

Analyse, inform and activate

LAKA

Analyseren, informeren, en activeren

Stichting Laka: Documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie

De Laka-bibliotheek

Dit is een pdf van één van de publicaties in de bibliotheek van Stichting Laka, het in Amsterdam gevestigde documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie.

Laka heeft een bibliotheek met ongeveer 8000 boeken (waarvan een gedeelte dus ook als pdf), duizenden kranten- en tijdschriften-artikelen, honderden tijdschriftentitels, posters, video's en ander beeldmateriaal. Laka digitaliseert (oude) tijdschriften en boeken uit de internationale antikernenergie-beweging.

De [catalogus](#) van de Laka-bibliotheek staat op onze site. De collectie bevat een grote verzameling gedigitaliseerde [tijdschriften](#) uit de Nederlandse antikernenergie-beweging en een verzameling [video's](#).

Laka speelt met oa. haar informatie-voorziening een belangrijke rol in de Nederlandse anti-kernenergiebeweging.

The Laka-library

This is a PDF from one of the publications from the library of the Laka Foundation; the Amsterdam-based documentation and research centre on nuclear energy.

The Laka library consists of about 8,000 books (of which a part is available as PDF), thousands of newspaper clippings, hundreds of magazines, posters, video's and other material. Laka digitizes books and magazines from the international movement against nuclear power.

The [catalogue](#) of the Laka-library can be found at our website. The collection also contains a large number of digitized [magazines](#) from the Dutch anti-nuclear power movement and a [video-section](#).

Laka plays with, amongst others things, its information services, an important role in the Dutch anti-nuclear movement.

Appreciate our work? Feel free to make a small [donation](#). Thank you.



www.laka.org | info@laka.org | Ketelhuisplein 43, 1054 RD Amsterdam | 020-6168294

Risicoschatting en –management bij radiologische en nucleaire incidenten

dr R.C.G.M. Smetsers
Hoofd Laboratorium voor Stralingsonderzoek
RIVM

11 maart 2011

Inhoudsopgave

1	Introductie.....	1
2	De hoofdconcepten van het stralingsbeschermingsbeleid	2
2.1	Biologische effecten van straling.....	2
	Deterministische effecten	2
	Stochastische effecten	3
2.2	Uitgangspunten stralingsbescherming	4
2.3	Basisbegrippen stralingsdosimetrie.....	5
3	Wet- en regelgeving.....	7
1.	Blootgestelde werknemers type A (kunnen aan hogere niveaus worden blootgesteld);.....	7
2.	Blootgestelde werknemers type B;	7
3.	Overige personen binnen de locatie;.....	7
4.	Leden van de bevolking buiten de locatie.	7
	Ongeval met Categorie B-object:	9
	Ongeval met Categorie A-object:.....	9
	Internationale verdragen.....	9
4	Risicoschatting bij ongevallen, ofwel de analyse van bron tot dosis.....	9
4.1	Inschatting bronterm	11
4.2	Verspreiding.....	11
4.3	Blootstelling en dosisbepaling	12
4.4	Dosisreductie door interventies.....	12
4.5	Belangrijke blootstellingspaden en radionucliden	13
5	Risicomanagement bij ernstige stralingsongevallen.....	14
5.1	Preventie	14
5.2	Preparatie en bestrijding	14
5.3	Procesgang bij een kernongeval.....	16
5.4	Wensen en verwachtingen voor de toekomst.....	18
6	Samenvatting en conclusies.....	18
7	Referenties	19

Risicoschatting en -management bij radiologische en nucleaire incidenten

Ronald Smetsers (RIVM – Hoofd Laboratorium voor Stralingsonderzoek)

1 Introductie

Bij het risicomanagement rond radiologische en nucleaire incidenten wordt op tamelijk conventionele wijze de veiligheidsketen gevolgd (pro-actie – preventie – preparatie – bestrijding – nazorg). Bij *pro-actie* en *preventie* ligt de nadruk op het voorkómen dat ongevallen plaatsvinden. Dat wordt in eerste instantie geborgd door het ontwikkelen en implementeren van passende wet- en regelgeving. Uiteraard moet toegezien worden op de naleving daarvan, en waar nodig moet er worden gehandhaafd. Toch kan het misgaan, en kunnen er onbedoelde situaties ontstaan. In dat geval moet het incident op de juiste wijze *bestreden* worden. Zoiets kan alleen als de aanpak van zo'n incident in de *preparatiefase* goed is voorbereid, en de deelnemende instanties adequaat zijn voorbereid op hun taak. Als de bestrijdingsfase voorbij is, breekt de *fase van nazorg en herstel* aan. De tijdsdruk is nu minder groot dan de bestrijdingsfase, maar toch is het raadzaam om je ook op deze fase passend voor te bereiden.

Stralingsongevallen zijn er in alle soorten en maten, variërend van de vondst op straat van een pakje met een radioactiviteitssticker tot een kernramp van het kaliber 'Tsjernobyl'. De aanpak van kleine onregelmatigheden is staande praktijk in Nederland. Voor zware stralingsongevallen ligt dat anders. Er zijn namelijk complicerende factoren die de aanpak van een kernramp nog moeilijker maken dan die van een ander type milieuramp. Op de eerste plaats is er sprake van specifieke wet- en regelgeving (kernenergiewet), met als gevolg dat er op sommige punten afgeweken wordt van de 'normale' aanpak in de rampenbestrijding (zie wet Veiligheidsregio's). Zo liggen bijvoorbeeld de bestuurlijke bevoegdheden anders. Ten tweede zijn stralingsrampen zo zeldzaam dat er, van hoog tot laag, weinig praktijkervaring wordt opgedaan. Ten derde is de potentiële impact van een kernramp groot en strekt het bedreigde gebied zich al gauw uit tot buiten de landsgrenzen. Dat vraagt om veel internationale afstemming, bijvoorbeeld om te voorkomen dat er aan weerszijden van de grens verschillende maatregelen worden genomen. Want ieder land hanteert zijn eigen interventieniveaus. En last-but-not-least, zowel burgers, bestuurders als hulpverleners ervaren de gevaren van straling door de bank genomen zwaarder dan ze in werkelijkheid zijn, wat kan leiden tot massa-hysterie en sub-optimaal bestuurlijk handelen. Dit alles betekent dat het managen van een zwaar stralingsongeval dus een uitdaging van formaat is.

In deze bijdrage wordt geprobeerd om de lezer op hoofdlijnen in deze materie in te voeren. Hoofdstuk 2 geeft uitleg over de risico's van ioniserende straling en de basisprincipes van het stralingsbeschermingsbeleid. Ook worden hier de meest belangrijke grootheden en eenheden uitgelegd. Hoofdstuk 3 behandelt de wet- en regelgeving. Daarbij ligt de nadruk op het Nationaal Plan voor de Kernongevallenbestrijding. De risicoschatting bij een stralingsongeval is het resultaat van een complexe bron-risico analyse. In hoofdstuk 4 wordt uitgelegd hoe dat in zijn werk gaat. Ook wordt uitgelegd met welke interventies je de risico's kunt verkleinen. In hoofdstuk 5 ligt de nadruk op de bestuurlijke procesgang, waarbij in grote lijnen de veiligheidsketen gevolgd wordt. De belangrijkste bevindingen, tenslotte, zijn beknopt weergegeven in het afsluitende hoofdstuk '*Samenvatting en conclusies*'.

2 De hoofdconcepten van het stralingsbeschermingsbeleid

Stralingsbescherming is er op gericht om de gezondheidsrisico's van blootstelling aan straling te beperken. Het stralingsbeschermingsbeleid in Nederland is afgeleid van de 1990-aanbevelingen van de *International Commission on Radiological Protection*, de ICRP [ICRP91]. Deze aanbevelingen lagen zowel ten grondslag aan de "*International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*" van de *International Atomic Energy Agency* [IAEA94], als aan de Europese "*Richtlijn 96/29/Euratom van de Raad van 13 mei 1996 tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming van de gezondheid der bevolking en der werkers tegen de aan ioniserende straling verbonden gevaren*" [EU96]. De Nederlandse wetgeving op het terrein van de stralingsbescherming is een uitwerking van deze Europese richtlijn. De 1990-aanbevelingen van de ICRP zijn ook buiten Europa breed geaccepteerd. Inmiddels heeft de ICRP in 2007 een nieuwe set van aanbevelingen uitgebracht [ICRP07]. De nieuwe aanbevelingen borduren voort op die uit 1990 en bevatten geen fundamentele veranderingen in het stralingsbeschermingsconcept. Wel is de getalswaarde van een flink aantal parameters veranderd, die gebruikt (moeten) worden om de stralingsdosis te berekenen. De 2007-aanbevelingen zijn (nog) niet overgenomen door de EU cq. door Nederland. Onduidelijk is of, wanneer en in welke mate dit plaats gaat vinden.

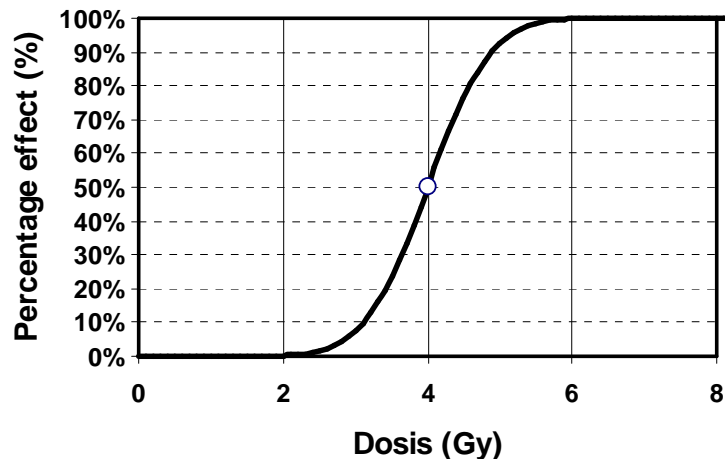
Hieronder worden eerst de belangrijkste biologische effecten van blootstelling aan straling samengevat. Daarna volgt een toelichting op hoofdlijnen van het ICRP-stralingsbeschermingsconcept uit 1990 en de implementatie daarvan in de Nederlandse wetgeving.

2.1 Biologische effecten van straling

Biologische organismen bestaan uit verzamelingen levende cellen. Om als organisme in stand te blijven vindt er voortdurend celdeling plaats. Het proces van celdeling wordt gestuurd door het DNA, dat een soort van '*biologische computercode*' bevat. Onder invloed van ioniserende straling kan het DNA beschadigd raken. Veel schade wordt hersteld, maar als de DNA-schade complex is, bestaat de kans dat het biologisch herstelmechanisme faalt, met als resultaat dat de cel niet meer kan delen. Deze schade uit zich vaak pas als de cel aan deling toe is. Dat kan uren, dagen of weken na het ontstaan van de schade zijn, afhankelijk van het type cel. Men spreekt in dit geval van *celdood*. Een andere mogelijkheid is dat er in het DNA als gevolg van foutief herstel een *mutatie* optreedt. De cel kan nog wel gewoon delen, maar er zit een weeffoutje in de code. Op de lange termijn *kan* dit, in samenhang met andere gebeurtenissen, tot de inductie van kanker leiden.

Deterministische effecten

Het menselijk lichaam bestaat uit meer dan tienduizend miljard cellen, zodat de dood van een handvol cellen geen probleem vormt. Echter, als bij toenemend stralingsniveau het aantal gedode cellen zodanig toeneemt dat er functieverlies van weefsels of organen plaatsvindt, dan spreken we van *deterministische effecten*. Deterministische effecten treden op boven een zekere drempeldosis en de ernst van het effect neemt met toenemende dosis toe. Voor de meeste deterministische effecten geldt dat de effecten vrij kort (d.w.z. binnen een maand) na blootstelling optreden. Deze effecten worden daarom ook wel *acute effecten* genoemd. De relatie tussen stralingsdosis en deterministisch effect wordt weergegeven door een S-curve. Bij lage doses is er bij niemand een effect waarneembaar, en bij hoge doses vinden we het effect in alle gevallen. De voor een bepaald effect karakteristieke stralingsdosis wordt weergegeven door de dosis waarbij het effect in 50% van de gevallen wordt waargenomen. In figuur 1 is dit geïllustreerd.



Figuur 1 Dosis-effect relatie volgens een S-curve. In dit geval gaat het (in redelijke benadering) om bestraling van het totale lichaam door een externe stralingsbron, en is het effect 'sterfte'. Het karakteristieke 50% punt is aangegeven met een open rondje.

Deterministische effecten bij de mens treden op bij hoge stralingsdoses, die in de praktijk, ook in ongevalssituaties, uitzonderlijk zijn. Deterministische effecten met een grote kans op sterfte zijn het *beenmergsyndroom*, het *maag-darmsyndroom* en – bij extreem hoge doses – het *centraal-zenuwstelselsyndroom*.

Stochastische effecten

Kanker ontstaat in een meerstaps-proces, waarbij mutaties in het DNA een essentiële rol spelen. Omdat straling in staat is om DNA te muteren, vormt het een extra risicofactor voor het ontstaan van kanker. In dit proces speelt toeval een grote rol. We spreken dan ook over *stochastische effecten*. Omdat stochastische effecten zich pas vele jaren na blootstelling openbaren, worden deze effecten ook wel *late effecten* genoemd.

De huidige kennis over de relatie tussen blootstelling aan straling en het ontstaan van kanker is afgeleid van fundamenteel biologisch onderzoek, dier-experimenteel onderzoek en de (epidemiologische) analyse van mensen die in het verleden aan hoge stralingsdoses zijn blootgesteld (atoombomslachtoffers, uraniummijnwerkers, 'radium-dialpainters'). Voor hogere stralingsdoses is het verband tussen straling en kanker bewezen, en zijn ook de risicogetallen tamelijk goed bekend. Vertaling naar lagere doses blijft echter moeilijk. Tot op de dag van vandaag woedt er een wetenschappelijke discussie of er (1) wel of niet sprake is van een drempeldosis en (2) of de dosis-effect relatie lineair is of niet. Er is sprake van een drempeldosis als er beneden die dosis geen effect optreedt. Een lineaire relatie betekent dat een vijf keer zo hoge dosis leidt tot een vijf keer zo hoge kans op een effect. Merk overigens op dat bij een hogere dosis niet het effect zelf (de ernst van de kanker) groter wordt, maar dat alleen de kans dat een tumor zich ontwikkelt toeneemt.

Voor stralingsbeschermingsdoeleinden gaan de ICRP, en daarmee ook de EU en Nederland, uit van de volgende aannames:

1. de relatie tussen de ontvangen stralingsdosis en de (extra) kans op het ontstaan van kanker is lineair;
2. er is geen sprake van een drempeldosis.

Dit model wordt ook wel het LNT-model genoemd, van 'linear-no-threshold'.

De dosis-effect relatie voor stochastische effecten (LNT) is dus wezenlijk anders is dan die voor deterministische effecten (S-curve). Voor deterministische effecten geldt wel degelijk een drempeldosis; en bovendien is de dosis-effect relatie verre van lineair.

2.2 ***Uitgangspunten stralingsbescherming***

De ICRP maakt in de 1990-aanbevelingen onderscheid tussen zogenaamde *handelingen* en *interventies*. Bij handelingen gaat het om (voorgenomen) menselijke activiteiten die aanleiding (kunnen) geven tot een verhoogde stralingsbelasting. Omdat de handeling zelf (bijvoorbeeld het controleren van lasnaden met een γ -bron) volledig planbaar is, geldt dat ook voor het na te streven niveau van bescherming. We hebben het hier dus over *reguliere situaties*, waarbij in alle rust de afweging gemaakt wordt welk niveau aan stralingsbelasting aanvaardbaar is en welke beschermingsmaatregelen nodig zijn.

Bij *interventies* gaat het om het terugdringen van de stralingbelasting in een gegeven omstandigheid die in zijn oorsprong niet of nauwelijks beheersbaar is. Dat geldt bijvoorbeeld voor *ongevalssituaties* waarbij radioactiviteit is vrijgekomen.

Ook worden er drie categorieën van blootstelling onderscheiden, te weten:

- Blootstelling van leden van de bevolking (publieksblootstelling);
- Beroepsmatige blootstelling;
- Medische blootstelling.

De laatste categorie geldt voor patiënten die medische zorg (diagnose of therapie) ondergaan waarbij straling wordt toegepast, en valt hier buiten beschouwing.

Voor leden van de bevolking gelden de strengste criteria. Voor werknemers die in reguliere omstandigheden blootgesteld worden aan straling is de maximaal toelaatbare stralingsbelasting hoger. De dosisbeperkingen die in ongevalsomstandigheden van toepassing zijn op hulpverleners zijn nog hoger. Het moge duidelijk zijn dat volgens de wetgever de toelaatbaarheid van een zekere blootstelling situatieafhankelijk is. Limieten en dosisbeperkingen worden verderop in dit hoofdstuk gepresenteerd.

Voor de stralingsbescherming bij handelingen wordt de volgende drietrapsraket gehanteerd:

(1) Rechtvaardiging

Bij een voorgenomen handeling wordt eerst gekeken of die handeling gerechtvaardigd is. De vraag ligt dus voor of de maatschappelijke voordelen van de handeling (bijvoorbeeld economische winst) de nadelen (de verhoogde stralingsbelasting) overtreffen. Een handeling die niet gerechtvaardigd is, is verboden. Dat is bijvoorbeeld snel het geval als er goede niet-radioactieve alternatieven voorhanden zijn. Zo is bv het verhandelen en toepassen van thoriumhoudende lasstaven en gloeikousjes verboden.

(2) ALARA

Als een handeling toegestaan wordt, dient de mogelijk daaruit voortvloeiende stralingsbelasting zo laag als redelijkerwijs mogelijk te worden gehouden. Vanuit het Engels wordt dit principe ALARA genoemd: As Low As Reasonably Achievable.

(3) Dosislimieten

In ieder geval dient gewaarborgd te worden dat individuen geen onaanvaardbaar hoge stralingsbelasting op (kunnen) lopen. Aan handelingen zijn daarom concrete dosislimieten verbonden. De dosislimieten zijn zodanig dat deterministische effecten vermeden worden, en het risico op stochastische effecten beperkt blijft. Deze dosislimieten zijn op Europees niveau vastgelegd, zij het met enige implementatieruimte voor de verschillende lidstaten.

Voor de stralingsbescherming bij interventies gelden de volgende, enigszins vergelijkbare uitgangspunten:

(1) Rechtvaardiging van een interventie

De uit een interventie volgende reductie in stralingsbelasting moet opwegen tegen de maatschappelijke kosten van de interventie.

(2) Optimalisatie

Een interventie moet zodanig worden uitgevoerd dat de te behalen winst geoptimaliseerd wordt. Met andere woorden, de balans van de aan de interventie verbonden nadelen en de te behalen voordelen moet zo gunstig mogelijk uitvallen.

(3) Interventieniveaus en dosisbeperkingen voor hulpverlening

De ICRP beveelt het gebruik aan van interventieniveaus. Dat zijn blootstellingsniveaus waarboven – als de situatie dat toelaat – specifieke maatregelen genomen moeten worden, zoals evacuatie of schuilen. In EU-verband zijn er, vanwege het belang van vrij verkeer van goederen, kort na ‘Tsjernobyl’ limieten vastgesteld voor het maximaal toelaatbare gehalte aan radioactiviteit in voedselwaren. Maar voor andere belastingspaden schrijven noch de ICRP, noch de EU concrete interventiewaarden voor. Dat wordt overgelaten aan de individuele lidstaten zelf. De voor de Nederlandse situatie geldende interventieniveaus zijn in 1989 vastgelegd in het Nationaal Plan voor de Kernongevallenbestrijding (NPK), en in 2008 nog ten dele aangepast [VROM89, VROM08]. De belangrijkste interventieniveaus worden verderop samengevat.

De dosislimieten die gelden voor handelingen zijn in ongevalsituaties niet van kracht. In plaats daarvan zijn er voor noodhulpverlening *dosisbeperkingen* vastgesteld. Er zijn verschillende dosisbeperkingen, waarvan de hoogte afhankelijk is van de beoogde doelen (bijvoorbeeld het uitvoeren van metingen of het redden van grote materiële belangen of mensen). De voor Nederland geldende waarden zijn vastgesteld in het NPK [VROM89] en in artikel 118 van het *Besluit stralingsbescherming* [SB01]. De dosisbeperkingen zijn zodanig dat deterministische effecten vermeden worden en het risico op stochastische effecten in het licht van de omstandigheden aanvaardbaar blijft.

2.3 Basisbegrippen stralingsdosimetrie

In de stralingsbescherming hebben we te maken met een veelvoud aan grootheden en eenheden. Er zijn *basisgrootheden* die gebruikt worden om de natuurkundige processen te beschrijven, zoals de *geabsorbeerde dosis*, D , uitgedrukt in *gray* (Gy). Deze fysische grootheden zijn in beginsel meetbaar, maar ze zijn geen goede maat voor de biologische schadelijkheid van straling.

Om het verband tussen blootstelling aan straling en kans op kanker beter tot uitdrukking te brengen zijn er speciale grootheden gedefinieerd, die rekening houden met het biologische

effect na blootstelling. De belangrijkste zijn de *equivalente (orgaan)dosis*, H_T , de *effectieve dosis*, E , en de *effectieve volg dosis*, $E(\tau)$. De equivalente (orgaan)dosis is per definitie de gemiddelde geabsorbeerde dosis in een orgaan, vermenigvuldigd met een stralingsweefactor. Die is bv. 1 voor beta- en gammastraling, maar 20 voor alfastraling. Alfastraling levert dus bij een gelijke fysische dosis meer biologische schade, dat verklaard wordt door het soort schade dat alfadeeltjes in het DNA-molecuul veroorzaken. De effectieve dosis is de equivalente orgaandosis, vermenigvuldigd met een orgaanspecifieke weefselweefactor, en dan gesommeerd over alle organen. De effectieve volg dosis, tenslotte, is gedefinieerd als de totale effectieve dosis die gedurende een periode τ wordt opgelopen na inname van een radioactieve stof. Deze periode is 70 jaar voor kinderen en 50 jaar voor volwassenen. Grootheden zoals bovengenoemd, die op een of andere manier rekening houden met het biologisch (stochastisch) effect, worden uitgedrukt in *sievert* (Sv). In de praktijk gaat het meestal om aantallen *millisievert* (mSv), of, bij hele lage doses, om *microsievert* ($1 \mu\text{Sv} = 0,001 \text{ mSv}$).

Dosislimieten en interventieniveau's zijn vrijwel altijd in dit soort grootheden uitgedrukt. Deze grootheden worden daarom *limiterende grootheden* genoemd. Limiterende grootheden zijn niet meetbaar, ze moeten *berekend* worden. Om die reden zijn er ook nog *operationele grootheden* gedefinieerd, zoals het *omgevingsdosis equivalent*, $H^*(10)$, die wél meetbaar zijn en als (conservatieve) schatting kunnen dienen voor niet meetbare limiterende grootheden¹.

Voor stralingsbeschermingsdoeleinden wordt de effectieve volg dosis doorgaans toegekend aan het moment van inname. Voor het gebruik als limiterende grootheid vervalt daarom het onderscheid tussen effectieve dosis en effectieve volg dosis. Bedenk echter dat bijvoorbeeld bij inhalatie (of ingestie) van radioactieve deeltjes in een ongevalsituatie de dosis weliswaar volgens afspraak 'opgelopen wordt' ten tijde van het ongeval, maar dat er in werkelijkheid sprake is van een chronische bestraling (met een navenant laag dosistempo) die soms jarenlang kan aanhouden.

De effectieve dosis is daarmee de eerst aangewezen maat om (beneden de drempel van deterministische gezondheidseffecten) de schadelijkheid van blootstelling aan ioniserende straling in uit te drukken, ongeacht het soort straling en de de verschillende paden waarlangs blootstelling plaatsvindt. In deze grootheid worden namelijk de specifieke eigenschappen van alle typen straling en alle weefsels en organen meegenomen. Het is dus mogelijk om in één getal de totale stralingsbelasting van het lichaam uit te drukken die het gevolg is van:

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

Merk wel op dat de effectieve dosis alleen gedefinieerd is in relatie tot de kans op stochastische effecten. Deze grootheid is dus niet bedoeld als maat voor deterministische effecten.

Omdat in de totale effectieve dosis alle risico's op stochastische effecten meegenomen zijn, is er een vertaling te maken van effectieve dosis (in *sievert*) naar kans op een effect, bijvoorbeeld de kans op sterfte aan kanker. Voor volwassen werkers is de kanscoëfficiënt voor fatale kanker als gevolg van straling $0,04 \text{ Sv}^{-1}$ [ICRP91]. Als een hulpverlener tijdens

¹ Het *omgevingsdosis equivalent*, $H^*(10)$, stelt de geabsorbeerde dosis voor op 10 mm diepte in een massieve bol van 'lichaamsequivalent materiaal' met een diameter van 30 cm. Zo'n perspex-achtige bol is een versimpeling van het menselijk lichaam; de gekozen diepte van 10 mm komt overeen met de typische ligging van belangrijke organen in het lichaam. Zie [ICRU93] voor de exacte definitie.

een interventie dus een effectieve dosis oploopt van 250 mSv, loopt hij als gevolg daarvan een extra risico van 1% om op termijn aan kanker te overlijden. Voor burgers bedraagt de kanscoëfficiënt voor fatale kanker door straling $0,05 \text{ Sv}^{-1}$. Dat de kanscoëfficiënt voor werkers iets lager is komt door het zogenaamde 'healthy worker effect': het werkende deel van de bevolking is gemiddeld gesproken gezonder en iets beter bestand tegen blootstellingen dan de totale populatie.

3 Wet- en regelgeving

Voor ongevalsbestrijding bestaat er algemene wet- en regelgeving; per 1 oktober 2010 geldt name de wet Veiligheidsregio's als kader. Maar voor het stralingsdomein domineert de specifieke wet- en regelgeving, met als basis de Kernenergiewet. Specifieke wet- en regelgeving en het gegeven dat stralingongevallen vaak een grensoverschrijdend karakter hebben, maakt de preparatie op resp. de bestrijding van kernrampen en andere ernstige stralingsongevallen in veel aspecten bijzonder. Het ministerie van VROM droeg hiervoor de systeemverantwoordelijkheid; na de departementale herindeling, eind 2010, is deze verantwoordelijkheid overgedragen aan het nieuwe ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (EL&I). Wet- en regelgeving op het gebied van straling is onder meer te vinden op de website van het rijk (www.rijksoverheid.nl).

De Kernenergiewet (Kew, gepubliceerd in het Staatsblad 1963, nummer 82) is een raamwet. Onderwerpen worden niet in detail in deze wet geregeld, maar in aparte besluiten en beschikkingen. Hoofdstuk VI van de Kernenergiewet bevat de bepalingen met betrekking tot de ongevalsbestrijding alsmede de voorbereiding daarop (artikel 38 t/m 49).

Een van de belangrijkste besluiten onder de Kew is het Besluit stralingsbescherming, dat op 1 maart 2002 in werking is getreden [SB01]. Dit besluit bevat maatregelen om werknemers en burgers te beschermen tegen de gevaren van ioniserende straling en implementeert EU richtlijn 96/29/Euratom (alsmede 97/43/Euratom, die over medische blootstelling gaat) [EU96, EU97]. Het Besluit stralingsbescherming legt ondermeer de dosislimieten voor reguliere handelingen en de dosisbeperkingen bij ongevallen vast.

Voor handelingen maakt de wetgever onderscheid tussen vier categorieën van personen:

1. Blootgestelde werknemers type A (kunnen aan hogere niveaus worden blootgesteld);
2. Blootgestelde werknemers type B;
3. Overige personen binnen de locatie;
4. Leden van de bevolking buiten de locatie.

De eerste drie categorieën zijn werknemers (of bezoekers) die onder het gezag vallen van de ondernemer. Daarvoor gelden – van streng tot minder streng – limieten voor de effectieve dosis. Daarnaast zijn er voor werknemers limieten van kracht voor de equivalente dosis voor de organen ooglens, huid en extremiteiten (= handen-onderarmen-voeten-enkels). Zie voor een overzicht Tabel 1.

Voor leden van de bevolking geldt per jaar een algehele effectieve dosislimiet voor blootstelling aan straling als gevolg van handelingen van 1 mSv. Omdat iemand aan meerdere handelingen kan worden blootgesteld geldt er in Nederland per bron of handeling een limiet voor de effectieve dosis voor leden van de bevolking van 0,1 mSv per jaar.

Tabel 1 Jaardosislimieten voor reguliere handelingen

	Effectieve dosis (mSv)	Equivalente dosis (mSv)		
		Ooglens	Huid	Extremititeiten
Blootgestelde A-werknemers	20	150	500	500
Blootgestelde B-werknemers	6	50	150	150
Andere personen op locatie	1	15	50	-
Leden van de bevolking	0,1	-	-	-

Tabel 2 Dosisbeperkingen voor werknemers en hulpverleners bij interventies [BS01]

	Effectieve dosis
	(mSv)
Levensreddend werk	750
Redden van belangrijke materiële belangen	250
Ondersteuning of uitvoering van metingen, evacuatie, jodiumprofylaxe, openbare orde en veiligheid	100

De dosislimieten die gelden voor reguliere handelingen zijn **niet** van toepassing in geval van een interventie in een radiologische noodsituatie. Voor deze situaties gelden er voor werknemers en hulpverleners dosisbeperkingen, waarvan de hoogte verband houdt met het belang van de te behalen doelen. Deze dosisbeperkingen zijn weergegeven in Tabel 2.

De hoogste dosisbeperking van 750 mSv mag volgens het Besluit stralingsbescherming (Artikel 118) slechts worden overschreden indien dat *'noodzakelijk is om mensenlevens te redden of belangrijke materiële belangen veilig te stellen, de betrokken werknemer of hulpverlener door de ondernemer is geïnformeerd over de risico's van de interventie en de interventie vrijwillig wordt uitgevoerd'*.

Uitvoeringsvoorschrift C-5 van de Kew omvat het Nationaal Plan voor de Kernongevallenbestrijding, dat in 1989, enkele jaren na Tsjernobyl, door het parlement is aangenomen [VROM89]. Dit plan vormt de basis voor een gecoördineerde inzet van de verschillende bestuurslagen en uitvoerende diensten ten tijde van een nucleair incident zoals een ongeval met een binnenlandse of buitenlandse kerncentrale. Het NPK uit 1989 beschreef een ingewikkelde en op zichzelf staande organisatie, die in de jaren daarna vanwege de zeldzaamheid van nucleaire rampen weinig operationele inzet heeft gekend. Daarmee dreigde het NPK in de loop der jaren vooral een papieren plan te worden. Tien jaar na vaststelling is daarom het Project Revitalisatie NPK (RNPK) uitgevoerd, waarbij het NPK is aangepast aan de (bestuurlijke) ontwikkelingen van de jaren negentig op het gebied van de algemene rampenbestrijding. Uitgangspunt daarbij was dat het NPK flexibeler moest worden en alleen die zaken moet regelen waarvoor niet in de normale rampenbestrijding is voorzien. Het RNPK-project is in 2002 afgerond [VROM02]. Ook sindsdien is het NPK nog regelmatig geactualiseerd. Zo zijn er nog daarna wijzingen doorgevoerd m.b.t. het maatrap scenario en de interventieniveaus voor directe maatregelen (zie verderop). Voor de meest recente beschrijving van de NPK-organisatie wordt verwezen naar het Responsplan NPK [VI09].

In het NPK wordt onderscheid gemaakt tussen ongevallen met Categorie-A en Categorie-B objecten:

Ongeval met Categorie B-object:

Het gaat hier om stralingsongevallen met lokale effecten (d.w.z. binnen de veiligheidsregio). Bij dergelijke ongevallen kan sprake zijn van een beperkte ondersteuning van ministeries en rijks-onderzoeksinstituten zoals het RIVM, maar de coördinatie van de bestrijding ligt op lokaal niveau. Voorbeelden zijn ongevallen met radioactieve bronnen, transportongevallen waarbij radioactief materiaal betrokken is, ongevallen in radionuclidenlaboratoria en ongevallen bij de opslag van radioactief materiaal.

Ongeval met Categorie A-object:

Het gaat hier om stralingsongevallen met een (mogelijk) (inter)nationale impact, waarbij de coördinatie van de bestrijding op nationaal niveau ligt. Voorbeelden zijn ongevallen met kernenergie installaties, onderzoeksreactoren, nucleair aangedreven schepen en transport ongevallen met nucleair defensiemateriaal. Hoewel niet expliciet zo beschreven zullen ook aanslagen met nucleair en/of radioactief materiaal onder dit regiem worden aangepakt. Verder kan een ongeval met een categorie B-object zich vanwege aard, ernst, omvang en gevolgen ontwikkelen tot een ernstiger ongeval, vergelijkbaar met een categorie A-object. Op verzoek van de Burgemeester of de Commissaris van de Koningin kan de verantwoordelijk minister besluiten tot opschaling conform een ongeval met een categorie A-object. De verantwoordelijk minister kan ook zelfstandig tot een dergelijke opschaling besluiten.

Internationale verdragen

Nederland is gehouden aan een aantal internationale afspraken, die gesloten zijn hetzij in IAEA-verband, hetzij in EU-verband. Het gaat daarbij onder meer om de volgende verdragen en richtlijnen:

Het IAEA-verdrag "*Convention on Early Notification of a Nuclear Accident*" verplicht de lidstaten om bij stralingsongevallen met een (mogelijk) grensoverschrijdend karakter vroegtijdig relevante informatie af te geven over de aard en het verloop van het ongeval [IAEA86a]. IAEA-verdrag "*Convention for Emergency Notification and Assistance*" regelt het wederzijds verlenen van bijstand in geval van een ernstig stralingsongeval [IAEA86b]. Beide verdragen zijn in werking getreden op 24 oktober 1991.

Ook de EU heeft de lidstaten verplicht om ernstige stralingsongevallen te melden en informatie daarover uit te wisselen. Dit is vastgelegd in EURATOM verdrag "*Council Decision on Community arrangements for the early exchange of information in the event of a radiological emergency (87/600/Euratom)*" van 14 december 1987 [EU87].

Tenslotte zijn er bilaterale afspraken gemaakt tussen Nederland en Duitsland, en is er overleg met België en het Verenigd Koninkrijk gaande om tot een vergelijkbare set van afspraken te komen.

4 Risicoschatting bij ongevallen, ofwel de analyse van bron tot dosis

Bij een (dreigend) stralingsongeval is er sprake van een (verwachte) lozing van radioactieve stoffen naar het milieu. Om in zo'n situatie passende maatregel te nemen moet eerst het (verwachte) stralingsrisico voor de bevolking ingeschat worden. Op basis van die 'radiologische' informatie kan de overheid tot een pakket van interventies besluiten. In het besluitvormingsproces worden andere (e.g. economische, politieke en sociale) aspecten nadrukkelijk meegewogen, en wordt er gekeken naar de haalbaarheid van eventueel te nemen maatregelen. Maar de (verwachte) radiologische situatie vormt bij de afweging van 'wat nu te

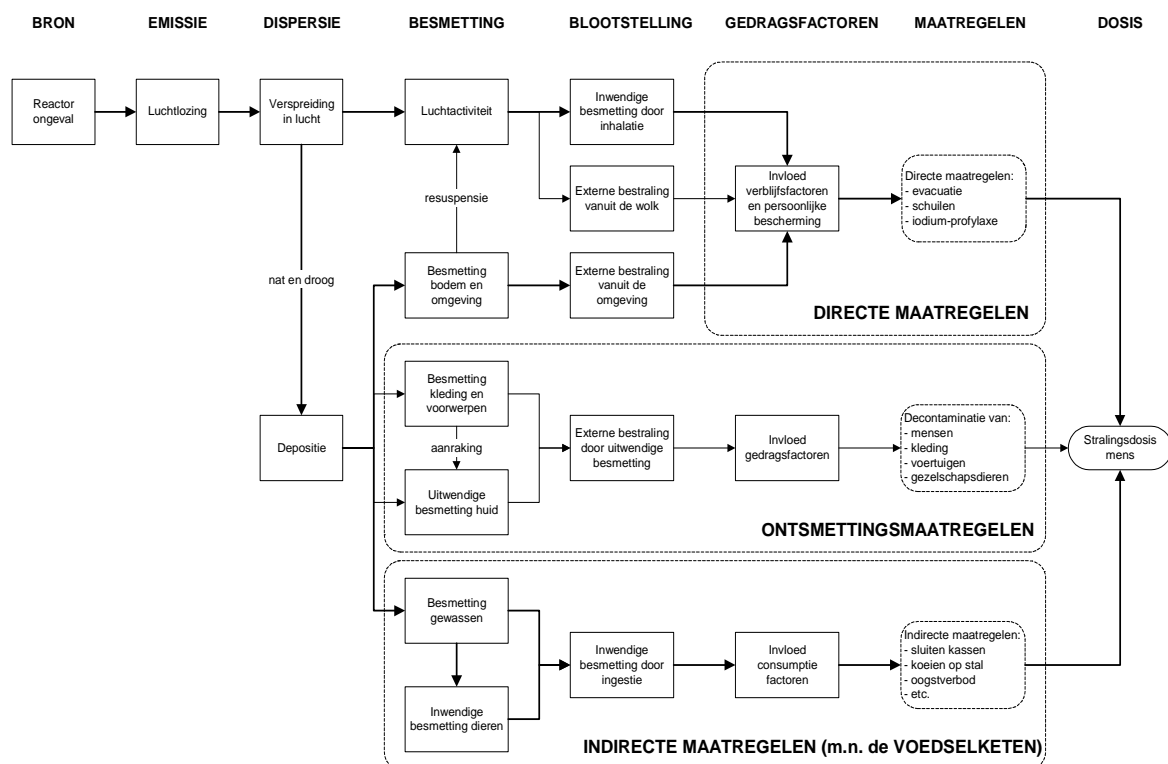
doen' toch het vertrekpunt. Het is dan ook zaak om die informatie zo goed en snel als mogelijk beschikbaar te maken.

Tussen emissie en ontvangen stralingsdosis zitten veel processen, die – afhankelijk van het type incident – behoorlijk complex kunnen zijn. Om een beeld te geven van het proces van risicoschatting wordt hieronder in vogelvlucht uiteengezet hoe in Nederland de stralingsdosis voor de bevolking wordt ingeschat in geval van een (dreigend) ongeval met een kernreactor op of nabij Nederlands grondgebied. Zo'n ongeval heeft zich (gelukkig) nog niet voorgedaan, zodat er ook geen praktijkervaring is opgedaan. Risicoschattingen van reële situaties zijn in de afgelopen jaren wel uitgevoerd voor een aantal kleinere stralingsincidenten. Uitgebreide verslagen van de (mogelijke) blootstelling van hulpverleners en omstanders aan verarmd uranium ten tijde van de vliegcrash Bijlmermeer zijn te vinden in [Sm98; Br99; Uij99; Uij00].

Bij een (dreigend) ongeval met een nabij gelegen kernreactor wordt de risicoschatting in grote lijnen via de onderstaande stappen uitgevoerd:

- De situatie binnen de nucleaire inrichting bepaalt wanneer en in welke mate er radioactiviteit vrijkomt.
- Weersomstandigheden en omgevingsfactoren bepalen vervolgens hoe deze radioactiviteit zich door het milieu verspreidt;
- Als resultaat raken lucht en omgeving besmet;
- Deze besmetting leidt vervolgens via directe (d.w.z. direct op de mens betrekking hebbende) en indirecte blootstellingspaden (voedselketen) tot een stralingsdosis;
- Het (al dan niet door interventies opgelegde) gedrag van de mens bepaalt tenslotte in welke mate er reductiefactoren van toepassing zijn.

Deze procesketen wordt in figuur 2 in meer detail weergegeven en hieronder nader toegelicht.



Figuur 2 Schematisch overzicht van belastingspaden na een ernstig kernongeval. De lijnen die (potentieel) het meest bijdragen aan de stralingsdosis zijn vet weergegeven. De stippellijntjes geven aan in welke domeinen beschermende maatregelen genomen kunnen worden.

4.1 *Inschatting bronterm*

Bij een reactorongeval gaat het bijna altijd om een (combinatie van) technisch en/of menselijk falen dat leidt tot beschadiging van splijtstofmateriaal als gevolg van onvoldoende koeling. Tijdens regulier bedrijf zijn er in het reactorvat vele honderden verschillende radioactieve stoffen gevormd, die als gevolg van lokale oververhitting ten dele kunnen ontsnappen. Echter, voordat er radionucliden in het milieu terechtkomen moeten er veel barrières genomen worden. Dit proces is zo complex dat het erg moeilijk is om tijdens een ongeval het emissieverloop precies te voorspellen. Om toch inzicht te krijgen in de gevolgen van een mankement zijn er voor de meeste kerncentrales probabilistische veiligheidsstudies uitgevoerd. Het resultaat is een set van mogelijke ongevalsscenario's met bijbehorende brontermen. Een bronterm legt vast:

- welke fractie van de aanwezige radionucliden er ontsnapt;
- hoeveel tijd er verloopt tussen het aanvankelijke falen en de emissie van radioactiviteit naar het milieu;
- hoelang de emissie duurt;
- op welke hoogte de emissie plaats vindt en wat de warmte-inhoud is.

Als een werkelijk ongeval overeenkomsten vertoont met een doorgerekend scenario van een veiligheidsstudie, dan levert dat een indicatie voor de bronterm.

4.2 *Verspreiding*

Als er eenmaal radioactieve deeltjes naar de atmosfeer geloosd zijn, zullen die daar verder verspreid worden. De actuele meteorologische situatie is dan bepalend voor het verdere verloop. De atmosfeer kan men opgebouwd denken uit twee lagen. In de onderste laag, de menglaag, vindt – afhankelijk van de mate van turbulentie – vermenging plaats van lucht en de daarin voorkomende (verontreinigende) stoffen. Uit windrichting en snelheid (op verschillende hoogtes) volgt het horizontale transport. De diffusie van de deeltjes wordt bepaald door de stabiliteit van de atmosfeer. Boven de menglaag zit de reservoirlaag. De menglaaghoogte, die de grens aangeeft tussen beide compartimenten, varieert sterk, van typisch enkele kilometers overdag tot soms minder dan tien meter 's nachts. De menglaaghoogte bepaalt dus in welke mate er verticale menging plaatsvindt en is een zeer belangrijke parameter voor luchtverspreidingsberekeningen, vooral over lange afstanden.

Naast meteorologische gegevens zijn ook de fysische en chemische eigenschappen van de deeltjes en de oppervlakteruwheid van het terrein van invloed op de verspreiding en depositie. Zware deeltjes slaan eerder neer dan lichte deeltjes en in de stad is de depositie van deeltjes heel anders dan op het platte land. Met name het gedrag van jodiumisotopen, die in verschillende chemische vormen vrij kunnen komen, is ingewikkeld.

Regenval draagt sterk bij aan de fall-out van radioactieve deeltjes. Hier zijn twee processen te onderscheiden: washout en rainout. Bij washout gaat het om het invangen van radioactieve deeltjes door vallende regendruppels, maar dat gaat niet zo effectief. Bij rainout worden de regendruppels gevormd om bestaande radioactieve verontreinigingen die hoog in de atmosfeer aanwezig zijn. Dit neerslagproces is veel effectiever maar moeilijker te voorspellen. Al met al kan de depositie van radioactieve deeltjes tijdens (hevige) regenval ordes van grootte hoger zijn dan onder droge omstandigheden. Vooral buiige regen tijdens het overtrekken van een radioactieve wolk kan leiden tot 'hot spots' in het depositiepatroon. Natte depositie betekent ook dat de wolk zelf zijn radioactiviteit verliest (depletie).

Het resultaat van dit alles is een in de tijd veranderende besmetting van lucht en omgeving. Radioactief verval (dat per radionuclide anders is) en groei van radioactieve dochters, met

doorgaans andere fysisch/chemische eigenschappen dan de moeder, maken dit proces extra ingewikkeld. De besmetting van lucht en omgeving als functie van tijd en ruimte, die alleen met complexe modellen berekend kan worden, vormt de basis voor de schatting van de stralingsdosis.

4.3 Blootstelling en dosisbepaling

Als de besmetting van lucht en omgeving bekend is kan de stralingsdosis voor een onbeschermd referentiemens ('vrij in het veld') uitgerekend worden. Zo iemand wordt extern bestraald vanuit wolk en omgeving en inwendig besmet via radioactieve stofdeeltjes in de lucht en de consumptie van radioactief besmet voedsel. Ook kunnen personen bij een kernongeval uitwendig besmet raken, hetzij direct (door fall-out), hetzij na aanraking van besmette goederen. In Figuur 1 herkennen we van links naar rechts de volgende blootstellingspaden:

- Inwendige besmetting door inhalatie van radioactieve deeltjes;
- Externe bestraling vanuit de wolk;
- Externe bestraling vanuit de omgeving (na depositie);
- Externe bestraling als gevolg van uitwendige besmetting (direct of via aanraking);
- Inwendige besmetting door inname van besmet voedsel en drinkwater.

In de bovenste gevallen wordt de mens op directe wijze blootgesteld. We spreken daarom van directe blootstellingspaden. Als je hier dosisreducerende maatregelen wilt nemen, dan hebben die rechtstreeks betrekking op de mens, vandaar de term 'directe maatregelen'. In geval van consumptie van besmet voedsel of drinkwater hebben we te maken met indirecte blootstellingspaden. Interventies vinden vooral plaats ergens in de voedselketen en worden daarom 'indirecte maatregelen' genoemd.

Bij de dosisschatting wordt gebruik gemaakt van een grote verzameling conversiecoëfficiënten die per radionuclide verschillen. Zo'n coëfficiënt legt bijvoorbeeld het verband tussen de besmetting van de bodem en de dosis door externe bestraling die daarvan het gevolg is, of het verband tussen het inademen van radioactief besmette luchtstof en de inhalatiedosis die dat oplevert. Vervolgens dienen allerlei reducerende factoren in rekening gebracht te worden, die al dan niet het gevolg zijn van genomen maatregelen.

4.4 Dosisreductie door interventies

Maatregelen zijn erop gericht om schadelijke gezondheidseffecten zo veel mogelijk te vermijden. In ieder geval moet voorkomen worden dat mensen (ook hulpverleners) dusdanig worden blootgesteld dat er acute (deterministische) stralingseffecten optreden. Daarnaast moeten lange-termijn effecten (m.n. kanker) zo veel mogelijk vermeden worden.

Evacuatie

Evacuatie levert maximale bescherming als de bevolking uit het gebied verwijderd is vóórdat de radioactieve wolk arriveert, maar ook in een latere fase kan evacuatie opportuun zijn. Het NPK maakt daarom onderscheid tussen preventieve, eerste dag en late evacuatie.

Schuilen

Verblijf in gebouwen biedt een zekere bescherming, tegen externe bestraling en tegen het inademen van radioactief besmette lucht. Hoe hoog deze bescherming precies is hangt van vele factoren af, maar als ruwe vuistregel levert schuilen een dosisreductie op van ca. 50%.

Langer dan 6 uur schuilen heeft echter weinig zin, omdat dan de binnenlucht teveel besmet geraakt is.

Jodium-profylaxe

Bij een ernstig kernongeval komen radioactieve jodiumisotopen vrij. Het meest belangrijke is het jodiumisotoop met massagetal 131, genoteerd als I-131. Dit radioactieve jodiumisotoop, dat een halfwaardetijd heeft van ca. 8 dagen, kan een groot probleem veroorzaken in de eerste dagen en weken na het ongeval, maar na enkele maanden is dit isotoop vrijwel volledig verdwenen uit de leefomgeving. Jodium wordt vooral bij kinderen effectief door de schildklier opgenomen, wat kan leiden tot schildklierkanker. Na Tsjernobyl kwam dat bij veel kinderen voor. De schildklierdosis kan vrijwel geheel vermeden worden door het tijdig innemen van stabiel jodium (kaliumjodaat- of kaliumjodidetabiet), wat jodium-profylaxe genoemd wordt. Uiteraard heeft het de voorkeur om jodium-profylaxe toe te passen vóóordat de radioactieve wolk arriveert. Echter, zelfs 6 uur na het begin van de inhalatie van de radioactief besmette lucht levert jodium-profylaxe nog een dosisreductie van ruim 60%. Oraal ingenomen jodium bereikt de schildklier namelijk veel sneller dan jodium dat via de luchtwegen binnenkomt.

Decontaminatie

Bij een ernstig kernongeval worden mensen en goederen besmet. Dat geldt met name voor hulpverleners en mensen die in de buurt van de reactor verblijven. Bij een lokaal opgestelde opvangplaats zal er dus een besmettingscontrole plaats moeten vinden. Decontaminatie van personen bestaat met name uit het grondig wassen van hoofd, haren en handen. In extreme gevallen kan men overgaan tot kaalscheren of 'strippen'. Kleding, voertuigen en andere besmette goederen kunnen een bron zijn voor verdere besmetting en dienen derhalve ingenomen te worden. Ze kunnen weer worden vrijgegeven als ze (na wassen, afsputten, vervangen luchtfilter etc.) afdoende ontsmet zijn.

Indirecte maatregelen

De consumptie van besmet voedsel of drinkwater kan vermeden worden door tijdig 'indirecte' maatregelen te nemen ergens in de voedselketen, waarbij het begrip voedselketen ruim genomen moet worden. Er bestaat een groot scala aan indirecte maatregelen. Maatregelen zoals 'graasverbod', 'sluiten van kassen' en 'sluiten van inlaatpunten voor de bereiding van drinkwater' zijn erop gericht om de besmetting van vee, land- en tuinbouwproducten en drinkwater te voorkómen. Deze maatregelen moeten genomen worden liefst vóóordat de wolk passeert. Andere maatregelen zijn erop gericht om besmette waren uit de handel te nemen.

4.5 Belangrijke blootstellingspaden en radionucliden

Om bij de afweging van maatregelen de juiste prioriteiten te kiezen is het van belang om te weten welke blootstellingspaden in welke fase het meest bijdragen aan de stralingsdosis. In geval van een ernstige kernramp wordt de stralingsdosis ten tijde van de lozing gedomineerd door de inhalatiedosis. Meest belangrijk zijn dan de radioactieve jodiumisotopen, met name I-131. Externe straling draagt 10 tot 20% bij en komt onder meer van radioactieve edelgassen. Op de iets langere termijn domineren echter de belastingspaden ingestie en externe bestraling vanuit de omgeving. Als het ongeval in het groeiseizoen plaatsvindt, zal (als er geen maatregelen genomen worden) vooral het eten van besmette bladgroente, zoals spinazie, aan de stralingsdosis bijdragen. Ook dan is I-131 erg belangrijk. Na Tsjernobyl zijn dit soort groenten dan ook tijdelijk uit de handel genomen. Op termijn van jaren domineren de cesiumisotopen Cs-137 en (in mindere mate) Cs-134.

5 Risicomanagement bij ernstige stralingsongevallen

5.1 Preventie

Het risicomanagement rond (zware) stralingsongevallen richt zich in eerste instantie op het voorkómen daarvan. Dat beleid heeft na het kernongeval in Tsjernobyl nationaal en internationaal een extra stimulans gekregen en is, af te meten aan het geringe aantal nucleaire ongevallen dat wereldwijd heeft plaatsgevonden in de afgelopen 25 jaar, succesvol te noemen. Vooral westerse kerncentrales zijn aantoonbaar veiliger dan twee decennia geleden. Dat geldt ook voor de kerncentrale te Borssele, waarvan de veiligheidssystemen en voorzieningen in de afgelopen decennia meerdere malen verbeterd zijn [KEMA93; KEMA96]. Zo wordt de kerncentrale Borssele in de opinie van de IAEA goed onderhouden en beheerd en ligt de veiligheid van de bedrijfsvoering op een hoog niveau, zo blijkt uit regelmatige inspecties [e.g. IAEA09]. Het verhoogde veiligheidsniveau van Borssele heeft ertoe geleid dat de ten tijde van het NPK ingevoerde *maatrap*² ('PWR5') enkele jaren geleden naar beneden is bijgesteld [Ba08; VROM08].

Maar ook is er geïnvesteerd in maatregelen om kleinere stralingsongevallen te voorkomen. Deze trend is versterkt door de toegenomen dreiging van terreuraanslagen, waarbij mogelijk gebruik gemaakt wordt van radiologisch of nucleair materiaal. In Nederland zijn veel preventieve maatregelen genomen, maar het merendeel van de daaraan ten grondslag liggende informatie is om veiligheidsredenen niet openbaar. Het effect van al die maatregelen is op een aantal punten wel zichtbaar. Zo zijn er in Nederland de afgelopen jaren, vrijwillig of wettelijk afgedwongen [SB02; SC03; SC09], vele tientallen stralingspoorten geplaatst, bij schrootbedrijven, de haven van Rotterdam en enkele huisvuilverwerkingsbedrijven. Door deze stralingspoorten zijn grote aantallen radioactieve voorwerpen gedetecteerd en uit het maatschappelijke verkeer genomen [e.g. VI08]. De onderschepte goederen door de jaren heen variëren van containerladingen consumentenproducten met een ontoelaatbaar hoog gehalte aan radioactieve stoffen tot radioactief besmet incontinentiemateriaal [St09], onbeheerde stralingsbronnen en stukken schroot met bestanddelen van hoogverrijkt uranium.

5.2 Preparatie en bestrijding

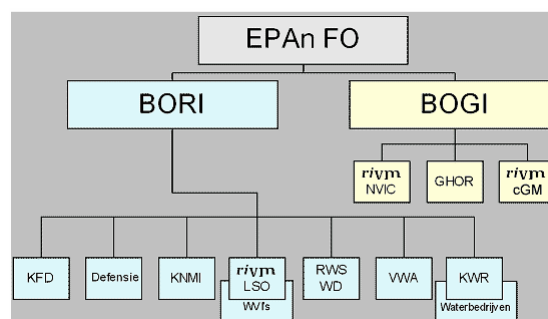
Bij risicomanagement speelt naast preventie ook preparatie en bestrijding een belangrijke rol. Kleine stralingsincidenten komen met enige regelmaat voor, en de afhandeling daarvan is staande praktijk. De (voormalige) VROM Inspectie, per 2011 onderdeel van de Inspectie Leefomgeving en Transport van het ministerie van Infrastructuur en Milieu, speelt hierbij een sleutelrol. Ook in het Protocol Verdachte Objecten [BZK06 (vertrouwelijk)] wordt rekening gehouden met de aanwezigheid van radioactief of nucleair materiaal. Verdachte objecten zoals poederbrieven worden met grote regelmaat onderschept en volgens protocol behandeld.

Voor grote stralingsongevallen, zoals ongevallen met een kernreactor, is de situatie anders. Het managen van een zwaar milieuongeval is in alle gevallen al ingewikkeld, maar bij een kernramp speelt er nog een aantal extra complicerende factoren. Op de eerste plaats wijkt de ongevalsorganisatie, vanwege de ophanging aan de kernenergiewet, op een aantal punten af van de 'normale' rampenbestrijdingsorganisatie. Vooral de noodzakelijke afstemming onder hoge tijdsdruk tussen het coördinerende rijksniveau en de decentrale overheden met hun

² In de kernongevallenbestrijding is een zogenaamde maatrap gedefinieerd die richting geeft aan het zwaarste niveau van maatregelen waar het bevoegd gezag zich op moet voorbereiden. Toen het NPK van kracht werd is gekozen voor een bronterm uit een generieke Amerikaanse veiligheidsstudie, PWR5 geheten. Volgens het PWR5-scenario komt er 3% van het in de reactor kern aanwezige jodium vrij. Volgens de nieuwe maatrap is het percentage jodium dat vrijkomt 1% [Ba08].

operationele taken ligt ingewikkeld. Op de tweede plaats zijn dit soort rampen zo zeldzaam dat veel spelers in het veld weinig ervaren zijn. Dat geldt van hoog tot laag, van topambtenaren die relatief frequent van positie veranderen tot brandweerpersoneel dat op lokaal niveau de stralingskennis in moet brengen maar in de praktijk van alle dag niet of nauwelijks met straling van doen heeft en daardoor geen ervaring opbouwt. Ten derde is de potentiële impact van een kernramp groot en strekt het (potentiële) getroffen gebied zich al gauw uit tot buiten de landsgrenzen. Extra complicerend is dan dat aan weerszijden van de grens verschillende interventiewaarden gehanteerd worden. En op de vierde plaats, tenslotte, worden de risico's van straling door veel mensen zwaarder gepercipieerd dan ze in werkelijkheid zijn. Dit probleem speelt niet alleen bij de burger, wat de lat hoog legt voor het vereiste niveau van risicocommunicatie tijdens een stralingsramp, maar stralingsangst speelt ook een rol bij niet-stralingsdeskundig personeel, zoals hulpverleners in de witte, blauwe en ten dele ook de rode kolom, die in de bestrijdingsfase een onmisbare rol moeten vervullen. Het managen van een kernongeval is dus een uitdaging van formaat. Omdat er door de jaren heen niet of nauwelijks praktijkervaring wordt opgedaan, zal de organisatie voor de kernongevallenbestrijding paraat gehouden moeten worden door permanent aandacht te schenken aan opleiding en training en frequent te oefenen op samenwerking onder tijdsdruk. Ook is het van groot belang dat plannen en protocollen, zoals de rampenplannen die lokaal voor elke nucleaire installatie beschikbaar moeten zijn, up-to-date gehouden worden. Het moge duidelijk zijn dat de hiervoor benodigde middelen, zeker in financieel zware tijden, onder druk staan.

Bij een kernongeval neemt het bevoegd gezag besluiten over maatregelen. In de nieuwe NPK-organisatie wordt het bevoegd gezag geadviseerd door de Eenheid Planning en Advies nucleair (EPAn). De EPAn bestaat uit een 'Haags' Front Office (FO) en enkele Back-Offices die op specifieke deelterrinen informatie verschaffen (zie figuur 3). Het Back-Office Radiologische Informatie (BORI), dat onder regie staat van het RIVM, heeft als taak om zo goed en snel als mogelijk inzicht te verschaffen in de (verwachte) stralingsdosis voor de bevolking. Het Back-Office Geneeskundige Informatie (BOGI), dat onder het Ministerie van VWS valt, geeft informatie over gezondheidsrisico's bij blootstelling aan straling en adviseert over nut en noodzaak van een eventueel gezondheidsonderzoek. Het FO beschouwt de informatie van de Back-Offices, beoordeelt de haalbaarheid van maatregelen en deelt informatie over het ongeval met andere partijen, zoals het lokaal bevoegd gezag, buurlanden en internationale gremia. Het radiologisch advies van het FO wordt vervolgens ingebracht in de bestuurlijke kolom voor de bestrijding van zware rampen zoals vastgelegd in het Nationaal Handboek Crisisbesluitvorming [BZK98].



Figuur 3 Schematisch overzicht (situatie 2010) van de Eenheid Planning en Advies nucleair (EPAn).

In het BORI werken alle overheidsinstituten samen die een rol spelen bij de verzameling en interpretatie van radiologische gegevens. Het gaat daarbij om de Kernfysische Dienst, KNMI,

RIVM, RIKILT, VWA, RWS Waterdienst, KIWA, de brandweer en het Ministerie van Defensie. Al deze instanties hebben weer hun eigen contacten en netwerken. Denk daarbij o.a. aan buitenlandse kerncentrales, waterschappen en waterbedrijven. Ook zijn er in dit kader met acht niet-overheidsinstellingen (de zogenaamde waakvlaminstituten) akkoorden gesloten voor de aanlevering van meetgegevens. In ongevalsituaties komen vertegenwoordigers van deze overheidsinstellingen bijeen op het RIVM te Bilthoven. De werkwijze van het BORI is elders in detail beschreven [Sm05; Sm06; Sm08].

5.3 Procesgang bij een kernongeval

Na een geverifieerde melding van een (dreigend) kernongeval wordt de NPK-organisatie opgestart. Zo'n melding kan via verschillende kanalen binnenkomen. Problemen met binnenlandse installaties zullen door de beheerder rechtstreeks aan het bevoegd gezag gemeld worden. Ook voor nabijgelegen buitenlandse centrales bestaan er bilaterale meldingsprocedures. Daarnaast bestaan er internationale meldingsverplichtingen, zowel in EU- als IAEA-verband. EU-meldingen komen binnen bij het coördinerend ministerie. De IAEA maakt gebruik van het netwerk van de World Meteorological Organization (WMO); 'Early-warning messages' van de IAEA komen zodoende binnen bij KNMI en RIVM. Als laatste vangnet staat verder nog het Nationaal Meetnet Radioactiviteit (NMR) ter beschikking, dat 24 uur per dag de stralingsniveaus in Nederland in de gaten houdt.

Tussen het aanvankelijk falen in een kerninstallatie en de (eventuele) lozing van radioactiviteit verlopen vele uren. In de dreigingsfase schat het BORI de verwachte stralingsdosis op basis van modelberekeningen. Hiervoor staan verschillende verspreidingsmodellen ter beschikking die qua bereik variëren van enkele tientallen kilometers tot geheel Europa. Om deze verspreidingsmodellen te runnen is informatie nodig over de bronterm (aan te leveren door de Kernfysische Dienst van de VROM Inspectie) en de meteorologische omstandigheden (wordt on-line door KNMI geleverd).

Na aanvang van de lozing wordt de situatie nader geanalyseerd op basis van meetgegevens, die o.a. gegenereerd worden door het Nationaal Meetnet Radioactiviteit, een aantal radiologische meetwagens, de Waakvlaminstituten en – in een latere fase – het Landelijk Meetnet Radioactiviteit in Voedsel (LMRV). Ook de RWS Waterdienst (oppervlaktewater) en de Waterbedrijven (drinkwater) zullen dan met meetresultaten komen. Gaandeweg het ongeval wordt de beschrijving van de radiologische situatie dus steeds meer gedetailleerd. Nieuwe informatie kan eerder (voor)genomen maatregelen onderbouwen of reden zijn om maatregelen in meer of mindere mate te herzien.

Om maximaal profijt te trekken van meetgegevens worden de data verzameld volgens een bepaald meetplan. Op dit moment worden bestaande lokale en nationale meetplannen geïntegreerd tot één meetstrategie. Hierin worden ook de nieuwe ondersteuningstaken van defensie op het gebied van de civiele rampenbestrijding verwerkt. Daarnaast heeft RIVM methodes uitgewerkt om de real-time interpolatie en prognose van verspreidings- en dosisschattingen te verbeteren [Tw07; Hi08].

Kort nadat de ongevalsorganisatie operationeel geworden is, zal het Front-Office van de EPAn van het BORI een eerste statusrapport ontvangen waarin de huidige en verwachte situatie is omschreven, en waarin is aangegeven waar welke interventieniveaus overschreden worden of dreigen te gaan worden. De interventieniveaus voor directe maatregelen zijn te

vinden in Tabel 3. De belangrijkste (afgeleide) interventieniveaus voor indirecte maatregelen staan in Tabel 4.

Tabel 3 De interventieniveau's voor directe maatregelen.

Maatregel	Limiet	Opmerking
Evacuatie	200 mSv	effectieve dosis niet-schuilende volwassene
Jodiumprofylaxe	100 mSv	schildklierdosis voor eenjarig schuilend kind*
	1000 mSv	schildklierdosis voor volwassene
Schuilen	10 mSv	effectieve dosis niet-schuilende volwassene

Tabel 4 Afgeleide interventieniveaus voor indirecte maatregelen. De kolommen gelden respectievelijk voor strontium-isotopen, jodium-isotopen, α -stralers en overige radionucliden*. De rechterkolom laat zien of de limietwaarde op Europees of op nationaal niveau is vastgesteld.

Max. niveau [Bq/L of Bq/kg]	Groep Sr	Groep I	Groep alfa	Groep overig*	Kader
Babyvoeding	75	150	1	400	EU
Verse melkproducten	125	500	20	1000	EU
Levensmiddelen**	750	2000	80	1250	EU
Vloeiende levensmiddelen	125	500	20	1000	EU
Diervoeders	-	-	-	1250-5000***	EU
Beregeningswater begroeid land	15	40	2	25	NL
Beregeningswater onbegroeid land	50	-	2	800	NL
Uitrijden zuiveringsslib	50	-	2	800	NL
Luchtconcentratie i.r.t. sluiten van kassen	375	1000	40	625	NL
Bodemconcentratie i.r.t. graasverbod	-	5000	-	-	NL

* Betreft niet eerder genoemde radionucliden met een halfwaardetijd groter dan 10 dagen (bv. Cs-137).

** Voor zogenaamde 'minor foodstuffs' gelden limieten die tienmaal zo groot zijn als hier aangegeven.

*** Afhankelijk van de diersoort (varkens: 1250 Bq/kg; gevoegte, lammeren en kalveren: 2500 Bq/kg, overige dieren: 5000 Bq/kg).

In deze fase is adequate afstemming met het lokaal bevoegd gezag van cruciaal belang. Dat zal immers op basis van het lokale rampenplan onder grote tijdsdruk maatregelen (willen) nemen ter bescherming van haar burgers. Het is niet realistisch om te verwachten dat men lokaal tijdig maatregelen kan implementeren die zwaarder zijn dan planmatig voorbereid. Nationale en lokale autoriteiten zullen dus samen het optimale compromis moeten vinden. Ook de communicatie naar de burger zal goed afgestemd moeten worden, opdat er geen onnodige ongerustheid ontstaat.

Nieuwe informatie kan reden zijn voor het bevoegd gezag om extra maatregelen te nemen, en/of om genomen maatregelen naar boven of beneden bij te stellen. Om de uitvoeringsorganisatie niet te zwaar te belasten zal men prudent met nieuwe inzichten om moeten gaan. Ook zal, nadat de meest belangrijke beschermende maatregelen genomen zijn, in toenemende mate aandacht gevraagd worden voor zaken waarvoor in de preparatiefase geen harde interventiewaarden zijn opgesteld. Het gaat daarbij bv. om het stilzetten of omleiden van transporten over water, wegen en door de lucht, het stilleggen van industrieën met een hoog economisch belang, het geven aan aanwijzingen aan de toeristische sector etc. Dat zal met name op nationaal niveau een hoge druk leggen op de bestuurlijke kolom.

Na enige tijd zal het gevaar voor nieuwe emissies geweken zijn, maar desondanks zal de aandacht zal zich nog lange tijd moeten richten op reductie van de stralingsbelasting van de bevolking en zullen sommige maatregelen nog lange tijd van kracht zijn. Ook zal in deze fase gewerkt moeten worden aan een zo goed mogelijk herstel van de oude situatie

(decontaminatie, sanering). Afhankelijk van de ernst van het ongeval kan de recovery fase zich over maanden tot vele tientallen jaren (Tsjernobyl) uitstrekken.

5.4 Wensen en verwachtingen voor de toekomst

De organisatiestructuur van het Nationaal Plan voor de Kernongevallenbestrijding is rond 2000 ingrijpend herzien, en nog onlangs zijn de interventieniveau's voor directe maatregelen en de maatrap, die ten grondslag ligt aan de preparatie op een kernongeval (lokaal rampenplan), naar de huidige inzichten aangepast. Het ligt dan ook niet in de rede om te verwachten dat het NPK in de nabije toekomst ingrijpend gewijzigd zal worden. Op dit moment circuleren er plannen voor de bouw van enkele nieuwe nucleaire installaties. Als hiertoe de komende jaren inderdaad besloten wordt, vraagt dat om intensivering van de inzet voor de preparatie op de bestrijding van ongevallen. Deze activiteiten kunnen echter zonder problemen in de vigerende NPK-structuur worden ondergebracht.

Wel is het zo dat er binnen het NPK framework op dit moment nog een aantal zaken onvoldoende uitgewerkt is. In de bestrijdingsfase geldt dat bijvoorbeeld voor de communicatie naar de burger en het ontsmetten van mensen, dieren en goederen. Het Radiologisch Handboek voor Hulpverleningsdiensten [BZK04] geeft voor ontsmetting weliswaar enkele handreikingen, maar dit onderwerp verdient nog nadere aandacht. Dat geldt meer algemeen voor de recovery fase, waarin de situatie van voor het ongeval zo goed als mogelijk moet worden hersteld. Het Verenigd Koninkrijk heeft voor de herstelfase van een nucleair ongeval recent een serie handboeken uitgebracht [UK09]. Voor drinkwater is een vertaling gemaakt naar de Nederlandse situatie [Kw10]. Het verdient aanbeveling om ook voor andere onderwerpen de specifieke Nederlandse situatie in meer detail uit te werken.

Ook schenkt het NPK geen expliciete aandacht aan eventuele terroristische aanslagen met radiologisch of nucleair materiaal, zoals een aanslag met een vuile bom. Als zo iets nu plaats zou vinden, zal bij de bestrijding daarvan vrijwel zeker sterk geleund worden op de NPK ongevalsstructuur. Bij een aanslag zijn echter extra aandachtspunten aan de orde, met name in de justitiële kolom en rond communicatie. Het verdient dan ook aanbeveling om de aanpak van RN-aanslagen expliciet te beschrijven in de NPK-systematiek en terreurscenario's mee te nemen in opleiding-, training- en oefenprogramma's. De toegenomen aandacht voor security heeft al wel geleid tot extra preventieve maatregelen, bv. rond het beheer van zware stralingsbronnen.

6 Samenvatting en conclusies

Het zo goed mogelijk voorkómen en adequaat afhandelen van kleine stralingsincidenten is in Nederland staande praktijk. De wet- en regelgeving is toereikend en de betrokken instanties zijn goed op hun taken ingespeeld. In de afgelopen jaren zijn diverse maatregelen genomen om de kans op een incident te verminderen, dan wel om onregelmatigheden in een vroegtijdige fase op te sporen. Denk hierbij aan zaken als preventieve maatregelen in de vergunningverlening, de plaatsing van poortdetectoren bij havens en schrootbedrijven en de wijdverbreide toepassing van het Protocol Verdachte Objecten.

Voor zware stralingsongevallen ligt dat gecompliceerder. Op het gebied van preventie is de bewijslast positief. De afgelopen tientallen jaren hebben zich in Nederland geen zware stralingsongevallen voorgedaan. Internationale inspecties laten zien dat de veiligheid van onze nucleaire installaties, zoals de kerncentrale te Borssele, sterk is verbeterd over de afgelopen decennia en ook wordt de veiligheidsattitude van management en bediendend personeel als

hoogstaand beoordeeld. Of Nederland ook goed scoort in de bestrijdings- en herstelfase is onzeker. Enerzijds staat vast dat er veel is voorbereid in de preparatiefase, maar anderszijds kan gewezen worden op omstandigheden die de aanpak van een stralingsramp in de praktijk behoorlijk zullen compliceren. Het grootste manco is dat daadwerkelijke praktijkervaring op alle niveaus ontbreekt. Dit is echter inherent aan problemen met een uiterst kleine kans van optreden, maar met zeer ernstige gevolgen voor het geval dat toch...! Hoe Nederland uiteindelijk zal presteren zal de toekomst ons leren, als het onverhoopt ooit zo ver komt.

Toch kunnen er nog een paar concrete aanbevelingen worden gedaan. Op de eerste plaats kan worden opgemerkt dat Nederland zich maar zeer beperkt heeft voorbereid op de herstelfase na een stralingsongeval. Internationaal zijn er de laatste jaren uitgebreide handboeken beschikbaar gekomen, maar die zijn nog maar ten dele vertaald naar de specifieke Nederlandse situatie. Ten tweede is de aanpak van een eventuele terroristische aanslag met radiologisch of nucleair materiaal nog onvoldoende ingebed in de huidige systematiek. Aanbevolen wordt om de aanpak van RN-aanslagen meer expliciet te beschrijven in de NPK-systematiek, met speciale aandacht voor elementen die afwijkend zijn van de aanpak van conventionele stralingsongevallen. In lijn hiermee verdient de aanpak van terreurscenario's meer aandacht in opleiding-, training- en oefenprogramma's.

7 Referenties

- Ba08 Bader S, Slaper H. *Inventarisatie en classificatie van maatregelzones bij kernongevallen*. RIVM Rapport 610790003, Bilthoven (2008)
- Br99 Bruggen M van, Janssen PCJM, Kliet JGG, Meulenbelt J, Smetsers RCGM, Uijt de Haag PAM, Mik G de, Elzinga G (vz). *Gezondheidsrisico's brand EL AL-Boeing*, RIVM 609026002 (1998).
- BZK98 *Nationaal Handboek Crisisbesluitvorming*. Ministerie van Binnenlandse Zaken, 1998
- BZK04 *Radiologisch Handboek Hulpverleningsdiensten*. Ministerie van Binnenlandse Zaken, december 2004
- BZK06 *Protocol Verdachte Objecten* (vertr.) Ministerie van Binnenlandse Zaken, april 2006
- EU87 *87/600/Euratom: Council Decision of 14 December 1987 on Community arrangements for the early exchange of information in the event of a radiological emergency*. Official Journal L 371 , 30 December 1987
- EU96 *Richtlijn 96/29/Euratom van de Raad van 13 mei 1996 tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming van de gezondheid der bevolking en der werkers tegen de aan ioniserende straling verbonden gevaren*. Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen L 159, 1996
- EU97 *Richtlijn 97/43/Euratom van de Raad van 30 juni 1997 betreffende de bescherming van personen tegen de gevaren van ioniserende straling in verband met medische blootstelling en tot intrekking van Richtlijn 84/466/Euratom*. Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen L 180, 1997
- Hi08 Hiemstra PH, Pebesma EJ, Twenhöfel CJW, Heuvelink GBM. *Automatic real-time interpolation of radiation hazards: prototype and system architecture Considerations*. International Journal of Spatial Data Infrastructures Research, 2008, Vol. 3, 58-72 Special Issue GI-Days, Münster, 2007
- IAEA86a International Atomic Energy Agency. *Convention on Early Notification of a Nuclear Accident*, INFCIRC/335, 18 November 1986.
- IAEA86b International Atomic Energy Agency. *Convention for Emergency Notification and Assistance*, INFCIRC/336, 18 November 1986.
- IAEA94 International Atomic Energy Agency. *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*. IAEA Safety Series No. 115. Wenen, 1994.
- IAEA09 International Atomic Energy Agency. *Peer review mission on safe long term operation (SALTO), Borssele NPP, Netherlands, 8-13 November 2009*. Zie: http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NENP/PLIM-LTO/plim_TMC_Borssele_NPP_Nov-2009.html
- ICRP91 International Commission on Radiological Protection. *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication no. 60, Annals of the ICRP 21(1-3), 1991

- ICRP07 International Commission on Radiological Protection. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication no. 103, Annals of the ICRP 37(2-4), 2007
- ICRU93 International Commission on Radiation Units and Measurements. *Quantities and units in radiation protection dosimetry*, ICRU Report 51, Bethesda MD, 1993
- KEMA93 *Modificatie kernenergie-eenheid centrale Borssele. Milieu-effectrapport*. KEMA Ref. 53388-KET, Arnhem (1993)
- KEMA96 *Optimalisatie splijtstof kernenergie-eenheid centrale Borssele. Milieu-effectrapport*. KEMA Ref. 64378-KES/MAD, Arnhem (1996)
- Kw10 Kwakman PJM en Versteegh JFM. *Maatregelen na een radiologische besmetting van drinkwater en drinkwaterbronnen*. RIVM rapport 703719043, Bilthoven (2010)
- SB01 *Besluit van 16 juli 2001, houdende vaststelling van het Besluit stralingsbescherming*. Staatsblad 6 september 2001, nr 397 (2001)
- SB02 *Besluit van 3 oktober 2002, houdende regels voor de detectie van radioactief besmet schroot (Besluit detectie radioactief besmet schroot)*. Staatsblad 28 november 2002, nr 565 (2002)
- SC03 *Regeling van de Staatssecretaris van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer en van de Staatssecretaris van Sociale Zaken en Werkgelegenheid, M. Rutte van 16 april 2003, nr. MJZ2003014180, houdende regels inzake de wijze van detecteren en registreren met betrekking tot aanwezigheid van ioniserende straling in schroot en de daartoe nodige vaardigheden en bekwaamheden (Regeling detectie radioactief besmet schroot)*. Staatscourant 28 april 2003, nr 81 (2003)
- SC09 *Regeling van de Ministers van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer en van Sociale Zaken en Werkgelegenheid van 26 februari 2009, nr. RB/2008107670, houdende wijziging van de Regeling detectie radioactief besmet schroot*. Staatscourant 12 maart 2009, nr 49 (2009)
- Sm98 Smetsers RCGM, Uijt de Haag PAM, van Hienen JFA en Veltkamp AC. *Gezondheidsrisico's brand EL AL-Boeing: reconstructieonderzoek verarmd uranium*. NVS Nieuws 23e jaargang nr. 5, pp. 8-11 (1998).
- Sm05 Smetsers RCGM. *Inschatting van de radiologische situatie na een kernongeval*. NVS nieuws 2005/2, pp 6-14 (2005)
- Sm06 Smetsers RCGM. *En als het dan toch gebeurt, wat dan? Inschatting radiologische gevolgen kernongeval*. Tijdschrift Milieu, Jaargang 12, No. 4, pp.40-44, april 2006
- Sm08 Smetsers, RCGM. *And if it were to happen, what then? Estimated radiological consequences of a nuclear accident*. Tijdschrift Milieu, Special Nuclear Power, September 2008
- St09 Stoop P, Bader S, Tanzi CP, Waard-Schalkx IR de. *Radioactief jodium in huishoudelijk afval. Een verkenning*. RIVM rapport 610790008, Bilthoven (2009)
- Tw07 Twenhöfel CJW, Troost MM van, Bader S. *Uncertainty analysis and parameter optimisation in early phase nuclear emergency management. A case study using the NPK-PUFF dispersion model*. RIVM rapport 861004001
- UK09 A Nisbet, J Brown, A Jones, H Rochford, D Hammond and T Cabianca. *UK Recovery Handbooks for Radiation Incidents: 2009 Version 3*. Health Protection Agency, ISBN: 978-0-85951-660-0, December 2009.
- Uij99 Uijt de Haag PAM, Smetsers RCGM, Witlox H, Krüs HW and Eisenga AHM. *Risk Analysis of Depleted Uranium following an Aircraft Crash*. In: Proceedings 9th Annual Conference Risk Analysis: Facing the New Millennium. Rotterdam, 10-13 Oct 1999.
- Uij00 Uijt de Haag PAM, Smetsers RCGM, Witlox H, Krüs HW and Eisenga AHM. *Evaluating the risk from depleted uranium after the Boeing 747-258F crash in Amsterdam, 1992*. J Hazardous Materials. Vol. 76(1), pp. 39-58 (2000).
- VI08 VROM Inspectie Zuid-West. *Signalen met betrekking tot radioactieve stoffen en straling in 2006 en 2007*. ARTIKELCODE: 8320, 10 oktober 2008
- VI09 VROM Inspectie. *Responsplan Nationaal Plan voor de Kernongevallenbestrijding*. VROM, augustus 2009
- VROM89 VROM. *Nationaal Plan voor de Kernongevallenbestrijding*. (Tweede Kamer, vergaderjaar 1988-1989, 21015, nr.3). VROM publicatie 90044/2-89 1174/26, SDU, Den Haag, 1989
- VROM02 VROM. *De revitalisatie van het Nationaal Plan voor de Kernongevallenbestrijding - Eindrapportage project RNPk*. Ministerie van VROM, 21 maart 2002
- VROM08 Brief van de Minister van VROM aan de Tweede Kamer der Staten-Generaal. *Kernongevallenbestrijding*, 21015, nr 16. 23 maart 2008 (2008)