



## Achtergrondinformatie

# Effecten van ioniserende straling

### Equivalente dosis

Het biologisch effect van ioniserende straling – of: de schade aan levend weefsel – hangt af van de opgelopen *equivalente dosis*. Deze equivalente dosis hangt af van de geabsorbeerde stralingsenergie per kilogram weefsel en van de soort straling. En deze grootheden hangen op hun beurt weer af van de radioactieve bron (de activiteit van de bron, de uitgezonden soort deeltjes en de energie daarvan), van de afstand tussen de bron en de ontvanger en van de afscherming van de bron en/of de ontvanger met absorberend materiaal – zie de pagina [Eigenschappen van ioniserende straling](#).

### Natuurlijke stralingsbronnen

De mens staat voortdurend bloot aan ioniserende straling uit natuurlijke bronnen: uit het heelal, uit de bodem, uit water, voedsel en lucht, en uit bouwmaterialen. Een overzicht van de bronnen van deze achtergrondstraling staat in de tabel van figuur 1. In deze tabel staat ook de equivalente dosis die je daardoor in een jaar oploopt. In totaal komt dat neer op zo'n 1,8 mSv. Maar dat is een gemiddelde. Hoe groot de equivalente jaardosis als gevolg van de achtergrondstraling is, hangt af van de grondsoort en de gebruikte bouwmaterialen in je leefomgeving.

Bron	Equivalente dosis (mSv/jaar)
Kosmische straling	0,25
Bodem	0,05
Water en voedsel	0,35
Lucht	0,8
Bouwmaterialen	0,35
Totaal	1,8

Figuur 1 – Stralingsbelasting door bronnen van natuurlijke achtergrondstraling. Bron: RIVM (2006), van der Woude & de Meijer (2003).

**Kosmische straling** – De kosmische straling die vanuit het heelal de aardatmosfeer binnendringt bestaat voornamelijk uit protonen, heliumkernen en zwaardere kernen (zoals ijzerkernen), en daarnaast – in kleinere aantallen – elektronen, fotonen en neutrino's. Een deel van de kosmische straling is afkomstig van de Zon. Hierbij gaat het vooral om protonen in de zonnewind. Deze straling heeft te weinig energie om in de aardatmosfeer door te dringen, maar beïnvloedt wel het magnetisch veld van de aarde en daardoor de invloed van kosmische straling op de aardatmosfeer.

Door wisselwerking van de primaire kosmische straling met de bovenste lagen van de atmosfeer ontstaat de secundaire kosmische straling. Daarbij gaat het vooral om fotonen, elektronen en muonen. Daarnaast ontstaan bij deze wisselwerking radioactieve isotopen zoals waterstof-3 (tritium), beryllium-7 en koolstof-14.

Door de afschermende werking van de aardatmosfeer neemt de opgelopen jaardosis sterk toe met de hoogte boven zeeniveau. Door de afschermende werking van het magnetisch veld van de aarde hangt de opgelopen jaardosis ook af van de breedtegraad: deze dosis neemt toe vanaf de evenaar richting de poolstreken.

**Bodem** – De aardkorst bevat verschillende radioactieve nucliden, die waarschijnlijk bij het ontstaan van de aarde gevormd zijn. De belangrijkste zijn uranium-238 en thorium-232 en hun vervalproducten zoals radium-226, radon-222 en radon-220. Daarnaast zit er kalium-40 in de bodem. Door de uiteenlopende concentraties van deze nucliden in de verschillende gesteenten en grondsoorten is de opgelopen jaardosis per landstreek verschillend.

**Water en voedsel** – In ons lichaam wordt de grootste stralingsbelasting veroorzaakt door het natuurlijk voorkomen van kalium-40 in de bodem. Daardoor krijgen we deze radioactieve isotoop binnen via water en voedsel. Langs dezelfde weg komen ook radioactieve isotopen als koolstof-14, jood-131 en ijzer-55 ons lichaam binnen.

**Lucht** – De isotopen radon-220 en radon-222 zijn vervalproducten van het uranium en thorium in de aardkorst die in de vrije buitenlucht terug te vinden zijn. Radon is namelijk een

edelgas, en komt daardoor geleidelijk uit gesteenten en bouwmaterialen vrij. Deze radioactieve isotopen komen via de ademhaling het lichaam binnen en blijven voor een deel in de longen achter.

**Bouwmaterialen** – Voor de productie van bouwmaterialen als hout, beton en baksteen worden grondstoffen gebruikt waarin van nature radioactieve isotopen voorkomen. Radioactieve isotopen als kalium-40, thorium-232 en radium-226 in bouwmaterialen leveren daardoor een bijdrage aan de stralingsbelasting vanuit de woon- en werkomgeving. Bovendien leveren thorium-232 en radium-226 bij verval een bijdrage aan de concentratie van radioactieve radonisotopen in de binnenlucht.

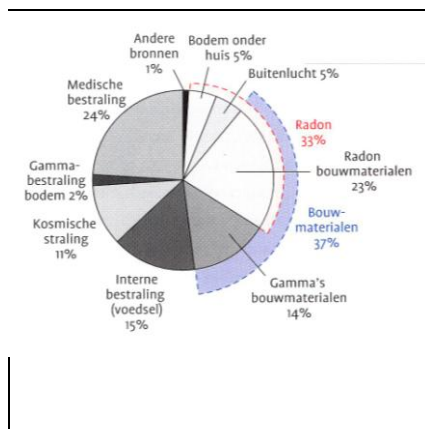
### Kunstmatige stralingsbronnen

Bovenop de gemiddelde equivalente dosis van zo'n 1,8 mSv per jaar door de natuurlijke achtergrondstraling komt een extra dosis door kunstmatige bronnen, zoals weergegeven in de tabel van figuur 2. De grootste bijdrage wordt geleverd door medische toepassingen. De equivalente dosis is daarbij van geval tot geval verschillend, maar gemiddeld wordt de dosis als gevolg van medische diagnostiek geschat op 0,6 mSv per jaar per persoon. Bij stralingstherapie worden veel hogere doses gebruikt, maar die worden bij het bepalen van de gemiddelde stralingbelasting niet meegeteld. Naast medische toepassingen zijn er talrijke andere bronnen van kunstmatige straling zoals kernreactoren, opslagplaatsen van radioactief afval, deeltjesversnellers, consumentenproducten (zoals rookmelders en beeldschermen) en de fall-out als gevolg van het Tsjernobyl-reactorongeluk in 1986 en atoombomproeven.

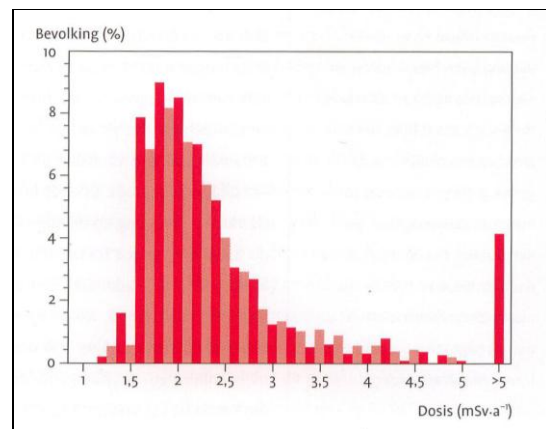
Bron	Equivalente dosis (mSv/jaar)
Natuurlijke achtergrondstraling	1,8
Medische toepassingen	0,6
Andere bronnen	0,02
<b>Totaal</b>	<b>2,4</b>

Figuur 2 – Stralingsbelasting door bronnen van natuurlijke achtergrondstraling en kunstmatige bronnen. Bron: RIVM (2006), van der Woude & de Meijer (2003).

Het cirkeldiagram van figuur 3 geeft op een andere manier een overzicht van de bijdrage van de verschillende bronnen aan de gemiddelde stralingsbelasting van 2,4 mSv per jaar voor iedere inwoner van Nederland. In dit diagram is te zien dat het radioactieve gas radon de grootste bijdrage levert aan de natuurlijke stralingsbelasting in Nederland. De bronnen van radon in Nederlandse woningen zijn vooral de bouwmaterialen, de grond onder de woning en de buitenlucht. De lokale radonconcentratie in de buitenlucht hangt af van de grondsoort en de weersomstandigheden. Gemiddeld over een jaar verschilt die in Nederland een factor drie.



Figuur 3 – De bijdrage van de verschillende bronnen aan de gemiddelde equivalente dosis van 2,4 mSv/jaar per inwoner van Nederland. Bron: van der Woude & de Meijer (2003).



Figuur 4 – Het aantal inwoners van Nederland, in procenten van het totale aantal, dat aan een bepaalde dosis is blootgesteld. De gemiddelde equivalente dosis is 2,4 mSv/jaar. Bron: van der Woude & de Meijer (2003).

Door verschillen in natuurlijke achtergrondstraling en medische bestraling is de jaarlijkse stralingsbelasting per persoon verschillend. In het diagram van figuur 4 is te zien welk percentage van het aantal inwoners van Nederland aan een bepaalde dosis is blootgesteld. Het is duidelijk dat de equivalente dosis van 2,4 mSv per jaar voor een inwoner van Nederland een *gemiddelde* is. De jaarlijkse equivalente dosis wordt mede bepaald door activiteiten in de vrije tijd, door medische toepassingen en tijdens het werk. De tabel van figuur 5 geeft een paar voorbeelden.

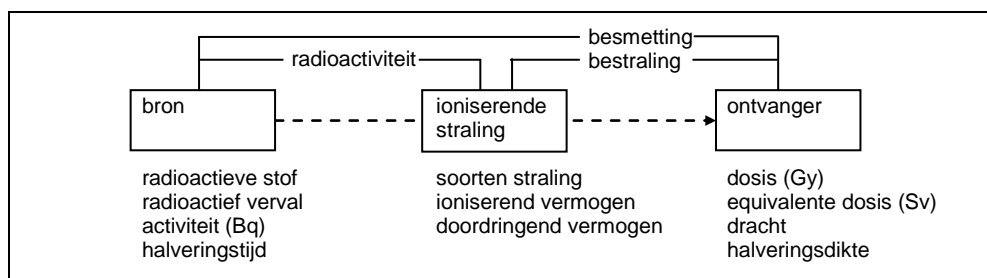
Bron	Equivalente dosis
Vliegreis (10 km hoogte)	5 $\mu$ Sv/uur
Wintersportvakantie (2000 m hoogte)	30 $\mu$ Sv/week
Röntgenfoto borstholte	90 $\mu$ Sv
Röntgenfoto gebit	0,1 mSv
Röntgenfoto borsten (mammografie)	0,1 mSv
Röntgenfoto hoofd-nekgebied	0,2 mSv
Röntgenfoto heup	0,8 mSv
CT-scan hoofd	1,2 mSv
CT-scan lichaam	1,2 mSv
Scintigram schildklier met $^{131}\text{I}$	4,3 mSv
Scintigram skelet met $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (750 MBq)	6 mSv
Scintigram hartspier met $^{201}\text{Tl}$	17 mSv
Ioniserende Stralen Practicum	0,2 $\mu$ Sv/uur

Figuur 5 – Stralingsbelasting door activiteiten in de vrije tijd, door medische toepassingen en tijdens het werk.

De extra dosis door vliegvlagen en wintersportvakanties is het gevolg van de hoogte waarop deze activiteiten in de aardatmosfeer plaatsvinden: een hoogte waarop de stralingsbelasting door de natuurlijke achtergrondstraling groter is.

### Bestraling en besmetting

Het effect van ioniserende straling op levend weefsel hangt onder andere af van de vraag of er sprake is van *bestraling* of *besmetting*. In het schema van figuur 6 is een aantal begrippen gerangschikt volgens de indeling bron – straling – ontvanger. De begrippen bestraling en besmetting vormen een verbinding tussen de elementen bron, straling en ontvanger.



Figuur 6 – Het schema bron – straling – ontvanger met enkele bijbehorende basisbegrippen.

Bij *bestraling* hebben we te maken met een proces waarbij een ontvanger door straling wordt getroffen, en bij *besmetting* met een toestand waarbij een ontvanger radioactieve stoffen (een bron) bevat.

Bij bestraling bevindt de bron zich buiten het lichaam. Bij deze *uitwendige bestraling* is  $\alpha$ -straling vrijwel ongevaarlijk. De  $\alpha$ -deeltjes geven hun energie af aan de dode cellen in de hoorlaag van de opperhuid. De  $\beta$ -deeltjes dringen iets dieper door, maar het is de  $\gamma$ -straling die diep in het lichaam kan doordringen en daar ionisaties veroorzaakt.

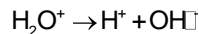
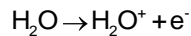
Bij besmetting bevindt de bron zich op of in het lichaam. Besmetting met radioactieve stoffen *op* het lichaam veroorzaakt weer *uitwendige bestraling* met vergelijkbare risico's. Bij *inwendige bestraling* door radioactieve stoffen *in* het lichaam ligt dat anders. In dit geval is de  $\alpha$ -straling veel gevaarlijker dan de  $\gamma$ -straling, omdat de  $\alpha$ -deeltjes nu hun energie afgeven

aan levende cellen en daarbij een groot aantal ionisaties per cel veroorzaken. De  $\beta$ -straling neemt nu een tussenpositie in.

Bij een groot deel van de stralingsbronnen in de tabellen van figuur 1 en 2 is sprake van uitwendige bestraling. Maar de stralingsbronnen die via water, voedsel en lucht het lichaam binnenkomen veroorzaken inwendige bestraling. Vooral de  $\alpha$ -stralers (zoals  $^{220}\text{Rn}$  en  $^{222}\text{Rn}$ ) en in mindere mate de  $\beta$ -stralers (zoals  $^{40}\text{K}$ ) vormen daarbij een risicofactor.

### Stralingseffecten

De biologische effecten van ioniserende straling zijn vooral het gevolg van de vorming van vrije radicalen in de cel. Onder invloed van ioniserende straling kunnen in water – een belangrijk onderdeel van levend weefsel – vrije radicalen worden gevormd. De eerste stap is daarbij de ionisatie van het watermolecuul, dat daarna uiteenvalt in twee ionen:



De stip bij  $\text{OH}^\cdot$  geeft aan dat het hier om een vrije radicaal gaat. Het kenmerk van een vrije radicaal is dat het een ongepaard elektron bezit en daardoor vrij agressief reageert met andere moleculen. Ze hebben een levensduur met een grootte-orde van  $10^{-5}$  s. Maar die korte levensduur is lang genoeg om met andere organische moleculen zoals het DNA in de cel te reageren en deze daardoor te beschadigen. Een dergelijke reactie kan zelfs leiden tot een breuk in het DNA.

De cel heeft een aantal mogelijkheden om de DNA-schade te repareren. Als dat niet lukt, kan de celstofwisseling verstoord raken of kan de cel het vermogen om te delen verliezen. Er is dan sprake van celdood. Wordt de DNA-schade onvolledig, verkeerd of niet op tijd hersteld, dan heeft dat invloed op het functioneren van de cel: de cel kan andere eiwitten gaan produceren, of bepaalde eiwitten worden juist niet meer aangemaakt. Deze DNA-schade wordt bovendien bij celdeling doorgegeven aan de dochtercellen. Een verstoring van het mechanisme van de celdeling kan ook leiden tot het ontstaan van tumoren.

De effecten van ioniserende straling op levend weefsel zijn te onderscheiden in *somatische* en *genetische* effecten.

**Vroeg somatische effecten** – Enkele uren tot hoogstens enkele weken na bestraling van het gehele lichaam treden de *vroeg* of *acuut somatische effecten* op. Deze effecten zijn het gevolg van de grote stralingsgevoeligheid van snel delende cellen in organen en weefsels als bijvoorbeeld het beenmerg en de lymfeklieren (die beide een rol spelen bij de productie van bloedcellen) en de geslachtsklieren. Om dezelfde reden is ook het embryo gevoelig voor stralingsschade. De tabel van figuur 7 geeft een overzicht van deze effecten.

Equivalentente dosis (Sv)	Effect
0,2 – 1	Tijdelijke vermindering van het aantal witte bloedlichaampjes.
1 – 2	Lichte verschijnselen van <i>stralingsziekte</i> binnen enkele uren na bestraling: vermoeidheid, braken en verminderde weerstand tegen infectie. Bij kinderen mogelijk beschadiging van de groeizones in het skelet.
2 – 3	Ernstige stralingsziekte als gevolg van beschadiging van beenmerg en lymfeklieren (beenmergsyndroom). Eventueel overlijden binnen een maand als gevolg van inwendige bloedingen.
3 – 4	Ernstige stralingsziekte. Sterftekans meer dan 50% binnen twee weken na bestraling.
4 – 10	Ernstige stralingsziekte. Sterftekans vrijwel 100% binnen een maand.
10 – 50	Darmsyndroom. Overlijden binnen enkele dagen door vochtverlies.
> 50	Centraal zenuwstelselsyndroom. Overlijden binnen enkele uren.

Figuur 7 – Overzicht van de vroeg of acuut somatische effecten afhankelijk van de dosis bij bestraling van het gehele lichaam.

Bij plaatselijke bestraling kunnen dezelfde symptomen optreden als bij stralingsziekte, met name bij overbestraling van het beenmerg, de hersenen en de buik. Daarnaast zijn er meer specifieke gevolgen bij bestraling van bepaalde weefsels en organen: rood worden van de huid (erytheemvorming), haaruitval, staarvorming in de ogen en steriliteit.

Bestraling van het menselijk embryo met een dosis groter dan 0,1 Sv kan schadelijk zijn. Behalve de kans op een abortus of vroeggeboorte is er het risico van aangeboren afwijkingen. Met name bestaat de kans op beschadiging van de hersenen, het zenuwstelsel, de ogen en het skelet.

**Laat somatische effecten** – De *laat somatische effecten* van bestraling zijn het optreden van leukemie en de vorming van tumoren. Beschadigingen van het DNA in de celkern leiden in deze gevallen tot ongecontroleerde celdeling. We noemen dit de *laat somatische effecten* omdat er een aantal jaren verloopt tussen het moment van bestraling en het uitbreken van de ziekte. Deze periode is voor leukemie ongeveer 3 tot 6 jaar en voor tumoren in verschillende organen 10 tot 25 jaar.

De kans op het optreden van deze ziektes is groter naarmate de opgelopen dosis groter is geweest. Maar het blijft een kansproces: na blootstelling aan dezelfde dosis treden deze effecten bij de een wel en bij de ander niet op. Het vaststellen van het verband tussen bestraling en kanker is daarom moeilijk. Maar bovendien kan beschadiging van het DNA verschillende oorzaken hebben. Ioniserende straling is er daar maar één van. Andere oorzaken zijn blootstelling aan chemisch mutagene stoffen en ultravioletstraling.

**Genetische effecten** – Genetische effecten zijn het gevolg van veranderingen in het DNA van geslachtscellen: genmutaties. De effecten van deze genmutaties op het nageslacht kunnen beperkt blijven tot iets onschuldigs als de haarkleur. Maar ze kunnen ook leiden tot de dood van het embryo in een vroeg stadium of tot lichamelijke afwijkingen. Het vaststellen van genetische effecten is vrijwel onmogelijk, omdat ook chemisch mutagene stoffen, ultravioletstraling en de natuurlijke achtergrondstraling genmutaties veroorzaken. In veel gevallen waarin sprake lijkt van genetische effecten blijkt het te gaan om kinderen die in de periode van bestraling al verwekt waren en daardoor zelf (in het lichaam van de moeder) een stralingsdosis hebben ontvangen. Zij hebben geen erfelijke maar aangeboren afwijkingen.

### Stralingsbescherming

Aan de jaarlijkse dosis als gevolg van de natuurlijke achtergrondstraling valt niet te ontkomen. Maar de extra dosis moet zo laag mogelijk blijven. Toepassingen van ioniserende straling moeten dus *gerechtvaardigd* zijn, als ze gerechtvaardigd zijn moet de extra dosis *zo laag mogelijk* en in elk geval onder de *dosislimiet* blijven.

**Rechtvaardiging** – Voor het gebruiken van radioactieve bronnen en röntgenbuizen is een vergunning nodig. Die vergunning wordt alleen verleend als het gebruik van deze stralingsbronnen gerechtvaardigd is. Dat betekent dat de voordelen van het gebruik van ioniserende straling moeten opwegen tegen de nadelen. Zo weegt het voordeel van het maken van een röntgenfoto bij een gebroken been op tegen het nadeel van de daarbij opgelopen extra dosis. Een dergelijke afweging geldt bij veel medische toepassingen van ioniserende straling. Maar ook in de gezondheidszorg moet een arts zich voortdurend afvragen of het maken van een röntgenfoto wel nodig is als hij of zij de diagnose ook kan stellen met *echoscopie* of *magnetic resonance imaging* (MRI) – medische beeldvormingstechnieken zonder stralingsbelasting.

Soms ontbreekt die rechtvaardiging, zoals bij het gebruik van waterstof-3 (tritium) in de 'lichtjes' van hengels en bij het gebruik van een röntgenapparaat om te zien of schoenen wel goed passen. Dit soort toepassingen is dan ook inmiddels verboden.

**Optimalisering** – Het zoeken naar manieren om met een zo laag mogelijke dosis toch een goed resultaat te krijgen noemen we optimalisering. Er is dan sprake van toepassing van het *ALARA-principe*. Het woord ALARA is een afkorting van het Engelse 'As Low As Reasonably Achievable'. Het wordt gebruikt om aan te geven dat een extra dosis zo laag moet zijn als redelijkerwijs mogelijk is. Door technische ontwikkelingen als het gebruik van bijvoorbeeld een beeldversterker is de stralingsdosis die nodig is voor het maken van een goede röntgenfoto in de loop van de tijd steeds lager geworden. Dit brengt echter wel extra kosten voor de apparatuur met zich mee. En ook hier is dus sprake van een afweging: weegt het nadeel van de extra kosten op tegen het voordeel van een lagere dosis?

**Limitering** – Ook al is bij toepassingen van ioniserende straling de gemiddeld opgelopen dosis voldoende laag, voor bepaalde personen kan gelden dat zij toch een te hoog risico lopen. Om dit individuele risico te beperken zijn *dosislimieten* ingevoerd. Zo'n dosislimiet is geen grens tussen veilig en onveilig, maar een bovengrens aan het individuele risico van personen. Deze dosislimieten worden voorgesteld door de *International Commission on Radiological Protection* (ICRP). De Nederlandse regering heeft deze voorstellen in de wet vastgelegd. Voor mensen die in hun beroep met stralingsbronnen werken (de stralingswerkers) is de dosislimiet 20 mSv/jaar als gemiddelde over een periode van vijf jaar, met een maximum van 50 mSv/jaar. Voor de bevolking is de stralingsnorm veel strenger: 1

mSv/jaar als gemiddelde over een periode van vijf jaar.

Bij deze dosislimieten wordt geen onderscheid gemaakt tussen een dosis opgelopen door uitwendige of inwendige bestraling. Bovendien valt de stralingsbelasting door de natuurlijke achtergrondstraling en door medische toepassingen van ioniserende straling volledig buiten deze dosislimieten.

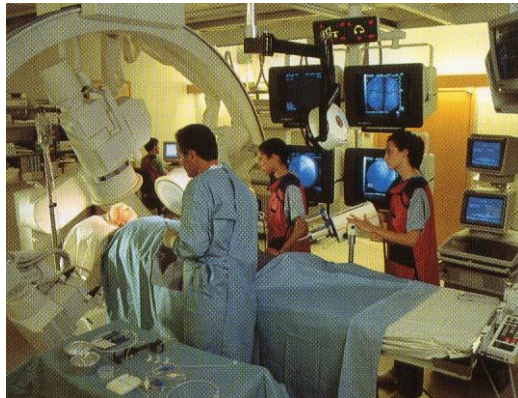
### Veiligheidsmaatregelen

Om het stralingsrisico voor stralingswerkers te beperken is een drietal maatregelen mogelijk: *afscherming* van de bron, verkorten van de *manipulatielijd* en vergroten van de *afstand* tot de bron.

**Afscherming** – De opgelopen dosis hangt af van de afscherming met absorberend materiaal tussen de bron en de ontvanger, zoals aluminium, lood, beton, staal, loodglas enzovoort. Het gebruikte afschermingsmateriaal hangt af van de soort straling die wordt uitgezonden. Het doordringend vermogen van  $\alpha$ - en  $\beta$ -straling is relatief klein, zodat daarbij de afscherming licht en dun kan zijn. Voor röntgen- en  $\gamma$ -straling is een dikke afscherming met materialen als lood en beton nodig.

**Manipulatielijd** – De opgelopen extra dosis is recht evenredig met de manipulatielijd – de tijd dat een stralingswerker met de bron bezig is. De manipulatielijd is te verkorten door eerst te oefenen met een dummybron.

**Afstand** – De opgelopen extra dosis is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tussen de bron en de ontvanger. Het gaat hierbij om een puntbron die  $\beta$ - of  $\gamma$ -straling uitzendt. Absorptie van deze stralingssoorten door de lucht wordt hierbij verwaarloosd. Voor een  $\alpha$ -bron heeft deze 'kwadratenwet' geen betekenis, omdat de dracht van  $\alpha$ -deeltjes in lucht niet meer is dan een paar cm. De afstand tussen de bron en de ontvanger is te vergroten door het gebruik van een pincet of mechanische armen (handling tools).



Figuur 8 – Het personeel op bijvoorbeeld de röntgenafdeling van een ziekenhuis kan als afscherming een loodschort dragen.



Figuur 9 – Met handling tools achter een afscherming van bijvoorbeeld loodglas zijn bewerkingen op afstand uit te voeren.

Bij het werken met *gesloten* bronnen – waarbij de radioactieve stoffen zitten opgesloten in een gesloten omhulsel – is het risico van besmetting vrijwel afwezig. Voor het werken met *open* bronnen, zoals het manipuleren van radioactieve vloeistoffen of gassen in de apotheek van een ziekenhuis, zijn extra veiligheidsmaatregelen nodig om te voorkomen dat werkoppervlakken en de lucht in de werkruimte besmet raken.

### Bronnen

- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) (2006), Dossier straling. Website: <http://www.milieuennatuurcompendium.nl>
- van der Woude, A. & R.J. de Meijer (2003), *Radioactiviteit*. Wetenschappelijke Bibliotheek deel 77, Natuurwetenschap & Techniek.