bij een stralingsincident met een B-object stelt de brandweer zelf op basis van een risico-inschatting maatregelzones in en zorgt voor de bescherming van slachtoffers, bevolking en hulpverleners tegen de gevaren van ioniserende straling. De bestrijding van een grootschalig stralingsincident vereist een andere aanpak en deskundigheid en wordt landelijk aange-

stuurd. In het Landelijk Crisisplan Straling (LCP-S) is de gecoördineerde inzet van de vele betrokken diensten en organisaties beschreven.

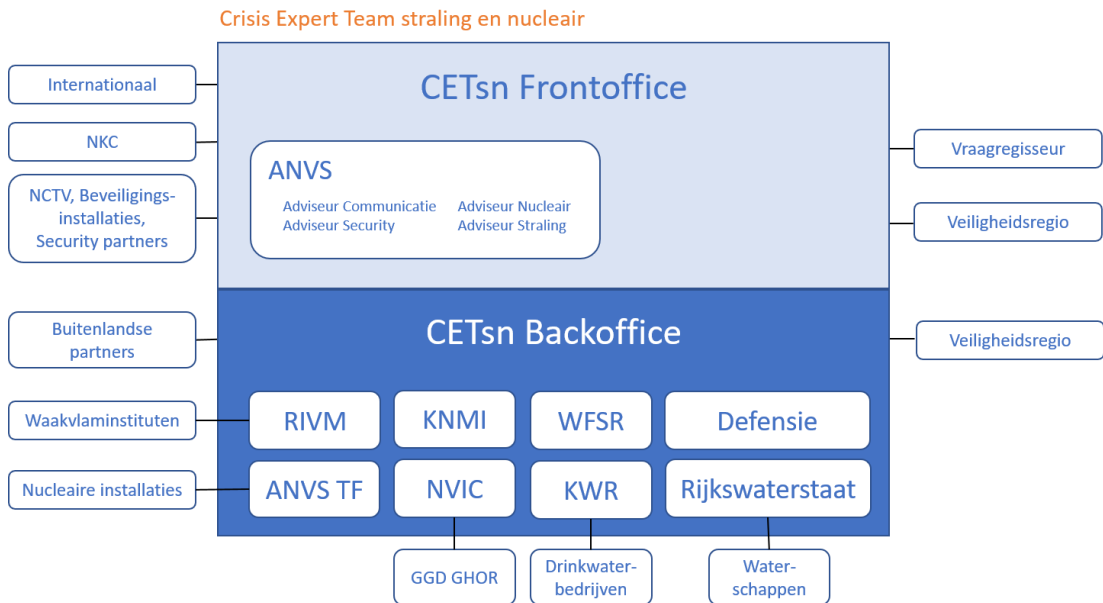
Het Crisis Expert team straling en nucleair

Het Crisis Expert Team straling en nucleair (CETsn) is het kennis- en adviesnetwerk op het gebied van stralingsbescherming bij ongevallen. Het (CETsn) levert informatie en adviezen ten behoeve van een adequate bestrijding van stralingsongevallen aan de nationale crisisorganisatie en de veiligheidsregio. Het CETsn levert deze adviezen via de zogenaamde nationale of regionale vraagregisseurs.

Het CETsn valt onder verantwoordelijkheid van ANVS en bestaat uit het CETsn Frontoffice en het Radiologisch en Gezondheidskundig Expertise Netwerk (RGEN), het CETsn Backoffice. Het RIVM is coördinator van het RGEN en onderhoudt rechtstreekse contacten met de veiligheidsregio's over onder andere de uitvoering van de landelijke meetstrategie bij stralingsincidenten. Deelnemende organisaties in het RGEN zijn het RIVM, het KNMI, Defensie, WFSR, Rijkswaterstaat, KWR, NVIC en de TaskForce van de ANVS (Figuur S9.1).

Het CETsn zorgt bij stralingsongevallen voor het:

- > verzamelen van informatie
- > beschrijven van de technische situatie van het object
- > opstellen van een prognose en diagnose van het ongeval
- > adviseren over beschermende maatregelen voor de bevolking
- > leveren van informatie voor publieksvoorlichting
- > uitwisselen van informatie met buurlanden, de Europese Unie en het IAEA.



Figuur S9.1 Organisatie van het Frontoffice en het Backoffice (RGEN) van het CETsn.

(Bron)bestrijding A-object

Het begrip 'bronbestrijding' bij een stralingsincident bij een A-object is duidelijk anders dan bronbestrijding bij brand of een chemisch incident. Bij een kernreactor is alles gericht op het in stand houden van de koeling van de reactorkern met als doel de uitstoot van radioactief materiaal te voorkomen. Hierbij moet gedacht worden aan het fysiek inbrengen van koelwater, het leveren /plaatsen van noodstroomdieselgeneratoren (inclusief brandstof) tot en met het eventueel begaanbaar maken en houden van de toegangswegen naar de kernenergiecentrale voor het transport van deze middelen. De exploitant is verantwoordelijk voor de voorbereiding en uitvoering van bestrijdingsacties (inclusief de behandeling van eigen personeel). De bronbestrijding wordt ondersteund door de veiligheidsregio.

Bij A-incidenten gaat vooral veel aandacht uit naar de stralingsbescherming van de bevolking, omdat de verspreiding van radioactieve stoffen over een heel groot gebied kan plaatsvinden. De belangrijkste beschermingsmaatregelen leiden tot:

- > Vermijden van dosis: voorkomen/beperken van bestraling vanuit de wolk of neergeslagen besmetting op huid, kleding of omgeving, door schuilen, afscherming, beperken van de blootstellingstijd (wegnemen van de besmetting, evacueren uit besmet gebied of een gebied evacueren voordat de wolk overtrekt).
- > Voorkomen van inademing door adembescherming en/of schuilen: schuilen is alleen effectief als de lozingsduur beperkt is, omdat na verloop van tijd de concentratie / besmetting binnenshuis steeds groter wordt.
- > Beperken van verdere verspreiding van en blootstelling aan radioactieve besmetting door besmettingsbeperkende maatregelen, zoals toegangsbeperkingen en vervoersbeperkingen in besmet gebied, verwijderen van besmetting bij mensen, huisdieren, voertuigen en in de leefomgeving.
- > Voorkomen/beperken van het innemen (opeten of drinken) van radioactieve stof via besmette waren. Dit gebeurt bijvoorbeeld door een gebruiksverbod, het advies etenswaren en groenten extra te wassen of alleen verpakte etenswaren te gebruiken.

Bij deze maatregelen wordt onderscheid gemaakt in directe en indirecte maatregelen.

Initiële acties bij een (dreigend) kernongeval

Bij een (dreigend) kernongeval bij de kernenergiecentrale Borssele (EPZ) met effecten op Nederlands grondgebied is de exploitant informant en adviseur voor Veiligheidsregio Zeeland, totdat er op nationaal niveau is opgeschaald en advies van het CETSn beschikbaar is.

EPZ heeft enige tijd nodig voordat een analyse kan worden gemaakt van de omvang van de problematiek (aard van de storing, omvang van de te verwachten uitstoot, de tijdsduur van het incident en van eventueel herstel). De Site Emergency Director (SED) van EPZ wordt gealarmeerd en na de eerste analyse wordt de storing gemeld via het crisnummer stralingsincidenten van de Gemeenschappelijke Meldkamer Zeeland (GMK). De dienstdoende regionaal stralingsdeskundige (op (minimaal) het niveau van Coördinerend Deskundige, CD) zal worden gealarmeerd door de GMK. In overleg met de Operationeel Leider worden de vervolgstappen bepaald, bijvoorbeeld wel of niet opschalen, partijen informeren et cetera. EPZ maakt een SITRAP met daarin een ongevalsclassificatie; in de regio is een ongevalsclassificatie altijd aanleiding voor een GRIP-opschaling. In de SITRAP worden ook aanbevelingen gedaan voor eventuele maatregelen. Na opschaling zal een liaison van EPZ worden toegevoegd aan het ROT.

EPZ levert advies over te nemen maatregelen op basis van de analyse van het ongeval en de heersende meteorologische omstandigheden. Na activering van de nationale responsorganisatie vindt de radiologische beoordeling en toetsing plaats door het CETsn.

Classificaties

Stralingsongevallen worden geclassificeerd volgens het classificatiesysteem zoals vastgelegd in het LCP-S, 2021. De classificaties komen overeen met de classificatie zoals die door de IAEA gebruikt wordt. Er zijn 4 ongevalsclassificaties:

Alert en Facility Emergency

Bij een Alert en bij een Facility Emergency wordt direct opgeschaald naar GRIP 2 en zal binnen Veiligheidsregio Zeeland en Veiligheidsregio Midden- en West-Brabant een ROT (Interregionaal OT) worden ingesteld. Dit zal uitvoering gaan geven aan de noodzakelijke maatregelen behorend bij de afgekondigde classificatie en zich gaan voorbereiden op de maatregelen noodzakelijk voor de eerstvolgende ongevalsclassificatie.

Site Area Emergency en General Emergency

Bij een Site Area Emergency en bij een General Emergency is multidisciplinaire afstemming nodig voor de voor te bereiden en/of te nemen directe en indirecte maatregelen. Bij deze classificaties wordt direct opgeschaald naar GRIP 4 of GRIP 5 en zullen een ROT/IROT en een RBT/IRBT worden ingesteld. GRIP 4 of 5 is gekozen, omdat de effecten waarop voorbereiding plaats moet vinden tot buiten de regiogrenzen zullen reiken; dit geldt vooral voor de indirecte maatregelen en zeker voor de communicatie naar de bevolking. Het uitgangspunt daarbij is dat de bronregio coördineert.

Dosisberekeningen

Maatregelen bij A-incidenten worden in real-time op basis van een prognosescenario en berekeningen, of op basis van radiologische metingen vastgesteld. Hierbij wordt in de praktijk onderscheid gemaakt tussen:

- > De fase waarin radioactief materiaal wordt geloosd en zich verspreidt in de atmosfeer: hierbij zijn acute maatregelen nodig.
- > De eerste dagen na de lozing (die geleid heeft tot een omvangrijk besmet gebied) met:
 - een mogelijk hoge stralingsbelasting voor personen
 - beperkte verdere verspreiding vanuit het besmette gebied door activiteiten van mensen
 - verdere atmosferische verspreiding van opwervend stof en verspreiding door regenwaterafvoer, et cetera.In deze periode kan worden besloten tot aanvullende veiligheidsmaatregelen zoals (tijdelijke) relocatie, landbouwmaatregelen, stralingshygiënische controle op de toegang tot het gebied, vervoersbeperkingen, schoonmaakmaatregelen, et cetera.
- > De jarenlange periode daarna, waarin stapsgewijs overgestapt wordt naar lagere, alledaagse stralingshygiënische normen en veiligheidsmaatregelen. Het streven is een hogere mate van risicobeperking, waarbij rekening gehouden wordt met de kans op late (stochastische) effecten van straling.

Het tijdstip van een lozing laat zich moeilijk voorspellen; daarom moet de veiligheidsregio zich in de periode voordat de uitstoot plaatsvindt voorbereiden op het nemen van maatregelen.

9.2.1 Directe maatregelen

Directe maatregelen grijpen direct in op blootstellingspaden waarbij de mens door de emissie op *directe wijze* (= rechtstreeks) wordt blootgesteld aan radioactieve stoffen of ioniserende straling.

Dominante stralingsbelasting

Maatregelen worden uitgevoerd op basis van schattingen en verwachtingen. Als er helemaal geen maatregelen genomen worden, zal op lange termijn circa 75% van de stralingsdosis veroorzaakt worden door ^{131}I , ^{134}Cs en $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$. Met adequate directe maatregelen is een reductie van 50-100% van de eerste-dag dosis haalbaar.

De gebruikte maatregelen zijn:

> **Evacuatie:**

- Onmiddellijke evacuatie: als in een effectgebied mogelijk een grote dosis (> 1000 mSv) wordt opgelopen. Evacuatie vindt bij voorkeur plaats voordat de radioactieve wolk is overgetrokken, maar desnoods wordt tijdens de wolk geëvacueerd als dit tot een dosisreductie leidt.
- Evacuatie: bij voorkeur voordat de radioactieve wolk is overgetrokken.
- Tijdelijke relocatie: late evacuatie (ruim) na het overtrekken van de wolk als blijkt dat de op te lopen dosis na het incident te hoog is. Dit gaat gepaard met de maatregel besmettingscontrole en verwijderen van besmetting bij mensen, dieren en goederen.
- Vaak nemen mensen zelf het besluit om te vertrekken: dit wordt spontane evacuatie genoemd. De maatregelen bij een spontane evacuatie zijn afhankelijk van de mogelijke besmetting van de spontaan geëvacueerde mensen.

Evacuatie tijdens het overtrekken van de wolk moet voorkomen worden; vaak zijn andere maatregelen (schuilen en jodiumprofylaxe (zie hieronder)) dan beter.

Interventieniveaus evacuatie

De primaire doelgroep voor onmiddellijke (of preventieve) evacuatie is de groep mensen van wie verwacht wordt dat zij in de eerste 48 uur van het incident een effectieve dosis op kunnen lopen hoger dan 1000 mSv; het doel is dus vermijden van deterministische effecten. De kans op overschrijding van de 1000 mSv-limiet buiten de grenzen van de inrichting is uiterst gering. Voor onmiddellijke evacuatie is een paar uur beschikbaar. Er is ook een interventieniveau voor evacuatie vastgesteld (zie Tabel S9.1); dit is een effectieve dosis voor de eerste zeven dagen. Voor tijdelijke relocatie geldt een periode van één jaar. Het verschil met evacuatie is dat de maatregel tijdelijke relocatie in de regel langer duurt dan evacuatie en dat aan het besluit voor terugkeer een nieuwe dosisevaluatie ten grondslag ligt. Dit traject geeft het bevoegd gezag meer mogelijkheden om plaatselijke omstandigheden en de haalbaarheid van de uitvoering of de acceptatie in het besluitvormingsproces mee te wegen.

Tabel S9.1 Interventieniveaus directe maatregelen voor de bevolking uit het LCP-S

Maatregel	Tijd ^{a)}	Interventie-waarde [mSv]	Grootheid	Opmerking
Schulen	7 dgn	10	Effectieve dosis	
Jodiumprofylaxe kinderen < 18 jaar	7 dgn	50	Equivalente dosis schildklier	Via inhalatie, geen ingestie
Jodiumprofylaxe volwassenen ≤ 40 jaar	7 dgn	250	Equivalente dosis schildklier	Via inhalatie, geen ingestie
Onmiddellijke evacuatie ^{b)}	48 u	1000	Effectieve dosis	Evacuatie, zelf tijdens pluimpassage mogelijk. Om (ernstige) deterministische effecten te voorkomen
Evacuatie	7 dgn	100	Effectieve dosis	Ter beperking van stochastische effecten. Bij voorkeur vóór, maar anders kort ook na pluimpassage mogelijk
Tijdelijke relocatie	1 jaar	100	Effectieve dosis	Dosis in het eerste jaar, inclusief dosis ten gevolge van pluimpassage
Relocatie	1 jaar	20	Effectieve dosis	Periode vanaf terugkeer, 20 mSv per (elk) jaar

a) Tijd is de periode direct na aanvang van de lozing waarover de potentiële dosis wordt berekend.

b) Voor onmiddellijke evacuatie zijn ook interventieniveaus op basis van equivalente orgaandosiswaarden gedefinieerd: $H_{th} = 5000$ mSv, $H_{rbm} = 1000$ mSv, $H_{long} = 4000$ mSv en $H_{huid} = 3000$ mSv.

- > **Schulen:** schulen betekent naar binnen gaan, ramen en deuren sluiten en ventilatie of luchttoevoer stoppen. Het binnenklimaat is in de eerste uren (ongeveer 6 uur) na het vrijkomen van een gevaarlijke stof (dus ook van radioactieve stoffen) beter dan het buitenklimaat.

Criteria schulen

Voor de maatregel schulen gelden dezelfde principes als voor schulen bij het vrijkomen van andere gevaarlijke stoffen: dus maximaal 6 uur. Bebouwing beschermt altijd tegen blootstelling aan externe straling, omdat straling van radioactieve deeltjes op de grond in een bijna horizontaal vlak obstakels tegenkomt: dit geldt dus ook als iemand buiten is.

Voor straling vanuit een overtrekkende wolk worden afschermingsfactoren berekend tussen 30 en 70%. Voor de interventieniveaus wordt uitgegaan van 50% voor de inhalatie- en de externe bestralingscomponenten en een ventilatievoud van 0,5 - 1.

Het interventieniveau voor schulen is, net als voor evacuatie, de effectieve dosis in de eerste zeven dagen. Timing is heel belangrijk.

- > **Jodiumprofylaxe:** het innemen van jodiumtabletten (zie ook paragraaf 4.4). Bij een ernstig incident met een in werking zijnde kernreactor komen radioactieve jodiumisotopen vrij. Jodium wordt vooral bij kinderen effectief door de schildklier

opgenomen; dit kan leiden tot het ontstaan van schildklierkanker. Dit bleek ook in de jaren na Tsjernobyl. Vandaar dat de overheid bij het vrijkomen van radioactief jodium, jodiumtabletten verstrekt aan de bevolking. Dit wordt jodiumprofylaxe genoemd. Het innemen van de tabletten heeft alleen zin op jongere leeftijd (tot 40 jaar): de overheid geeft hiervoor instructies. De maatregel is het meest effectief als de jodiumtabletten worden ingenomen voordat de radioactieve wolk arriveert. Maar ook na 6 uur wordt de stralingsdosis nog met 50% beperkt.

Interventieniveaus jodiumprofylaxe

Door het tijdig oraal innemen van stabiel jodium, in de vorm van een kaliumjodaat- of kaliumjodidetabiet, kan de schildklierdosis door inwendige besmetting vrijwel geheel vermeden worden. Bij een gelijke luchtconcentratie lopen kinderen jonger dan 5 jaar het hoogste risico, gevolgd door de leeftijdsgroep t/m 16 jaar. Boven de leeftijd van 40 jaar is het ontstaan van schildklierkanker door inhalatie van radioactief jodium nooit aangetoond. Jodiumprofylaxe kan soms leiden tot bijverschijnselen zoals huidirritatie en maagdarmklachten. Heel sporadisch kan er een ernstige allergische reactie optreden. Voor jodiumprofylaxe is de equivalente orgaandosis de limiterende grootheid; het gaat in dit geval om de schildklierdosis opgelopen in de zeven dagen vanaf het moment van de lozing. Het interventieniveau voor jodiumprofylaxe is vastgesteld voor kinderen (t/m 18 jaar) en voor volwassenen (zie Tabel S9.1). Daarbij wordt ervan uitgegaan dat mensen schuilen. Jodiumprofylaxe voor mensen ouder dan 40 jaar wordt ontraden, omdat voor hen de nadelen mogelijk groter zijn dan de voordelen.

Maatregelen om besmettingen in de leefomgeving te verwijderen zijn ook directe maatregelen. De landelijke overheid kondigt deze niet af, omdat het besmet raken en het verspreiden van besmetting sterk afhankelijk is van het gedrag van mensen. Er is geen specifieke voorbereiding op dit gebied voor stralingsincidenten; de standaardprotocollen zijn van toepassing. Bovendien is het bij een grootschalig A-incident niet mogelijk om alle particuliere voertuigen in de omgeving schoon te maken. Dan kan bijvoorbeeld gebruikgemaakt worden van bestaande wasstraten of overgegaan worden op het in beslag nemen van voertuigen, zie ook paragraaf 9.3.3.

9.2.2 Indirecte maatregelen

Indirecte maatregelen grijpen in op de verspreiding van radioactieve stoffen via de voedselketen. Het doel is om het innemen van radioactieve stoffen via het voedsel en drinkwater te voorkomen. Het gaat hier bijvoorbeeld om: een graasverbod (melk), het sluiten van kassen, een verbod op het gebruik van beregeningswater, maatregelen ter bescherming van drinkwater, verontreinigd slib onttrekken, isoleren van besmette dieren of planten en producten.

Interventieniveaus indirecte maatregelen

Voor voedsel en voedselproducten zijn afgeleide interventieniveaus vastgesteld voor vier verschillende nuclidegroepen. Indirecte maatregelen hebben niet de hoogste prioriteit, uitgezonderd het graasverbod en het sluiten van kassen. Of en waar deze van toepassing zijn, wordt bepaald met modelberekeningen en via radiologische metingen. De afgeleide interventieniveaus voor voedsel zijn in Europese wetgeving vastgesteld en opgenomen in het LCP-S.

9.2.3 Maatregelzones en de rol van de hulpdiensten

In de bestrijdingsfase van een A-incident worden, van klein naar groot, de volgende zones gehanteerd:

- > Evacuatiezone: zone waar voor of na het overtrekken van de wolk geëvacueerd wordt.
- > Jodiumprofylaxezone: zone waar de combinatie schuilen en jodiumprofylaxe van kracht is.
- > Schuilzone: zone waar geschuild wordt (zonder jodiumprofylaxe).
- > Landbouwmaatregelzone: zone waar landbouwmaatregelen genomen worden.

Deze zones worden ingesteld op basis van prognoses en worden later op basis van meetgegevens en andere informatie bijgesteld. De maatregelen bij A-incidenten worden voorgeschreven door de landelijke overheid. Als een ongeval plaatsvindt in een kernenergiecentrale in het buitenland vlakbij de Nederlandse grens, neemt de Nederlandse overheid de maatregelen van het buurland over. Preparatiezones voor maatregelen zijn vastgelegd in het LCP-S en worden voorbereid in het rampbestrijdingsplan van een A-object.

Een mogelijke rol van de hulpdiensten ligt in de ondersteuning bij de uitvoering van de maatregelen op lokaal niveau. Ook deze taken worden vastgelegd in het rampbestrijdingsplan en de bijbehorende protocollen en procedures. Mogelijke taken zijn:

- > Evacueren
- > Uitdelen van jodiumtabletten
- > Meten:
 - monitoren van externe straling: het meten van het externe stralingsniveau is nodig voor het vaststellen van de daadwerkelijke, actuele situatie en het instellen van de maatregelzones en de tijdsduur van die maatregelen
 - besmettingscontrole van personen of omgevingBovendien is zichtbaar meten door de brandweer ook geruststellend voor de bevolking.
- > Verwijderen van besmetting: afhankelijk van de situatie zullen personen, voertuigen en andere goederen schoongemaakt moeten worden.

De beschermende maatregelen die in de voorgaande paragrafen beschreven zijn, gelden hier onverminderd. Het radiologisch meetprogramma van de brandweer is onderdeel van het landelijk meetprogramma, beschreven in de Landelijk Meetstrategie Kernongevallen. Een beknopte beschrijving daarvan is te vinden in paragraaf 7.5.

9.3 Besmettingscontrole en verwijderen van besmetting

Besmettingscontrole en het verwijderen van besmetting worden bij voorkeur gecombineerd in één werkproces. Dit vindt bij voorkeur plaats zo dicht mogelijk op de grens tussen besmet en schoon gebied. Is een persoon of object besmet, dan kan het verwijderen van besmetting direct daarop volgen. Dit wordt weer gevolgd door een volgende besmettingscontrole. Afhankelijk van het aantal schoon te maken personen kunnen één of meerdere locaties ingericht worden. Voor grote aantallen besmette personen kunnen deze posten worden ingericht in vaste locaties (zwembaden of sporthallen met douchegelegenheden) of geïmproviseerd met mobiele uitrusting (beschikbaar bij de CBRN-steunpuntregio's). Zo'n besmettingscontrolepost staat onder leiding van een AGS (bij voorkeur van de CBRN-steunpuntregio en opgeleid stralingsbeschermingsdeskundige op (minimaal) het niveau van Coördinerend Deskundige, CD). De GAGS adviseert over de mogelijke gezondheidsrisico's.

9.3.1 Besmettingscontrole

Vooraf aan de besmettingscontrole moet bepaald worden welk oppervlak gecontroleerd moet worden. Personen die enige tijd in een radioactieve wolk zijn geweest, kunnen besmet raken via depositie van radioactief materiaal. Besmetting van hoofdhaar en de onbedekte huid levert een huiddosis. Maar ook besmetting van (beschermende) kleding kan via resuspensie van radioactief materiaal of aanraking daarvan tot een inwendige besmetting en een dosis leiden. Hulpverleners die in mogelijk besmet gebied zijn geweest zullen zeker de onderkant van hun laarzen controleren maar ook de bovenkant van hun pak. De mate van besmetting bepaalt welke meetsonde gebruikt kan worden (AD-17 of AD-k).

9.3.2 Normen voor de besmetting van personen

Er zijn zeer beperkt normen voor besmetting vastgesteld. Voor reguliere situaties zijn er normen voor een besmetting op de handen, kleding en voorwerpen. Voor radiologische noodsituaties gelden veel hogere besmettingsnormen die zijn gebaseerd op een huiddosis, waarvoor een laag en hoog niveau is vastgesteld. Als de besmetting onder het niveau blijft, zijn de gevolgen verwaarloosbaar. Boven het niveau moeten schoonmaakmaatregelen genomen worden. De stralingsdeskundige bepaalt op basis van de geldende niveaus welke maatregelen getroffen moeten worden.

Normen voor reguliere situaties

De normen voor de besmetting van de huid, handen en voorwerpen voor reguliere situaties zijn weergegeven in Tabel S9.2. Deze waarden noemen we ook wel drempelwaarden en zijn met de meetapparatuur van de brandweer goed te bepalen als bekend is welke radioactieve stoffen aanwezig zijn. Met de omrekenfactoren uit de *Radionuclidentabel* wordt het meetresultaat omgerekend naar besmetting en vergeleken met de waarde uit Tabel S9.2.

De normen in Tabel S9.2 zijn afkomstig uit de inmiddels vervallen Richtlijn Radionuclide-laboratoria uit 1994. Hierin waren grenswaarden voor de maximale toegestane afwrijfbare besmetting op oppervlakten van $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ en 4 Bq/cm^2 voor respectievelijk alfastralers en voor bèta- en of gammastralers vastgelegd. De normen voor de besmetting van kleding en voorwerpen komen tevens overeen met de grenswaarden voor oppervlaktesbesmetting van SCO-1 objecten volgens het VLG-ADR. Het is echter onduidelijk op basis van welk dosiscriterium de bovenstaande normen zijn afgeleid. Voor bèta- en gammastralers geldt in ieder geval dat besmetting van de huid een huiddosis oplevert. Een besmetting met alfastralers zal in het algemeen geen huiddosis opleveren. Het belastingspad hier is inhalatie na resuspensie van alfastralers vanaf de besmette huid of kleding.

Bijvoorbeeld: Bij een incident is een Mo/Tc-generator beschadigd geraakt. Alle afscherming is verdwenen en een deel van de inhoud heeft de kleding en een deel van de huid van een hulpverlener besmet. Met de Automess met sonde AD-17 wordt op de kleding en huid een netto telsnelheid van 9 cps gemeten. De omrekenfactor voor de AD-17 is $0,56 \text{ Bq/cm}^2$ per cps. De besmetting is dus $9 \times 0,56 = 5,0 \text{ Bq/cm}^2$.

Met de AD-k wordt 159 cps gemeten. De omrekenfactor voor de AD-k is $0,031 \text{ Bq/cm}^2$ per cps. De besmetting is dus $159 \times 0,031 = 4,9 \text{ Bq/cm}^2$. Dit ligt boven de norm van $4,0 \text{ Bq/cm}^2$ voor deze β/γ -straler. Er is dus sprake van besmetting.

Tabel S9.2 Normen voor besmetting van handen, kleding en voorwerpen voor reguliere situaties.

	α -stralers ¹⁾	β - en γ -stralers ¹⁾
Huid: gemiddeld over 50 cm ²	0,4 Bq/cm ²	4,0 Bq/cm ²
Handen: gemiddeld per hand	40 Bq	1000 Bq
Kleding en voorwerpen: directe meting ²⁾	0,4 Bq/cm ²	4,0 ³⁾ Bq/cm ²

- 1) Het niveau voor α -stralers is 10 maal lager dan voor β - en γ -stralers, omdat α -stralers na inademing of inslikken vele malen meer schade kunnen aanrichten.
- 2) Houd bij een directe meting rekening met het meetoppervlak van de gebruikte sonde. Het is ook mogelijk om een veegproef te doen over een bepaald oppervlak. Houd dan rekening met het afgeveegde oppervlak en een veegrendement van 10%. Houd ook rekening met feit dat met een veegproef enkel het afwrijfbaar deel van de besmetting bepaald kan worden.
- 3) Voor laag-energetische β -stralers ($E_{\max} < 0,2$ MeV) geldt 40 als niveau, m.u.v. β -stralende Pu-nucliden.

Interventieniveaus besmetting bij een radiologische noodsituatie

Als basiscriterium voor besmetting van personen bij een radiologische noodsituatie worden twee niveaus gehanteerd voor de equivalente huiddosis door β - en γ -stralers, gemiddeld over elk willekeurig oppervlak van 1 cm²:

- > LAAG: 50 mSv in 24 uur
- > HOOG: 500 mSv in 24 uur.

Voor α -stralers is een besmettingsniveau van 12 kBq/cm² afgeleid. Dit is gebaseerd op een maximale *longdosis* van 1000 mSv voor hulpverleners in 24 uur. Deze afleiding is niet op de huiddosis gebaseerd, maar op inhalatie van alfastralers na resuspensie vanaf de besmette huid of kleding.

Over het algemeen geven alfastralers geen huiddosis.¹⁵ Voor alfastralers is een indirecte grenswaarde afgeleid, gebaseerd op de inhalatie van alfadeeltjes na resuspensie vanaf de besmette oppervlakte. Wat hier staat, is dat 12 kBq/cm² α -besmetting op de huid en of kleding van een hulpverlener kan leiden tot een longdosis (via inhalatie) van 1000 mSv in 24 uur. Er is daarbij aangenomen dat de hulpverlener tijdens het oplopen van de besmetting adembescherming heeft gedragen en derhalve geen longdosis heeft opgelopen gedurende de wolkpassage en na de inzet niet ontsmet is. Vervolgens wordt de hulpverlener 24 uur blootgesteld aan de alfastralers die na resuspensie in de lucht aanwezig zijn. Er wordt gerekend met een resuspensiefactor die de luchtconcentratie relateert aan de oppervlaktebesmetting. Deze resuspensiefactor is hoogst onzeker. De methode is omslachtig en de uitkomst twijfelachtig, maar deze schatting is de enige die op dit moment beschikbaar is.

Een huiddosis wordt vooral veroorzaakt door β -straling, en in mindere mate door γ -straling. De *Radionuclidentabel* laat zien dat β - en γ -stralers een huiddosistempo van maximaal $1,5 \times 10^{-3}$ mSv/s per kBq/cm² besmetting veroorzaken.

Een nuclidensamenstelling die vrijkomt na een kernongeval geeft een besmetting met een huiddosistempo van ongeveer 6×10^{-4} mSv/s per kBq/cm². Voor een huiddosis van 50 mSv

¹⁵ Er zijn enkele zeldzaam voorkomende alfastralers die een huiddosis kunnen veroorzaken. Voor de hier beschouwde (kern)ongevallen spelen ze geen rol van betekenis.

in 24 uur volgt hieruit een (veilig) afgeleid niveau van 0,96 kBq/cm² β/γ-besmetting. Het afgeleide besmettingsniveau voor een huiddosis van 500 mSv in 24 uur is dus 9,6 kBq/cm².¹⁶ Het toepassen van deze afgeleide niveaus voor een reactorongeval geeft een veilige (over)schatting van de huiddosis. Deze besmettingsniveaus liggen een factor 10³ - 10⁴ hoger dan de stralingshygiënische drempelniveaus voor de reguliere normen (zie Tabel S9.2).

Oppervlaktebesmettingen in deze orde van grootte worden gemeten met de Automess 6150 met sonde AD-17, omdat de AD-k hiervoor te gevoelig is. De drempelwaarden voor de meting met de AD-17 en de AD-k moeten omgerekend worden met de omrekenfactoren uit de *Radionuclidentabel*. Voor ¹³¹I geeft deze bijvoorbeeld een omrekenfactor van respectievelijk 0,97 en 0,062 Bq/cm² per cps. Dit levert voor respectievelijk het lage niveau (LAAG: 50 mSv huiddosis in 24h) en het hoge niveau (HOOG: 500 mSv huiddosis in 24h):

- > LAAG:
 - $0,96 \times 10^3 / 0,97 = 990$ cps voor de AD-17
 - $0,96 \times 10^3 / 0,062 = 15.484$ cps voor de AD-k
 - > HOOG:
 - $9,6 \times 10^3 / 0,97 = 9.897$ cps voor de AD-17
 - $9,6 \times 10^3 / 0,062 = 154.839$ cps voor de AD-k
- Let op: dit ligt boven het meetbereik van de AD-k!

Meten zonder beschermkap op ongeveer een centimeter afstand van de huid met een ¹³¹I-oppervlaktebesmetting van 1 kBq/cm² levert dus een telsnelheid van ongeveer 1000 s⁻¹. Voor andere β-stralers die vrijkomen bij een kernongeval, kan de telsnelheid per Bq/cm² een factor 2 lager zijn (bijvoorbeeld ¹⁰³Ru, zie hiervoor de omrekenfactoren in de *Radionuclidentabel*).

Uiteindelijk wordt het niveau voor de huiddosis afgerond naar veilige waarden voor de lage respectievelijk hoge grenswaarde naar teltempo's van 500 en 5000 s⁻¹. Als vuistregel geldt de veilige schatting voor de drempelwaarden voor alle typen straling van:

- > LAAG: 500 cps
- > HOOG: 5000 cps.

Bij het meten in besmet gebied kan een achtergrondcorrectie noodzakelijk zijn.

Voor het meten van β- en γ-straling zonder sonde (dus met de Automess AD1) is dit omgerekend naar een dosistempo op 1 meter afstand van de bron:

- > LAAG: 20 μSv/u
- > HOOG: 200 μSv/u.

Maatregelen na besmettingscontrole

De mate van besmetting wordt weergegeven als:

- > NIET besmet: besmetting < DREMPEL (reguliere situaties) dus:
oppervlakte-activiteit < niveaus in Tabel S9.2
- > LICHT besmet: besmetting < LAAG niveau: $H_{\text{huid}} < 50$ mSv/24 uur
- > MIDDEL besmet: besmetting < HOOG niveau: $50 < H_{\text{huid}} < 500$ mSv/24 uur

¹⁶ In het *Radiologisch Handboek Hulpverleningsdiensten* werden de waarden 0,8 en 8 kBq/cm² gehanteerd.

> ZWAAR besmet: besmetting > HOOG niveau: $H_{\text{huid}} > 500 \text{ mSv/24 uur}$.

Zie voor de besmettingsniveaus DREMPEL, LAAG en HOOG Tabel S9.3.

De maatregelen voor de bevolking bij een radiologische noodsituatie worden gekoppeld aan bovengenoemde drempelwaarden voor de huiddosis. Er zijn vier categorieën voor maatregelen gedefinieerd om besmetting te verwijderen; deze zijn weergegeven in Tabel S9.4.

Tabel S9.3 Interventieniveaus voor besmetting in radiologische noodsituaties

	α -stralers		β - en γ -stralers	
DREMPEL	0,4 Bq/cm ² 5 s ⁻¹	AD-17 zonder kap, 2 mm	4 Bq/cm ² 5 s ⁻¹	AD-17 zonder kap, 1 cm
LAAG niveau	- / -		50 mSv in 24 uur 960 Bq/cm ² 500 s ⁻¹ 50 s ⁻¹ 20 μ Sv/u 2 mSv/u	huiddosis per cm ² norm afgeleid van ¹³⁷ Cs AD-17 zonder kap, 1 cm AD-17 zonder kap, 10 cm AD1 op 1 meter AD1 op 10 cm
HOOG niveau	1000 mSv in 24 uur 12.000 Bq/cm ² ¹⁾ 5000 s ⁻¹	longdosis AD-17 zonder kap, 2 mm	500 mSv in 24 uur 9600 Bq/cm ² 5000 s ⁻¹ 200 μ Sv/u	huiddosis per cm ² norm afgeleid van ¹³⁷ Cs AD-17 zonder kap, 1 cm AD1 op 1 meter

1) Dit interventieniveau is gebaseerd op een longdosis na inhalatie van een opgelopen dosis gedurende 24 uur. De dosis is opgelopen door een hulpverlener tijdens een inzet met adembescherming. Na de inzet wordt de besmetting door resuspensie ingeademd (de besmetting wordt dus niet verwijderd). De methode is omslachtig en de uitkomst twijfelachtig, maar deze schatting is de enige die op dit moment beschikbaar is.

Tabel S9.4 Te nemen maatregelen voor het verwijderen van besmetting, afhankelijk van besmettingsniveau DREMPEL, LAAG en HOOG, uitgedrukt in Bq/cm², cps of H_{huid} (mSv) volgens Tabel S9.3

Besmetting	Categorie	Gemeten besmettingsniveau in Bq/cm ² , cps of H _{huid} (mSv)	Maatregelen
NIET	Cat. 1	besmetting < DREMPEL	personen kunnen vertrekken
LICHT	Cat. 2	DREMPEL < besmetting < LAAG	personen kunnen zichzelf schoonmaken (douchen, haren en kleding wassen)
MIDDEL	Cat. 3	LAAG < besmetting < HOOG	verwijderen van besmetting op locatie, zelfstandig met protocol onder begeleiding van de brandweer, kleding wordt ingenomen, besmettingscontrole
ZWAAR	Cat. 4	besmetting > HOOG	verwijderen van besmetting vergelijkbaar met Cat. 3, onder begeleiding van de brandweer, medische controle, zwaar besmette kleding apart afvoeren

9.3.3 Verwijderen van besmetting

Voor het verwijderen van besmetting wordt verwezen naar de *Handreiking decontaminatie* (IFV, 2019). Deze kan toegepast worden met de volgende aandachtspunten:

- > Omdat radioactieve stoffen meestal niet acuut giftig zijn, is er geen extreme haast nodig bij het verwijderen van besmetting; uiteraard moet dan wel uitgesloten zijn dat de stof toxisch is.
- > Omdat inademing de meest risicovolle blootstellingsroute is, wordt gebruikgemaakt van een mondkapje voor besmette personen.
- > Ook ogen zijn erg gevoelig en worden daarom beschermd met een zwembril, veiligheidsbril of spatmasker.
- > Het is beter om direct te douchen (eerst veel water, dan water en neutrale zeep, dan goed afspoelen) in plaats van eerst droog besmetting te verwijderen. Laat het spoelwater weglopen weg van de ogen, neus en mond.
- > Bij zeer ernstige besmetting van het hoofd kan het haar kort knippen of kaal scheren een goede maatregel zijn, omdat stof aan de haren hecht. Gebruik geen mesjes voor het scheren vanwege het risico op het veroorzaken van wondjes en daarmee een risico op inwendige besmetting.
- > Ontsmetting heeft alleen zin in een schoon gebied en als de wolk overgetrokken is.

Het doel van de behandeling van een radioactieve besmetting is:

- > zoveel mogelijk (liefst alle) radioactiviteit te verwijderen
- > optreden van acute effecten voorkomen, of deze beperken als voorkomen niet meer mogelijk is
- > de kans op het optreden van late effecten zoveel mogelijk beperken
- > het verspreiden van radioactief materiaal voorkomen.

Het is daarom belangrijk om zo snel mogelijk de besmetting te verwijderen. Belangrijke voorwaarden hierbij zijn:

- > dit mag bij voorkeur niet leiden tot verdere verspreiding van de besmetting over de tot dusver nog onbesmette lichaamsdelen
- > dit mag niet leiden tot verwondingen of beschadigingen van de huid. Dit kan namelijk leiden tot inwendige besmetting.

De belangrijkste stappen bij het verwijderen van besmetting bij personen zijn:

- > persoonlijk beschermingsmiddelen hulpverleners en inperking risico secundaire besmettingen
- > neus laten snuiten (monster bewaren en registreren per persoon)
- > mondkapje en zwembril op
- > kleding uit (niet over het hoofd) en kleding innemen (behandelen als besmet)
- > ernstige besmetting eerst lokaal verwijderen
- > goed afspoelen met lauw water (eerst zonder zeep)
- > haren wassen (direct met zeep)
- > goed naspoelen
- > besmettingscontrole
- > registratie van besmette personen en van de gemeten besmetting
- > voor het eventueel vrijgeven van persoonlijke bezittingen geeft de AGS (stralingsdeskundige) advies; dit advies is bindend! De GAGS kan hierbij op afstand advies geven over de mogelijke gezondheidsrisico's.

Aandachtspunten bij het verwijderen van besmetting bij personen

Algemeen

Gedurende enkele minuten wassen met lauw water en (vloeibare) zeep, daarna drogen zonder te wrijven (met tissues, zachte handdoek of hete-luchtdroger) en meten. Zo nodig herhalen tot maximaal drie keer, eventueel met zachte borstel. Beperk het wassen zoveel mogelijk tot de besmette huiddelen om verspreiding te voorkomen. Let op: wassen werkt ontvettend waardoor de opname van radionucliden verbetert, verwarming veroorzaakt betere absorptie door de huid, en borstelen kan huidabsorptie door verwonding verhogen.

Toestand van de besmette huid

De toestand van de huid is van essentieel belang. Bij mogelijk besmette wonden moet voorkomen worden dat radioactief materiaal vanuit de omgeving in de wond komt. Kleinere wonden eerst al spoelend laten doorbloeden. Bij verbrandingen mogelijke blaren niet openmaken. Bij verwonding of beschadiging vindt opname sneller plaats en moet medische assistentie worden ingeroepen.

'Hot spots'

Wanneer in eerste aanleg blijkt dat de besmetting de vorm heeft van enkele 'hot spots' op de huid, zal een wasprocedure deze activiteit waarschijnlijk onnodig verspreiden. Probeer eerst de besmetting grotendeels te verwijderen door een stukje plakband of een pleister over de besmette plek te plakken en vervolgens voorzichtig los te trekken (eventuele beharing van de huid rondom de plek vooraf verwijderen met een tondeuse of elektrisch scheerapparaat). Resterende besmetting voorzichtig deppen met water en zeep of eventueel met een goed werkend decontaminatiemiddel dat de huid weinig aantast (zo kort mogelijk). Daarna goed spoelen.

Hardnekkige besmettingen

Hardnekkige besmettingen op minder gevoelige gedeelten van de huid voorzichtig met schuurmiddel (schuurpoeder of een puimsteentje) behandelen. Vervolgens goed spoelen. Als aanvulling zou de huid nog ingesmeerd kunnen worden met een absorberende crème (lanolinecrème). De activiteit die gedurende een nacht in de crème trekt, kan de volgende dag gemakkelijk worden afgespoeld.

Handen

Huidbesmetting wordt meestal gevonden op de handen. Vooral letten op de nagelranden en -riemen en tussen de vingers. Er is bovendien sprake van verschil in kwetsbaarheid van de huid.

Overige lichaamsdelen

Overige lichaamsdelen (behalve het hoofd) en huidplooien decontamineren met een handdouche.

Hoofd

Bij besmet hoofdhaar verspreiding naar ogen, oren, neus en mond voorkomen. Het is het beste het hoofd achterover te houden in een wasbak en het gelaat te beschermen tegen spatwater. Bij besmetting van het gelaat oppassen voor besmetting van de ogen. Het gezicht afspoelen met water en zeep met ogen en mond goed gesloten (rondom ogen van binnen naar buiten wassen). Als er geen oogletsel is de ogen spoelen met een speciale oogdouche met fysiologisch zout of schoon leidingwater. Bij oogletsel het oog afdekken met een steriel gaasje, gedrenkt in fysiologisch zout.

Werkwijze bij schoonmaken

Het streven is om iemand na maximaal drie schoonmaakrondes tot maximaal de lichte categorie (Cat. 2) te laten behoren. Blijft na herhaald schoonmaken de restbesmetting middelmatig (tussen LAAG en HOOG, Cat. 3), dan is deze in ieder geval niet meer afwrijfbaar. Blijft na een aantal schoonmaakrondes de besmetting HOOG (Cat. 4), dan moet voor medische opvang gezorgd worden, omdat deterministische effecten kunnen ontstaan.

Het heeft geen zin van tevoren niveaus van restbesmetting die in elk geval gehaald moeten worden vast te stellen, omdat na een aantal malen schoonmaken verdere behandeling niet tot betere resultaten leidt. Dit is het gevolg van de afname van de effectiviteit bij herhaalde toepassing van een maatregel.

Het is niet aannemelijk dat kleine persoonlijke goederen, anders dan kleding, zwaar besmet raken. Het is belangrijk om pragmatisch te handelen en voor belangrijke persoonlijke eigendommen (sieraden, horloges, paspoort et cetera) dezelfde limieten te hanteren als voor besmette personen.

Voor gezelschapsdieren kan dezelfde procedure gevolgd worden als voor personen; deze wordt uitgevoerd door de eigenaren zelf. Na de besmettingscontrole kunnen er aanvullende gedragsvoorschriften nodig zijn. Alleen dieren die HOOG besmet blijven, moeten in beslag worden genomen.

Voor het schoonmaken van grote aantallen besmette personen wordt verwezen naar de beschikbare protocollen voor grootschalige ontsmetting. Aandachtspunten zijn:

- > Meenemen van gezelschapsdieren uit de hot zone: eigenaren maken de dieren zelf schoon, voordat zij zichzelf schoonmaken; daarbij is extra aandacht nodig voor 'harige' dieren en moet een aanvullende besmettingscontrole uitgevoerd worden.
- > Besmette personen krijgen een instructie en douchen zelf: dat kan ter plaatse onder begeleiding van de brandweer zijn of zelfs thuis als de besmetting laag is.
- > Besmette personen krijgen de eigen kleding mee, voorzien van een wasinstructie en wassen deze thuis.

9.3.4 Behandelprotocollen GHOR

Bij een mogelijk besmet slachtoffer wordt het stroomschema in Figuur 9. met bijbehorende, onderstaande behandelprotocollen toegepast. Het behandelprotocol wordt bepaald door de (G)AGS na besmettingscontrole (zie paragraaf 9.3.1).

Let op: uitwendig besmette slachtoffers die ter plaatse schoongemaakt zijn, kunnen vervoerd worden naar het ziekenhuis. Laat de AGS (de stralingsdeskundige die ter plaatse is) dit uitleggen aan het GHOR-/ambulancepersoneel of laat het GHOR-/ambulancepersoneel contact opnemen met de GAGS. Eventueel kunnen slachtoffers goed toegedekt worden met bijvoorbeeld lakens.

Protocol 1: Behandeling van (eventueel) besmette gewonde

1. Verleen een gewonde die besmet is met radioactief materiaal direct noodzakelijke eerste hulp, zoals het stoppen van een slagaderlijke bloeding, het aanleggen van een noodverband, het behandelen van een ademstilstand, et cetera.
2. Dek open wonden altijd af.

- Pas op voor secundaire besmetting.
- Gebruik persoonlijke beschermingsmiddelen (handschoenen en masker tegen fijn stof).
- Ga er zo lang de eventuele besmetting nog onbekend is, van uit dat de gewonde wel besmet is.
- Voer tegelijkertijd een besmettingscontrole uit.

Nadat door besmettingscontrole gebleken is dat er geen sprake van besmetting is, wordt de patiënt vervoerd naar het ziekenhuis met de vermelding dat het gaat om een radiologisch incident. In het ziekenhuis kan dan een tweede controle worden uitgevoerd.

Protocol 2: Decontaminatie van gewonde, inclusief vervoer

Decontaminatie

1. Is een besmetting geconstateerd, registreer dan de aard en de plek van de besmetting en verzamel informatie over de verblijftijd en waar de gewonde vandaan komt.
2. Laat vervolgens zo mogelijk de neus snuiten in een tissue (na mogelijke inademing van radioactieve stofdeeltjes wordt hiermee al een deel weggehaald) en bewaar dit voor latere analyse.
3. Verwijder de kleding op een zodanige manier dat er geen secundaire besmetting kan optreden en bewaar ze in een plastic zak voorzien van een label 'Radioactief besmet'. Door de maatregel vindt al een besmettingsreductie plaats van ongeveer 90%.

Vervoer

4. Bedek de brancard, inclusief kussen, met een opengeslagen laken of deken, leg de patiënt hierop en sla daarna het laken of de deken goed om de patiënt heen.
5. Vervoer de patiënt naar een ziekenhuis waar men de beschikking heeft over een besmettingsmonitor (meestal een ziekenhuis met een afdeling Nucleaire Geneeskunde) en meld dit aan het betreffende ziekenhuis.
6. Controleer na het overdragen van de patiënt handen en kleding van de hulpverleners en de ambulance-inventaris op besmetting en geef de besmette materialen af.
7. Als besmetting is opgetreden: wassen met ruim water en zachte zeep. Geen harde borstel gebruiken. Eventueel douchen en haren wassen. Nadien opnieuw controleren op besmetting. Bij restbesmetting de procedure herhalen.
 - Pas op voor secundaire besmetting.
 - Gebruik persoonlijke beschermingsmiddelen (handschoenen en maskers).

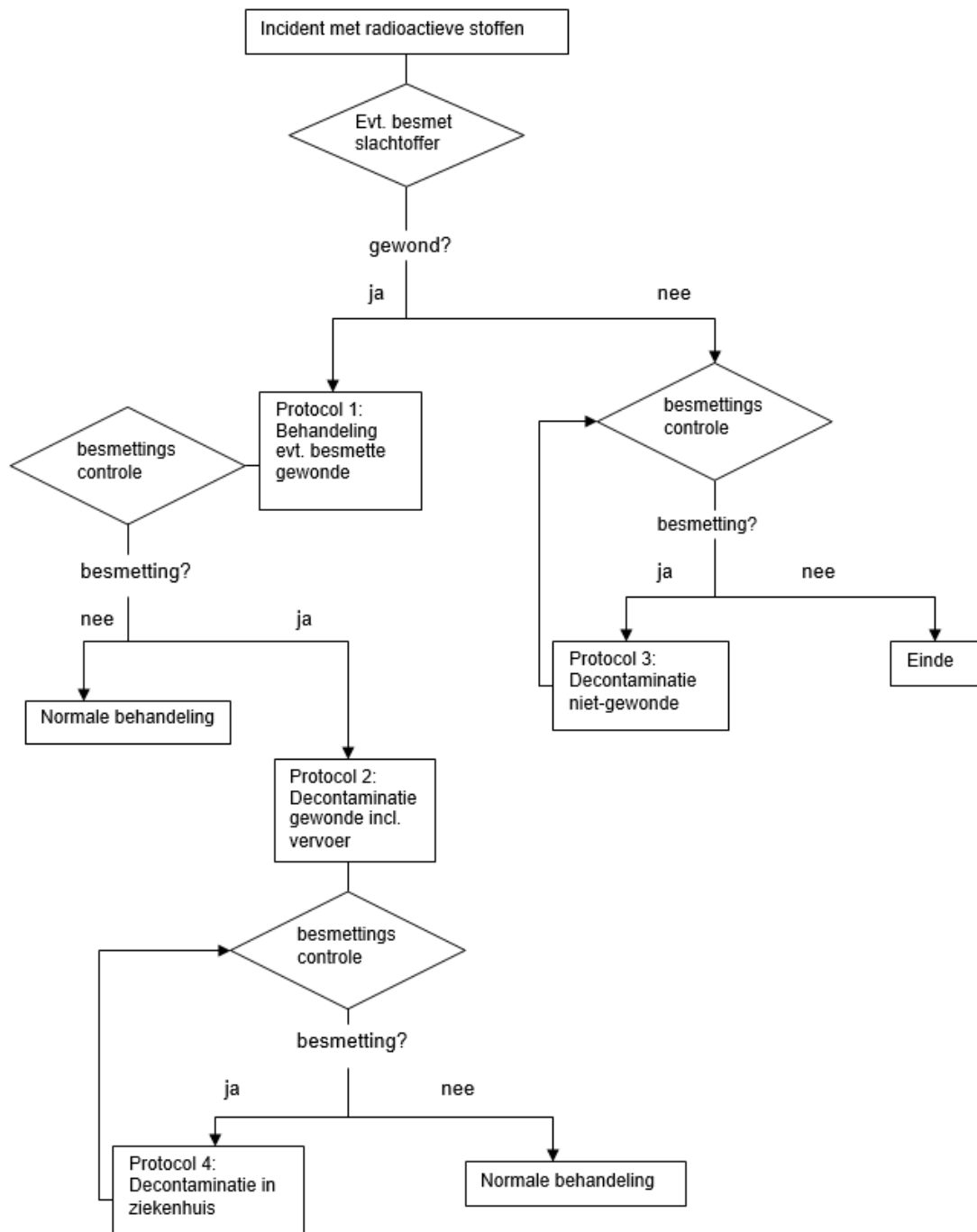
Protocol 3: Decontaminatie van niet-gewonde

1. Is een besmetting geconstateerd, registreer dan de aard en de plek van de besmetting en verzamel informatie over de verblijftijd en waar iemand vandaan komt.
2. Laat vervolgens zo mogelijk de neus snuiten in een tissue (na mogelijke inademing van radioactieve stofdeeltjes wordt hiermee al een deel weggehaald) en bewaar dit voor latere analyse.
3. Verwijder de kleding op een zodanige manier dat er geen secundaire besmetting kan optreden en bewaar deze in een plastic zak voorzien van een label 'Radioactief besmet'. Door de maatregel vindt al een besmettingsreductie plaats van ongeveer 90%.
4. Controleer na de decontaminatie handen en kleding van de hulpverleners op besmetting.
5. Als besmetting is opgetreden: wassen met ruim water en zachte zeep. Geen harde borstel gebruiken. Eventueel douchen en haren wassen. Nadien opnieuw controleren op besmetting. Bij restbesmetting procedure maximaal drie keer herhalen.

- Pas op voor secundaire besmetting.
- Gebruik persoonlijke beschermingsmiddelen (handschoenen en maskers).

Protocol 4: Decontaminatie in ziekenhuis

1. Verleen een gewonde die besmet is met radioactief materiaal direct noodzakelijke eerste hulp.
2. Verzamel gegevens omtrent de oorzaak en de aard van de besmetting.
3. Lokaliseer en meet de besmettingen, registreer de gegevens (bij voorkeur op een speciaal formulier).
4. Trek voorzichtig besmette kledingstukken uit.
5. Verwijder eventuele besmetting uit de neus-, mond- en keelholte door snuiten et cetera (monsters bewaren voor meting).
6. Voorkom verspreiding van de besmettingen, bijvoorbeeld door het afdekken van bepaalde lichaamsdelen.
7. Decontaminatie (rekening houdend met de toestand van de huid), meting en registratie.
8. Eventueel stap 7 herhalen.
 - Pas op voor secundaire besmetting.
 - Gebruik persoonlijke beschermingsmiddelen (handschoenen en maskers).
 - Steeds moet men voor ogen houden dat inwendige besmetting voorkomen, dan wel beperkt moet worden.



Figuur 9.2 Stroomschema voor het verwijderen van besmetting

9.3.5 Besmette omgeving

In vrijwel alle gevallen is inademen van radioactieve deeltjes die opwarrelen (resuspensie), het dominante blootstellingspad. Besmettingscontrole van de omgeving is dus noodzakelijk, maar er zijn geen interventieniveaus vastgesteld.

Aandachtspunten zijn:

- > Denk bij de controle van voertuigen ook aan wielkasten en banden, maar vooral aan het vervangen van luchtfilters!
- > Voor het verwijderen van radioactieve besmetting uit de omgeving zijn landelijke teams beschikbaar voor technische en medische interventie.
- > Defensie is gespecialiseerd in het schoonmaken van de infrastructuur.

De te nemen maatregelen zijn afhankelijk van de ernst en omvang van het incident.

Bijlage 1 Begrippenlijst

Deze begrippenlijst bevat de begrippen die voorkomen in *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Achtergrondinformatie* en in *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Basisinformatie voor operationeel leidinggevendend*.

A-scenario	stralingsincident met een A-object met mogelijk regio-overstijgende effecten, waarbij bestuurlijke coördinatie door de landelijke overheid vereist is.
Aangeslagen toestand	een toestand van hogere energie.
Achtergrondstraling	altijd aanwezige ioniserende straling, ook wel natuurlijke stralingsbelasting.
Activiteit, A	aantal desintegraties per seconde.
Alfadeeltje, α	bestaat uit twee protonen en twee neutronen en heeft lading 2+.
Alfastraling	α -straling is ioniserende straling door alfadeeltjes; komt meestal voor bij grote kernen zoals uranium.
Atoom	kleinste bouwsteen van een chemisch element.
B-scenario	radiologische incidenten van beperkte omvang met een B-object die regionaal worden afgehandeld.
Becquerel, Bq	eenheid van radioactiviteit, afgekort tot Bq. 1 Bq = 1 vervallende kern per seconde.
Belastingspad	een blootstellingsroute die leidt tot een stralingsbelasting.
Besmetting	neerslaan van radioactieve deeltjes waardoor een vooraf bepaalde grenswaarde wordt overschreden.
Bètadeeltje, β	bestaat uit een elektron met lading 1- of een positron met lading 1+.
Bètastraling	β -straling is ioniserende straling bestaande uit elektronen of positronen.
Blootgestelde werknemers	personen die beroepshalve werken met radioactieve stoffen of met toestellen die ioniserende straling uitzenden.
Brongebied	het gebied waar zich alles bevindt wat gerelateerd is aan de directe incidentbestrijding.
Bronterm	theoretische benadering van de te verwachten uitstoot van een kernreactor.
Curie, Ci	verouderde eenheid van radioactiviteit: 1 Ci = 37 miljard Bq; nog in gebruik in de Verenigde Staten.
DELTA-meting	meting van de opgelopen dosis door een persoon (D=dosis).
Depositie	neergeslagen radioactieve deeltjes in de omgeving.
Desintegratie	zie radioactief verval.
Deterministische effecten	ook wel acute of vroege effecten: gezondheidseffecten die boven een bepaalde drempeldosis altijd optreden na meestal een korte tijd van enkele uren tot maanden.
Directe ionisatie	een atoom wordt direct geïoniseerd door geladen deeltjes, dus α - of β -straling.

Directe maatregelen	maatregelen die ingrijpen op blootstellingspaden waarbij de mens op directe wijze wordt blootgesteld aan radioactieve stoffen of ioniserende straling.
DNA	desoxyribonucleïnezuur, een biochemisch macromolecuul dat de belangrijkste drager is van erfelijke informatie in alle bekende organismen en virussen.
Dosis, D	hoeveelheid ioniserende straling geabsorbeerd per massa-eenheid bestraald materiaal.
Dosistempo, \dot{D}	dosis per tijdseenheid.
Dracht, R	de afstand die ioniserende straling kan overbruggen.
Drempeldosis	dosis ioniserende straling die leidt tot gezondheidsschade.
Effectgebied	het gebied waarbinnen gevaarlijke stoffen zich verspreiden en mogelijke (gezondheids)schade aanrichten.
Effectieve dosis, E	equivalente dosis vermenigvuldigd met de weefselweegfactor, aangegeven met E; de effectieve dosis is de optelsom van alle blootstellingspaden voor het hele lichaam van alle typen straling bij een incident voor 1 nuclide, alleen voor stochastische effecten (niet voor deterministische).
Elektromagnetische straling	straling samengesteld uit een elektrische en een magnetische component; beide componenten maken golfbewegingen die loodrecht op elkaar staan.
Elektron, e^- , e^-	negatief geladen deeltje, dat gebonden kan zijn (bijvoorbeeld in een atoom) of zich vrij in de ruimte kan bevinden.
Equivalentente dosis, H_T	hoeveelheid ioniserende straling geabsorbeerd per massa-eenheid bestraald materiaal vermenigvuldigd met de stralingsweegfactor, aangegeven met H_T .
Exploitant	de inrichting of persoon die bij vergunning is toegestaan radioactieve stoffen te bereiden, toe te passen, te vervoeren of voorhanden te hebben of splijtstoffen of ertsen te vervoeren of voorhanden te hebben
·	
Fall-out	neergeslagen radioactieve deeltjes in de omgeving, ook wel depositie.
Foton	massaloze verschijningsvorm van elektromagnetische straling, 'pakketje energie'; weergegeven als γ ; fotonen hebben een hoge energie, dringen diep in weefsels en andere stoffen door en gaan er meestal dwars doorheen.
Gammastraling, γ	γ -straling is onzichtbare elektromagnetische straling met een hogere energie dan ultraviolet licht en röntgenstraling en die wordt uitgezonden door atoomkernen.
Geabsorbeerde dosis	hoeveelheid energie per massa-eenheid bestraald materiaal.
Genetische effecten	effecten die tot uitdrukking komen in het nageslacht.
Gray, Gy	eenheid van geabsorbeerde dosis: 1 Gy = 1 J/kg materiaal.
FOXTROT-meting	meting van besmetting op oppervlakken door neergeslagen radioactieve stoffen (bijvoorbeeld 'hot spots'; F=fall-out).

Halfwaarde-/Halveringstijd, $T_{1/2}$	de tijd waarin de helft van de kernen van een hoeveelheid radionucliden is vervallen.
Hardheid	geeft de energie van de straling aan; hoe hoger de energie, hoe harder de straling.
Harmonisatie	bij een ongeval met een grensoverschrijdende lozing (of dreiging daarvan) worden aan weerszijden van de grens dezelfde beschermende maatregelen genomen.
Hot spot	verhoogde concentratie neergeslagen radioactieve deeltjes in de omgeving.
ICRU-bol	weefsel-equivalente bol geïntroduceerd door het ICRU om het menselijk lichaam te benaderen.
Indirecte ionisatie	ionisatie in stappen: elektromagnetische straling gaat een interactie aan met een atoom(kern) waarbij geladen deeltjes ontstaan die op hun beurt een ionisatie veroorzaken.
Indirecte maatregelen	maatregelen die ingrijpen op blootstellingspaden waarbij de mens indirect wordt blootgesteld aan radioactieve stoffen of ioniserende straling en maatregelen die ingrijpen op de psychosociale gevolgen van een stralingsincident.
Ingekapselde bron	bron waarin de radioactieve stoffen zijn ingebed of vastgehecht aan vast, niet-radioactief dragermateriaal of zijn omgeven door een omhulling van niet-radioactief materiaal, zodat verspreiding van radioactieve stoffen uit de bron wordt voorkomen onder normale gebruiksomstandigheden.
Ingestie	inslikken.
Inhalatie	inademing.
Interventie	ingrijpen, maatregelen treffen.
Interventieniveau	blootstellingsniveau waarboven specifieke maatregelen genomen moeten worden als de situatie dat toelaat.
Ion	een elektrisch geladen atoom, molecuul of andere groep gebonden atomen. Een ion kan positief of negatief geladen zijn door respectievelijk een gebrek of een overschot aan één of meer elektronen.
Ionisatie	het scheiden van een atoom in één of meer elektronen uit de buitenste schil van een atoom en een positief geladen rest van het atoom: het atoom wordt geïoniseerd, en wordt een ion.
Ioniserende straling	energierijke straling die ionisaties kan veroorzaken.
Isobaren	atoomkernen met hetzelfde massagetal.
Isomeren	radionucliden met dezelfde samenstelling, maar verkerend in verschillende energietoestanden.
Isotopen	atoomkernen met hetzelfde aantal protonen, maar met verschillende aantallen neutronen en dus verschillende kernmassa's.
ISO-geometrie	isotroop stralingsveld; de straling komt in gelijke mate van alle kanten komt (dus ook van boven en beneden).

Jodiumprofylaxe	maatregel om besmetting van de schildklier door het inademen van radioactief jood te voorkomen door de schildklier te verzadigen met jodium (in tabletvorm).
Kernsplijting	proces waarbij een atoomkern splijt/uiteenvalt in twee kleinere kernen waarbij neutronen- en γ -straling wordt uitgezonden.
Kosmische straling Kwadratenwet	ioniserende straling afkomstig uit het heelal. eigenlijk <i>omgekeerde</i> kwadratenwet is een wet (in de natuurkunde) die aangeeft dat een grootheid omgekeerd evenredig verloopt met het kwadraat van de afstand tot de bron van die grootheid.
Late stralingseffecten	stralingseffecten die zich later dan 1 of 2 maanden na een bestraling openbaren.
Maatregel	actie die wordt genomen om de fysieke en psychologische gezondheid van mensen en het milieu te beschermen tegen de gevaarlijke effecten van blootstelling.
Melding	onmiddellijk bericht naar een officieel contactpunt over een situatie die tot een crisis kan leiden.
Moeder-dochter	het vervalproduct van een radionuclide is zelf radioactief; er is sprake van een vervalreeks. De eerste radionuclide wordt de moeder (index m) genoemd en de tweede de dochter (index d).
Molecuul Mutatie	chemische verbinding van één of meer atomen. overerfbare verandering van het DNA.
Natuurlijke stralingsbelasting Neutron, n	zie achtergrondstraling. is een subatomair deeltje zonder elektrische lading dat voorkomt in atoomkernen (behalve in waterstof); weergegeven als n.
Nuclide	kernsoort: atoomkern met bepaald aantal protonen Z en neutronen N.
Off-site	buiten de begrenzing van het gebied van de exploitant.
Planaire opnamen	bij planaire opnamen wordt de straling die een ingespoten licht radioactieve stof uitzendt, gemeten met één of twee stilstaande detectoren.
Positron, e ⁺	het antideeltje van het elektron; het heeft dezelfde massa, maar een tegengestelde lading.
Preparatiezone	zone waarbinnen bepaalde maatregelen moeten zijn voorbereid.
Proton, p, p ⁺	is een subatomair deeltje met een positieve eenheidslading .
Rad Radioactief verval	verouderde eenheid van geabsorbeerde dosis. ook wel desintegratie of splijting. Fysisch-chemisch verschijnsel waarbij een isotoop spontaan wordt omgezet in een ander isotoop. Hierbij wordt een deeltje (zoals een

	elektron, een proton of een alfadeeltje) uitgezonden of opgenomen. De atoomkern verandert van samenstelling; bevat meer of minder protonen en/of neutronen. Zo ontstaan andere nucliden. Het desintegratieproduct kan zelf ook weer instabiel zijn en wordt dan dochternuclide genoemd. Het proces gaat door totdat er een stabiele atoomkern is ontstaan; dit is een vervalproces of vervalketen.
Radioactieve stoffen	stoffen met een instabiele kern die op den duur vervalst, waarbij ioniserende straling wordt uitgezonden.
Radioactiviteit	spontane verandering van atoomkernen waarbij ioniserende straling wordt uitgezonden.
Radionuclide	radioactieve kern die radioactief verval vertoont.
Radiologisch	met betrekking tot radioactiviteit.
Radiologische strijdmiddelen	radioactieve materialen die geschikt zijn gemaakt voor en gebruikt worden met het doel om schade toe te brengen aan mensen en omgeving.
Radiologisch incident	incident met radioactieve stoffen niet zijnde splijtstof en/of splijtstofmateriaal.
Radiotoxiciteitsklasse	mate waarin een radioactieve stof gezondheidsschadelijke effecten kan veroorzaken gebaseerd op inhalatie; indeling van zeer hoog (klasse 1) naar laag (klasse 4).
Remstraling	elektromagnetische straling die ontstaat door β -deeltjes die met een hoge energie langs zware atoomkernen scheren; hierbij worden ze door de elektrische lading van de atoomkern afgebogen en afgeremd.
ROMEIO-meting	meting van dosistempo door externe straling in de omgeving ('R'=rate).
ROT-geometrie	rotatie-invariant stralingsveld; een stralingsveld dat in een horizontaal vlak ligt en gelijkmatig uit alle richtingen komt.
Röntgenstraling	elektromagnetische straling met een iets grotere energie dan zichtbaar licht en ultraviolet, maar lager dan γ -straling. Röntgenstraling wordt bewust opgewekt in een röntgentoestel. Wordt ook weergegeven als röntgen- of X-straling.
Röntgentoestel	toestel waarin röntgenstraling wordt opgewekt.
Sievert, Sv	eenheid van dosisequivalent: 1 Sv = 1 J/kg materiaal.
SIERRA-meting	meting van besmetting op personen (S=surface).
SPECT-opname	single-photon emission computerized tomography; de straling van een ingespoten licht radioactieve stof wordt gemeten met detectoren die rond de patiënt draaien.
Splijtingsproducten	radioactieve stoffen die ontstaan bij kernsplijting.
Splijtstof	materiaal dat in een kernreactor gespleten wordt (brandstofstaven) en tenminste een bepaald percentage uranium, plutonium, thorium of andere elementen bevat.
Stochastische effecten	ook wel late effecten of lange termijneffecten: gezondheidseffecten waarvan de kans dat ze optreden toeneemt met de stralingsdosis en die soms pas na jaren blootstelling optreden.
Stralingsincident	een situatie waarin ongewenst ioniserende straling vrijkomt of dreigt vrij te komen met een verhoogd risico voor mens en

milieu OF een situatie die een gecoördineerde inzet van diensten en organisaties van verschillende disciplines vergt om een verhoogd stralingsrisico voor mens en/of milieu te voorkomen.

Versneller	apparaat waarmee elektronen, kernen of kerndeeltjes versneld worden.
Volgdosis, $H(\tau)$ of $E(\tau)$	de totale equivalente dosis die gedurende een periode τ wordt opgelopen door inwendige besmetting.

Terminologie ADR

Aan de ADR-regelgeving liggen vele definities ten grondslag. Dit zijn de belangrijkste:

Speciale toestand	Radioactieve stoffen kunnen al dan niet <i>in speciale toestand</i> vervoerd worden. Onder radioactieve stof <i>in speciale toestand</i> wordt verstaan een niet verspreidbare radioactieve stof of een gesloten capsule die een radioactieve stof bevat en die zodanig moet zijn vervaardigd dat deze alleen kan worden geopend door de capsule te vernietigen.
A_1 en A_2	Vervolgens zijn er zogenaamde A_1 en A_2 waarden gedefinieerd. Onder A_1 wordt verstaan de maximale waarde van de activiteit van radioactieve stoffen in speciale toestand, zoals vastgelegd in het ADR (zie ADR tabel 2.2.7.7.2.1), die wordt gebruikt om de grenswaarden van de activiteit voor de toepassing van de voorschriften van het ADR vast te stellen. Onder A_2 wordt verstaan de maximale waarde van de activiteit van radioactieve stoffen, NIET in speciale toestand. Die waarden staan ook in de genoemde ADR tabel.
Exclusief gebruik	Onder <i>exclusief gebruik</i> verstaat men het gebruik van een voertuig (of een grote container) door één enkele afzender, waarbij alle handelingen vóór, tijdens en na het vervoer worden uitgevoerd in overeenstemming met de aanwijzingen van de afzender of de geadresseerde.
Speciale regeling	Onder <i>speciale regeling</i> verstaat men de bepalingen, goedgekeurd door het bevoegd gezag, op grond waarvan een zending die niet aan alle van toepassingen zijnde voorschriften van het ADR voldoet, mag worden vervoerd.
Transportindex	De transportindex (TI) voor een collo, oververpakking of container, of voor niet verpakte LSA-I-stoffen of SCO-I, is gelijk aan 0,1 keer het (hoogste) dosistempo ($\mu\text{Sv/u}$), bepaald op een afstand van 1 m van het oppervlak. De TI is op de eerste decimaal naar boven afgerond (bijvoorbeeld 1,13 wordt 1,2). Alleen als de gevonden waarde kleiner dan of gelijk aan 0,05 is wordt de TI afgerond op nul. De transportindex voor oververpakkingen, containers of voertuigen wordt bepaald door de TI's van alle daarin aanwezige colli bij elkaar op te tellen. Bij stijve

UN-nummer	<p>oververpakkingen mag de samengestelde TI ook door rechtstreekse meting bepaald worden.</p> <p>Gevaarlijke stoffen worden internationaal gecodeerd met een 4-cijferig UN-nummer. Voor het vervoer van radioactieve stoffen bestaan er enkele tientallen UN-nummers om de lading te karakteriseren. Deze zijn verderop weergegeven in Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..</p>
LSA	<p>Radioactieve stoffen die van nature een beperkte specifieke activiteit bezitten, of radioactieve stoffen waarvoor grenswaarden voor de geschatte gemiddelde specifieke activiteit van toepassing zijn, heten <i>stoffen met geringe specifieke activiteit</i> (Low Specific Activity, LSA). LSA-stoffen worden in drie groepen verdeeld: LSA-I, LSA-II en LSA-III, zie het ADR voor meer details over de verschillen tussen deze groepen.</p>
SCO	<p>Onder een <i>voorwerp met besmetting aan het oppervlak</i> (Surface Contaminated Object, SCO) wordt verstaan een vast voorwerp dat zelf niet radioactief is, maar waarbij op het oppervlak ervan een radioactieve stof verspreid is. Er bestaan twee categorieën: SCO-I en SCO-II, waarbij SCO-I minder radioactief besmet is dan SCO-II.</p>
Colli	<p>Een verpakking met radioactieve inhoud, gereed voor verzending, heet een <i>collo</i>. Een collo is dus de radioactieve inhoud inclusief <i>verpakking</i>. De verpakking kan een kist, vat, container of tank zijn en allerlei materialen bevatten zoals afstandhouders, dempers en warmte-isolatiemateriaal. Het ADR onderscheidt verschillende typen colli, te weten:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) Vrijgesteld collo b) Industrieel collo: type 1, 2 en 3 (respectievelijk type IP-1, IP-2 en IP-3) c) Collo van type A d) Collo van type B(U) e) Collo van type B(M) f) Collo van type C <p>Voor deze colli gelden verschillende voorwaarden, zie hieronder. Voor colli die splijtbare stoffen of uraniumhexafluoride bevatten, gelden bijzondere voorwaarden.</p>
Vrijgesteld collo	<p>Dit is een verpakking t.b.v. instrumenten, voorwerpen of stoffen met een gelimiteerde hoeveelheid activiteit (zoals vermeld in ADR 2.2.7.7.1.2.1.). De verpakking is ontworpen om te voldoen aan de aan alle verpakkingen en colli gestelde voorschriften (zoals vermeld in ADR 6.4.2.)</p>
Industrieel collo	<p>Dit is een verpakking, een tank of container die stoffen met een geringe specifieke activiteit (LSA) of voorwerpen met besmetting aan het oppervlak (SCO) bevat. Er wordt een onderverdeling gemaakt in drie types, te weten: type 1, 2 en 3 (IP-1, IP-2, IP-3) met oplopende ontwerp- en prestatie-eisen.</p>
Collo van type A	<p>Dit is een verpakking, een tank of container die een activiteit van ten hoogste A₁ bevat als de stof zich in speciale</p>

	toestand bevindt of een activiteit van ten hoogste A_2 , als de radioactieve stof zich niet in speciale toestand bevindt en die is ontworpen om te voldoen aan de aan alle verpakkingen en colli gestelde algemene voorschriften.
Collo van type B	Dit is een verpakking, een tank of container die een activiteit bevat die groter kan zijn dan A_1 resp. A_2 en die voldoet aan alle algemene voorschriften en - voor zover van toepassing - aan de bijzondere voorschriften (zie ADR). De aard van en hoeveelheid activiteit worden gelimiteerd door een certificaat.
Collo van type C	Dit is een verpakking die speciaal is ontworpen voor vervoer van hoge activiteit ($> 3000 A_1$ c.q. $> 100.000 A_2$) door de lucht.

UN-nummers met benaming en beschrijving

De BENAMING en BESCHRIJVING in hoofdletters is verplicht, toevoegingen weergegeven in kleine letters zijn optioneel:

2908	RADIOACTIEVE STOFFEN, VRIJGESTELD COLLO - LEGE VERPAKKING
2909	RADIOACTIEVE STOFFEN, VRIJGESTELD COLLO - INDUSTRIËLE VOORWERPEN VAN NATUURLIJK URANIUM of VAN VERARMDE URANIUM of VAN NATUURLIJK THORIUM
2910	RADIOACTIEVE STOFFEN, VRIJGESTELD COLLO - BEPERKTE HOEVEELHEID STOF
2911	RADIOACTIEVE STOFFEN, VRIJGESTELD COLLO - INSTRUMENTEN of INDUSTRIËLE VOORWERPEN
2912	RADIOACTIEVE STOFFEN MET GERINGE SPECIFIEKE ACTIVITEIT (LSA- I), niet splijtbaar of splijtbaar, vrijgesteld
2913	RADIOACTIEVE STOFFEN, VOORWERPEN MET BESMETTING AAN HET OPPERVLAK (SCO- I of SCO- II), niet splijtbaar of splijtbaar, vrijgesteld
2915	RADIOACTIEVE STOFFEN, IN COLLO VAN TYPE A, niet in speciale toestand, niet splijtbaar of splijtbaar, vrijgesteld
2916	RADIOACTIEVE STOFFEN, IN COLLO VAN TYPE B(U), niet splijtbaar of splijtbaar, vrijgesteld
2917	RADIOACTIEVE STOFFEN, IN COLLO VAN TYPE B(M), niet splijtbaar of splijtbaar, vrijgesteld
2919	RADIOACTIEVE STOFFEN, VERVOERD OP GROND VAN EEN SPECIALE REGELING, niet splijtbaar of splijtbaar, vrijgesteld
2977	RADIOACTIEVE STOFFEN, URANIUMHEXAFLUORIDE, SPLIJTBAAR
2978	RADIOACTIEVE STOFFEN, URANIUMHEXAFLUORIDE, niet splijtbaar of splijtbaar, vrijgesteld
3321	RADIOACTIEVE STOFFEN MET GERINGE SPECIFIEKE ACTIVITEIT (LSA- II), niet splijtbaar of splijtbaar, vrijgesteld
3322	RADIOACTIEVE STOFFEN MET GERINGE SPECIFIEKE ACTIVITEIT (LSA- III), niet splijtbaar of splijtbaar, vrijgesteld
3323	RADIOACTIEVE STOFFEN IN COLLO VAN TYPE C, niet splijtbaar of splijtbaar, vrijgesteld

- 3324 RADIOACTIEVE STOFFEN MET GERINGE SPECIFIEKE ACTIVITEIT (LSA- II), SPLIJTBAAR
- 3325 RADIOACTIEVE STOFFEN MET GERINGE SPECIFIEKE ACTIVITEIT (LSA- III), SPLIJTBAAR
- 3326 RADIOACTIEVE STOFFEN MET BESMETTING AAN HET OPPERVLAK (SCO- 1 of SCO- II), SPLIJTBAAR
- 3327 RADIOACTIEVE STOFFEN IN COLLO VAN TYPE A, SPLIJTBAAR, niet in speciale toestand
- 3328 RADIOACTIEVE STOFFEN IN COLLO VAN TYPE B (U), SPLIJTBAAR
- 3329 RADIOACTIEVE STOFFEN IN COLLO VAN TYPE B (M), SPLIJTBAAR
- 3330 RADIOACTIEVE STOFFEN IN COLLO VAN TYPE C, SPLIJTBAAR
- 3331 RADIOACTIEVE STOFFEN, VERVOERD OP GROND VAN EEN SPECIALE REGELING, SPLIJTBAAR
- 3332 RADIOACTIEVE STOFFEN IN COLLO VAN TYPE A, IN SPECIALE TOESTAND, niet splijtbaar of splijtbaar, vrijgesteld
- 3333 RADIOACTIEVE STOFFEN IN COLLO VAN TYPE A, IN SPECIALE TOESTAND, SPLIJTBAAR
- 3507 URANIUMHEXAFLUORIDE, RADIOACTIEVE STOFFEN, VRIJGESTELD COLLO, minder dan 0,1 kg per collo, niet splijtbaar of splijtbaar, vrijgesteld

Bijlage 2 Afkortingenlijst

Deze afkortingenlijst bevat de afkortingen die voorkomen in *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Achtergrondinformatie* en in *Stralingsincidenten veiligheidsregio's: Basisinformatie voor operationeel leidinggevenden*.

Zie voor de gebruikte voorvoegsels bij eenheden Tabel 1.1.

Algemeen

AD	alarmdosismeter
ADOS	alarmdosismeter
ADR	Accord Européen relatif au transport international de marchandises Dangereuses par Route
AGS	Adviseur Gevaarlijke Stoffen
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
ANVS	Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming
AP	anterior-posterior (geometrie)
BZK	Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties
CBRN	Chemisch, Biologisch, Radiologisch, Nucleair
CEAG	Coördinatiecentrum Expertise Arbeidsomstandigheden en Gezondheid
CETmd	Crisis Expert Team milieu drinkwater
CETsn	Crisis Expert Team straling en nucleair, met daarin opgenomen RGEN
CKV	Centrum voor Kernongevallenbestrijding
CoPI	Commandoteam Plaats Incident
COVRA	Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval
CVE	coördinator verkenningseenheid
DDA	dienstdoend ambtenaar
DNA	desoxyribonucleïnezuur
DTPA	di-ethyleentriaminepenta-azijnzuur
EPZ	Elektriciteits-Produktiemaatschappij Zuid-Nederland
ERIC	emergency response intervention card
Ext	externe straling
GAGS	Gezondheidskundig Adviseur Gevaarlijke Stoffen
GEVI	gevaarsidentificatienummer
GGD	Gemeentelijke Gezondheidsdienst
GHOR	Geneeskundige Hulpverleningsorganisatie in de Regio
GMK	gemeenschappelijke meldkamer
GOE	grootschalige ontsmettingseenheid
GRIP	gecoördineerde regionale incidentbestrijdingsprocedure
IAEA	International Atomic Energy Agency
IBC	intermediate bulk container
IBGS	incidentbestrijding gevaarlijke stoffen
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Committee on Radiation Units (ICRU)
lenW	Infrastructuur en Waterstaat
IFV	Instituut Fysieke Veiligheid
ILT	Inspectie Leefomgeving en Transport

Ing	ingestie of inslikken
Inh	inhalatie of inademen
IRBT	Interregionaal Beleidsteam (overlegvorm)
IRI	Interfacultair Reactor Instituut (TU Delft)
IROT	Interregionaal Operationeel Team (overlegvorm)
KEW	Kernenergiewet
LCP-S	Landelijk Crisisplan Straling
LD	letale dosis
LD ₅₀	letale dosis waarbij 50% van de blootgestelde personen overlijdt
LMRV	Landelijk meetnet radioactiviteit in voedsel
LNT	linear-no-threshold
LSA	lage specifieke activiteit (Low specific activity)
NCS	Nationaal Crisisplan Stralingsincidenten
NCTV	Nationaal Coördinator Terrorismebestrijding en Veiligheid
NDO	niet-destructief onderzoek
NMR	Nationaal Meetnet Radioactiviteit
NRG	Nuclear Research and consultancy Group
NVWA	Nederlandse Voedsel en Warenautoriteit
PA	posterior-anterior (geometrie)
PET	positron emission tomography
PWR	pressurized water reactor
RA	radioactiviteit/radioactief
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
RGEN	Radiologisch en Gezondheidskundig Expertise Netwerk
ROT	regionaal operationeel team (overlegvorm)
RTG	radionuclide thermoelectric generator
RVS	roestvast staal
RWS	Rijkswaterstaat
SCRAM	security rods axe man
SCO	surface contaminated object
SD	stralingsdeskundige
SED	Site Emergency Director
STC-CON1	geconstrueerde standaard bronterm
SITRAP	situatierapportage
SZW	Sociale Zaken en Werkgelegenheid
TI	transportindex
TS	tankautospuit
UN	United Nations (in UN-nummer)
Urenco	Uranium Enrichment Company
UV	ultraviolet
VE	verkenningseenheid
VR	veiligheidsregio
WVI	waakvlaminstituut
WFSR	Wageningen Food Safety Research

Grootheden en eenheden

A	activiteit (eenheid: Bq)
A	massagetal (geen eenheid)
Bq	Becquerel
C	Coulomb
C_{gem}	gemiddelde concentratie
Ci	Curie (= $3,7 \times 10^{10}$ Bq) (oude eenheid)
cps	counts / tikken per seconde
d	dikte afschermingsmateriaal (eenheid: centimeters)
D	dosis (eenheid: Gy)
\dot{D}	dosistempo (eenheid: Gy/u)
DCC	dosiskonversiecoëfficiënt (eenheid: Sv/Bq)
E	energie (eenheid: eV)
E	effectieve dosis (eenheid: Sv)
$E(\tau)$	effectieve volgdosis (eenheid: Sv)
e_{50}	dosiskonversiecoëfficiënt (eenheid: Sv/Bq)
eV	elektronvolt (= $1,60219 \times 10^{-19}$ J)
Gy	Gray
H	dosisequivalent (oud)
$H_P(d)$	persoonsdosisequivalent op d mm
H_T	equivalente dosis
\dot{H}_T	equivalent orgaandosistempo
H_{huid}	gemeten besmettingsniveau op de huid
$H_T(\tau)$	equivalente volgdosis (eenheid: Sv)
$H^*(10)$	omgevingsdosisequivalent op 10 mm indringdiepte
$\dot{H}^*(10)$	omgevingsdosisequivalenttempo op 10 mm indringdiepte
h of hr	hour
j	jaar
J	joule
kg	kilogram
km	kilometer
min	minuten
MWe	Megawatt elektriciteit: eenheid voor elektrische uitgangsvermogen van energiecentrales
MWth	Megawatt thermisch: eenheid voor totale warmtevermogen van kernreactoren (ongeveer een factor 3 hoger dan MWe)
n	aantal radionucliden
N	aantal neutronen
N_A	getal van Avogadro
r	afstand van de bron (eenheid: meters)
R	dracht (eenheid: (centi)meters)
R	Röntgen (= $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg)
rad	eenheid geabsorbeerde dosis (= 1 Gy)
rem	eenheid van 'equivalente dosis' (= 1 Sv)
rö	röntgen

s	seconde
s ⁻¹	per seconde en ks ⁻¹ = 1000 cps
Sv	Sievert
t	tijdstip t
T _½	halfwaardetijd
u	uur
V	ademventilatievoud (eenheid: m ³ /u)
W _R	stralingsweegfactor
W _T	weefselweegfactor
X	exposie (eenheid: R)
y	yield / opbrengst
z	indringdiepte (eenheid: centimeters)
Z	aantal protonen (geen eenheid)
α	alfa
β	bèta
Δt	tijdsinterval / periode
Φ	aantal passerende fotonen
γ	gamma
Γ _{H*(10)}	bronconstante (eenheid: μSv.m ² /MBq.u)
λ	vervalconstante (eenheid: s ⁻¹)
μ	lineïeke verzwakkingscoëfficiënt
$\bar{\nu}$	antineutrino
ρ	soortelijke dichtheid van materie (eenheid: g/cm ³)

Chemisch

Am	americium	P	fosfor
Ba	barium	Pb	lood
Be	beryllium	Po	polonium
Bi	bismuth	Pr	praseodymium
C	koolstof	Pu	plutonium
Ce	cerium	Ra	radium
Cm	curium	Rb	rubidium
Co	kobalt	Re	renium
Cl	chloor	Rh	rhodium
Cs	cesium	Rn	radon(-222) en thoron(-220)
Eu	europium	Ru	ruthetium
F	fluor	S	zwavel
Ga	gallium	Sb	antimoon
H	waterstof	Se	selenium
He	helium	Si	silicium
HF	waterstoffluoride	Sr	strontium
I	jodium	Tc	technetium
In	indium	Te	tellurium
Ir	iridium	Th	thorium
K	kalium	U	uranium
Kr	krypton	UF ₆	uraanhexafluoride
La	lantaan	UO ₂ F ₂	uranoylfluoride

Li lithium
 Mo molybdeen
 Ni nikkel
 Np neptunium

Y yttrium
 Yb ytterbium
 Xe xenon
 Zr zirkonium

H 1 (1,01)																	He 2 (4,00)																												
Li 3 (6,94)	Be 4 (9,01)											B 5 (10,81)	C 6 (12,01)	N 7 (14,01)	O 8 (15,99)	F 9 (18,99)	Ne 9 (18,99)																												
Na 11 (22,99)	Mg 12 (24,30)											Al 13 (26,98)	Si 14 (28,08)	P 15 (30,97)	S 16 (32,06)	Cl 17 (35,45)	Ar 18 (39,95)																												
K 19 (39,10)	Ca 20 (40,08)	Sc 21 (44,96)	Ti 22 (47,88)	V 23 (50,94)	Cr 24 (51,99)	Mn 25 (54,94)	Fe 26 (55,85)	Co 27 (58,93)	Ni 28 (58,69)	Cu 29 (63,55)	Zn 30 (65,38)	Ga 31 (69,72)	Ge 32 (72,59)	As 33 (74,92)	Se 34 (78,96)	Br 35 (79,90)	Kr 36 (83,80)																												
Rb 37 (85,47)	Sr 38 (87,62)	Y 39 (88,90)	Zr 40 (91,22)	Nb 41 (92,91)	Mo 42 (95,94)	Tc 43 (98,91)	Ru 44 (101,07)	Rh 45 (102,90)	Pd 46 (107,87)	Ag 47 (107,87)	Cd 48 (112,41)	In 49 (114,82)	Sn 50 (118,71)	Sb 51 (121,76)	Te 52 (127,60)	I 53 (126,90)	Xe 54 (131,29)																												
Cs 55 (132,90)	Ba 56 (137,33)	La 57 (138,90)	Hf 72 (178,49)	Ta 73 (180,95)	W 74 (183,85)	Re 75 (186,21)	Os 76 (190,23)	Ir 77 (192,22)	Pt 78 (195,08)	Au 79 (196,97)	Hg 80 (200,59)	Tl 81 (204,38)	Pb 82 (207,20)	Bi 83 (208,98)	Po 84 (209)	At 85 (209)	Rn 86 (222,02)																												
Fr 87 (223,02)	Ra 88 (226,02)	Ac 89 (227,03)	Rf 104 (261,10)	Db 105 (262,11)	Sg 106 (263,10)	Bh 107 (264,10)	Hs 108 (277,10)	Mt 109 (268,10)	Ds 110 (268,10)	Rg 111 (280)	Cn 112 (285)			Fl 114 (289)			Lv 116 (293)																												
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Ce 58 (140,12)</td> <td>Pr 59 (140,91)</td> <td>Nd 60 (144,24)</td> <td>Pm 61 (144,91)</td> <td>Sm 62 (150,36)</td> <td>Eu 63 (151,96)</td> <td>Gd 64 (157,25)</td> <td>Tb 65 (158,93)</td> <td>Dy 66 (162,50)</td> <td>Ho 67 (164,93)</td> <td>Er 68 (167,26)</td> <td>Tm 69 (168,93)</td> <td>Yb 70 (173,04)</td> <td>Lu 71 (174,97)</td> </tr> <tr> <td>Th 90 (232,04)</td> <td>Pa 91 (231,04)</td> <td>U 92 (238,03)</td> <td>Np 93 (237,05)</td> <td>Pu 94 (244,06)</td> <td>Am 95 (243,06)</td> <td>Cm 96 (247,07)</td> <td>Bk 97 (247,07)</td> <td>Cf 98 (251,08)</td> <td>Es 99 (252,08)</td> <td>Fm 100 (257,10)</td> <td>Md 101 (258,10)</td> <td>No 102 (259,10)</td> <td>Lr 103 (262,11)</td> </tr> </tbody> </table>																		Ce 58 (140,12)	Pr 59 (140,91)	Nd 60 (144,24)	Pm 61 (144,91)	Sm 62 (150,36)	Eu 63 (151,96)	Gd 64 (157,25)	Tb 65 (158,93)	Dy 66 (162,50)	Ho 67 (164,93)	Er 68 (167,26)	Tm 69 (168,93)	Yb 70 (173,04)	Lu 71 (174,97)	Th 90 (232,04)	Pa 91 (231,04)	U 92 (238,03)	Np 93 (237,05)	Pu 94 (244,06)	Am 95 (243,06)	Cm 96 (247,07)	Bk 97 (247,07)	Cf 98 (251,08)	Es 99 (252,08)	Fm 100 (257,10)	Md 101 (258,10)	No 102 (259,10)	Lr 103 (262,11)
Ce 58 (140,12)	Pr 59 (140,91)	Nd 60 (144,24)	Pm 61 (144,91)	Sm 62 (150,36)	Eu 63 (151,96)	Gd 64 (157,25)	Tb 65 (158,93)	Dy 66 (162,50)	Ho 67 (164,93)	Er 68 (167,26)	Tm 69 (168,93)	Yb 70 (173,04)	Lu 71 (174,97)																																
Th 90 (232,04)	Pa 91 (231,04)	U 92 (238,03)	Np 93 (237,05)	Pu 94 (244,06)	Am 95 (243,06)	Cm 96 (247,07)	Bk 97 (247,07)	Cf 98 (251,08)	Es 99 (252,08)	Fm 100 (257,10)	Md 101 (258,10)	No 102 (259,10)	Lr 103 (262,11)																																

Figuur B2.1 Periodiek systeem van de elementen

Bijlage 3 Bronnen

Voor de samenstelling van de handreiking *Stralingsincidenten veiligheidsregio's* is gebruik gemaakt van de volgende bronnen.

1. Radiologisch Handboek Hulpverleningsdiensten, 2004 en conceptversie 2011-2014
2. Radiologische basiskennis Kernongevallenbestrijding, RIVM, 2005 en 2011
3. Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman, 2007
4. Nationaal Plan Kernongevallenbestrijding, VROM-inspectie, 2005
5. Info-pakket Straling, Ministerie VROM, zonder jaartal
6. De achtergronden van radioactiviteit, aanvullende leerstof middenkader, Stichting brandweeropleidingen in Nederland, zonder jaartal
7. Handboek NBC, Tweede herziene druk, Nibra, 2005
8. Operationele Handreiking Ongevalsebestrijding gevaarlijke stoffen, NVBR, 2012 inclusief herziening 2014
9. Bevelvoerder Ongevalsebestrijding gevaarlijke stoffen, Tekstboek Brandweeracademie, 2011
10. Manschap a Ongevalsebestrijding gevaarlijke stoffen, Tekstboek Brandweeracademie, 2013
11. Verkenner gevaarlijke stoffen, Tekstboek Brandweeracademie, 2012
12. Handleiding voor first responders op een radiologische noodsituatie, IAEA, 2006
13. TMT Handbook, Triage, Monitoring and Treatment of people exposed to Ionising radiation following a malevolent act, 2009
14. Triage en eerste opvang van slachtoffers na radiologische incidenten, RIVM, 2010
15. Maatgevende scenario's voor ongevallen met categorie B-objecten, Verhoef en Van Hienen, NRG, 2004
16. Radioactieve stoffen: uraniumhexafluoride, Gezamenlijke brandweer, 2005
17. Informatiebulletin Medical Valley Petten
18. Nationaal Crisisplan Stralingsincidenten, concept 2014
19. Besluit stralingsbescherming (Stb. 2001, 397)
20. Circulaires EB62-386, EB65-1609, EB81-U1619, Ministerie BZK, 1962, 1965, 1981
21. Leidraad Kernongevallenbestrijding, Nibra, 2004
22. Handboek Vervoer Gevaarlijke Stoffen over de weg 2009-2010, GDS Europe, 2009
23. Vervoer van radioactieve stoffen over de weg in Nederland en België, NVS 2002 en de addenda van recentere datum
24. Richtlijn 2013/59/Euratom van de raad, publicatieblad van de Europese Unie, 2013
25. Regeling beveiliging nucleaire inrichtingen en splijtstoffen
26. www.rivm.nl
27. www.wikipedia.nl
28. ICRP Publication 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 2007, Ann. ICRP 37 (2-4)
ICRP Publication 119, Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60, 2012, Ann. ICRP 41(Suppl.)
29. <https://www.rivm.nl/nationaal-meetnet-radioactiviteit/NMR-alarm-afhandeling>, 2021
30. Landelijk Crisisplan Straling (LCP-S), Ministerie van I en W, 2021
31. Handreiking Decontaminatie Werkversie 1.1, IFV januari 2019

Bijlage 4 Toelichting bij Radionuclidentabel

Uitleg per kolom

Nuclide	<p>Als twee nucliden genoemd zijn, is dit een moeder/dochter combinatie. Een sterretje achter de naam duidt op een radioactieve (sub)reeks.</p> <p>In de volgende kolommen wordt de meest restrictieve waarde gegeven van de radionucliden. De halfwaardetijd is dit geval die van de moedernuclide.</p>
Toepassingsgebied	<p>Met kruisjes wordt aangegeven in welke toepassingsgebieden men de radionuclide kan tegenkomen.</p>
Halfwaardetijd Vervalwijze	<p>Deze wordt vermeld in begrijpelijke eenheden.</p> <p>α, β^-, β^+/EC, γ: de wijze van verval, met daarbij het meest karakteristieke energieniveau van de vrijkomende stralingsdeeltjes. Voor β's is dat de maximale energie; hier is $E_{\beta, \text{gem}}$ van af te leiden ($E_{\beta, \text{gem}} = E_{\beta, \text{max}} / 3$). EC onder de kop β^+ duidt op elektronvangst. ^{192}Ir heeft 50% kans op elektronvangst en 50% kans op β^--verval, vandaar de haakjes.</p>
Vervoer	<p>Gegeven zijn de zogenaamde A_1- en A_2-getallen. Zie voor uitleg de <i>Bijlage 1</i> Begrippenlijst in Hoofdstuk 0 onder de kop <i>Terminologie ADR</i>. De afkorting 'onb.' betekent dat het vervoer onbeperkt is.</p>
Externe bestraling	<p>Hier staan achtereenvolgens: bronconstante, halveringsdikte van lood, conversie-coëfficiënten $e_{\text{Ext}}^{\text{wolk}}$: voor de omrekening van luchtconcentratie naar effectief dosistempo, conversie-coëfficiënten $e_{\text{Ext}}^{\text{bodem}}$ voor de omrekening van oppervlaktebesmetting (over een groot gebied) naar effectief dosistempo. De conversiecoëfficiënten zijn bij de natuurlijke reeksen $^{226}\text{Ra}^*$, $^{232}\text{Th}^*$ en $^{238}\text{U}^*$ sterk afhankelijk van de mate van evenwicht van alle dochternucliden.</p>
Inhalatie	<p>$e_{50}^{\text{inhalatie}}$, de conversiecoëfficiënt voor de omrekening van de ingeademde activiteit naar effectieve dosis. Ook wordt de radiotoxiciteitsklasse gegeven voor inhalatiegevaar.</p>
Ingestie	<p>e_{50}^{ingestie}, de conversiecoëfficiënt voor de omrekening van de ingenomen activiteit via voedsel en drinkwater en dergelijke naar effectieve dosis.</p>
Huid	<p>H_{huid}, het dosisequivalenttempo voor de omrekening van oppervlaktebesmetting van de huid naar huiddosistempo.</p>
Automess AD-17	<p>omrekenfactoren voor de sonde AD-17 (met en zonder afschermkap) van gemeten telsnelheid naar oppervlaktebesmetting.</p>
Automess AD-k	<p>omrekenfactoren voor de sonde AD-k (voor de standen α, $\alpha\beta\gamma$ met en zonder beschermkap) van de gemeten telsnelheid naar oppervlaktebesmetting.</p>

