



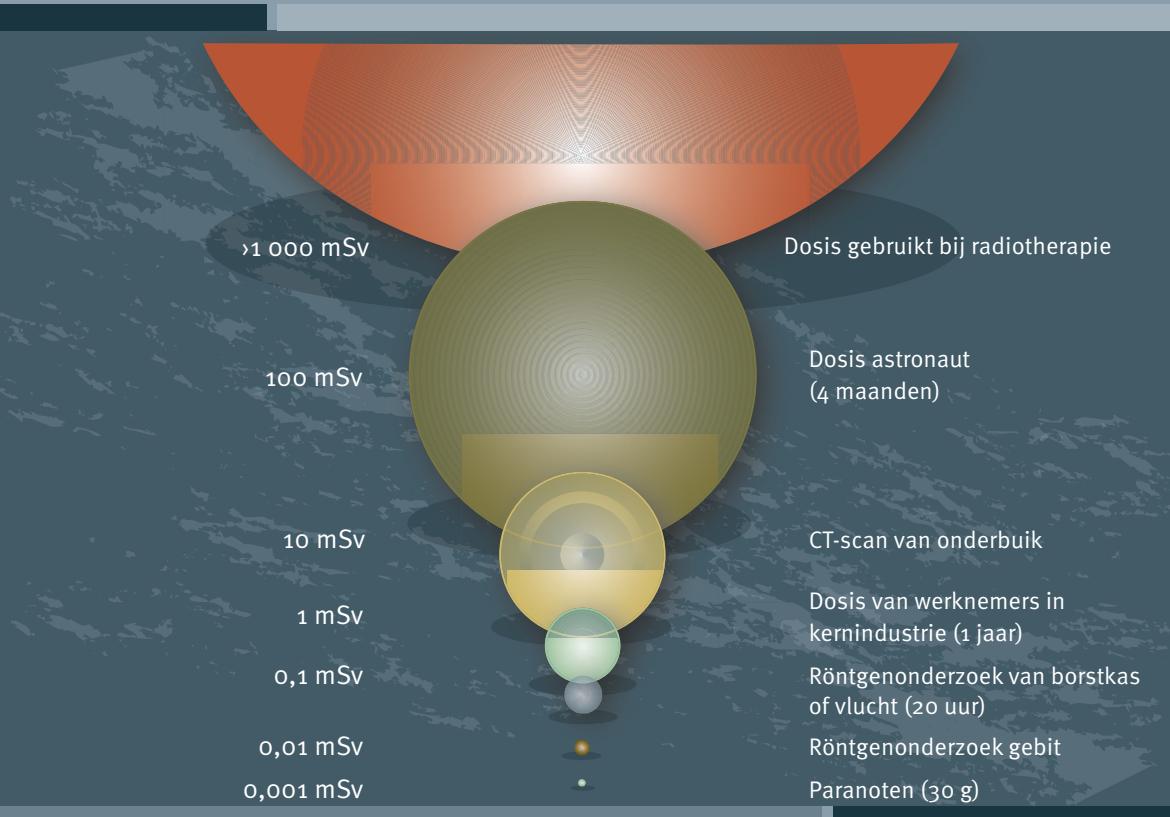
STRALING

EFFECTEN EN BRONNEN

Wat is straling?

Wat doet straling met ons?

Waar komt straling vandaan?





STRALING

EFFECTEN EN BRONNEN

Wat is straling?
Wat doet straling met ons?
Waar komt straling vandaan?

Milieuprogramma van de Verenigde Naties

DISCLAIMER

Deze brochure is grotendeels gebaseerd op de bevindingen van het Wetenschappelijk Comité van de Verenigde Naties inzake de gevolgen van atoomstraling (UNSCEAR), een hulporgaan van de Algemene Vergadering van de Verenigde Naties, waarvoor het secretariaat wordt waargenomen door het Milieuprogramma van de Verenigde Naties (UNEP). De in deze publicatie vervatte informatie geeft niet noodzakelijkerwijs de standpunten of meningen van UNSCEAR of van het UNEP weer.

Met de keuze voor bepaalde aanduidingen of een bepaalde presentatie van het materiaal in deze brochure neemt het UNEP geen standpunt in over de wettelijke status van een land, gebied, stad of regio, noch over de autoriteiten en de grenzen ervan.

Mits de bron wordt vermeld, is het zonder speciale toestemming van de auteursrecht-hebbende toegestaan deze brochure gedeeltelijk, in welke vorm of op welke wijze, te verveelvoudigen voor educatieve en niet-commerciële doeleinden. Het UNEP zou het op prijs stellen een exemplaar te ontvangen van elke uitgave waarvoor deze brochure als bron wordt gebruikt.

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het UNEP mag niets uit deze brochure worden gebruikt voor (weder)verkoopdoeleinden of enige andere commerciële doelstellingen.

Het UNEP promoot milieuvriendelijke praktijken, wereldwijd en in zijn eigen activiteiten. Deze brochure is gedrukt op 100% chloorvrij kringlooppapier. Het UNEP streeft in zijn distributiebeleid naar een vermindering van zijn koolstofvoetafdruk.

Oorspronkelijke titel: Straling: effecten en bronnen, Milieuprogramma van de Verenigde Naties, 2016

ISBN: 978-92-807-3601-4

Job No.: DEW/2037/NA

Copyright © Milieuprogramma van de Verenigde Naties (UNEP), 2016

Elektronische versie



STRALING

EFFECTEN EN BRONNEN

Wat is straling?
Wat doet straling met ons?
Waar komt straling vandaan?

Milieuprogramma van de Verenigde Naties

DANKWOORD

Deze brochure is grotendeels gebaseerd op de bevindingen van het Wetenschappelijk Comité van de Verenigde Naties inzake de gevolgen van atoomstraling (UNSCEAR) alsook op de publicatie van het Milieuprogramma van de Verenigde Naties (UNEP), getiteld *Radiation: doses, effects, risks*, die aanvankelijk in 1985 en 1991 werd uitgegeven door Geoffrey Lean.

Deze brochure is oorspronkelijk opgesteld in het Engels. De vertaling werd verzorgd door het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (België), het Studiecentrum voor Kernenergie (België), de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (Nederland) en het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (Nederland). In geval van verschillen tussen taalversies heeft de origineel versie voorrang.

Technische bewerking: Malcolm Crick en Ferid Shannoun

Tekstbewerking: Susan Cohen-Unger en Ayhan Evrensel

Grafische vormgeving en lay-out: Alexandra Diesner-Kuepfer

De volgende personen hebben met hun opmerkingen en commentaar een waardevolle bijdrage geleverd aan de totstandkoming van deze brochure:

Laura Anderson, John Cooper, Susan Cueto-Habersack, Emilie van Deventer, Gillian Hirth, David Kinley, Vladislav Klener, Kristine Leysen, Kateřina Navrátilová-Rovenská, Jaya Mohan, Wolfgang-Ulrich Müller, Maria Pérez, Shin Saigusa, Bertrand Thériault, Hiroshi Yasuda en Anthony Wrixon.

WOORD VOORAF

Namen zoals Hiroshima, Nagasaki, Three Mile Island, Tsjernobyl en Fukushima-Daiichi worden vaak in één adem genoemd met de angst voor straling die bij de bevolking leeft, zowel ten aanzien van het gebruik van kernwapens als wat ongevallen in kerncentrales betreft. Niettemin wordt de mens dagelijks in veel hogere mate blootgesteld aan straling uit tal van andere bronnen, waaronder de lucht en de aarde, maar ook als gevolg van de toepassing van straling in de geneeskunde en de industrie.

Kernproeven deden in 1955 bij het publiek grote bezorgdheid rijzen over de gevolgen van atoomstraling voor de kwaliteit van lucht, water en voedsel. Als reactie daarop heeft de Algemene Vergadering van de Verenigde Naties het Wetenschappelijk Comité van de Verenigde Naties inzake de gevolgen van atoomstraling (UNSCEAR) opgericht met als taak inlichtingen te verzamelen en te evalueren over de niveaus en effecten van stralingsblootstelling. In het eerste verslag van UNSCEAR werden de wetenschappelijke grondslagen gelegd om te onderhandelen over het gedeeltelijk kernstopverdrag (ook bekend als PTBT, wat staat voor Partial Test Ban Treaty) van 1963, dat voorzag in een verbod op atmosferische proefnemingen met kernwapens. Sindsdien heeft UNSCEAR diverse andere gezaghebbende verslagen over stralingsblootstelling gepubliceerd, onder meer over de ongevallen in de kerncentrales van Tsjernobyl en Fukushima-Daiichi. UNSCEAR heeft altijd waardevol werk geleverd, waarvan de resultaten niet alleen de wetenschappelijke wereld, maar ook beleidsmakers ten goede komen.



In wetenschappelijke kringen werd weliswaar ook informatie over stralingsbronnen en -effecten gepubliceerd, maar die was veelal technisch van aard en wellicht moeilijk te begrijpen voor het grote publiek. Dit gebrek aan duidelijkheid heeft het publiek meer in de war gebracht dan vooruitgeholpen, waardoor de angst en verwarring van de afgelopen decennia nog steeds de overhand hebben. Deze brochure wil die onduidelijkheid wegnemen, en beoogt helderheid te brengen in de meest recente wetenschappelijke informatie van UNSCEAR – over de soorten straling, bronnen van straling en de effecten daarvan op mens en milieu. Opzet is die informatie inzichtelijk te maken voor de doorsneelezer.

Vandaag is het UNSCEAR-secretariaat werkzaam onder het toezicht van het Milieuprogramma van de Verenigde Naties (UNEP), dat landen helpt een vanuit mili-

euroogpunt gezond beleid te voeren en milieuvriendelijke praktijken toe te passen. Het behoort tot de kerntaak van het UNEP om het publiek beter inzicht te verschaffen in straling en duidelijk te maken wat de gevolgen daarvan zijn voor het leven op deze planeet.

Ik wil dan ook iedereen die aan de totstandkoming van deze brochure heeft bijgedragen van harte feliciteren. Verder richt ik een dankwoord aan alle leden van UNSCEAR en hun delegaties, die zich de afgelopen zes decennia vol ijver en toewijding hebben ingezet voor deze uitermate belangrijke problematiek.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Achim Steiner".

Achim Steiner
UNEP Uitvoerend directeur en
Ondersecretaris-generaal van de Verenigde Naties

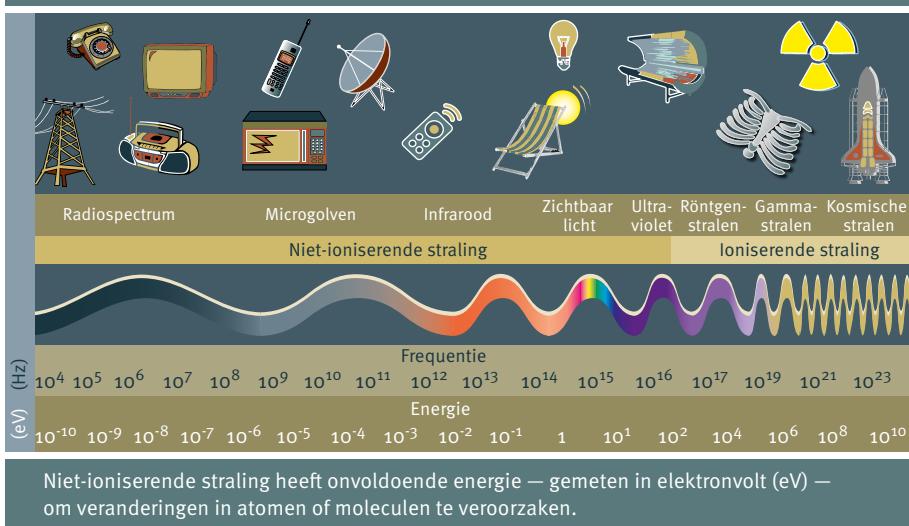
INHOUDSOPGAVE

INLEIDING	1
1. WAT IS STRALING?	3
1.1.Een beetje geschiedenis	3
1.2. Enkele basisbegrippen	4
Radioactief verval en halveringstijd	6
Enheden van straling	7
1.3. Doordringingsvermogen van straling	9
2.WAT DOET STRALING MET ONS?	11
2.1. Effecten op de mens	13
Vroege gezondheidseffecten	14
Late gezondheidseffecten	15
Effecten op het nageslacht	18
2.2. Effecten op dieren en planten	22
2.3. Relatie tussen stralingsdoses en -effecten	24
3. WAAR KOMT STRALING VANDAAN?	27
3.1. Natuurlijke stralingsbronnen	28
Kosmische stralingsbronnen	28
Aardse stralingsbronnen	29
Stralingsbronnen in voedsel en drank	32
3.2. Kunstmatige stralingsbronnen	32
Medische toepassingen	33
Kernwapens	37
Kernreactoren	39
Industriële en andere toepassingen	48
3.3. Gemiddelde stralingsblootstelling van bevolking en werknemers	54

INLEIDING

Eerst en vooral moeten we onderscheid maken tussen ioniserende straling en niet-ioniserende straling. *Ioniserende straling* heeft voldoende energie om elektronen uit atomen te verwijderen; bij dit proces, ionisatie genoemd, blijven elektrisch geladen deeltjes (ionen) achter op atoomniveau. *Niet-ioniserende straling* daarentegen, zoals radiostraling (radiogolven), zichtbaar licht of ultraviolette straling, bevat onvoldoende energie om een ionisatieproces op gang te brengen. Deze brochure handelt over de effecten van blootstelling aan straling van natuurlijke en kunstmatige bronnen. Daarbij wordt met de term *stralings* in deze brochure uitsluitend de ioniserende straling bedoeld.

Voorbeelden van toepassingen waarin straling wordt gebruikt



Vandaag is over de bronnen en effecten van stralingsblootstelling meer bekend dan over de meeste andere gevaarlijke stoffen. De kennis ter zake wordt voortdurend geactualiseerd en verder uitgediept door wetenschappers. De meeste mensen weten dat straling wordt gebruikt in kerncentrales voor het opwekken van elektriciteit of in medische toepassingen. Over talloze andere toepassingen van nucleaire technologie, bijvoorbeeld in industrie, landbouw, bouwbedrijf, onderzoek en op diverse andere gebieden, is weinig of niets bekend. Wie voor het eerst iets over dit onderwerp leest, zal wellicht tot zijn grote verbazing vernemen dat de stralingsbronnen waaraan het publiek het meest is blootgesteld, niet noodzakelijkerwijs de bronnen zijn die de meeste aandacht krijgen. In werkelijkheid wordt de hoogste stralingsblootstelling veroorzaakt door natuurlijke bronnen die altijd en overal in ons

leefmilieu aanwezig zijn. Verder is de blootstelling aan kunstmatige bronnen overwegend het gevolg van het wijdverbreide gebruik van straling in de geneeskunde. Bovendien kan onze dagelijkse levensstijl, zoals reizen per vliegtuig en wonen in goed geïsoleerde huizen in bepaalde delen van de wereld, de stralingsblootstelling fors doen toenemen.

Met deze brochure willen het Milieuprogramma van de Verenigde Naties (UNEP) en het secretariaat van het Wetenschappelijk comité van de Verenigde Naties inzake de gevolgen van atoomstraling (UNSCEAR) bijdragen aan een betere voorlichting over en een grotere bewustwording van bronnen, niveaus en effecten van blootstelling aan ioniserende straling. UNSCEAR werd in 1955 opgericht door de Algemene Vergadering van de Verenigde Naties en brengt vooraanstaande wetenschappers uit zeventewintig VN-lidstaten samen om op wereldschaal onderzoek te verrichten naar stralingsblootstelling en de daarmee samenhangende effecten en risico's. UNSCEAR legt zelf geen veiligheidsnormen vast en doet evenmin aanbevelingen op dat gebied, maar wil wetenschappelijke informatie aanreiken zodat nationale autoriteiten en andere bevoegde instanties normerend kunnen optreden. De wetenschappelijke evaluaties die UNSCEAR de afgelopen zestig jaar heeft uitgevoerd, vormen de belangrijkste bron van informatie voor deze brochure.

1. WAT IS STRALING?

Voordat we kunnen spreken over niveaus, effecten en risico's van stralingsblootstelling, moeten we enkele basisbegrippen uit de stralingswetenschap verduidelijken. Radioactiviteit en de straling die daarvan het gevolg is, bestonden al lang voordat er leven op aarde was. Zij waren in de ruimte aanwezig sinds het begin van het heelal. Al van bij het prille begin komt radioactief materiaal van nature op aarde voor. De mens heeft dit universele natuurverschijnsel pas aan het eind van de negentiende eeuw ontdekt, en tot op vandaag worden nog nieuwe gebruikswijzen ervan gevonden.

1.1. Een beetje geschiedenis

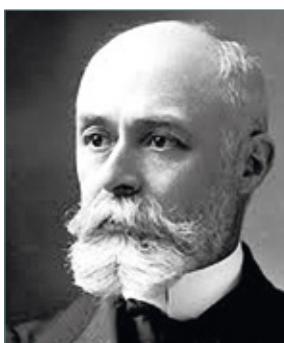
In 1895 ontdekte de Duitse natuurkundige **Wilhelm Conrad Röntgen** röntgenstraling. Hij noemde die X-stralen en zag de mogelijkheid om daarmee binnenin het menselijk lichaam te kijken. Deze ontdekking betekende meteen het begin van het gebruik van straling in de geneeskunde. Sindsdien zijn de medische toepassingen ervan gestaag toegenomen. Als blijk van erkenning ontving Röntgen in 1901 de Nobelprijs voor natuurkunde omdat hij zich in buitengewone mate verdienstelijk had gemaakt voor de mensheid. Eén jaar na de ontdekking van Röntgen borg de Franse natuurkundige **Henri Becquerel** enkele fotografische platen samen met uraniumhoudende mineraalmonsters veilig in een lade op. Toen hij later de fotografische platen ontwikkelde, ontdekte hij tot zijn verbazing dat ze door straling waren aangetast. Dit verschijnsel, radioactiviteit genoemd, treedt op wanneer energie spontaan vrijkomt uit atomen. Vandaag wordt **radioactiviteit** uitgedrukt in becquerel (Bq), genoemd naar Henri Becquerel. Het onderzoek werd kort daarop voortgezet door een jonge scheikundige, **Marie Skłodowska-Curie**, die als eerste de naam « radioactiviteit » gaf aan het door Becquerel ontdekte stralingsfenomeen. In 1898 ontdekte zij samen met haar echtgenoot, **Pierre Curie**, dat uranium door straling af te geven op mysterieuze wijze in andere elementen veranderde, waarvan zij het eerste polonium noemden, naar haar geboorteland Polen, en het tweede radium, naar het Latijnse woord voor straling.



Wilhelm C. Röntgen (1845–1923)



Marie Curie (1867–1934)



Henri Becquerel (1852–1908)

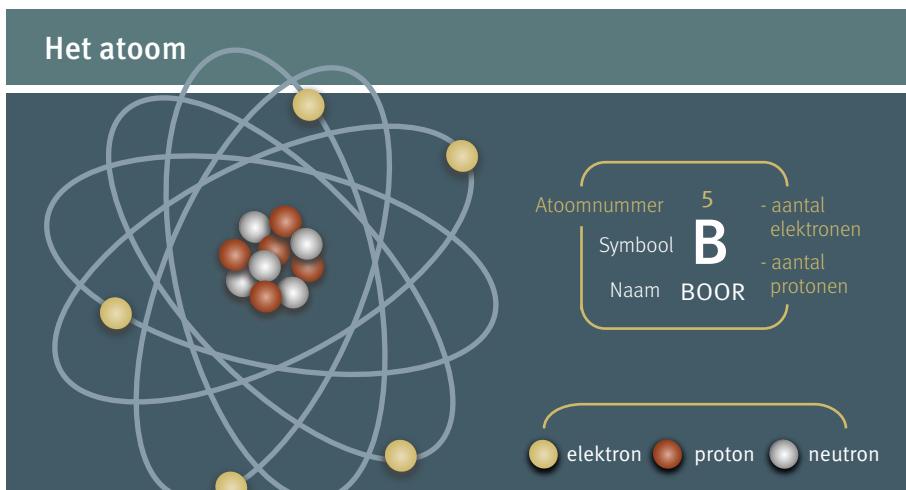
Marie Curie deelde in 1903 de Nobelprijs voor natuurkunde met haar man Pierre en met Henri Becquerel. Zij was de eerste vrouw die de Nobelprijs voor een tweede keer in ontvangst mocht nemen in 1911 voor haar verdiensten op het gebied van stralingschemie.

1.2. Enkele basisbegrippen

Sinds mensenheugenis proberen wetenschappers het *atoom* en meer in het bijzonder de structuur ervan te doogronden. Het is bekend dat een atoom uit een uiterst kleine, positief geladen kern (nucleus) bestaat, met daaromheen een wolk van negatief geladen *elektronen*. De atoomkern is ongeveer honderdduizend keer kleiner dan het atoom zelf. Vanwege de dichtheid is vrijwel de volledige atoommassa in de kern vervat.

De atoomkern of nucleus bestaat doorgaans uit een cluster van deeltjes, *protonen* en *neutronen*, die sterk met elkaar verbonden zijn. Protonen hebben een positieve elektrische lading, terwijl de neutronen ladingloos zijn. Het atoomnummer van chemische elementen wordt bepaald door het aantal protonen in de atoomkern. Zo heeft boor bijvoorbeeld het atoomnummer 5, wat betekent dat het 5 protonen heeft, terwijl uranium het atoomnummer 92 heeft (= 92 protonen). Elementen met hetzelfde aantal protonen, maar een verschillend aantal neutronen worden *isotopen* genoemd (zo heeft uranium-235 bijvoorbeeld drie neutronen minder dan uranium-238). Normaal gezien heeft het atoom in zijn geheel geen lading: het is elektrisch neutraal omdat het aantal negatief geladen elektronen gelijk is aan het aantal positief geladen protonen.

Het atoom

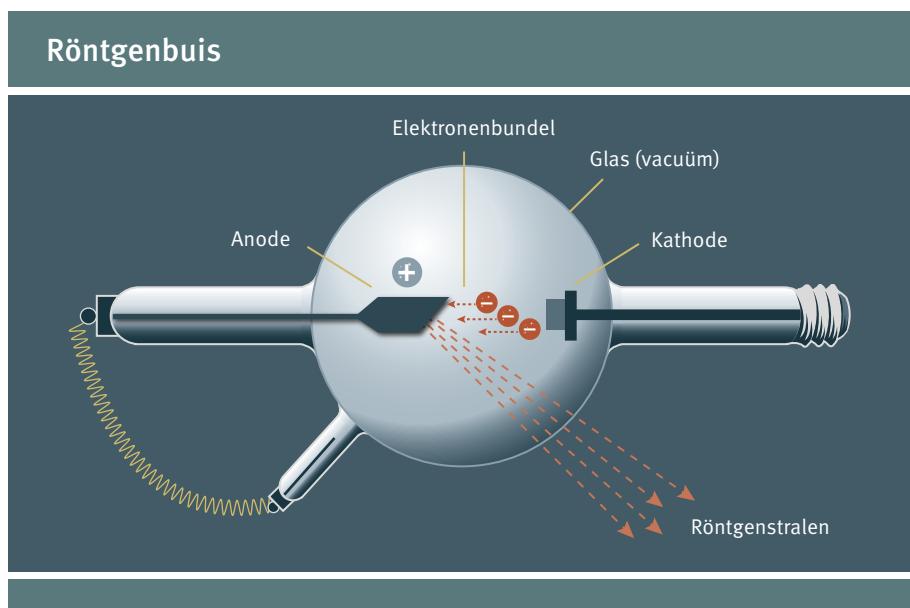


The diagram illustrates the structure of an atom. At the center is a nucleus composed of several small, brownish-red spheres (protons) and white spheres (neutrons). Surrounding the nucleus are five larger, yellowish spheres (electrons) moving in elliptical orbits. To the right, a legend identifies the components: a yellow circle for an electron, a brown circle for a proton, and a grey circle for a neutron. Below the legend, a box contains the atomic symbol for Boron: 'Atoomnummer 5', 'Symbol B', and 'Naam BOOR'. It also states that the number 5 represents the 'aantal elektronen' and 'aantal protonen'.

Een atoom bestaat uit een kern (nucleus) van ongeladen neutronen en positief geladen protonen. Rondom de positief geladen kern bevindt zich een negatief geladen elektronenwolk. Bij ongeladen atomen is het aantal elektronen in de elektronenwolk gelijk aan het aantal protonen in de kern. Het atoomnummer (of atoomgetal) geeft het aantal protonen in de atoomkern van een element aan.

Sommige atomen zijn van nature stabiel. Andere atomen zijn instabiel. Atomen met een instabiele kern – die spontaan uiteenvallen en daarbij stralingsenergie afgeven – worden *radionucliden* genoemd en het spontaan uiteenvallen heet *radioactief verval*. De bij dit radioactief verval vrijkomende stralingsenergie kan inwerken op andere atomen en die ioniseren. *Ionisatie* is het proces waarbij een atoom positief of negatief geladen wordt door elektronen op te nemen of af te staan. Bij ioniserende straling is voldoende energie beschikbaar om elektronen van andere atomen uit hun baan rond de kern te stoten, waardoor elektrisch geladen atomen ontstaan die *ionen* worden genoemd. Het radioactief verval kan op verschillende manieren plaatsvinden, maar voor eenzelfde radionuclide gebeurt het volgens een vast patroon. *Alfaverval* (ook wel alfadesintegratie genoemd) is het proces waarbij tegelijk twee protonen en twee neutronen worden uitgezonden. *Bètaverval* (ook wel bekend als bètadesintegratie) is het proces waarbij elektronen worden uitgezonden. Doorgaans moet het instabiele nuclide naast het alfaverval of betaverval nog meer energie kwijt. Dat gebeurt door elektromagnetische golven uit te zenden in de vorm een hoog-energetisch foton (golfpakket), de gammastraling.

Net als gammastralen zijn *röntgenstralen* ook een vorm van elektromagnetische straling, zij het dan met minder hoog-energetische fotonen. Een polyenergetisch röntgenspectrum wordt opgewekt in een glazen vacuümbuis door elektronen die vrijkommen uit de *kathode* te versnellen en als elektronenstraal af te vuren op het trefmateriaal, *anode* genoemd. Het röntgenspectrum hangt af van het anodemateriaal en van de versnellingsenergie van de elektronenstraal. Zo kunnen röntgenstralen op kunstmatige wijze worden gegenereerd precies daar waar ze nodig zijn, wat handig is voor industriële en medische toepassingen.

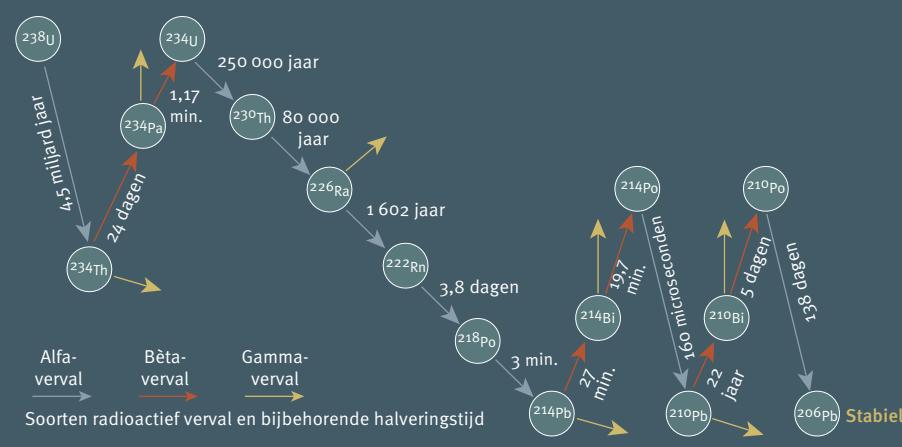


Radioactief verval en halveringstijd

Alle radionucliden zijn instabiel, maar sommige zijn instabieler dan andere. Zo hebben de deeltjes in een uranium-238 atoomkern (met 92 protonen en 146 neutronen) nog maar net genoeg bindingsenergie om niet uiteen te vallen. Uiteindelijk komen twee protonen en twee neutronen los. Zij verlaten het atoom als alfa-deeltje, waardoor uranium-238 vervalt naar thorium-234 (met 90 protonen en 144 neutronen). Thorium-234 is echter ook instabiel en ondergaat een ander verval- of desintegratieproces. Door hoogenergetische elektronen uit te zenden als bêtadeeltjes en een neutron om te zetten in een proton, vervalt het naar protactinium-234, met 91 protonen en 143 neutronen. Dit verval- of desintegratieproduct is echter ook uiterst instabiel en vervalt op zijn beurt naar uranium-234. Het vervalproces door deeltjesemissie gaat verder en eindigt bij de stabiele isotoop lood-206, met 82 protonen en 124 neutronen. Er bestaan heel wat van deze desintegratierreeksen die men **radioactieve vervalreeksen** noemt.

De **halveringstijd** (ook wel halfwaardetijd genoemd) is de tijd waarna van een oorspronkelijke hoeveelheid stof nog precies de helft over is; in de kernfysica geeft de halveringstijd aan hoe lang het duurt om de helft van de atomen te laten vervallen. Zijn er op een bepaald moment één miljoen atomen, dan blijven er na één halveringstijd nog gemiddeld 500 000 over. Na de tweede halveringstijd zijn er nog ongeveer 250 000 atomen over; dit gaat zo door totdat alle atomen vervallen zijn. Na tien halveringstijden blijft er nog slechts één duizendste (0,1%) over van het oorspronkelijke miljoen. In het bovenstaande voorbeeld zou het iets meer dan één minuut

Uranium-238 – radioactieve vervalreeks



duren om de helft van de atomen van protactinium-234 te laten vervallen naar uranium-234. Voor uranium-238 daarentegen, zou het 4,5 miljard (4 500 000 000) jaar duren om de helft van de atomen te laten vervallen naar thorium-234. Dit gezegd hebbende, komen er relatief weinig radionucliden van nature in het milieu voor.

Eenheden van straling

We weten vandaag dat stralingsenergie schadelijk is voor levend weefsel. De hoeveelheid energie die wordt overgedragen op levend weefsel wordt uitgedrukt als *dosis*. De stralingsdosis kan afkomstig zijn van één of meer radionucliden die zich buiten het lichaam bevinden (uitwendige bestraling). Er kan ook sprake zijn van inwendige bestraling wanneer radionucliden worden opgenomen bijvoorbeeld via inhalatie of ingestie. Dosimetrische grootheden worden op verschillende manieren uitgedrukt, afhankelijk van het bestraalde lichaamsoppervlak en de bestraalde lichaamsdelen, het aantal blootgestelde personen en de blootstellingsduur (bijvoorbeeld acute bestraling).



Harold Gray (1905–1965)
Rolf Sievert (1896–1966)

De *geabsorbeerde dosis* is de hoeveelheid opgenomen stralingsenergie per kilogram weefsel en wordt uitgedrukt in gray (Gy). Deze eenheid is vernoemd naar Harold Gray, Brits natuurkundige en pionier van de stralingsbiologie. Hiermee krijgen we echter geen volledig beeld om de eenvoudige reden dat dezelfde geabsorbeerde dosis alfastraling veel schadelijker is dan dezelfde dosis bèta- of gammastraling. Om de bij verschillende stralingssoorten geabsorbeerde doses vergelijkbaar te maken, moeten we een stralingsweegfactor toepassen, die afhangt van de mate waarin elke dosis schadelijke biologische effecten kan veroorzaken. Deze met de stralingsweegfactor gecorrigeerde dosis wordt *equivalente dosis* (of soms ook wel dosisequivalent) genoemd en uitgedrukt in sievert (Sv). Deze eenheid is vernoemd naar de Zweedse medisch fysicus Rolf Sievert. Een millisievert (mSv) is één duizendste van een sievert, net zoals een milliliter één duizendste van een liter is of een millimeter één duizendste van een meter.

Sommige lichaamsdelen zijn meer stralingsgevoelig dan andere. Zo is de kans op longkanker bij een bepaalde equivalente stralingsdosis bijvoor-

beeld groter dan die op leverkanker. Bijzondere aandacht is er voor de geslachtsorganen vanwege de mogelijkheid van erfelijke schade. Om de doses bij bestraling van verschillende weefsels en organen vergelijkbaar te maken, wordt de equivalente dosis voor ieder lichaamsdeel vermenigvuldigd met een weefselweegfactor. Het resultaat is de *effectieve dosis*, die ook in sievert (Sv) wordt uitgedrukt. De effectieve dosis geeft een indicatie van de kans op stralingsschade in de vorm van kanker en genetische effecten bij lagere stralingsdoses en is niet geschikt als maat voor de ernst van stralingseffecten bij hogere doses.

Dit complexe stelsel van dosimetrische grootheden is nodig om een samenhangend geheel te krijgen. Op die manier kunnen stralingsbeschermingsdeskundigen de individuele doses op een consistente en vergelijkbare wijze registreren. Dit is van het allergrootste belang voor iedereen die met straling werkt en in het bijzonder voor personen die *beroepshalve aan straling worden blootgesteld*.

Stralingsgrootheden

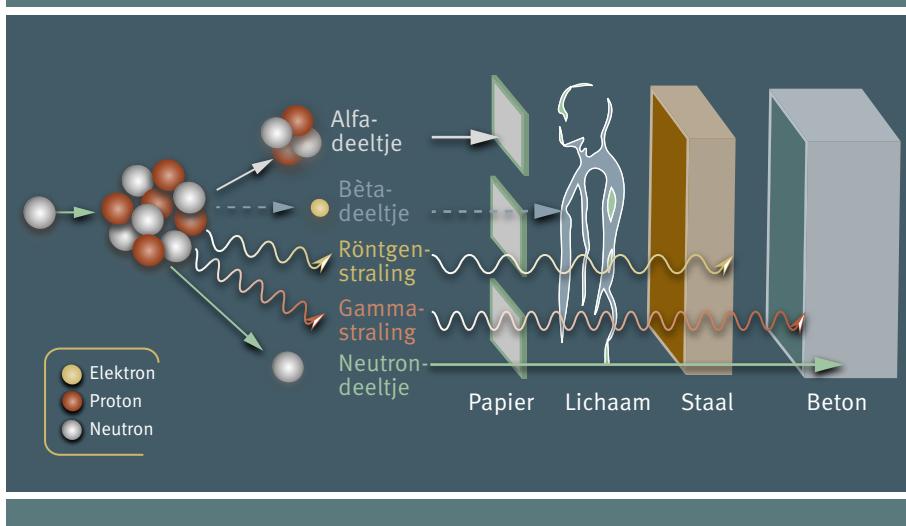
Fysische grootheid	
Activiteit	Het aantal nucleaire energieovergangen per tijdseenheid, gemeten in aantal desintegraties per seconde en uitgedrukt in becquerel (Bq).
Geabsorbeerde dosis	De hoeveelheid stralingsenergie die per massa-eenheid wordt opgenomen, bijvoorbeeld in een weefsel of orgaan. De eenheid voor geabsorbeerde dosis is de gray (Gy), waarbij één gray gelijk is aan één joule per kilogram (J/kg).
Berekende grootheid	
Dosisequivalent	De geabsorbeerde dosis vermenigvuldigd met een stralingsweegfactor (w_R) die rekening houdt met de mate waarin verschillende soorten straling biologische schade veroorzaken in een weefsel of orgaan. De eenheid voor equivalente dosis is de sievert (Sv), waarbij één sievert gelijk is aan één joule per kilogram (J/kg).
Effectieve dosis	De equivalente dosis vermenigvuldigd met de weefselweegfactor (w_T) die rekening houdt met de stralingsgevoeligheid van weefsels en organen. De effectieve dosis wordt uitgedrukt in sievert (Sv), waarbij één sievert gelijk is aan één joule per kilogram (J/kg).
Collectieve effectieve dosis	Som van alle effectieve doses van een aan straling blootgestelde populatie/bevolking of groep personen. De collectieve effectieve dosis wordt uitgedrukt in mens-sievert (mensSv).

Deze beschrijven evenwel enkel individuele doses. Tellen we alle door elk lid van een populatie ontvangen effectieve doses samen, dan krijgen we de *collectieve effectieve dosis* (soms ook gewoon *collectieve dosis* genoemd). De eenheid daarvan wordt meestal aangeduid als mens-sievert (mens Sv). Zo bedraagt de collectieve jaardosis van de wereldbevolking bijvoorbeeld meer dan 19 miljoen mens Sv, wat neerkomt op een jaargemiddelde dosis van 3 mSv per persoon.

1.3. Doordringingsvermogen van straling

Kort samengevat kan worden gesteld dat straling de vorm kan aannemen van deeltjes (waaronder alfa- en bètadeeltjes en neutronen) of van elektromagnetische golven (gammastralen en röntgenstralen) met verschillende energieën. De verschillende energieën en soorten deeltjes die worden uitgezonden hebben een wisselend doordringend vermogen en dus ook uiteenlopende effecten op levende materie. Van alle soorten straling hebben alfadeeltjes de hoogste lading omdat zij uit twee positief geladen protonen en twee neutronen bestaan. Deze hogere lading betekent dat zij in hogere mate inwerken op omgevende atomen. Door deze wisselwerking neemt de energie van de alfadeeltjes – en daardoor ook het doordringend vermogen ervan – snel af. Alfastraling kan bijvoorbeeld al worden tegengehouden door een vel papier. Bètadeeltjes bestaan uit negatief geladen elektronen: zij hebben een kleinere lading en dus een hoger doordringingsvermogen dan alfadeeltjes. Bètadeeltjes kunnen door een paar centimeter levende materie dringen. Gammastralen en röntgenstralen zijn bijzonder doordringend en worden pas tegengehouden door een dikke staalplaat. Kunstmatig opgewekte neutronen worden uitgezonden door

Doordringend vermogen van verschillende soorten straling



instabiele kernen als gevolg van een atoomsplitsing of kernfusiereactie. Neutronen komen ook van nature voor als component van kosmische straling. Neutronen zijn elektrisch neutraal en hebben daardoor een zeer hoog doordringend vermogen wanneer ze inwerken op materie of weefsel.

2. WAT DOET STRALING MET ONS?

Voordat we dieper ingaan op de effecten van stralingsblootstelling, komen we terug op de eerder genoemde pioniers op het gebied van stralingswetenschappen. Kort na zijn ontdekking ondervond *Henri Becquerel* aan den lijve het meest verontrustende nadeel van straling, namelijk het effect ervan op levend weefsel: toen hij enkele uren met een flesje radium in zijn zak rondliep, merkte hij op dat er huidletsel was ontstaan.

Wilhelm Conrad Röntgen, die in 1895 X-stralen ontdekte, stierf in 1923 aan darmkanker. *Marie Curie* overleed in 1934 aan bloedkanker (leukemie), die vermoedelijk veroorzaakt werd door de grote blootstelling aan straling tijdens haar arbeidsleven.

Volgens bepaalde bronnen zijn aan het einde van de jaren vijftig minstens 359 van de eerste stralingswerkers (voornamelijk artsen en andere wetenschappers) overleden aan de gevolgen van straling omdat zij toen nog niet wisten dat ze zich hiertegen dienden te beschermen.

Het is dan ook niet verwonderlijk dat de eerste aanbevelingen met betrekking tot stralingsbescherming voor werknemers afkomstig waren van degenen die zich bezighielden met de behandeling van patiënten met straling. In 1928 werd het International X-ray and Radium Protection Committee opgericht door het tweede Internationale Radiologiecongres in Stockholm. *Rolf Sievert* werd verkozen als eerste voorzitter van dit orgaan. Om gelijke tred te houden met nieuwe, niet-medische toepassingen van straling werd het comité na de Tweede Wereldoorlog gereorganiseerd: het kreeg de naam International Commission on Radiological Protection (ICRP). Tussen 1958 en 1960, toen Rolf Sievert optrad als vierde voorzitter van UNSCEAR, was er een toenemende bezorgdheid over de genetische effecten van kernproeven op de mens.

Aansluitend op het groeiende bewustzijn van de gevaren die gepaard gaan met stralingsblootstelling, werd in de twintigste eeuw een begin gemaakt met intensief onderzoek naar de effecten van straling op mens en milieu. Veruit het meest groot-schalige onderzoek naar aan straling blootgestelde bevolkingsgroepen had betrekking op de ongeveer 86 500 overlevenden van de atoombomaanvallen op Hiroshima en Nagasaki in 1945, aan het einde van de Tweede Wereldoorlog (hierna *overlevenden van de atoombommen genoemd*). Andere betrouwbare gegevens komen uit het opvolgen van bestraalde patiënten, maar ook van reddingswerkers en hulpverleners na blootstelling bij een ongeval (zoals de kernramp in Tsjernobyl). Ook dier- en celproeven in laboratoria vormen een belangrijke informatiebron ter zake.

Bronnen van informatie over stralingseffecten



Bevolkingsonderzoek



Dierproeven



Klinisch onderzoek



Celproeven

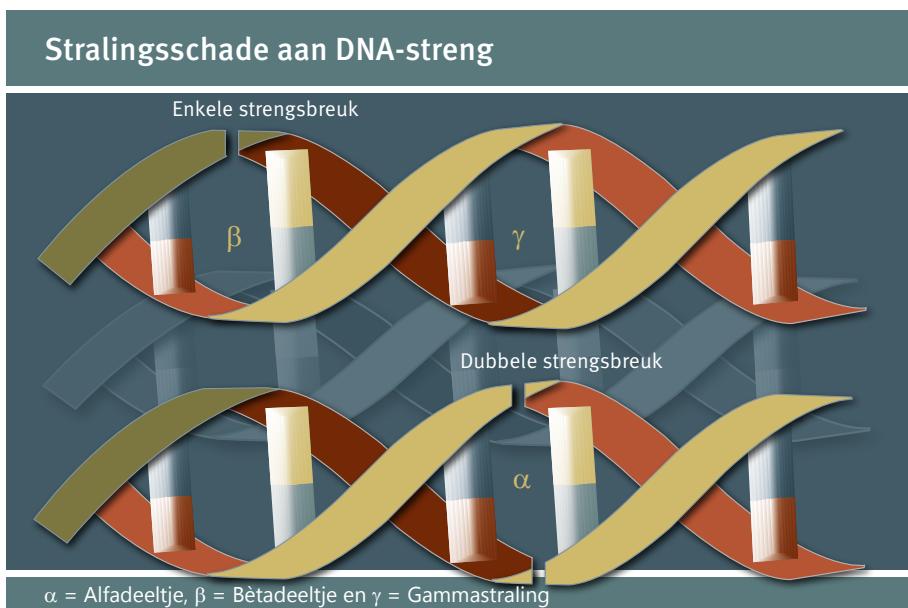
UNSCEAR evaluateert wetenschappelijke informatie over de effecten van stralingsblootstelling op mens en milieu. Daarbij wordt op een zo betrouwbaar mogelijke wijze nagegaan welke effecten in direct verband kunnen worden gebracht met diverse niveaus van stralingsblootstelling. Zoals eerder aangegeven, hangt de mate van blootstelling af van het soort straling, de (be)stralingsduur en de door de materie opgenomen hoeveelheid stralingsenergie. In het kader van deze evaluaties hanteert UNSCEAR momenteel de aanduiding *lage dosis* om te verwijzen naar een stralingsniveau tussen 10 en 100 mGy (milligray); met de aanduiding *zeer lage dosis* wordt verwezen naar stralingsniveaus beneden 10 mGy.

Door UNSCEAR gebruikte dosisintervallen

Hoge dosis	Meer dan ~ 1 Gy	Ernstige stralingsongevallen (bv. brandweerlieden bij het Tsjernobyl-ongeval)
Matige dosis	~ 100 mGy tot ~ 1 Gy	Opruimingswerkers na het Tsjernobyl-ongeval
Lage dosis	~ 10 mGy tot ~ 100 mGy	Meerdere computertomogrammen (CT-scans)
Zeer lage dosis	Minder dan ~ 10 mGy	Conventionele radiografie (d.w.z. zonder CT)

2.1. Effecten op de mens

Sinds de ontdekking van straling heeft ruim een eeuw onderzoek op dat gebied heel wat inzicht verschafft in de biologische mechanismen die aan de basis liggen van de gezondheidseffecten van straling. Zo weten we nu dat straling effecten op cellulair niveau kan hebben en cellen kan muteren of doen afsterven, doorgaans als gevolg van directe beschadiging van DNA(desoxyribonucleïnezuur)-strengen in chromosomen. Als het aantal beschadigde of afgestorven cellen groot genoeg is, kan dit leiden tot orgaanafalen of zelfs tot de dood. DNA kan ook anderszins beschadigd worden, zonder de cel te doen afsterven. Meestal kan deze schade volledig worden hersteld door het lichaam, maar als dat niet gebeurt ontstaat een verandering in de cel, ook wel *celmutatie* genoemd, die bij elke nieuwe celdeling (mitose) doorgegeven wordt en op termijn kan leiden tot kanker. Als een mutatie ontstaat in de cellen die erfelijke informatie doorgeven aan nakomelingen, kan dat genetische afwijkingen tot gevolg hebben. Vaak worden laboratoriumproeven uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in deze biologische mechanismen en in overerfbare effecten.



Afgaande op de waargenomen frequentie van optreden (incidentie) maken we hier onderscheid tussen vroege en late gezondheidseffecten van stralingsblootstelling. Doorgaans komen vroege gezondheidseffecten aan het licht na een diagnose van klinische symptomen bij personen. Late gezondheidseffecten, zoals kanker, blijken uit *epidemiologisch onderzoek*, waarbij een verhoogde incidentie van een ziekte bij een bevolkingsgroep wordt waargenomen. In deze brochure wordt tevens bijzondere aandacht besteed aan de effecten op kinderen en embryo's/foetussen evenals aan overerfbare effecten.

Vroege gezondheidseffecten

Deze effecten zijn het gevolg van grootschalige celbeschadiging/celdood. Voorbeelden hiervan zijn huidbrandwonden, haarverlies en verminderde vruchtbaarheid. Kenmerkend voor deze gezondheidseffecten is dat ze optreden wanneer binnen een kort tijdvak een relatief hoge drempeldosis wordt overschreden. Hoe meer de ontvangen dosis boven de drempeldosis ligt, des te ernstiger het effect.

Doorgaans wordt het centrale zenuwstelsel bij acute doses van meer dan 50 Gy dermate beschadigd dat de bestraalde persoon binnen enkele dagen sterft. Zelfs bij doses beneden 8 Gy treden symptomen van stralingsziekte op, ook *acute stralingssyndroom* genoemd, zoals misselijkheid (nausea), braken, diarree, darmkrampen, speekselvloed, uitdroging (dehydratie), vermoeidheid, apathie, lusteloosheid, transpiratie, koorts, hoofdpijn en te lage bloeddruk (hypotensie). In medische zin betekent « acuut » dat ziekten en aandoeningen niet zozeer op termijn, maar wel kort na blootstelling optreden. In sommige gevallen kunnen slachtoffers de straling in eerste instantie overleven, waarna ze een paar weken later als nog sterven aan maag- en darmbeschadiging. Lagere doses veroorzaken geen maag- en darmletsel, maar kunnen niettemin enkele maanden later een dodelijke afloop hebben, voornamelijk doordat ze het rode beenmerg beschadigen. Bij nog lagere doses treedt het ziekteproces pas later in en zijn de symptomen minder ernstig. Van de personen die een dosis van 2 Gy oplopen, krijgt ongeveer de helft na een drietal uur last van braken. Bij doses beneden 1 Gy is dit zelden het geval.

Onbedoelde medische blootstelling

Bij radiotherapie krijgen patiënten hoge doses toegediend. Daarom is het voorkomen van acute stralingseffecten een prioriteit.



Bij doses beneden 1 Gy hebben het rode beenmerg en de andere bloedvormende organen gelukkig een indrukwekkend vermogen om zich via regeneratie volledig te herstellen. Niettemin loopt de persoon in kwestie een groter risico om later leukemie te krijgen. Wanneer het lichaam slechts gedeeltelijk wordt bestraald, blijft er doorgaans voldoende gezond beenmerg over om de beschadigde beenmergcellen te vervangen. Dierproeven hebben aangetoond dat, zelfs wanneer er slechts één tiende van het actieve beenmerg onaangestast blijft, de overlevingskans bijna 100% is.

De eigenschap van straling om het erfelijk materiaal in een cel (DNA) direct te beschadigen wordt nuttig toegepast bij de behandeling van kanker om kwaadaardige cellen te vernietigen. *Radiotherapie* (ook bestralingstherapie of stralentherapie genoemd) is het gebruik van ioniserende straling voor therapeutische doeleinden. De totale hoeveelheid bestraling die bij een radiotherapeutische behandeling wordt toegediend, hangt af van het soort kanker en het stadium ervan. Vaste (solide) tumoren worden doorgaans behandeld met doses van 20 tot 80 Gy. Wanneer men een dergelijke dosis in één keer zou toedienen, kan dat de patiënt echter in gevaar brengen. Daarom wordt de dosis gefractioneerd toegediend, dat wil zeggen door de totale dosis op te delen in een aantal kleinere bestralingsfracties gaande tot maximaal 2 Gy. Deze dosisfractionering heeft als voordeel dat meebestraalde gezonde cellen zich beter kunnen herstellen, terwijl de kankercellen dermate worden bestraald dat ze de opgelopen stralingsschade niet meer kunnen herstellen.

Late gezondheidseffecten

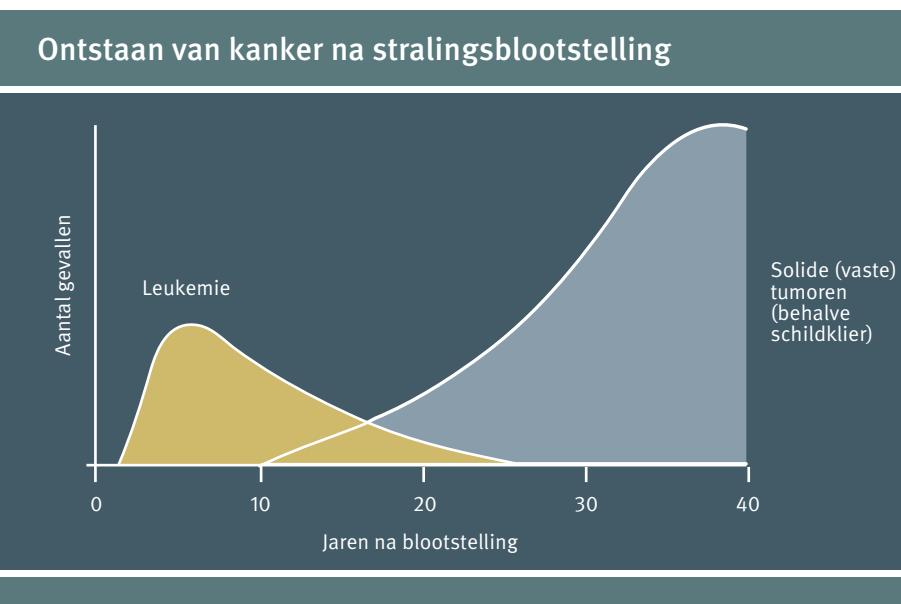
Dit zijn effecten die geruime tijd na blootstelling optreden. Voor het merendeel gaat het om stochastische effecten waarbij de kans dat het effect optreedt afhangt van de ontvangen stralingsdosis. Aangenomen wordt dat deze gezondheidseffecten worden veroorzaakt door mutaties in genetisch celmateriaal als gevolg van stralingsblootstelling. Voorbeelden van late gezondheidseffecten zijn vaste (solide) tumoren en leukemie bij blootgestelde personen evenals genetische afwijkingen bij hun nakomelingen. Binnen een populatie of bevolking lijkt de frequentie van optreden van deze effecten – maar niet de ernst ervan – evenredig te zijn met de omvang van de stralingsdosis.

Epidemiologisch onderzoek is van groot belang om inzicht te krijgen in late gezondheidseffecten van stralingsblootstelling. Daarbij worden statistische methoden toegepast om een vergelijking te maken van de frequentie van optreden (incidentie) van een gezondheidseffect (bijvoorbeeld kanker) bij een blootgestelde en een niet-blootgestelde bevolkingsgroep. Indien de incidentie veel groter uitvalt bij een blootgestelde bevolkingsgroep, kan dat te maken hebben met de straling waaraan de bevolkingsgroep is blootgesteld.

Het epidemiologisch onderzoek naar de overlevenden van de atoombommen is veruit de belangrijkste informatiebron voor het beoordelen op lange termijn van aan straling blootgestelde bevolkingsgroepen. Het is het meest volledige onderzoek ooit omwille van het grote aantal personen en de representativiteit voor de bevolking als geheel, en die bovendien uiteenlopende, evenredig over het lichaam verdeelde doses hebben opgelopen. De geschatte doses ontvangen door deze bevolkingsgroep zijn vrij goed bekend. Tot dusver heeft dit onderzoek uitgewezen dat er in deze groep enkele honderden gevallen van kanker meer werden vastgesteld dan men had kunnen verwachten indien zij niet aan straling was blootgesteld. Veel slachtoffers van de atoombomaanvallen op Hiroshima en Nagasaki zijn vandaag nog in leven. Om die reden wordt het onderzoek onverminderd voortgezet om de beoordeling af te ronden.

Kanker

Wereldwijd is ongeveer 20% van alle sterfgevallen te wijten aan kanker. Na hart- en vaatziekten is kanker de belangrijkste doodsoorzaak in de industrielanden. Ongeveer 40% van de bevolking krijgt tijdens hun leven te maken met kanker, zelfs indien zij niet aan straling zijn blootgesteld. De afgelopen jaren zijn de meest voorkomende vormen van kanker bij de man longkanker, prostaatkanker, darmkanker (colorectale kanker), maagkanker en leverkanker. Bij de vrouw zijn de meest voorkomende vormen borstkanker, darmkanker, longkanker, baarmoederhalskanker en maagkanker.



De ontwikkeling van kanker is een complex proces dat in verschillende fasen verloopt. Het kankerproces wordt doorgaans in gang gezet door een initiërend effect, waarschijnlijk op eencellig niveau, gevolgd door een hele reeks andere gebeurtenissen voor dat de cel kwaadaardig wordt en een tumor ontstaat. Kanker openbaart zich pas geruime tijd nadat de eerste schade is aangericht. De tijdspanne tussen de stralingsblootstelling en de openbaring van kanker wordt de latentieperiode genoemd. De kans dat iemand als gevolg van stralingsblootstelling kanker ontwikkelt, is een bron van grote bezorgdheid. Bij blootstelling aan een voldoende hoge stralingsdosis kan men voor een groep berekenen of bepaalde vormen van kanker vaker voorkomen na het in beschouwing nemen van alle statistische en andere onzekerheden. Tot op vandaag is nog steeds niet bekend wat de reële bijdrage van straling aan het ontstaan van kanker is.

Leukemie, schildklierkanker en botkanker openbaren zich enkele jaren na de stralingsblootstelling. De meeste andere vormen van kanker daarentegen, verschijnen pas op zijn minst tien jaar na de blootstelling en vaak ettelijke decennia daarna. Geen enkele vorm van kanker wordt echter uitsluitend veroorzaakt door stralingsblootstelling. Bijgevolg zijn stralingsgeïnduceerde tumoren niet te onderscheiden van tumoren die door diverse andere oorzaken ontstaan. Dit neemt niet weg dat het van belang is in te schatten hoe groot de kans is dat men na bepaalde stralingsdoses kanker krijgt. Zo kan men namelijk een solide wetenschappelijke onderbouwing geven aan de vaststelling van blootstellingslimieten.

Onderzoek naar radiotherapeutisch behandelde patiënten, beroepshalve blootgestelde personen en in het bijzonder overlevenden van de atoombommen vormt het fundament voor verdere kennisopbouw over het verband tussen kanker en stralingsblootstelling. Deze studies bestrijken een ruime steekproef van personen die op verschillende lichaamsdelen werden bestraald en die over een redelijk lange periode worden gevolgd. Aan bepaalde studies zijn tevens ernstige nadelen verbonden, met als belangrijkste een andere leeftijdsdistributie dan die van de gewone bevolking alsmede het feit dat veel van die patiënten al ziek waren toen ze bestraald werden en daarvoor al voor kanker zijn behandeld.

Nog fundamenteel is de vaststelling dat bijna alle gegevens berusten op onderzoek naar personen van wie de weefsels – eenmalig of over een relatief korte tijdspanne – aanzienlijke stralingsdoses hebben gekregen in een grootteorde van 1 Gy of meer. Afgezien van enkele studies bij stralingswerkers is er slechts weinig bekend over de effecten van langdurige blootstelling aan lage doses. Bovendien is vrijwel geen directe informatie beschikbaar over de gevolgen van routinematische blootstelling van het publiek. Dergelijke studies zouden erop gericht moeten zijn een groot aantal personen over een langere periode te volgen. Maar zelfs dan kan dit per saldo ontoereikend zijn om een toename van de kankerincidentie aan te tonen bovenop het grote aantal spontane gevallen van kanker.

UNSCEAR heeft uitgebreid onderzoek verricht naar kankerincidentie bij aan straling blootgestelde bevolkingsgroepen. Daaruit is gebleken dat iemand die aan stralingsdoses boven 100 mSv wordt blootgesteld, per sievert ongeveer 3 tot 5% kans heeft aan door de stralingsblootstelling veroorzaakte kanker te overlijden.

Andere gezondheidseffecten

Indien het hart aan hoge stralingsdoses wordt blootgesteld, stijgt de kans op hart- en vaatziekten (zoals een hartaanval). Deze blootstelling kan plaatsvinden tijdens radiotherapie en heeft geleid tot de ontwikkeling van behandelingstechnieken die de doses ter hoogte van het hart verminderen. Er bestaat echter geen wetenschappelijk bewijs dat de blootstelling aan lage stralingsdoses hart- en vaatziekten veroorzaakt.

Wel blijkt duidelijk uit de bevindingen van UNSCEAR dat ooglensvertroebeling (cataract) vaker voorkwam bij reddingswerkers in Tsjernobyl, mogelijk in verband met hoge stralingsdoses. Verder heeft UNSCEAR onderzoek verricht naar stralings-effecten op het menselijke immuunsysteem bij overlevenden van de atoombommen, reddingswerkers in de kerncentrale van Tsjernobyl evenals bij patiënten die radiotherapeutisch worden behandeld. De stralingseffecten op het immuunsysteem worden beoordeeld door veranderingen van het aantal cellen in te schatten of door diverse functionele analyses uit te voeren. Hoge stralingsdoses onderdrukken het immuunsysteem voornamelijk door lymfocyten te beschadigen. Een afname van het aantal lymfocyten wordt tegenwoordig gebruikt als vroege aanwijzing om de stralingsdosis na acute blootstelling te bepalen.

Effecten op het nageslacht

Stralingsschade in geslachts- of voortplantingscellen, sperma of eicellen kan overerfbare effecten op nakomelingen hebben. Bovendien kan straling directe schade veroorzaken aan een embryo of foetus dat zich al ontwikkelt in de baarmoeder. Het is van belang onderscheid te maken tussen de blootstelling aan straling van volwassenen, kinderen en embryo's/foetussen. UNSCEAR heeft uitgebreid het onderzoek dat is verricht naar de gezondheidseffecten bij deze groepen bestudeerd, ook wat betreft overerfbare effecten.

Effecten op kinderen

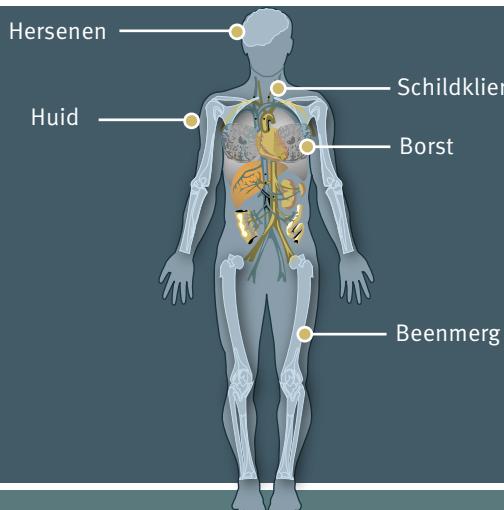
De gezondheidseffecten bij de mens hangen af van een aantal lichamelijke factoren. Voor kinderen heeft stralingsblootstelling andere gevolgen dan voor volwassenen. Dat heeft te maken met hun anatomische en fysiologische verschillen. Bij dezelfde uitwendige blootstelling krijgen de inwendige organen van kinderen bovendien een hogere dosis dan volwassenen. De reden hiervoor is dat het lichaam

van kinderen kleiner is met als gevolg dat de organen minder afgeschermd worden door bovenliggend weefsel. Bovendien zijn kinderen ook minder lang dan volwassenen, waardoor ze hogere doses kunnen ontvangen door bestraling afkomstig van radionucliden op de bodem

Wat inwendige blootstelling betreft, kunnen bij kinderen de concentraties van radionucliden in een orgaan gemakkelijker de omliggende organen bestralen dan bij volwassenen. Dat komt doordat kinderen kleiner zijn dan volwassenen, waardoor de verschillende organen dichter bij elkaar liggen. Ook andere leeftijdsgebonden factoren die betrekking hebben op metabolisme en fysiologie kunnen een groot verschil uitmaken qua stralingsdosis op verschillende leeftijden. Diverse radionucliden geven reden tot grote bezorgdheid wat de inwendige blootstelling van kinderen betreft. Ongevallen waarbij radioactief jodium-131 vrijkomt, kunnen de schildklier aan hoge stralingsdoses blootstellen. Voor eenzelfde inname is de schildkleredosis van kinderen ongeveer negen keer groter dan die van volwassenen. Onderzoek in het kader van het kernongeval in Tsjernobyl heeft het verband bevestigd tussen schildklierkanker en jodium-131, een radioactieve isotoop die voornamelijk in dit orgaan wordt opgenomen.

Uit epidemiologisch onderzoek is gebleken dat bij dezelfde stralingsblootstelling jongeren onder de 20 jaar twee keer meer kans lopen om leukemie te krijgen dan volwassenen. Met name kinderen jonger dan 10 jaar zijn uiterst kwetsbaar; uit andere studies komt naar voren dat zij drie tot vier keer meer kans lopen om aan leukemie te sterven dan volwassenen. Nog andere studies hebben aangetoond dat

Bijzonder stralingsgevoelige organen bij kinderen



Kinderen die onder de leeftijd van 20 jaar aan straling zijn blootgesteld, lopen ongeveer twee keer zoveel kans **hersenkanker** te ontwikkelen als volwassenen die aan dezelfde dosis zijn blootgesteld. Een gelijkaardig verband werd vastgesteld voor **borstkanker** bij meisjes die onder de leeftijd van 20 jaar aan straling werden blootgesteld.

meisjes die onder de leeftijd van 20 jaar aan straling worden blootgesteld ongeveer twee keer meer kans lopen om borstkanker te krijgen dan volwassen vrouwen. Kinderen lopen meer kans dan volwassenen om na stralingsblootstelling kanker te ontwikkelen, zij het dan vaak later in hun leven, wanneer ze de leeftijd bereiken waarop kanker zich normaal gezien openbaart.

UNSCEAR heeft wetenschappelijke gegevens onderzocht waaruit blijkt dat de incidentie van kanker bij kinderen sterker varieert dan bij volwassenen, en afhankelijk is van het soort tumor en van de leeftijd en het geslacht van het kind. De term *stralingsgevoelighed* in de context van kankerinductie verwijst naar het aantal door straling geïnduceerde tumoren. Uit onderzoek naar verschillen in stralingsgevoelighed tussen volwassenen en kinderen komt naar voren dat kinderen in hogere mate vatbaar zijn voor de ontwikkeling van schildklier-, hersen-, huid- en borstkanker, en leukemie.

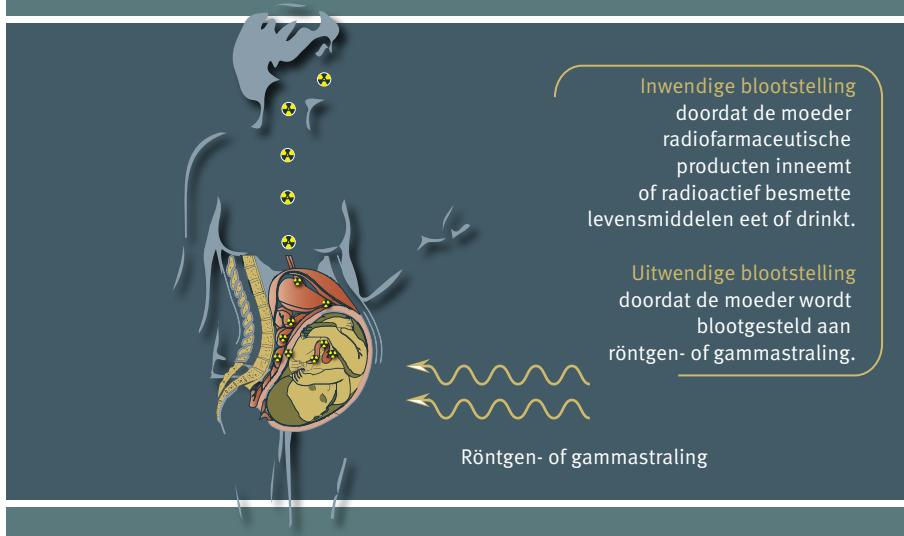
De verschillen in vroege gezondheidseffecten bij kinderen blootgesteld aan hoge doses (bijvoorbeeld bij radiotherapeutische behandeling) zijn uiterst complex en toe te schrijven aan de wisselwerking tussen verschillende weefsels en biologische mechanismen. Bepaalde effecten komen duidelijker tot uiting bij blootstelling tijdens de kinderjaren dan op volwassen leeftijd (bijvoorbeeld hersenafwijkingen, cataract en schildklierknobbels). Daar staat tegenover dat bepaalde weefsels van kinderen (zoals longen en eierstokken) een grotere resistentie hebben tegen een aantal effecten.

Effecten op het ongeboren kind

Een embryo of foetus kan niet alleen aan straling worden blootgesteld als gevolg van radioactieve stoffen die door de moeder worden overgebracht via voedsel en drank (inwendige blootstelling), maar ook rechtstreeks, via uitwendige blootstelling. Een foetus wordt beschermd door de baarmoeder en krijgt bij stralingsblootstelling meestal een lagere dosis dan de moeder. Toch zijn embryo's en foetussen bijzonder stralingsgevoelig. Blootstelling kan ernstige gevolgen voor de gezondheid hebben, zelfs bij doses die zo laag zijn dat ze geen direct effect op de moeder hebben. Mogelijke gevolgen zijn onder meer groeistoornissen (bijvoorbeeld groeiachterstand), misvormingen, verminderde hersenfunctie en kanker.

De ontwikkeling van zoogdieren in de baarmoeder verloopt grosso modo in drie stadia. We weten dat straling een embryo in de baarmoeder kan doden in het eerste stadium, dat begint bij de bevruchting en gaat tot het ogenblik waarop het embryo zich in de baarmoederwand nestelt. Bij de mens bestrijkt dit stadium de eerste twee weken van de zwangerschap. Het is uiterst moeilijk te bestuderen wat er in dit stadium gebeurt. Desalniettemin blijkt uit bevindingen die voornamelijk op dierproeven berusten, dat stralingsdoses boven bepaalde drempelwaarden dodelijk zijn voor jonge embryo's.

Blootstellingsroutes voor embryo's



Het belangrijkste gevaar in het volgende stadium – bij de mens van de tweede tot de achtste week – is dat door de straling orgaanmisvormingen ontstaan met mogelijk de dood tot gevolg rond het tijdstip van geboorte. Dierproeven hebben aangetoond dat organen (zoals ogen, hersenen en skelet) bijzonder vatbaar zijn voor misvormingen wanneer deze in de ontwikkelingsfase worden bestraald.

De grootste stralingsschade treedt blijkbaar op in het centrale zenuwstelsel na de achtste week, wanneer het derde en laatste stadium van de zwangerschap ingaat. De effecten van stralingsblootstelling op de hersenen van het ongeboren kind zijn heel wat beter bekend. Zo werd bijvoorbeeld in een populatie van ongeveer 1 600 kinderen van overlevenden van de atoombommen die vóór de geboorte aan een dosis van 1 Gy waren blootgesteld, een zware verstandelijke handicap vastgesteld bij 30 kinderen.

Of stralingsblootstelling van embryo's later kanker kan veroorzaken, is omstreken en wetenschappelijk lopen de visies hierover uiteen. Bij dierproeven kon geen specifiek verband worden aangetoond. UNSCEAR heeft geprobeerd de algemene risico's in kaart te brengen van een aantal bestralingseffecten voor het ongeboren kind, zoals sterfte, misvorming, verstandelijke handicap en kanker. Alles wel beschouwd wordt aangenomen dat er hoogstens twee op elke duizend levend geboren baby's die in de baarmoeder aan een dosis van 0,01 Gy werden blootgesteld, schadelijke gevolgen zullen ondervinden, terwijl dezelfde effecten zich bij 60 op elke duizend baby's op natuurlijke wijze zullen ontwikkelen.

Overerfbare effecten

Straling kan mutaties veroorzaken in cellen die erfelijke informatie doorgeven aan nakomelingen. Dit kan leiden tot genetische afwijkingen. Dergelijke afwijkingen laten zich moeilijk bestuderen omdat zeer weinig bekend is over de genetische schade die de mens oploopt als gevolg van stralingsblootstelling. Dit komt deels doordat het ettelijke generaties kan duren voordat de overerfbare effecten zich in volle omvang openbaren, en deels doordat – zoals bij kanker – deze effecten niet te onderscheiden zijn van effecten met een andere oorzaak.

Van de ernstig getroffen embryo's en foetusSEN overleeft een groot aantal die effecten niet. Naar schatting de helft van alle miskramen zijn te wijten aan genetische afwijkingen. Zelfs wanneer zij levend worden geboren, lopen zuigelingen met genetische afwijkingen ongeveer vijf keer meer kans dan gezonde kinderen om te sterven voordat ze vijf jaar oud zijn.

Overerfbare effecten worden in twee hoofdcategorieën onderverdeeld: chromosoomafwijkingen, waaronder veranderingen in chromosoomgetal of -structuur, en genmutaties. Zij kunnen zich in volgende generaties openbaren, al is dat niet noodzakelijk het geval.

Onderzoek bij kinderen van overlevenden van de atoombommen heeft echter geen overerfbare effecten aan het licht kunnen brengen. Hiermee is echter niet gezegd dat er geen stralingsschade werd opgelopen, maar alleen dat bij matige stralingsblootstelling van een relatief omvangrijke bevolkingsgroep geen waarneembare gevolgen werden vastgesteld. Experimenteel onderzoek bij aan hoge doses blootgestelde planten en dieren heeft duidelijk aangetoond dat straling overerfbare effecten kan teweegbrengen. Dit geldt naar alle waarschijnlijkheid ook voor de mens.

UNSCEAR heeft zich alleen toegespitst op ernstige overerfbare effecten, en schat het totale risico voor de eerstvolgende generatie in op ongeveer 0,3 tot 0,5% per gray, zijnde minder dan één tiende van de kans op een door straling geïnduceerde dodelijke kanker.

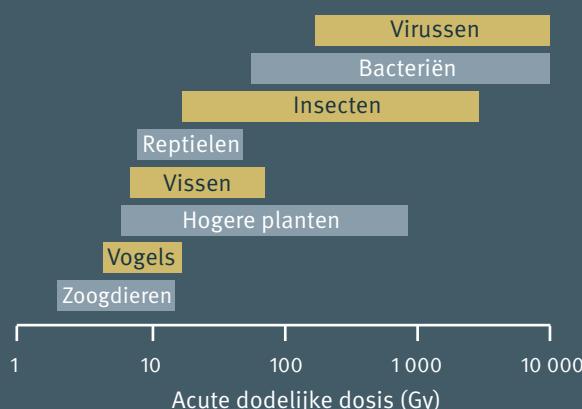
2.2. Effecten op dieren en planten

Tegenwoordig wordt meer dan vroeger aandacht besteed aan de effecten van stralingsblootstelling op dieren en planten. De afgelopen decennia heerste de opvatting dat, indien de mens afdoende werd beschermd, dit ook wel het geval zou zijn voor dieren en planten. Uit onderzoek van UNSCEAR naar de effecten van stralingsblootstelling op dieren en planten, is gebleken dat een theoretisch dosisbereik van 1 tot 10 Gy waarschijnlijk geen effecten heeft op dieren- en plantenpopulaties. Voorts werd duidelijk dat individuele dieren en planten op uiteenlopende wijze reageren op stralingsblootstelling: van alle dieren zijn zoogdieren

bijvoorbeeld het meest stralingsgevoelig. De belangrijkste effecten op dieren- en plantenpopulaties hebben waarschijnlijk te maken met fertiliteit (vruchtbaarheid), mortaliteit (sterfte) en inductie van mutaties. Veranderingen in reproductie, bijvoorbeeld in het aantal nakomelingen, zijn een meer betrouwbare indicator van stralingseffecten dan mortaliteit.

Letale doses zijn doses die voor de helft van de blootgestelde dieren en planten de dood tot gevolg hebben. Voor planten die een relatief korte tijdsperiode werden blootgesteld (*acute of korte bestraling*), liepen deze letale doses uiteen van minder dan 10 Gy tot ongeveer 1 000 Gy. Grote planten zijn doorgaans gevoeliger voor straling dan kleinere planten. Voor kleine zoogdieren liggen de letale doses tussen 6 en 10 Gy; voor grote zoogdieren schommelen ze rond 2,5 Gy. Bepaalde insecten, bacteriën en virussen zijn bestand tegen doses van meer dan 1 000 Gy.

Reikwijdte van acute dodelijke doses voor bepaalde dieren en planten



Waarnemingen bij dieren en planten in de omgeving van de kerncentrale van Tsjernobyl leveren belangrijke informatie op over stralingsblootstelling. UNSCEAR heeft onderzoek verricht naar blootstelling in het milieu, en heeft nieuwe benaderingen uitgewerkt om de mogelijke effecten van blootstelling te beoordelen.

Volgens recente ramingen van UNSCEAR over doses en de daarmee samenhangende effecten van stralingsblootstelling bij een steekproef van dieren en planten na het ongeval in de kerncentrale van Fukushima-Daiichi, was de blootstelling doorgaans te gering om acute effecten te kunnen waarnemen. Veranderingen in **biomerkers** (indicatoren die wijzen op een specifieke ziekte of fysiologische toestand van

een organisme, met name bij zoogdieren) vielen echter niet uit te sluiten, maar het belang ervan voor de integriteit van een populatie blijft onduidelijk.

Op te merken valt dat beschermings- en herstelmaatregelen die worden genomen om de mens in mindere mate bloot te stellen aan straling, nog veel verdergaande gevolgen kunnen hebben. Dergelijke maatregelen kunnen bijvoorbeeld niet alleen een weerslag hebben op milieugoederen en -diensten of op de hulpbronnen die worden gebruikt in landbouw, bosbouw, visserij en toerisme, maar ook op nutsvoorzieningen voor geestelijke, culturele en op recreatie gerichte activiteiten.

2.3. Relatie tussen stralingsdoses en -effecten

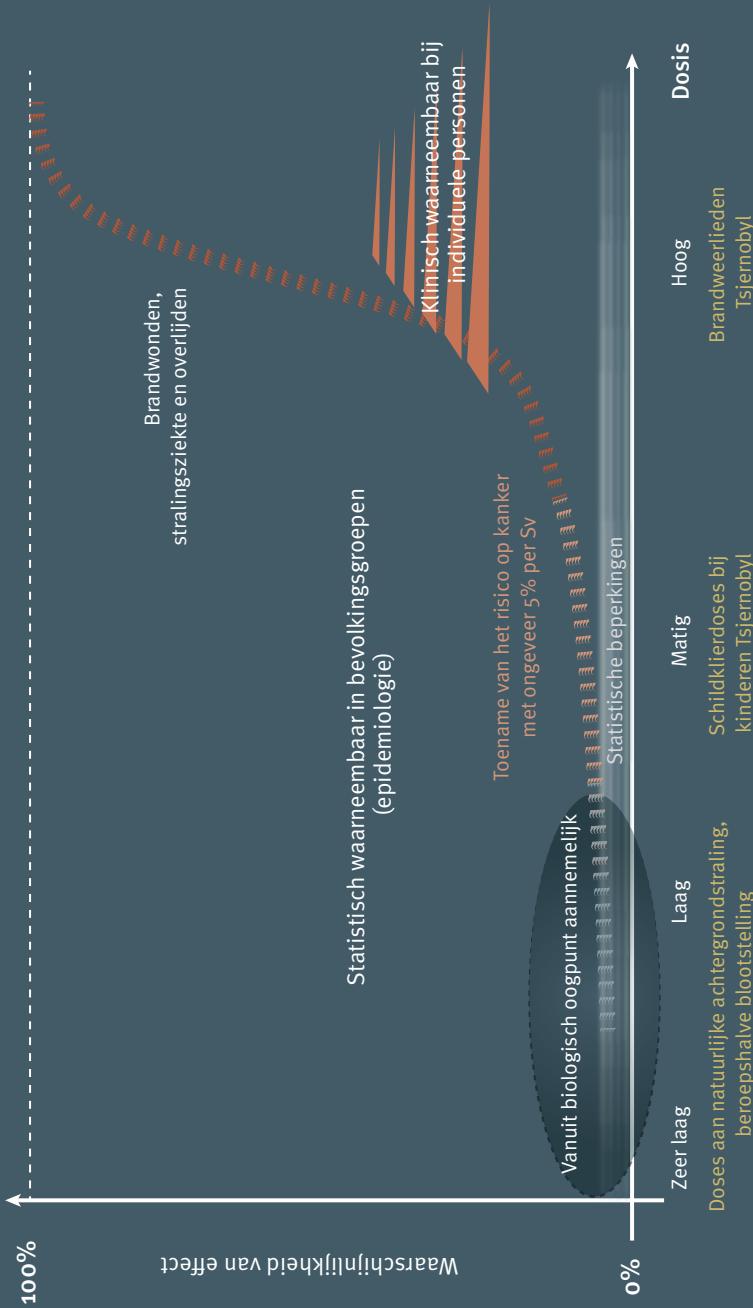
Bij het in kaart brengen van de dosis-effectrelatie, dat wil zeggen het verband tussen stralingsdoses en gezondheidseffecten, heeft UNSCEAR het belang benadrukt om onderscheid te maken tussen waarnemingen van bestaande gezondheids-effecten bij blootgestelde bevolkingsgroepen enerzijds en theoretische prognoses van mogelijke toekomstige effecten anderzijds. In beide gevallen komt het erop aan rekening te houden met eventuele onzekerheden en onnauwkeurigheden, of het nu gaat om stralingsmetingen, statistische overwegingen of andere factoren.

Gezien de huidige stand van de kennis kunnen waargenomen gezondheidseffecten terecht aan stralingsblootstelling worden toegeschreven indien vroege effecten (zoals huidbrandwonden) optreden bij personen die hoge doses van meer dan 1 Gy ontvangen. Hiervan kan sprake zijn bij stralingsongevallen: denk aan de hoge doses die de reddingswerkers bij het ongeval in de kerncentrale van Tsjernobyl hebben ontvangen of die patiënten soms krijgen als gevolg van fouten in radiotherapeutische behandelingen.

Door epidemiologische methoden toe te passen, kan een verklaring worden gegeven voor de toename van het aantal late gezondheidseffecten (zoals kanker) in een bevolkingsgroep die aan matige stralingsdoses wordt blootgesteld, althans voor zover de waargenomen toename groot genoeg is om eventuele onzekerheden weg te nemen. Momenteel zijn er echter geen biomarkers beschikbaar om uit te maken of een geval van kanker al dan niet door stralingsblootstelling werd veroorzaakt.

Bij blootstelling aan lage of zeer lage stralingsniveaus – hetgeen vaker voorkomt bij blootstelling aan natuurlijke stralingsbronnen en beroepshalve blootstelling – was het wegens statistische en andere onzekerheden niet mogelijk veranderingen in incidentie van late gezondheidseffecten te bevestigen. Desalniettemin zijn dergelijke effecten niet uit te sluiten.

Relatie tussen stralingsdoses en gezondheidseffecten



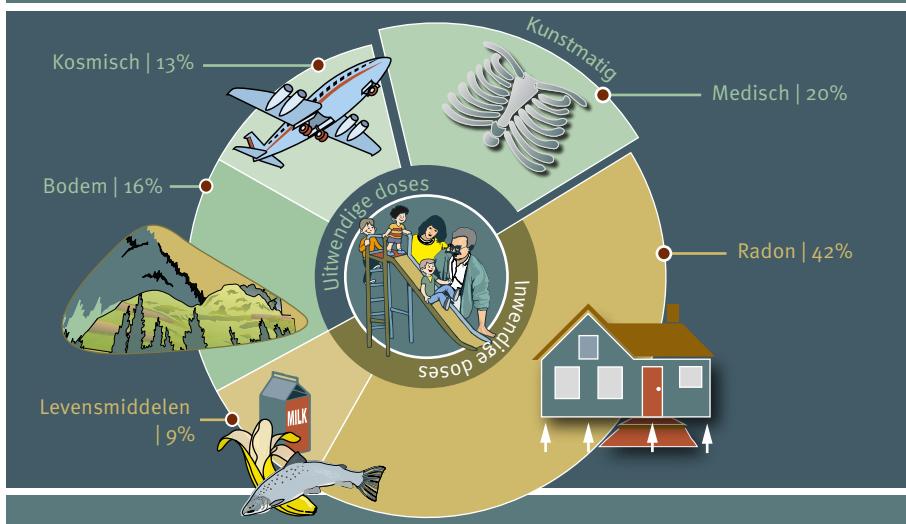
Wat eventuele toekomstige gezondheidseffecten betreft, bestaat eensgezindheid over de berekeningsmethode van de kans dat deze effecten optreden bij hoge en matige doses. Bij lage en zeer lage doses is het evenwel noodzakelijk veronderstellingen te maken en wiskundige modellen te gebruiken om in te schatten hoe groot de kans is dat eventuele gezondheidseffecten optreden. De daaruit resulterende waarden zijn echter uiterst onzeker. Daarom, en mede gezien de onaanvaardbare onzekerheden in de voorspellingen, heeft UNSCEAR ervoor gekozen dergelijke modellen niet als hulpmiddel te gebruiken bij de beoordeling van lage en zeer lage stralingsdoses om – bijvoorbeeld na de kernongevallen van Tsjernobyl en Fukushima-Daiichi – prognoses te maken over mogelijke gezondheidseffecten of het aantal sterfgevallen. Niettemin kan het voor vergelijkingen op het gebied van de volksgezondheid of met het oog op de stralingsbescherming nuttig zijn dergelijke berekeningen te maken op voorwaarde dat rekening wordt gehouden met de onzekerheden en dat duidelijk wordt uitgelegd welke beperkingen daaraan verbonden zijn.

3. WAAR KOMT STRALING VANDAAN?

De mens staat voortdurend bloot aan straling uit diverse bronnen. Alle levensvormen op aarde zijn geëvolueerd in een omgeving waar ze werden blootgesteld aan natuurlijke achtergrondstraling. Recentelijk werd de mens samen met andere organismen ook blootgesteld aan kunstmatige stralingsbronnen die de afgelopen eeuw werden ontwikkeld. Wereldwijd is ruim 80% van de straling waaraan de mens wordt blootgesteld afkomstig van natuurlijke bronnen. Slechts 20% komt uit kunstmatige (lees: door de mens gemaakte) bronnen, voornamelijk in het kader van medische toepassingen van straling. In deze brochure wordt stralingsblootstelling onderverdeeld volgens bron. Daarbij wordt het zwaartepunt gelegd op de doses die het publiek ontvangt. Met het oog op de regelgeving (bijvoorbeeld inzake stralingsbescherming) wordt stralingsblootstelling behandeld vanuit het oogpunt van verschillende doelgroepen. Als gevolg hiervan wordt er extra informatie verstrekt over enerzijds patiënten – die in het kader van medische toepassingen aan straling worden blootgesteld – en anderzijds over beroepshalve blootgestelde personen.

Stralingsblootstelling kan ook anders worden ingedeeld, namelijk volgens de wijze waarop we worden bestraald. Wanneer radioactieve stoffen en ioniserende stralen in het milieu ons lichaam van buitenaf bestralen, spreekt men van *uitwendige blootstelling*. Van *inwendige blootstelling* is sprake wanneer we radioactieve stoffen in de lucht inademen, via voedsel of drank inslikken of via huid en wonden absorberen, waarna die stoffen ons van binnenin bestralen. De doses ten gevolge van inwendige en uitwendige blootstelling zijn grosso modo identiek.

Wereldwijde bijdrage van de verschillende bronnen tot de stralingsbelasting

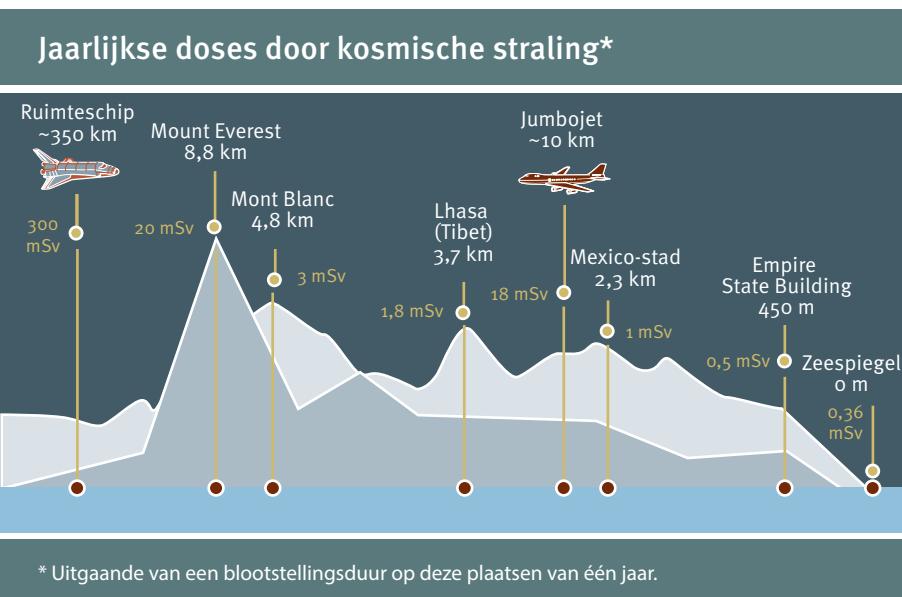


3.1. Natuurlijke stralingsbronnen

Al sinds haar ontstaan is de aarde blootgesteld aan straling uit het heelal en uit radioactief materiaal in de aardkorst en aardkern. Het is onmogelijk aan deze natuurlijke stralingsbronnen te ontsnappen: in feite nemen zij het grootste aandeel in de stralingsblootstelling van de wereldbevolking voor hun rekening. De mondiale gemiddelde jaarlijkse effectieve dosis per persoon bedraagt ongeveer 2,4 mSv. Afhankelijk van de plaats waar men woont, kan deze dosis variëren van ongeveer 1 mSv tot meer dan 10 mSv. In gebouwen kan vanuit de bodem een specifiek radioactief gas binnendringen, radon genoemd. Ook bouwmaterialen kunnen radionucliden bevatten die zorgen voor een verhoogde stralingsblootstelling. Deze stralingsbronnen zijn weliswaar van nature rondom ons aanwezig, maar toch kunnen we de mate van blootstelling daaraan verminderen door bepaalde keuzes te maken, zoals hoe we leven, waar we wonen of wat we eten en drinken.

Kosmische stralingsbronnen

Kosmische straling vormt een belangrijke bron van uitwendige blootstelling. De meeste kosmische straling ontstaat ver in de interstellaire ruimte; sommige worden veroorzaakt door de zon bij uitbarstingen van zonnevlammen. Kosmische straling valt vanuit de ruimte op de aarde in en produceert tijdens de wisselwerking met de dampkring verschillende soorten straling en radioactieve stoffen. Ze vormen de belangrijkste stralingsbron in de ruimte. Kosmische straling wordt sterk verminderd door de beschermende werking van de aardatmosfeer (dampkring) en het aard-



magnetisch veld. Desalniettemin zijn bepaalde delen van de wereld in hogere mate blootgesteld dan andere. Aangezien kosmische straling door het aardmagnetisch veld worden afgebogen in de richting van de geomagnetische polen (Noord- en Zuidpool), ontvangen deze gebieden meer kosmische straling dan de gebieden rond de evenaar.

Bovendien neemt de mate van blootstelling toe met de hoogte: op grote hoogte is er namelijk minder lucht aanwezig die als afscherming of stralingsschild kan functioneren. Mensen die op zeeniveau leven, ontvangen jaarlijks een gemiddelde effectieve dosis van ongeveer 0,3 mSv als gevolg van kosmische straling. Dit maakt ongeveer 10 tot 15% uit van hun totale stralingsdosis uit natuurlijke bronnen. Wie op meer dan 2 000 meter boven zeeniveau leeft, krijgt een veelvoud van die dosis. Vliegtuigpassagiers kunnen zelfs aan nog hogere doses worden blootgesteld. De blootstelling aan kosmische straling hangt niet alleen van de hoogte, maar ook van de duur van de vlucht af. Voor een tien uur durende vlucht op kruishoogte bijvoorbeeld, schommelt de gemiddelde effectieve dosis tussen 0,03 en 0,08 mSv. Dit betekent dat passagiers bij een heen- en terugvlucht New York–Parijs worden blootgesteld aan een dosis van ongeveer 0,05 mSv. Dit is bij benadering evenveel als de effectieve dosis die een patiënt bij een routinematig röntgenonderzoek van de borst ontvangt. De geschatte effectieve doses die individuele passagiers tijdens een vlucht ontvangen, zijn relatief laag. De collectieve doses daarentegen, kunnen vrij hoog zijn als gevolg van het grote aantal vliegtuigpassagiers en internationale vluchten.

STRALINGSBLOOTSTELLING OP HET WERK

Mensen die vaak vliegen, krijgen meer dosis door kosmische straling. Zo ontvangen piloten en cabinepersoneel een jaargemiddelde dosis van ongeveer 2 tot 3 mSv. Ook bij bepaalde ruimtevluchten werden dosismetingen uitgevoerd. Bij korte ruimtevluchten werden afhankelijk van de zonneactiviteit doses tussen 2 en 27 mSv gemeeten. Maar een astronaut op een vier maanden durende missie in het Internationale Ruimtestation dat op een hoogte van 350 km rond de aarde cirkelt, ontvangt een effectieve dosis van ongeveer 100 mSv.

Aardse stralingsbronnen

Bodem

Overal in en op aarde zijn *primordiale radionucliden* aanwezig. Deze radionucliden hebben een zeer lange halveringstijd en komen voor in de bodem, bijvoorbeeld kalium-40, uranium-238 en thorium-232, samen met de vervalproducten ervan, zoals radium-226 en radon-222. Zij zonden al straling uit nog voordat de aarde was

gevormd. Volgens berekeningen van UNSCEAR ontvangt iedere persoon op aarde jaarlijks een gemiddelde effectieve dosis van ongeveer 0,48 mSv als gevolg van uitwendige blootstelling vanuit de bodem en de bouwmaterialen.

De uitwendige blootstelling loopt sterk uiteen afhankelijk van de locatie. Uit studies in Frankrijk, Duitsland, Italië, Japan en de Verenigde Staten komt bijvoorbeeld naar voren dat ongeveer 95% van de bevolking in deze landen woont in gebieden waar de jaargemiddelde dosis in open lucht schommelt tussen 0,3 en 0,6 mSv. Op bepaalde plaatsen in deze landen kunnen inwoners echter jaardoses van meer dan 1 mSv ontvangen. Andere plaatsen in de wereld zijn in nog hogere mate blootgesteld aan bodemstraling. In Kerala bijvoorbeeld, een provincie aan de zuidwestkust van India bestaande uit een dichtbevolkte, 55 km lange strook land met thoriumrijk zand, ontvangen de inwoners gemiddeld 3,8 mSv per jaar. Er zijn ook andere regio's bekend waar bodems met hoge natuurlijke stralingsniveaus te vinden zijn, zoals in Brazilië, China, de Islamitische Republiek Iran, Madagaskar en Nigeria.

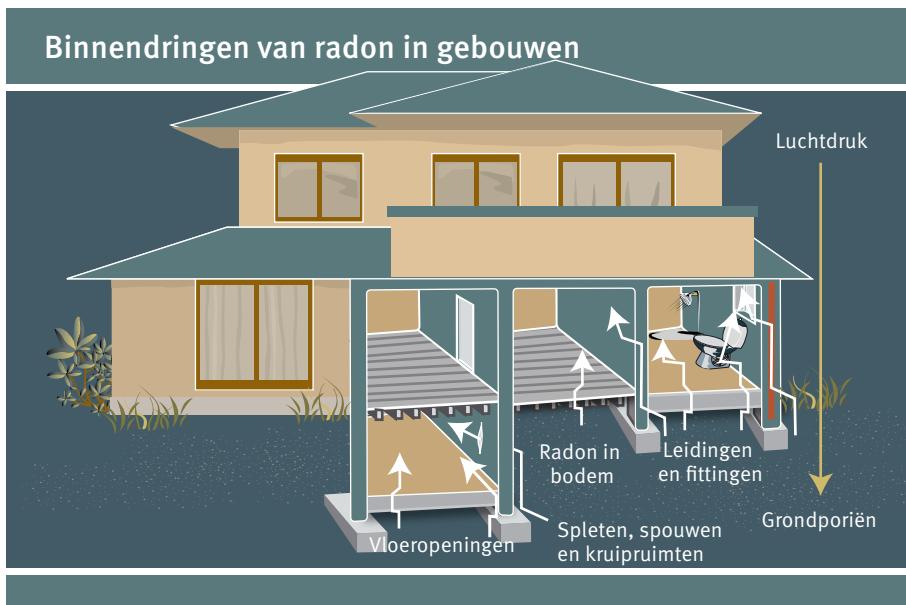
Radongas

Radon-222 is een gasvormig radionuclide die van nature vrijkomt uit de bodem. Het ontstaat tijdens de vervalreeks van uranium-238, dat in gesteente en in de aardbodem voorkomt. Bij inademing blijven bepaalde kortlevende vervalproducten van radon – voornamelijk polonium-218 en -214 – in de longen achter, waar ze de cellen in de luchtwegen met alfadeeltjes bestralen. Radoninhalatie is daarom een van de oorzaken van longkanker bij rokers en niet-rokers. Rokers lopen echter veel meer risico vanwege de sterke wisselwerking tussen roken en blootstelling aan radon.

Radon is overal in de atmosfeer aanwezig en kan in gebouwen binnendringen via (kruip)kelders en vloeren, waar het zich kan opstapelen en hoge *concentraties* kan bereiken, zijnde de activiteit of het aantal desintegraties per tijdseenheid in een bepaald luchtvolume. Met name bij het verwarmen van woningen stijgt warme lucht naar boven om uit de woning te ontsnappen via het dak, ramen of andere openingen. Hierdoor ontstaat een lagere druk op de begane grond en de kelderverdieping. Als gevolg van dit drukverschil wordt radon uit de ondergrond aangezogen via barsten of spleten in de onderbouw of via andere openingen (bijvoorbeeld rond aansluitingen van dienstleidingen).

De wereldgemiddelde radonconcentratie in het binnenmilieu bedraagt ongeveer 50 Bq/m³. Dit gemiddelde gaat echter voorbij aan het feit dat de concentraties in hoge mate variëren afhankelijk van de plaats. De nationale gemiddelde radonconcentraties lopen doorgaans sterk uiteen en gaan van minder dan 10 Bq/m³ in Cyprus, Egypte en Cuba tot meer dan 100 Bq/m³ in de Tsjechische Republiek, Finland en Luxemburg. In sommige landen, zoals Canada, Zweden en Zwitserland,

zijn in woningen radonconcentraties gemeten tussen 1 000 en 10 000 Bq/m³. Woningen met dergelijke hoge radonconcentraties komen verhoudingsgewijs zeer weinig voor. Diverse factoren liggen ten grondslag aan deze onderling grote variaties, zoals de plaatselijke geologische omstandigheden, de doorlatendheid (permeabiliteit) van de bodem, de gebruikte bouwmaterialen en de ventilatie of verluchting van gebouwen.



Met name ventilatie is een belangrijke factor, die vooral afhangt van de klimaatomstandigheden. Wanneer gebouwen goed worden geventileerd, bijvoorbeeld in gebieden met een tropisch klimaat, is de kans klein dat er zich grote hoeveelheden radon ophopen. In gebieden met een gematigd of koud klimaat daarentegen, worden woningen doorgaans minder goed geventileerd. Als gevolg daarvan kunnen daar hogere radonconcentraties ontstaan. Bij het ontwerp van energie-efficiënte gebouwen kan een ontoereikende ventilatie belangrijke gevolgen hebben. In heel wat landen werden grootschalige meetcampagnes gevoerd die de basis moeten vormen voor de toepassing van maatregelen om radonconcentraties in het binnenmilieu te verminderen.

De concentratie van radon in water is doorgaans zeer laag, maar in sommige watervoortraden, bijvoorbeeld diepe bronnen in de Finse hoofdstad Helsinki en in Hot Springs, een plaats in de Amerikaanse staat Arkansas, komen zeer hoge concentraties voor. Het in water aanwezige radon kan de radonconcentratie in de lucht doen toenemen, met name bij het douchen in de badkamer. Volgens UNSCEAR is de dosisbijdrage van radon als gevolg van ingestie via drinkwater laag vergeleken

met de dosisbijdrage door inhalatie. De jaargemiddelde effectieve dosis afkomstig van radon wordt door UNSCEAR geschat op 1,3 mSv, wat ongeveer de helft is van de totale dosis die de bevolking uit natuurlijke stralingsbronnen ontvangt.

STRALINGSBLOOTSTELLING OP HET WERK

Op bepaalde werkplekken is de stralingsblootstelling van werknemers vooral te wijten aan de inhalatie van radongas. In alle ondergrondse mijnen vormt radon de belangrijkste bron van stralingsblootstelling. Een kolenmijnwerker ontvangt jaarlijks een gemiddelde effectieve dosis van ongeveer 2,4 mSv; voor andere mijnwerkers schommelt deze dosis rond 3 mSv. Wie in de kernindustrie werkt, ontvangt jaarlijks een gemiddelde effectieve dosis van ongeveer 1 mSv, voornamelijk als gevolg van de blootstelling aan radon bij uraniumwinning.

Stralingsbronnen in voedsel en drank

Voedsel en drank kunnen naast primordiale ook andere radionucliden bevatten die hoofdzakelijk afkomstig zijn van natuurlijke bronnen. Via gesteente en in bodem en water aanwezige mineralen kunnen radionucliden worden overgedragen op planten en vervolgens op dieren. De doses hangen daardoor niet alleen af van de concentraties aan radionucliden in voedsel en drank, maar ook van lokale voedingsgewoonten.

In vis en zeevruchten bijvoorbeeld, zijn relatief hoge niveaus van lood-210 en polonium-210 aanwezig. Bijgevolg kunnen mensen die veel vis, schaal- en schelpdieren eten, iets hogere doses ontvangen dan de bevolking als geheel. Ook mensen in de Arctische streken die veel rendiervlees eten, krijgen verhoudingsgewijs hogere doses. De relatief hoge concentraties aan polonium-210 bij rendieren in het noordpoolgebied komen van het korstmos dat ze eten. Volgens ramingen van UNSCEAR bedraagt de effectieve dosis uit natuurlijke bronnen in voedsel en drank gemiddeld 0,3 mSv. Het grootste deel daarvan is afkomstig van kalium-40 en van radionucliden uit de vervalreeksen van uranium-238 en thorium-232.

Naast radionucliden uit natuurlijke bronnen kan voedsel ook radionucliden uit kunstmatige bronnen bevatten. Niettemin levert de toegelaten lozing van deze radionucliden in het milieu doorgaans een zeer kleine dosisbijdrage.

3.2. Kunstmatige stralingsbronnen

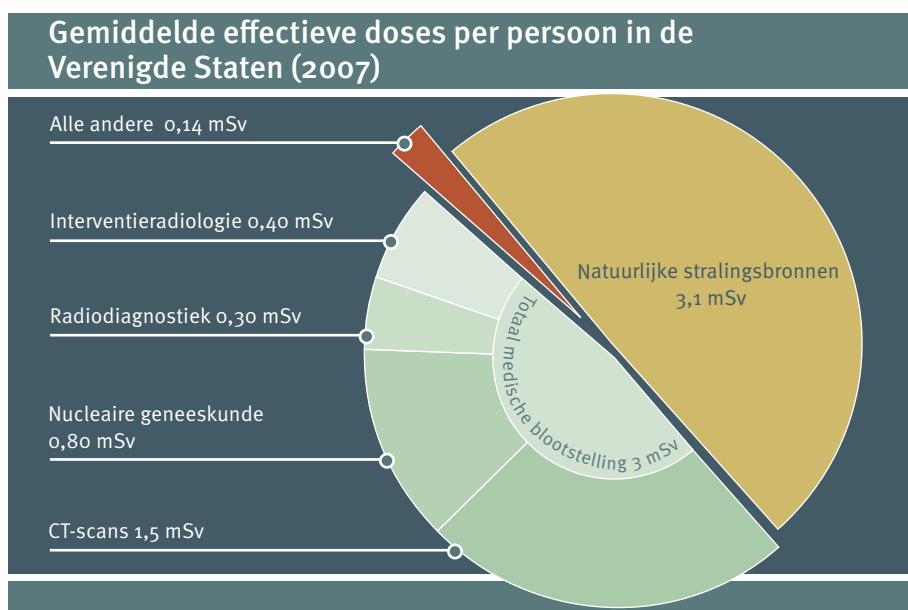
De afgelopen decennia wordt straling op steeds ruimere schaal toegepast omdat onderzoek het gebruik van radioactiviteit en straling voor een breed scala aan doeleinden mogelijk maakte, gaande van militaire en medische toepassingen (bijvoorbeeld de behandeling van kanker) tot elektriciteitsopwekking en huishoudelijke

toepassingen (bijvoorbeeld rookmelders). De straling uit deze en andere kunstmatige bronnen wordt toegevoegd aan de stralingsdosis uit natuurlijke bronnen, zowel op individueel niveau als voor de hele wereldbevolking.

Individuele doses uit kunstmatige stralingsbronnen lopen sterk uiteen. De meeste mensen ontvangen een relatief kleine dosis uit kunstmatige bronnen. In sommige gevallen bedraagt de ontvangen dosis echter een veelvoud van het gemiddelde. Kunstmatige stralingsbronnen zijn over het algemeen goed beheersbaar door de juiste maatregelen inzake stralingsbescherming te nemen.

Medische toepassingen

Het gebruik van straling in de geneeskunde voor het diagnosticeren en behandelen van bepaalde ziekten is dermate wijdverbreid dat het verreweg de belangrijkste bron van blootstelling aan kunstmatige straling ter wereld is geworden. Medische toepassingen van straling maken gemiddeld 98% van de blootstelling aan alle kunstmatige stralingsbronnen uit, en leveren - na natuurlijke stralingsbronnen - de op één na grootste bijdrage aan de blootstelling van de wereldbevolking, goed voor ongeveer 20% van het totaal. Deze blootstelling wordt grotendeels waargenomen in industrielanden omdat daar meer middelen voor medische verzorging en behandeling beschikbaar zijn en dus ook intensiever gebruik wordt gemaakt van radiologieapparatuur. Dit heeft er in sommige landen toe geleid dat de jaargemiddelde effectieve dosis die bij medische toepassingen wordt ontvangen op een vergelijkbaar niveau is komen te liggen als die uit natuurlijke bronnen.



Medische blootstelling aan ioniserende straling verschilt op wezenlijke punten van de meeste andere soorten blootstelling. Bij medische blootstelling wordt het lichaam doorgaans slechts gedeeltelijk bestraald. Bij andere soorten blootstelling is vaak het volledige lichaam onderhevig aan straling. Een ander verschil ligt in de leeftijdsopbouw: patiënten zijn doorgaans ouder dan de bevolking als geheel. Bovendien moet men bijzonder omzichtig te werk gaan bij het vergelijken van stralingsdoses als gevolg van medische blootstelling en stralingsdoses uit andere bronnen. Zo mag men niet vergeten dat patiënten rechtstreeks gebaat zijn bij de straling waaraan ze worden blootgesteld.

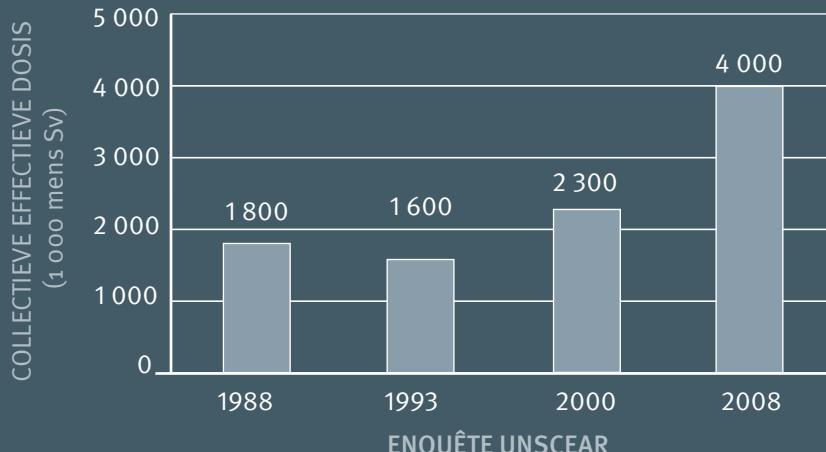
De toenemende verstedelijking, gecombineerd met een geleidelijke verbetering van de levensstandaard, betekent onvermijdelijk dat steeds meer mensen toegang hebben tot gezondheidszorg. Het directe gevolg hiervan is dat de bevolkingsdosis door medische blootstelling wereldwijd blijft stijgen. UNSCEAR verzamelt periodiek informatie over diagnostische en therapeutische procedures. Volgens een enquête van UNSCEAR over de periode 1997-2007 worden over de hele wereld jaarlijks ongeveer 3,6 miljard medische procedures uitgevoerd met blootstelling aan straling, wat bijna 50% meer is dan de 2,5 miljard procedures die in de vorige enquêteperiode 1991-1996 werden opgetekend.

De belangrijkste takken van de geneeskunde waarin straling worden toegepast, zijn radiologie (waaronder interventieprocedures), nucleaire geneeskunde en radiotherapie. Andere toepassingen die niet aan bod komen in de periodieke evaluaties van UNSCEAR, betreffen onder meer bevolkingsonderzoeksprogramma's en de vrijwillige deelname aan medische, biomedische, diagnostische of therapeutische onderzoeksprogramma's.

Radiodiagnostiek behelst de analyse van röntgenbeelden, zoals bij gewone radiografie (bijvoorbeeld röntgenonderzoek van de borst of het gebit), fluoroscopie (bijvoorbeeld een bariummaaltijd of bariumlavement waarbij barium als contrastmiddel wordt gebruikt) en computertomografie (CT). UNSCEAR houdt zich niet bezig met medische beeldvorming waarbij niet-ioniserende straling wordt toegepast, zoals ultrasone tomografie of magnetische resonantietomografie. Bij **interventieradiologie** worden minimaal invasieve beeldgeleide procedures toegepast voor diagnostische en therapeutische doeleinden (bijvoorbeeld radiologische interventies waarbij een sonde of katheter door een bloedvat wordt geleid).

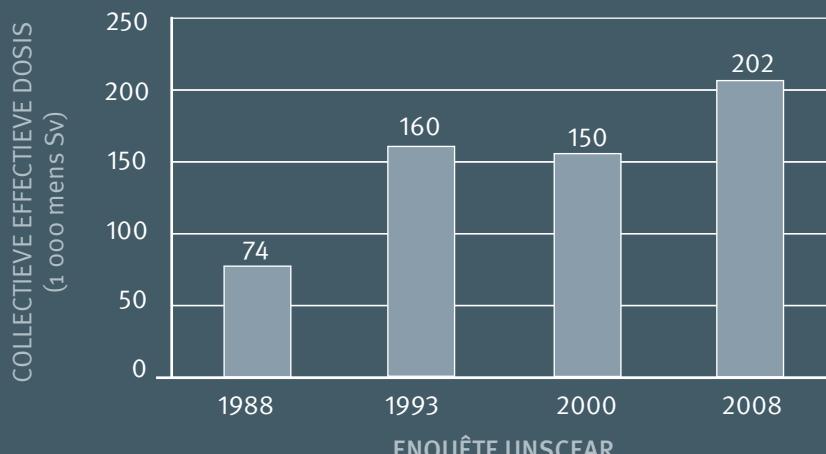
Als gevolg van het ruimere gebruik van CT-onderzoeken, en de hoge dosis die per onderzoek wordt toegediend, is de wereldgemiddelde effectieve dosis afkomstig van radiodiagnostische procedures bijna verdubbeld van 0,35 mSv in 1988 tot 0,62 mSv in 2007. Volgens de recentste enquête van UNSCEAR maken CT-onderzoeken vandaag 43% uit van de totale collectieve dosis als gevolg van

Mondiale radiologische blootstelling (1988–2008)



radiologische onderzoeken. Deze cijfers verschillen van regio tot regio. Van alle radiologische procedures komt ongeveer twee derde ten goede aan 25% van de wereldbevolking in de industrielanden. Wat de overige 75% van de wereldbevolking betreft, is de jaarlijkse frequentie vrijwel constant gebleven, zelfs voor gewoon röntgenonderzoek van het gebit.

Mondiale blootstelling door nucleaire geneeskunde (1988–2008)



Bij **nucleaire geneeskunde** worden *niet-ingekapselde* (dat wil zeggen oplosbare en niet-ingesloten) radioactieve stoffen in het lichaam ingebracht. Meestal gebeurt dit voor beeldvormingsdoeleinden, dat wil zeggen om informatie te verkrijgen over de orgaanstructuur of -werking. Hoewel minder gebruikelijk worden radioactieve stoffen ook aangewend bij de behandeling van bepaalde ziekten, zoals abnormaal verhoogde schildklierwerking (hyperthyroïdie) of schildklierkanker. Meestal wordt hierbij een radionuclide gecombineerd met chemisch dragermateriaal om een radioactieve merkstof of tracer (radiofarmacon) aan te maken die langs intraveneuze of orale weg aan de patiënt wordt toegediend. Deze radioactieve merkstof verdeelt zich dan volgens zijn fysische of chemische eigenschappen in het lichaam van de patiënt, waarna een scan kan worden gemaakt. De straling die door de radionuclide in het lichaam wordt uitgezonden, wordt geanalyseerd om diagnostische beelden te maken of wordt gebruikt om ziekten te behandelen.

Het aantal procedures in de nucleaire geneeskunde voor diagnosedoeleinden is wereldwijd gestegen van ongeveer 24 miljoen in 1988 naar ongeveer 33 miljoen in 2007. Dit heeft ertoe geleid dat de jaarlijkse collectieve effectieve dosis fors is toegenomen van 74 000 naar 202 000 mens Sv. Ook de therapeutische toepassingen van de moderne nucleaire geneeskunde zijn in volle opmars en bereiken jaarlijks ongeveer 0,9 miljoen patiënten over de hele wereld. Zoals gezegd, is het gebruik van nucleaire geneeskunde niet evenredig verdeeld: 90% van de onderzoeken vindt plaats in industrielanden.

Bij **radiotherapie** (ook **bestralingstherapie** genoemd) wordt straling gebruikt om diverse aandoeningen te behandelen, doorgaans kanker, maar ook goedaardige tumoren. Bij uitwendige radiotherapie wordt een patiënt behandeld met een bestralingsbron die zich buiten zijn lichaam bevindt; deze uitwendige bestralingstechniek wordt **teletherapie** genoemd. Hiervoor maakt men gebruik van een bestralingsapparaat met een hoogradioactieve bron (doorgaans kobalt-60) of een apparaat onder hoogspanning dat straling opwekt (bijvoorbeeld een lineaire deeltjesversneller). De behandeling kan ook worden uitgevoerd door, tijdelijk of permanent, metalen of ingekapselde radioactieve bronnen in het lichaam van de patiënt te plaatsen; deze inwendige bestralingstechniek noemt men **brachytherapie**.

STRALINGSBLOOTSTELLING OP HET WERK

Als gevolg van de forse toename van het totaal aantal medisch-radiologische procedures in de afgelopen decennia, is het aantal betrokken gezondheidswerkers aanzienlijk gestegen tot meer dan 7 miljoen. Deze zorgverleners ontvangen jaarlijks een gemiddelde effectieve dosis van ongeveer 0,5 mSv. Bij interventiera-diologie en nucleaire geneeskunde kan het medisch personeel een bovengemiddelde dosis ontvangen.

In de periode 1997-2007 hebben wereldwijd naar schatting 5,1 miljoen patiënten jaarlijks een radiotherapeutische behandeling gekregen, een toename vergeleken met het op 4,3 miljoen geschatte aantal patiënten in 1988. Ongeveer 4,7 miljoen patiënten werden behandeld door teletherapie en 0,4 miljoen door brachytherapie. 25% van de bevolking die in de industrielanden leeft, kreeg 70% van de radiotherapeutische behandelingen over de hele wereld, en 40% van alle brachytherapieprocedures.

Ongevallen bij medische toepassingen

Bij bepaalde medische toepassingen van straling (zoals radiotherapie, interventieradiologie en nucleaire geneeskunde) worden hoge doses aan patiënten toege diend. Wanneer de bestraling niet op de juiste manier wordt toegediend, kan dit leiden tot ernstig letsel of zelfs tot de dood. Niet alleen de patiënten lopen hierbij gevaar, maar ook de artsen en ander personeel dat zich in de buurt bevindt. Deze ongevallen zijn meestal het gevolg van menselijke fouten, zoals fouten in de behandelingsplannen, waardoor een verkeerde dosis wordt toegediend, verkeerd gebruik van apparatuur, bestraling van het verkeerde orgaan of soms zelfs van de verkeerde patiënt.

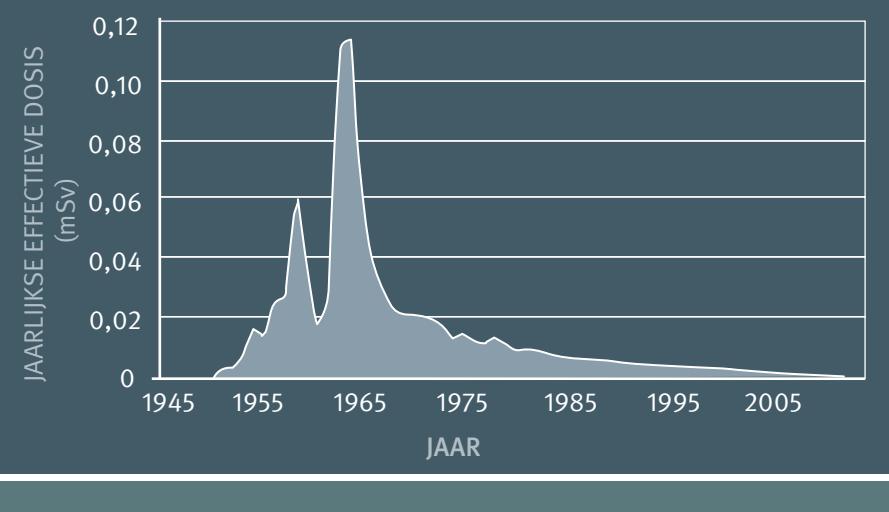
Ernstige radiotherapeutische ongevallen zijn weliswaar zeldzaam, maar toch werden er al ruim honderd geïnventariseerd. Sinds 1967 heeft UNSCEAR 29 gemelde ongevallen onderzocht, waarbij sprake was van 45 sterfgevallen en 613 letsls. Het is echter goed mogelijk dat sommige sterfgevallen en heel wat letsls helemaal niet werden gemeld.

Niet alleen overbestraling, maar ook onderbestraling, waarbij patiënten voor de behandeling van een levensbedreigende ziekte een te lage dosis toegediend krijgen, kan ernstige gevolgen hebben. Met kwaliteitsborgingsprogramma's wordt beoogd op consistente wijze hoge praktijknormen toe te passen om het risico op dergelijke ongevallen minimaal te houden.

Kernwapens

In 1945, in de slotfase van de Tweede Wereldoorlog, werden twee atoombomaan vallen uitgevoerd op Japan: op 6 augustus werd de stad Hiroshima gebombardeerd en op 9 augustus de stad Nagasaki. Beide atoombomexplosies hebben ongeveer 130 000 mensenlevens gekost. Dit zijn de enige gevallen in de geschiedenis waarin kernwapens voor oorlogsvoering werden ingezet. Na 1945 werden evenwel heel wat kernwapenproeven in de atmosfeer uitgevoerd, voornamelijk op het noordelijk halfrond. De meeste kernproeven vonden plaats tussen 1952 en 1962. In totaal werden meer dan 500 kernproeven uitgevoerd, met een totale explosiekracht van 430 megaton TNT (trinitrotolueen)-equivalent. De laatste bovengrondse kernproef dateert van 1980. Over de hele wereld werden mensen aan straling blootgesteld ten gevolge van de radioactieve neerslag (fall-out) van deze kernproeven. UNSCEAR werd in 1955 opgericht als reactie op de groeiende bezorgdheid over de stralingsblootstelling van mens en milieu.

Wereldgemiddelde dosis per persoon door radioactieve neerslag (fall-out) bij kernproeven



De jaargemiddelde effectieve dosis ten gevolge van de mondiale fall-out door kernproeven in de atmosfeer bereikte in 1963 een hoogtepunt met naar schatting 0,11 mSv. Nadien viel deze dosis terug tot het huidige niveau van ongeveer 0,005 mSv. In de toekomst zal deze blootstelling heel langzaam afnemen omdat het merendeel nu te wijten is aan het langlevende radionuclide koolstof-14.

Liefst 50% van de totale fall-out door bovengrondse kernproeven kwam ter plaatse terecht binnen een straal van ongeveer 100 km van de testsite. Mensen die bij testsites wonen, werden dus voornamelijk aan lokale radioactieve neerslag blootgesteld. De kernproeven werden echter in dunbevolkte afgelegen gebieden uitgevoerd, waardoor de bijdrage van de lokale bevolking aan de mondiale collectieve dosis te verwaarlozen is. Niettemin kregen mensen die benedenwinds van de testsites leefden veel hogere doses dan gemiddeld.

In het eerste verslag dat UNSCEAR in 1958 heeft uitgebracht, werd de wetenschappelijke basis gelegd om te onderhandelen over het *Verdrag tot het verbieden van proefnemingen met kernwapens in de atmosfeer, in de ruimte en onder water*. Na ondertekening van dit gedeeltelijk kernstopverdrag in 1963, werden tot in de jaren negentig jaarlijks nog een vijftigtal ondergrondse kernproeven uitgevoerd. Ook daarna werden nog enkele kernproeven uitgevoerd. De meeste ondergrondse kernproeven hadden een veel lagere nucleaire explosiekracht dan de bovengrondse kernproeven. Bovendien werd het radioactief puin doorgaans ingesloten op de gassen na die werden geloosd of na zekere tijd naar de atmosfeer lekten. Bij deze proeven ontstond weliswaar een zeer grote hoeveelheid radioactieve residuen, maar toch werd aangenomen dat het publiek geen blootstellingsgevaar liep

omdat deze reststoffen zich op grote diepte onder de grond bevonden en meestal samensmolten met het gastgesteente.

Ook het hergebruik van de nucleaire testsites geeft reden tot bezorgdheid. Sommige sites worden opnieuw in gebruik genomen (bijvoorbeeld als grasland of voor akkerbouw). De radioactieve residuen op bepaalde sites, bijvoorbeeld op een aantal plaatsen op de testsite Semipalatinsk in het huidige Kazachstan, kunnen aanleiding geven tot aanzienlijke stralingsdoses. Op andere testsites, bijvoorbeeld op de atollen Mururoa en Fangataufa in Frans-Polynesië, vormt de dosisbijdrage slechts een fractie van de normale achtergrondstraling waaraan de bewoners van deze sites worden blootgesteld. Voor nog andere locaties, zoals de Marshalleilanden en de proefsuite van Maralinga in Australië, waar respectievelijk kernproeven werden uitgevoerd door de Verenigde Staten en het Verenigd Koninkrijk, hangt de blootstelling van de lokale bevolking af van voedingsgewoonten en levenswijze.

Kernreactoren

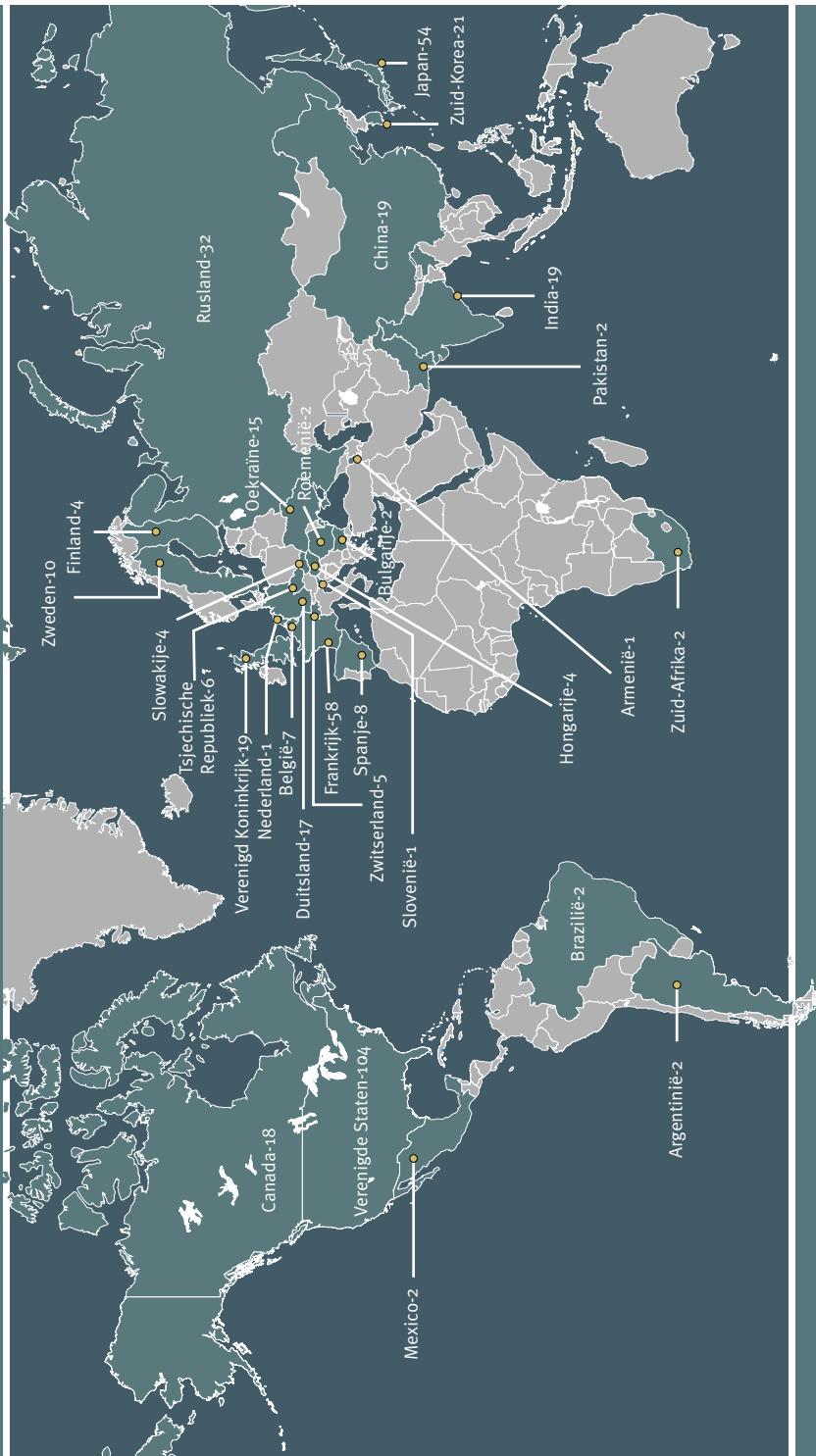
Kernsplijting (ook kernsplitsing of atoomsplitsing genoemd) is een proces waarbij de kern van bepaalde isotopen van uranium of plutonium, wanneer die door neutronen wordt geraakt zich in twee kleinere kernen splijt onder uitzending van enorme hoeveelheden energie alsmede van twee of meer nieuwe neutronen. De vrijgekomen neutronen kunnen op hun beurt andere uranium- of plutoniumkernen raken en doen splijten, waarbij opnieuw neutronen worden uitgezonden die weer andere kernen splitsen. Hierdoor houdt het proces zichzelf in stand: er ontstaat dus een kettingreactie. Deze isotopen worden doorgaans als splitsstof gebruikt in kernreactoren, waar de kettingreactie wordt beheerst en zo nodig kan worden gestopt als die te snel verloopt.

De energie die vrijkomt bij kernsplijting in kernreactoren, kan worden gebruikt om elektriciteit in kerncentrales op te wekken. Daarnaast bestaan er ook onderzoeksreactoren, waar niet alleen kernbrandstof en diverse andere materialen worden getest, maar ook kernfysisch en biologisch onderzoek wordt verricht. In deze reactoren worden ook radionucliden geproduceerd voor medische en industriële toepassingen. Ook al bestaan er verschillen tussen beide soorten reactoren, ze hebben met elkaar gemeen dat er industriële processen vereist zijn, zoals uraniumwinning en berging van radioactief afval, waarbij blootstelling kan ontstaan voor werknemers en de bevolking.

Kerncentrales

De eerste commerciële kerncentrale ter wereld waarop industriële schaal energie werd opgewekt, was die van Calder Hall, die in 1956 werd gebouwd in het Verenigd Koninkrijk. Sindsdien wordt steeds meer elektriciteit opgewekt door kerncentrales. Ondanks de ontmanteling van een toenemend aantal oudere reactoren blijft de nucleaire elektriciteitsopwekking toenemen. Eind 2010 waren er in 29 landen onge-

Kerncentrales wereldwijd (2010)



veer 440 kernreactoren in bedrijf, die zorgden voor ongeveer 10% van de mondiale elektriciteitsproductie. Verder waren er 240 onderzoeksreactoren verspreid over 56 landen in de hele wereld.

De opwekking van elektriciteit met kernenergie blijft een controversiële kwestie, ook al levert zij bij normale werking slechts een uiterst geringe bijdrage aan de mondiale stralingsblootstelling. Bovendien loopt de stralingsblootstelling sterk uiteen afhankelijk van de soort installatie, de vestigingsplaats en de exploitatieduur.

Ondanks de toename van het elektrisch vermogen van de centrales, volgen de totale blootstellingsniveaus als gevolg van de lozing van radioactieve effluenten uit reactoren een neerwaartse trend. Dit is deels te danken aan de verbeterde technologie en deels ook aan strengere maatregelen inzake stralingsbescherming. Doorgaans geven radioactieve lozingen van kerninstallaties aanleiding tot zeer lage stralingsdoses. De collectieve jaardosis voor de bevolking in de omgeving van kerncentrales wordt geschat op 75 mens Sv. Dit betekent dat iemand die in de buurt van een kerncentrale woont, aan een jaargemiddelde effectieve dosis van ongeveer 0,0001 mSv wordt blootgesteld.

De stralingsblootstelling bij activiteiten op het gebied van kernenergie ontstaat hoofdzakelijk bij de splijtstofwinning. Bij het winnen en verwerken van uranium ontstaan aanzienlijke hoeveelheden reststoffen in de vorm van ertsafval, waarin hoge niveaus van natuurlijke radionucliden voorkomen. Tegen 2003 was er wereldwijd al in totaal twee miljoen ton uranium geproduceerd, goed voor ruim twee miljard ton ertsafval. Momenteel worden de ertsafvalhopen van uranummijnen goed onderhouden. Toch bestaan er nog veel oude, verlaten mijnen waarvan slechts een klein aantal werd gesaneerd. Volgens ramingen van UNSCEAR komt de collectieve jaardosis van bevolkingsgroepen die wonen bij uranummijnen, verwerkingsinstallaties en ertsafvalhopen momenteel uit op ongeveer 50 tot 60 mens Sv.

Bestraalde (verbruikte) splijtstof van reactoren kan worden opgewerkt om uranium en plutonium terug te winnen en weer als splijtstof in omloop te brengen. Het merendeel van de verbruikte splijtstof bevindt zich momenteel in tussentijdse opslagfaciliteiten; slechts één derde van de huidige voorraad verbruikte splijtstof werd tot dusver opgewerkt. De collectieve jaardosis ten gevolge van opwerking schommelt naar schatting tussen 20 en 30 mens Sv.

Laagactief afval en tot op zekere hoogte ook middelactief afval worden tegenwoordig geborgen in bergingen dicht bij het oppervlak. Vroeger werd dit afval soms in zee gestort. Hoogactief opwerkingsafval en verbruikte splijtstof (voor zover niet opgewerkt) worden opgeslagen. Uiteindelijk zal men ook voor een berging van dit radioactief materiaal moeten zorgen. Voor zover de berging van dit afval naar behoren verloopt, zal dit geen aanleiding geven tot stralingsblootstelling bij mensen, zelfs niet in de verre toekomst.

Belangrijkste processen in de kernindustrie

Door conversie, verrijking en verwerking wordt uranium

klaargemaakt voor gebruik als splitstof.



Bij het fijnmalen wordt uranium gewonnen uit erts. Het residu bestaat uit ertsafval met lage concentraties aan langlevende radionucliden.



Natuurlijk uranium wordt voornamelijk gewonnen in open mijngroeven (dagbouw) of in ondergrondse mijnen (diepbouw).

Bij de splitstofproductie

worden splitstofstaven doorgaans gemaakt uit uranium, in de vorm van keramische pellets, omsloten in metalen buizen.



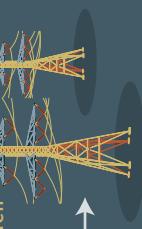
Uranium en plutonium in verbruikte splitstof kan na conversie en verrijking worden opgewerkt en weer als splitstof in omloop worden gebracht.



Tegenwoordig wordt hoogactief afval en verbruikte splitstof bijna altijd opgeslagen in afwachting van definitieve berging in diepe geologische lagen.



In onderzoeks- en energiereactoren



worden uraniumatoomkernen gesplitst. De warmte van dit kernsplitsingsproces wordt gebruikt om water te verhitten.

Radioactieve bijproducten verminderen het splitstofrendement. Na 12 tot 24 maanden wordt de verbruikte splitstof uit de reactor verwijderd.



In reactoren geproduceerde radio-isotopen kunnen worden afgzonerd voor medische en industriële toepassingen.



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



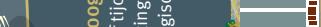
Opgeringe
en matige diepte



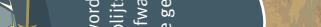
Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



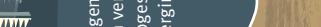
Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



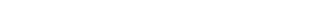
Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte



Opgeringe
en matige diepte

Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



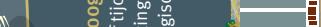
Belangrijkste processen in de kernindustrie



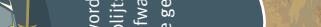
Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



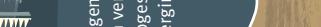
Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



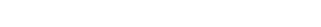
Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie



Belangrijkste processen in de kernindustrie

Belangrijkste processen in de kernindustrie

Belangrijkste processen in de kernindustrie

STRALINGSBLOOTSTELLING OP HET WERK

Het vrijkomen van radon in ondergrondse uranummijnen levert een wezenlijke bijdrage aan de beroepshalve blootstelling in de kernindustrie. Er worden op grote schaal radioactieve ertsën gewonnen en verwerkt die hoge niveaus van radionucliden bevatten. De jaargemiddelde effectieve dosis per werknemer in de kernindustrie is geleidelijk afgenomen van 4,4 mSv in de jaren zeventig tot 1 mSv vandaag. De belangrijkste reden hiervoor is de forse afname van de uraniumwinning, gecombineerd met meer geavanceerde winningstechnieken en verbeterde ventilatiemethoden.

Ongevallen in nucleaire installaties

Bij normale werking blijven de blootstellingsniveaus van kerninstallaties zeer laag. Niettemin zijn er enkele ernstige ongevallen geweest die in het middelpunt van de publieke belangstelling hebben gestaan. UNSCEAR heeft de gevolgen van die ongevallen onderzocht. We denken hierbij onder meer aan de ongevallen die plaatsvonden in het Vinca Instituut voor Kernwetenschappen (voormalig Joegoslavië – 1958); in de kerncentrale van Three Mile Island (Verenigde Staten – 1979) en in de omzettingsinstallatie van Tokai-Mura (Japan – 1999).

Tussen 1945 en 2007 hebben er in nucleaire installaties 35 ernstige stralingsongevallen plaatsgevonden waarbij werknemers ernstig gewond raakten of zelfs overleden zijn. Bij zeven ongevallen is er radioactief materiaal ontsnapt buiten het terrein van de kerninstallatie en werd de bevolking op waarneembare wijze blootgesteld. Ook in het kader van kernwapenprogramma's hebben er zich ernstige ongevallen voorgedaan. Afgezien van de hieronder behandelde ongevallen in de kerncentrale van Tsjernobyl (1986) en van Fukushima-Daiichi (2011), zijn er 32 sterfgevallen bekend alsook 61 gevallen van stralingsgerelateerde letsel s waarvoor medische behandeling nodig bleek.

Het ernstigste ongeval in een civiele kerninstallatie vóór dat van Tsjernobyl vond plaats op 28 maart 1979 in de kerncentrale van Three Mile Island. Door een aaneenschakeling van gebeurtenissen raakte de reactorkern oververhit en vond een gedeeltelijke kernsmelting of meltdown plaats. Bij dit ongeval zijn grote hoeveelheden splijtingsproducten en radionucliden uit de gesmolten reactorkern ontsnapt in het reactorgebouw. De lozing in de omgeving bleef echter relatief beperkt, wat resulteerde in een uiterste geringe blootstelling van de bevolking.

Ongeval in de kerncentrale van Tsjernobyl

Het kernongeval dat op 26 april 1986 plaatsvond in de kerncentrale van Tsjernobyl, was niet alleen de grootste kernramp in de geschiedenis van de kernenergie voor civiele doeleinden, maar ook het ernstigste kernongeval gemeten naar stralingsblootstelling van de bevolking als geheel. De collectieve dosis die door het ongeval werd veroorzaakt, was een veervoud van de gecombineerde collectieve dosis die bij alle andere stralingsongevallen werd gemeten.

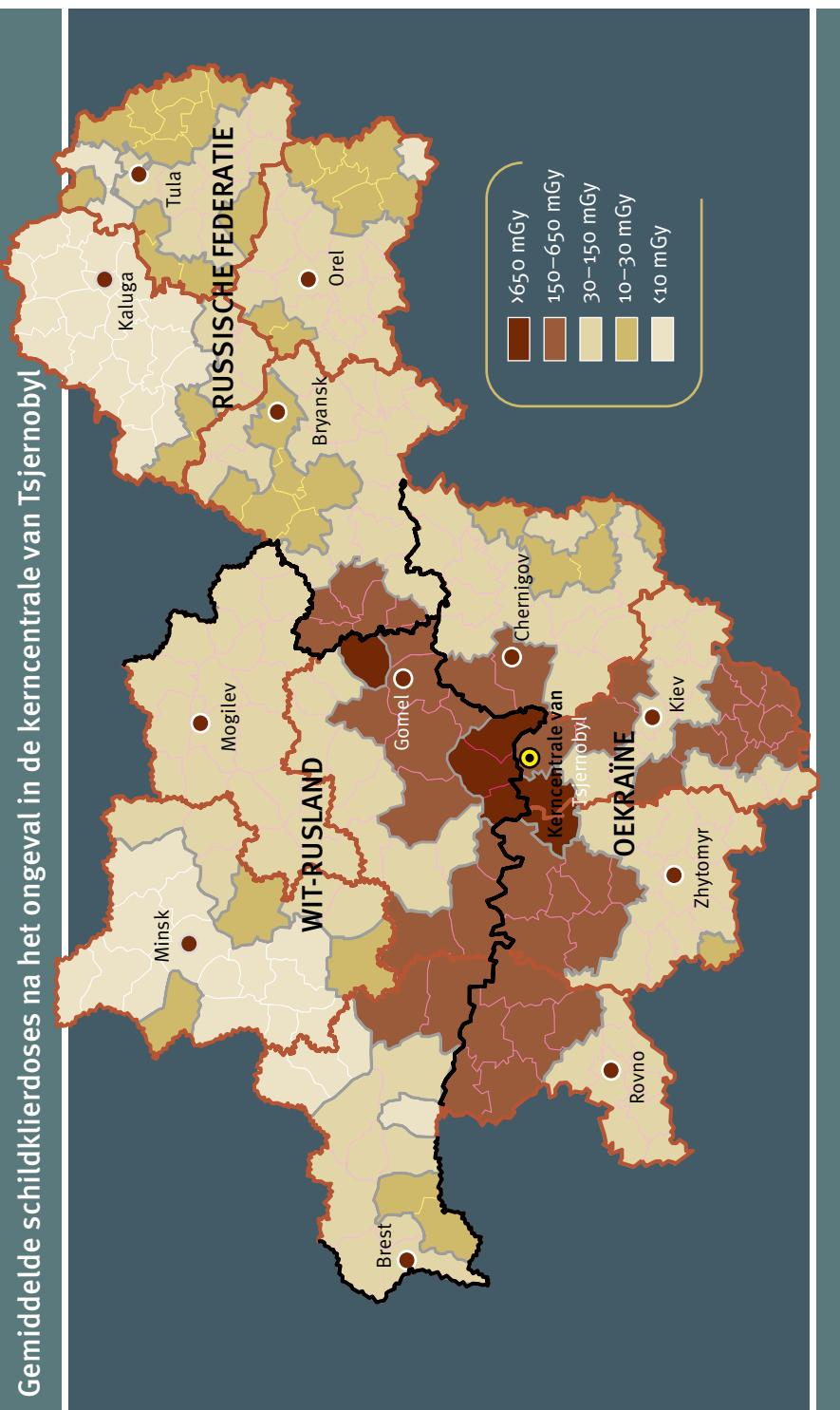
Twee werknemers overleden door ongevallen in de onmiddellijke nasleep en bij 134 reddingswerkers werd het acute stralingssyndroom vastgesteld, dat 28 onder hen het leven kostte. De overlevenden kregen vooral te kampen met huidletsels en stralingsgerelateerde symptomen, zoals cataract. Naast de reddingswerkers waren nadien vele honderduizenden mensen betrokken bij de hersteloperaties. Afgezien van de duidelijk toegenomen incidentie van leukemie en ooglensvertroebeling (cataract) bij de personen die hoge doses opliepen in 1986 en 1987, bestaat er tot op heden geen sluitend bewijs dat deze groep getroffen werd door andere stralingsgerelateerde gezondheidseffecten.

Dit ongeval veroorzaakte de grootste ongecontroleerde uitstoot van radioactieve stoffen in het milieu die ooit werd geregistreerd voor civiele kerninstallaties. Gedurende een tiental dagen kwamen grote hoeveelheden radioactieve stoffen vrij in de atmosfeer. De radioactieve wolk die door het ongeval was ontstaan, verspreidde zich over het volledige noordelijke halfrond. Daarbij kwamen aanzienlijke hoeveelheden radioactief materiaal terecht in grote gebieden van de voormalige Sovjet-Unie en in andere delen van Europa. Hierdoor raakten land en water radioactief besmet, vooral in Wit-Rusland, de Russische Federatie en Oekraïne. Grote delen van de bevolking werden hierdoor getroffen met een ernstige maatschappelijke en economische ontwrichting tot gevolg.

Als gevolg van de besmetting van verse melk met het kortlevende radionucleide jodium-131 (met een halveringstijd van acht dagen) en mede door het uitblijven van directe tegenmaatregelen, kregen met name kinderen in delen van de voormalige Sovjet-Unie zeer hoge schildklierdoses. Sinds het begin van de jaren negentig werd een hogere incidentie van schildklierkanker vastgesteld bij personen die in 1986 als kind of tiener waren blootgesteld. Dit was met name het geval in Wit-Rusland, in Oekraïne en in vier van de meest getroffen gebieden van de Russische Federatie. In de periode 1991-2005 werden meer dan 6 000 gevallen van schildklierkanker gemeld, waarvan 15 met dodelijke afloop.

Op langere termijn werd ook de bevolking aan straling blootgesteld, zowel uitwendig via de radioactieve neerslag, als inwendig door het verbruik van radioactief besmet voedsel, voornamelijk met cesium-137 (dat een halveringstijd van

Gemiddelde schildklierdoses na het ongeval in de kerncentrale van Tsjernobyl



dertig jaar heeft). De daaruit resulterende stralingsdoses op lange termijn waren echter relatief laag: de individuele effectieve dosis over de periode 1986–2005 in besmette gebieden van Wit-Rusland, de Russische Federatie en Oekraïne bedroeg gemiddeld 9 mSv. Waarschijnlijk zal dit geen wezenlijke gezondheidseffecten hebben voor de bevolking. Toch heeft de ernstige ontwrichting waartoe dit ongeval heeft geleid, verstrekende maatschappelijke en economische gevolgen gehad en groot leed berokkend aan de getroffen bevolkingsgroepen.

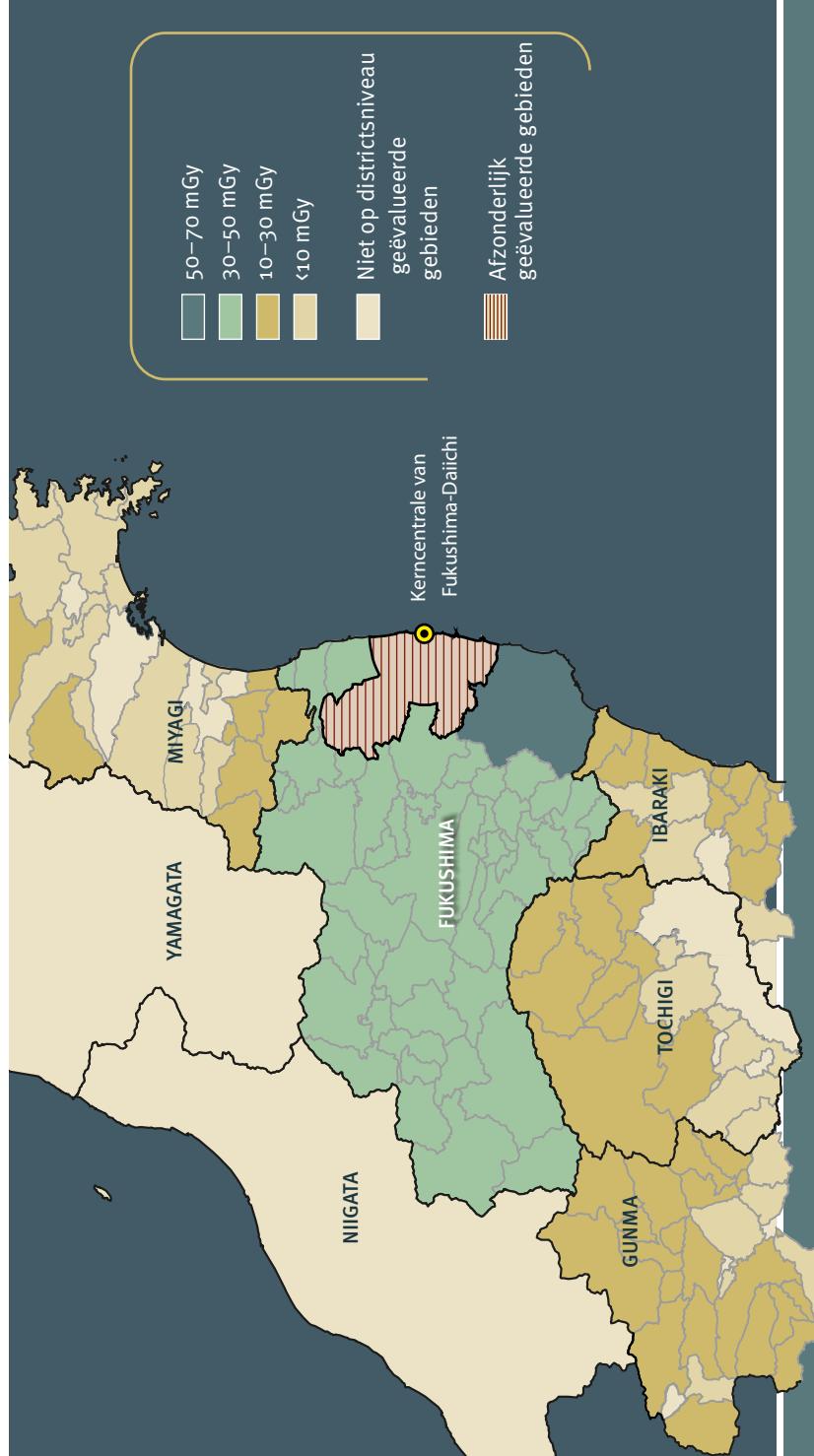
UNSCEAR heeft de radiologische gevolgen van het kernongeval grondig onderzocht en de resultaten daarvan in diverse verslagen gebundeld. De internationale gemeenschap heeft ongeziene inspanningen geleverd, niet alleen om de omvang van de gevolgen van het ongeval beter in kaart te brengen, maar ook om de schadelijke effecten ervan nader te karakteriseren. Daarbij kwamen niet enkel algemene aspecten aan bod maar ook diverse specifieke aandachtspunten met het doel de radiologische en andere gevolgen van het ongeval beter te begrijpen en zodoende te helpen verzachten.

Uit de sinds 1986 uitgevoerde studies komt duidelijk naar voren dat zowel de personen die als kind aan jodium-131 zijn blootgesteld als de reddings- en opruimingswerkers die hoge stralingsdoses opliepen, een verhoogd risico lopen op stralingsgeïnduceerde effecten. De meeste plaatselijke bewoners werden blootgesteld aan lage stralingsniveaus die vergelijkbaar zijn met, of enkele keren hoger zijn dan de jaardoses die ze krijgen als gevolg van natuurlijke achtergrondstraling.

Ongeval in de kerncentrale van Fukushima-Daiichi

Op 11 maart 2011 werd het oosten van Japan getroffen door een zware aardbeving met een kracht van 9,0 op de schaal van Richter. Na de beving werd de Japanse noordoostkust overspoeld door een tsunami. Als gevolg daarvan werd de kerncentrale van Fukushima-Daiichi ernstig beschadigd en kwam radioactief materiaal vrij in het milieu. Tussen 11 en 15 maart werden ongeveer 85 000 bewoners binnen een straal van 20 km rond de kerncentrale en in sommige omliggende gebieden uit voorzorg geëvacueerd. Wie op 20 tot 30 km van de kerncentrale woonde, kreeg de raad binnen te blijven. Later, in april 2011, werden vanwege de hoge bodembesmetting nog eens 10 000 mensen geëvacueerd die verder in het noordwesten van de kerncentrale woonden. Dankzij deze evacuaties werden de betrokken personen in veel mindere mate blootgesteld. Het verbruik van water en bepaalde voedingsmiddelen werd tijdelijk aan banden gelegd om de stralingsblootstelling van het publiek te verminderen. Tijdens de interventies om de nood-situatie in de kerncentrale onder controle te krijgen, werden bepaalde leden van het exploitatiepersoneel en hulpverleners blootgesteld.

Gemiddelde schildklierdoses voor zuigelingen na het ongeval in de kerncentrale van Fukushima-Daiichi



UNSCEAR heeft onderzoek verricht naar de stralingsdoses en daarmee samenhangende gezondheids- en milieueffecten. In de periode van anderhalf jaar na het kernongeval waren ongeveer 25 000 werknemers betrokken bij de bestrijding van het ongeval en andere activiteiten op het terrein van de kerncentrale van Fukushima-Daiichi. Tijdens deze periode kregen zij een gemiddelde effectieve dosis van ongeveer 12 mSv. Zes werknemers ontvingen echter gecumuleerde doses van meer dan 250 mSv; de hoogste gecumuleerde dosis die werd gemeld, bedroeg 680 mSv en werd voornamelijk als gevolg van inwendige blootstelling (ongeveer 90%) opgelopen. Twaalf werknemers liepen schildklerdoses op van naar schatting 2 tot 12 Gy. Bij de blootgestelde werknemers werden geen stralingsgerelateerde sterfgevallen of acute ziekten vastgesteld.

In het eerste jaar na het ongeval schommelden de gemiddelde effectieve doses, die werden opgelopen door volwassenen in de geëvacueerde gebieden van de prefectuur Fukushima, tussen 1 mSv en ongeveer 10 mSv. De effectieve doses die werden ontvangen door één jaar oude zuigelingen waren naar schatting dubbel zo hoog. In de niet-geëvacueerde gebieden van de prefectuur Fukushima en in omliggende prefecturen vielen de doses lager uit.

De gemiddelde schildklerdoses, voornamelijk van jodium-131, die werden opgelopen door de meest blootgestelde personen, gingen naar schatting tot 35 mGy bij volwassenen en tot 80 mGy bij één jaar oude zuigelingen. De jaarlijkse schildklerdosis, voornamelijk afkomstig van uitwendige natuurlijke stralingsbronnen, ligt doorgaans in een grootteorde van 1 mGy. UNSCEAR maakte hieruit op dat er in theorie een verhoogd risico op schildklierkanker bestaat bij de groep kinderen die het meest aan straling zijn blootgesteld. Schildklierkanker komt echter zelden voor bij jonge kinderen. Daardoor vallen er in deze groep statistisch gezien geen waarneembare effecten te verwachten.

Vergeleken met de kernramp in Tsjernobyl vertoonde het kernongeval van Fukushima-Daiichi een aantal verschillen qua reactortype, wijze waarop het ongeval plaatsvond, kenmerken van de uitstoot en verspreiding van radionucliden, en genomen beschermingsmaatregelen. In beide gevallen kwamen grote hoeveelheden jodium-131 en cesium-137 – de twee belangrijkste radionucliden wat blootstelling na kernongevallen betreft – vrij in het milieu. Vergelijkt met het Tsjernobyl-ongeval bedroeg de uitstoot van jodium-131 en cesium-137 bij het ongeval in de kerncentrale van Fukushima-Daiichi respectievelijk 10% en 20%.

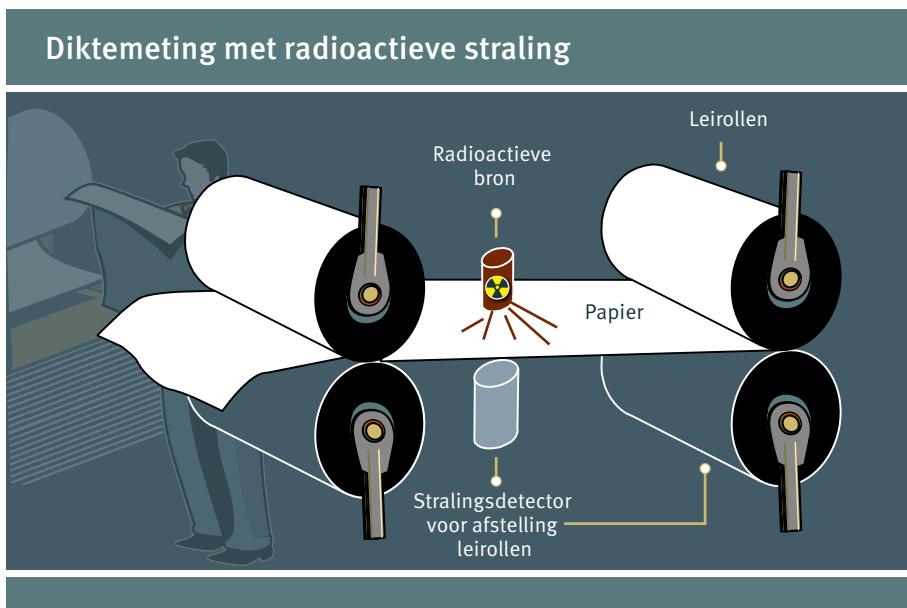
Industriële en andere toepassingen

Stralingsbronnen worden ingezet voor een breed scala aan industriële toepassingen. Daartoe behoren industriële bestraling voor de sterilisatie van medische en farmaceutische producten, de conservering van voedingsmiddelen of de bestrijding van insectenplagen; industriële radiografie voor het onderzoek van metalen lasnaden op gebreken; alfa- of bètastralers als lichtgevende componenten in wapenvizieren en als lichtbronnen met een laag vermogen voor het verlichten van uitgangsberden en kaarten; radioactieve bronnen of mini-röntgenapparaten voor de meting van geologische eigenschappen in boorgaten bij erts-, olie- of gaswinning; radioactieve bronnen in diktemeters, vochtmeters, dichtheidsmeters en niveaumeters in materiaaltoepassingen; en andere ingekapselde radioactieve bronnen voor onderzoeksdoeleinden.

De blootstelling van de bevolking door de productie op grote schaal van radio-nucliden voor gebruik in industriële en medische toepassingen blijft uiterst gering. Niettemin kunnen ongevallen leiden tot radioactieve besmetting in beperkte gebieden en grote blootstellingsniveaus tot gevolg hebben.

STRALINGSBLOOTSTELLING OP HET WERK

Begin 2000 waren ongeveer één miljoen werknemers betrokken bij industriële toepassingen van straling. De jaargemiddelde effectieve dosis bedroeg 0,3 mSv per werknemer.



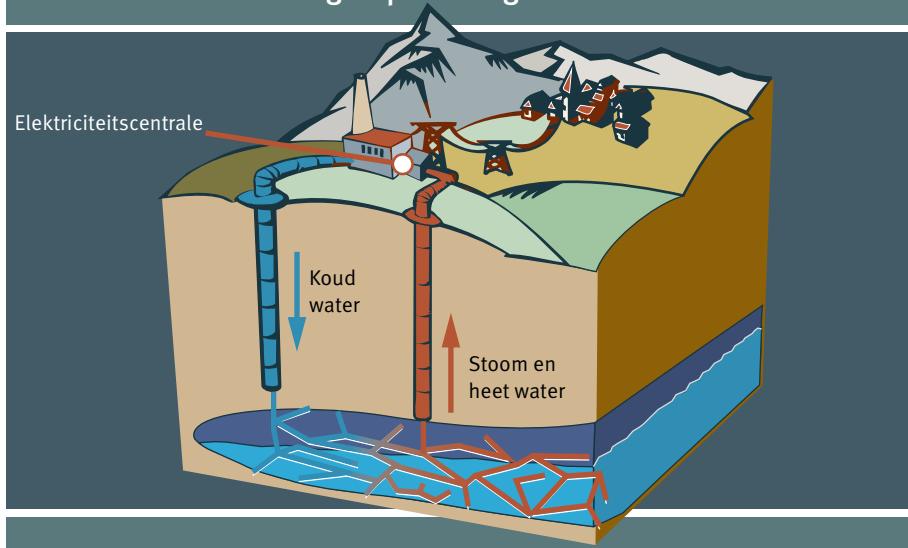
Natuurlijke radioactieve materialen

Over de hele wereld bestaan talloze installaties waar weliswaar geen kernenergie wordt gebruikt, maar het publiek toch aan straling kan worden blootgesteld vanwege verhoogde concentraties aan *natuurlijke radioactieve materialen* (doorgaans aangeduid met het acroniem NORM, wat staat voor Naturally Occurring Radioactive Material) in industrieproducten, bijproducten en afval. Dergelijke installaties worden hoofdzakelijk ingezet voor mijnbouw en ertsbehandeling.

Ook bij activiteiten voor de winning en behandeling van ertsen kunnen verhoogde concentraties aan NORM ontstaan. We denken hierbij onder meer aan het winnen en smelten van metaal; fosfaatproductie; steenkoolwinning en elektriciteitsopwekking door steenkoolverbranding; olie- en gasboringen; de titaanoxide- en zeldzame aardelementenindustrie; de zirkonium en keramische industrie; alsook toepassingen waarvoor natuurlijke radionucliden worden ingezet (meestal isotopen van radium en thorium).

Steenkool bijvoorbeeld, bevat sporen van primordiale radionucliden. Bij steenkoolverbranding komen deze radionucliden terecht in het milieu, waar ze de mens aan straling kunnen blootstellen. Dit betekent dat voor elke gigawatt-jaar elektrisch vermogen dat door kolengestookte elektriciteitscentrales wordt opgewekt, de collectieve dosis waaraan de wereldbevolking wordt blootgesteld jaarlijks naar schatting zal toenemen met ongeveer 20 mens Sv. Ook het gebruik van vliegas (poedervormige asresten van verbrandingsprocessen), niet alleen op stortplaatsen en in de wegen-

Geothermische energieopwekking



bouw, maar ook als bouwmateriaal, resulteert in stralingsblootstelling, zowel in de vorm van directe bestraling als door inademing van radon. Verder kan het storten van vliegas leiden tot een hogere stralingsblootstelling in de omgeving van de stortplaats.

Ook de productie van geothermische energie is een bron van stralingsblootstelling voor het publiek. Uit ondergrondse reservoirs wordt stoom en heet water afgetapt om elektriciteit op te wekken, of voor de verwarming van gebouwen. De collectieve dosis per gigawatt-jaar elektriciteit volgens ramingen van de emissies voortvloeiende uit het gebruik van deze technologie in Italië en de Verenigde Staten is ongeveer 10% van die door kolengestookte energiecentrales wordt opgewekt. Momenteel neemt geothermische energie een relatief klein aandeel in de wereldenergieproductie voor haar rekening. Als gevolg daarvan levert deze energievorm ook een geringe bijdrage aan de stralingsblootstelling.

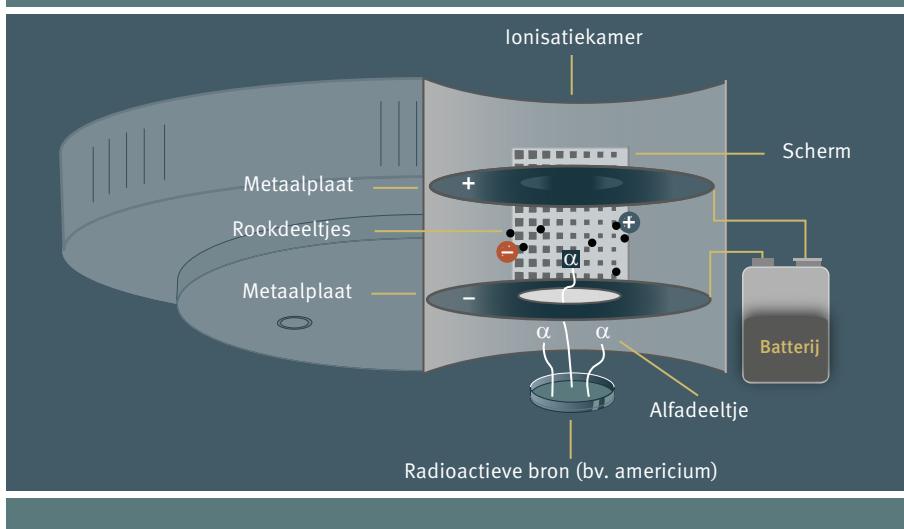
Bij diverse andere menselijke activiteiten kunnen mensen aan NORM worden blootgesteld, bijvoorbeeld door het gebruik van waterzuiveringsslib in de landbouw. Niettemin blijven de blootstellingsniveaus van het publiek uiterst laag, in een grootteorde van minder dan enkele duizendsten millisiever op jaarbasis.

Als bijproduct van uraniumverrijking is verarmd uranium minder radioactief dan natuurlijk uranium. Verarmd uranium werd jarenlang gebruikt voor civiele en militaire doeleinden. Door de hoge dichtheid wordt het toegepast als afschermingsmateriaal tegen ioniserende straling of als contragewicht in vliegtuigen. Bij het militair gebruik van verarmd uranium, met name in pantserdoorborende munitie, is bezorgdheid ontstaan over restbesmetting. Afgezien van enkele specifieke scenario's, zoals behandeling op lange termijn, is de stralingsblootstelling ten gevolge van verarmd uranium uiterst gering. In feite is de chemische toxiciteit de gevraagdste eigenschap van dit materiaal.

Gebruiksgoederen

Enkele producten die we in ons dagelijks leven gebruiken, bevatten lage niveaus van radionucliden, die opzettelijk werden toegevoegd om voordeel te halen uit hun chemische of radioactieve eigenschappen. Historisch gezien is radium-226 veruit het belangrijkste radionuclide voor gebruik in lichtgevende gebruiksgoederen. Meerdere decennia geleden werd dit gebruik stopgezet en werd radium vervangen door promethium-147 en waterstof-3 (tritium), die een kleinere radiotoxiciteit hebben. Desondanks kunnen er in klokken of horloges met componenten waarin tritium is verwerkt, kleine hoeveelheden tritium zijn uitgelekt als gevolg van de grote beweeglijkheid van deze stof. Tritium zendt echter alleen uiterst zwakke bètadeeltjes uit die niet door de menselijke huid heendringen. Daardoor worden mensen alleen blootgesteld wanneer tritium in hun lichaam terecht komt.

Ionisatierookmelder met radioactieve bron



Sommige moderne rookmelders bestaan uit ionisatiekamers met kleine folies van americium-241 die alfadeeltjes emitteren en een constante ionenstroom produceren. Omgevingslucht kan ongehinderd in de rookmelders komen en als rook in de melder komt, wordt de ionenstroom verstoord wat een alarm veroorzaakt.

Het americium dat als radioactieve bron in ionisatierookmelders wordt gebruikt, heeft een zeer lage radioactiviteit. Americium vervalt zeer langzaam met een halveringstijd van ongeveer 432 jaar. Dit betekent dat een rookmelder na tien jaar gebruik in wezen nog even radioactief is als bij het begin. Zolang het als radioactieve bron gebruikte americium in de rookmelder blijft, is de blootstelling te verwaarlozen. Ook al zijn ze meetbaar met gevoelige apparatuur, de blootstellingsniveaus van dergelijke producten blijven miniem. Iemand die acht uur per dag op twee meter afstand van de rookmelder staat, krijgt naar schatting een dosis van minder dan 0,0001 mSv op jaarrichting.

Arbeids-/bedrijfsongevallen

Arbeids-/bedrijfsongevallen met radioactieve bronnen doen zich vaker voor dan ongevallen in kerncentrales. Niettemin wordt aan ongevallen met radioactieve bronnen elders in het land doorgaans veel minder aandacht besteed. Maar werknemers en leden van het publiek kunnen bij dergelijke ongevallen aan hoge stralingsdoses worden blootgesteld.

Tussen 1945 en 2007 werd een tachtigtal ongevallen gemeld in industriële inrichtingen waar gewerkt wordt met stralingsbronnen, deeltjesversnellers en röntgenapparaten. Deze ongevallen hebben naar verluidt het leven gekost aan

negen personen, terwijl honderdtwintig werknemers gewond raakten. Sommige slachtoffers van een arbeids-/bedrijfssongeval kregen het acute stralingssyndroom (ook bekend als stralingsziekte). Dergelijke ongevallen veroorzaken meestal let-sels aan de handen, vaak met amputatie tot gevolg. Volgens UNSCEAR is het goed mogelijk dat bepaalde ongevallen in industriële inrichtingen waarbij doden en gewonden vallen, niet werden gemeld.

Deze ongevallen kunnen talrijke en uiteenlopende oorzaken en gevolgen hebben. We beperken ons hier tot twee voorbeelden. In 1978 liep een technisch medewerker op een binnenschip in de Amerikaanse staat Louisiana stralingsletsel op aan de linkerhand, veroorzaakt door een bron van iridium-192 van 3,7 TBq (terabecquerel). Het ongeval was waarschijnlijk te wijten aan een storing van de dosimeter. Een drietal weken later werd zijn hand rood en gezwollen, waarna blaarvorming optrad. Deze wonden genazen na een periode van vijf tot acht weken. Zes maanden later moest zijn wijsvinger echter gedeeltelijk geamputeerd worden. In 1990 werden in de Chinese stad Shanghai zeven arbeiders in een industriële inrichting blootgesteld aan straling uit een bron van kobalt-60. Dit ongeval was te wijten aan ontoereikende veiligheidsmaatregelen. Eén arbeider kreeg een dosis van naar schatting 12 Gy en overleed 25 dagen na blootstelling. Een tweede arbeider liep een dosis van naar schatting 11 Gy op en overleed 90 dagen na blootstelling. De andere vijf arbeiders kregen doses van naar schatting 2 tot 5 Gy, en herstelden na medische behandeling.

Weesbronnen

Tussen 1966 en 2007 werden 31 ongevallen geïnventariseerd met zogenaamde **weesbronnen**, dit zijn radioactieve bronnen waarop geen officiële controle wordt uitgeoefend omdat ze zijn verloren, zoekgeraakt of gestolen. Deze ongevallen hebben het leven gekost aan 42 leden van het publiek, onder wie ook kinderen. Verder hadden honderden personen medische verzorging nodig wegens acute stralingsziekte, ernstige verwondingen, inwendige besmetting of psychische problemen. Zes ongevallen hadden te maken met achtergelaten radiotherapeutische apparatuur.

Het is niet bekend hoeveel radioactieve weesbronnen er precies bestaan in de hele wereld, maar hun aantal loopt waarschijnlijk in de duizenden. Volgens de United States Nuclear Regulatory Commission zijn er bij Amerikaanse ondernemingen tussen 1996 en 2008 bijna 1 500 radioactieve bronnen zoekgeraakt. Meer dan de helft daarvan werd nooit teruggevonden. Volgens een studie van de Europese Unie werd geraamd dat in de hele EU jaarlijks de officiële controle op maximaal 70 radioactieve bronnen verloren gaat. Weesbronnen zelf leveren meestal geen wezenlijk stralingsgevaar op. Het zijn vooral ongevallen met deze weesbronnen die reden tot bezorgdheid geven.

Geschat aantal ernstige stralingsongevallen wereldwijd*

Soort ongeval	1945–1965	1966–1986	1987–2007
Ongevallen in nucleaire installaties	19	12	4
Bedrijfs-/arbeidsongevallen	2	50	28
Ongevallen met weesbronnen	3	15	16
Ongevallen in universiteiten/onderzoekscentra	2	16	4
Ongevallen bij medische toepassingen	Onbekend	18	14

* Op basis van officieel gemelde of openbaar gemaakte ongevallen. Aangenomen wordt dat het aantal niet-gemelde ongevallen, met name in de geneeskunde, veel groter is.

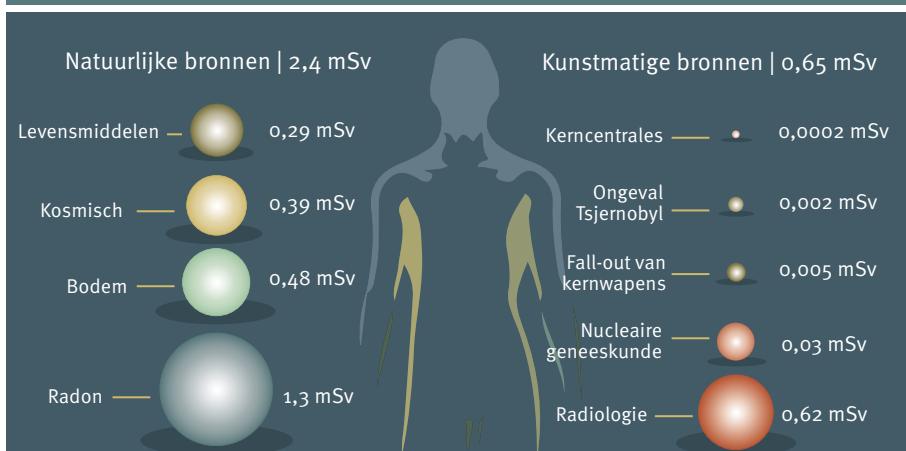
Ingekapselde bronnen of de containers ervan kunnen de indruk geven dat ze van waardevol materiaal vervaardigd zijn of dragen soms geen etiket met het opschrift ‘stralingsgevaar’, waardoor ze de aandacht trekken van personen die op zoek zijn naar oud ijzer om dit te verkopen aan schroothandelaars. Er zijn gevallen bekend waarin werknemers of zelfs leden van het publiek radioactieve bronnen nietsvermoedend hebben gemanipuleerd, met ernstig letsel en soms zelfs de dood tot gevolg. Dit was bijvoorbeeld het geval in 1987 in de Braziliaanse stad Goiânia toen een achtergelaten bestralingsapparaat met een bron van hoogactief cesium-137 (50,9 TBq) werd gestolen en de capsule van de bron werd opengekraakt. De volgende twee weken werd oplosbaar cesiumchloride in poedervorm verspreid in een sloopbedrijf en in omliggende woningen. Heel wat mensen hebben toen ziektes en huidletsels opgelopen; 110 000 personen moesten worden gescreend op radioactieve besmetting; een groot aantal van hen was inwendig besmet met cesium-137. Dit ongeval kostte het leven aan vier personen, onder wie één kind.

3.3. Gemiddelde stralingsblootstelling van bevolking en werknemers

Blootstelling aan natuurlijke stralingsbronnen is veruit de belangrijkste component van de totale blootstelling van de bevolking. De jaargemiddelde effectieve dosis per persoon wordt door UNSCEAR geschat op ongeveer 3 mSv. De jaardosis afkomstig van natuurlijke stralingsbronnen bedraagt gemiddeld 2,4 mSv; daarvan komt twee derde van radioactieve stoffen in de lucht die we

inademen, het voedsel dat we eten en het water dat we drinken. Met een individuele jaargemiddelde effectieve dosis van 0,62 mSv vormen medische toepassingen van straling de belangrijkste bron van blootstelling van kunstmatige oorsprong. De medisch-radiologische blootstelling varieert afhankelijk van regio, land en systeem van gezondheidszorg. Volgens ramingen van UNSCEAR wordt in de industrielanden bij medische toepassingen van straling jaarlijks een gemiddelde effectieve dosis opgelopen van 1,9 mSv, tegenover 0,32 mSv in niet-industrialiseerde landen. Deze dosiswaarden kunnen echter sterk uiteenlopen: in de Verenigde Staten bijvoorbeeld bedraagt deze dosis 3 mSv, maar in Kenia slechts 0,05 mSv.

Gemiddelde blootstelling van het publiek aan stralingsbronnen*



* Afgeloste schatting van de effectieve dosis die een persoon per jaar ontvangt (wereldgemiddelde).

Wat beroepsmatige blootstelling betreft, werd tot in de jaren negentig vooral aandacht besteed aan kunstmatige stralingsbronnen. Vandaag de dag beseft men echter dat een zeer groot aantal werknemers wordt blootgesteld aan natuurlijke stralingsbronnen, voornamelijk in de mijnbouw. Voor bepaalde beroepen in deze sector vormt de inademing van radongas veruit de belangrijkste bron van beroepshalve blootstelling aan straling. Het vrijkomen van radongas in ondergrondse uranummijnen levert een belangrijke bijdrage aan de beroepshalve blootstelling in de nucleaire industrie. Desondanks is de jaargemiddelde effectieve dosis van een werknemer in de nucleaire industrie als geheel gedaald van 4,4 mSv in de jaren zeventig naar ongeveer 1 mSv vandaag. Toch ontvangt een kolenmijnwerker nog steeds een jaargemiddelde effectieve dosis van ongeveer 2,4 mSv, terwijl deze dosis voor andere mijnwerkers schommelt rond 3 mSv.

Het totale aantal werknemers dat onder stralingstoezicht staat, wordt vandaag geschat op ongeveer 23 miljoen wereldwijd; van die werknemers wordt ongeveer 10 miljoen blootgesteld aan kunstmatige stralingsbronnen. Drie op vier werknemers die aan kunstmatige stralingsbronnen worden blootgesteld, zijn actief in de medische sector; de effectieve dosis die zij jaarlijks oplopen, bedraagt 0,5 mSv per persoon. Uit een trendanalyse van de jaargemiddelde effectieve dosis per werknemer blijkt dat de blootstelling aan natuurlijke stralingsbronnen is toegenomen, voornamelijk als gevolg van mijnbouw. De blootstelling aan kunstmatige stralingsbronnen daarentegen neemt af, met name dankzij de geslaagde uitvoering van maatregelen inzake stralingsbescherming.

Trends in mondiale radiologische blootstelling van werknemers (mSv)*				
Decennium	1970-79	1980-89	1990-99	2000-09
Natuurlijke bronnen				
Vliegtuigbemanning	—	3,0	3,0	3,0
Steenkoolmijnen	—	0,9	0,7	2,4
Andere mijnen**	—	1,0	2,7	3,0
Divers	—	6,0	4,8	4,8
Totaal	—	1,7	1,8	2,9
Kunstmatige bronnen				
Medische toepassingen	0,8	0,6	0,3	0,5
Kernindustrie	4,4	3,7	1,8	1,0
Andere sectoren	1,6	1,4	0,5	0,3
Divers	1,1	0,6	0,2	0,1
Totaal	1,7	1,4	0,6	0,5

* Schatting van de jaarlijkse gemiddelde effectieve dosis per werknemer.
 ** Uraniumwinning valt onder nucleaire industrie.

PUBLICATIES VAN UNSCEAR

Sinds zijn oprichting heeft het Wetenschappelijk Comité van de Verenigde Naties inzake de gevolgen van atoomstraling (UNSCEAR) meer dan vijfentwintig belangrijke verslagen uitgegeven met ruim honderd wetenschappelijke bijlagen. Dit materiaal vormt de belangrijkste bron van gezaghebbend onderzoek naar stralingsblootstelling ten gevolge van kernwapenproeven en kernenergieproductie, medische toepassingen van straling, beroepshalve gebruik van stralingsbronnen en natuurlijke stralingsbronnen. UNSCEAR evalueert ook gedetailleerde studies over stralingsgeïnduceerde gevallen van kanker en erfelijke ziekten, en beoordeelt de radiologische gevolgen van stralingsongevallen op gezondheid en milieu. De door UNSCEAR opgemaakte verslagen en wetenschappelijke bijlagen zijn verkrijgbaar als commerciële publicaties (unp.un.org) en kunnen ook gratis worden gedownload (unscear.org). Via deze verspreidingskanalen komen de bevindingen en onderzoeksresultaten ten goede aan de lidstaten van de Verenigde Naties, de wetenschappelijke wereld en het brede publiek.

Feedback en opmerkingen over deze brochure worden in dank aanvaard en kunnen gericht worden aan:UNSCEAR secretariat

Vienna International Centre
P.O. Box 500
1400 Vienna, Austria
E-mail: unscear@unscear.org

De Algemene Vergadering van de Verenigde Naties heeft in 1955 het Wetenschappelijk Comité van de Verenigde Naties inzake de gevolgen van atoomstraling (UNSCEAR) opgericht met als taak informatie te verzamelen en te evalueren over de niveaus en effecten van ioniserende straling.

UNSCEAR werd opgericht als reactie op de toenemende bezorgdheid over de effecten van ioniserende straling op de menselijke gezondheid en het milieu, in een context waarin steeds meer mensen via lucht, water en voedsel werden besmet door de radioactieve neerslag van kernwapenproeven in de atmosfeer. In het eerste verslag van UNSCEAR werden de wetenschappelijke grondslagen gelegd om te onderhandelen over het gedeeltelijk kernstopverdrag van 1963, dat voorzag in een verbod op proefnemingen met kernwapens in de atmosfeer.

In deze brochure wordt geprobeerd een objectieve stand van zaken op te maken over de meest recente kennis op het gebied van stralingsniveaus en -effecten. Het doel hiervan is eenvoudig toegankelijke en begrijpelijke informatie te verstrekken aan de doorsneebezoeker. Deze brochure berust op de wetenschappelijke verslagen van UNSCEAR, die als de belangrijkste informatiebron worden gebruikt voor de samenstelling ervan.

