

**Dosisberekening voor de Omgeving bij  
Vergunningverlening Ioniserende Straling - DOVIS**  
*Deel B: Externe Straling*

J.F.A. van Hienen  
E.I.M. Meijne  
N.B. Verhoef

Petten, 11 december 2002

20733/02.45655/C

In opdracht van het Ministerie van VROM

---

auteur : J.F.A. van Hienen  
E.I.M. Meijne  
N.B. Verhoef

beoordeeld: C.W.M. Timmermans

---

56 blz

goedgekeurd : R. Huiskamp

45655jvh rap

---

© NRG 2002

Behoudens hetgeen met de opdrachtgever is overeengekomen, mag in dit rapport vervatte informatie niet aan derden worden bekendgemaakt en is NRG niet aansprakelijk voor schade door het gebruik van deze informatie.

## **Voorwoord**

Bij de aanvraag van een vergunning, of melding, in het kader van de Kernenergiewet dient volgens het Besluit stralingsbescherming (Bs) een berekening te worden gevoegd van de totale effectieve jaardosis voor de mens door lozingen in lucht en water en blootstelling aan externe straling. Regels voor het uitvoeren van deze berekening staan in de bijlage bij de ministeriële regeling- *Analyse Gevolgen Ioniserende Straling voor het milieu (mr-AGIS)*.

In eenvoudige gevallen (bijvoorbeeld voor radionuclidenlaboratoria en ingekapselde bronnen voor meet- en regeltechniek) zal volstaan kunnen worden met de vereenvoudigde rekenregels in deel I van de hierboven genoemde bijlage.

Voor de meer complexe situaties en voor die emissiesoorten waarvoor volgens de vereenvoudigde rekenregels het Secundair Niveau wordt overschreden, moet de zogenoemde ‘nadere analyse’ worden uitgevoerd, die in deel II van de bijlage wordt beschreven.

De modellen die voor deze ‘nadere analyse’ gebruikt moeten worden, zijn beschreven in het rapport *Dosisberekening voor de Omgeving bij Vergunningverlening Ioniserende Straling (DOVIS)* dat uit twee delen bestaat, respectievelijk DOVIS-A: *Lozingen in lucht en water* en DOVIS-B: *Externe straling*.

DOVIS-A is opgesteld door het RIVM. DOVIS-B, het hier voorliggend rapport, is opgesteld door NRG in opdracht van het Directoraat-Generaal Milieubeheer, Directie Stoffen, Afvalstoffen en Straling van het Ministerie van VROM onder VROM zaaknummer 200109111.

## **Distributie**

Ministerie van VROM, Directie DGM/SAS  
RIVM  
NRG

## Inhoudsopgave

<b>Lijst van tabellen</b>	<b>5</b>
<b>Lijst van figuren</b>	<b>5</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>7</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>9</b>
1.1 Doel van dit rapport	9
1.2 Indeling van het rapport	10
<b>2 Bronnen van ioniserende straling</b>	<b>11</b>
2.1 Indeling van stralingsbronnen volgens mr-AGIS	11
2.2 Typen ioniserende straling	12
2.2.1 Fotonen	12
2.2.2 Neutronen	13
2.2.3 Snelle geladen deeltjes	13
2.3 Modelbenadering van bronnen	14
2.3.1 Puntbron-model	14
2.3.2 Lijnbron-model	15
2.3.3 Oppervlaktebron-model	15
2.3.4 Bundels	15
2.3.5 Volumebron	16
2.4 Afscherming van ioniserende straling	17
2.4.1 Afscherming van fotonen	17
2.4.2 Afscherming van neutronen	20
2.4.3 Afscherming van snelle geladen deeltjes	20
<b>3 Eenvoudige ingekapselde en open bronnen</b>	<b>23</b>
3.1 Toelichting	23
3.2 Gebruik van bronconstanten	23
3.3 Berekening van de terreingrensdosis op basis van extrapolatie	26
3.4 Dosistempen van een bron met een klein stralend oppervlak (puntbron)	27
3.4.1 Berekening met behulp van een bronconstante	28
3.4.2 Berekening door middel van extrapolatie	28
3.5 Dosistempen van een bron met een klein langwerpig stralend oppervlak (staafbron)	28
3.5.1 Berekening met behulp van een bronconstante	29
3.5.2 Berekening door middel van extrapolatie	29
3.6 Dosistempen van een bron met een groot stralend oppervlak (plaatbron)	30
3.6.1 Berekening met behulp van een bronconstante	30
3.6.2 Berekening door middel van extrapolatie	31
3.7 Dosisberekening bij het transport van bronnen	31
<b>4 Complexe ingekapselde en open bronnen</b>	<b>35</b>
4.1 Toepassingsgebied en voorbeelden	35

4.2	Dosisberekening dichtbij een volumebron	36
4.2.1	Dosistempo nabij buitenzijde deponie	36
<b>5</b>	<b>Toestellen</b>	<b>39</b>
5.1	Röntgentoestellen	39
5.1.1	Toepassingsgebied	39
5.1.2	Dosis als gevolg van de (afgeschermd) primaire bundel	39
5.1.3	Dosis als gevolg van de afgeschermd secundaire bundel	40
5.1.4	Vuistregel voor jaardosis aan de terreingrens op basis van buisspanning en buislading	42
5.2	Versnellers en andere complexe toestellen	43
5.2.1	Toepassingsgebied	44
5.2.2	Versnellers	44
5.2.3	Andere complexe toestellen	45
<b>6</b>	<b>Definities en nadere uitleg</b>	<b>47</b>
	<b>Referenties</b>	<b>55</b>

## Lijst van tabellen

Tabel 1:	Radionucliden met hoogenergetische $\gamma$ -straling uit de vervalreeksen van U-238, U-235 en Th-232 en hun gemiddelde energie afgifte per desintegratie.	36
Tabel 2:	Bronconstanten voor het berekenen van het omgevingsdosisequivalenttempo	47
Tabel 3:	Massieke verzwakkingsdoorsneden van fotonen voor lucht, beton en ijzer	50
Tabel 4:	Opbouwfactoren voor transmissie door ijzer van fotonen van een isotope puntbron	51
Tabel 5:	Opbouwfactoren voor transmissie door beton van fotonen van een isotope puntbron	51
Tabel 6:	Stralingsweegfactoren $w_R$	53

## Lijst van figuren

Figuur 1:	Schema eenvoudige bronnen	25
Figuur 2:	Geometrie van bron, muur en terreingrens, van bovenaf gezien, bij het berekenen van het dosistempo aan de terreingrens bij een afgeschermd bron.	26
Figuur 3:	Geometrie van bron, muur en terreingrens, van opzij gezien	27
Figuur 4:	Situatie bij het berekenen van het dosistempo in een afgeschermd (primaire) bundel.	40
Figuur 5:	Situatie bij het berekenen van het dosistempo in een afgeschermd bundel secundaire straling veroorzaakt door verstrooiing aan de bundelstop.	41
Figuur 6:	Verstrooiingscoëfficiënten ( $\alpha$ ) voor mono-energetische fotonen bij verschillende strooihoeken bij loodrechte inval op beton en ijzer.	43



## Samenvatting

Dit rapport beschrijft rekenmethoden voor het bepalen van de dosis van leden van de bevolking door uitwendige blootstelling aan ioniserende straling afkomstig van radioactieve stoffen in de vorm van ingekapselde en open bronnen en van toestellen. Deze rekenmethoden moeten worden gebruikt indien er een nadere analyse moet worden uitgevoerd volgens deel II van de bijlage van de ministeriële regeling Analyse Gevolgen Ioniserende Straling voor het milieu (mr-*AGIS*).

Het rapport behandelt de rekenmethoden conform de volgorde in mr-*AGIS*, sectie 3.2: rekenmethoden voor ingekapselde en open bronnen en voor toestellen. Hierbij maakt het rapport onderscheid tussen eenvoudige en complexe bronnen en toestellen.

De rekenmethoden in dit rapport bepalen voor bronnen en toestellen het omgevingsdosisequivalent tempo  $H^*(10, r)$  op afstand  $r$  van, respectievelijk, een bron en een toestel. Met dit resultaat kan de maximale jaardosis  $H^*(10)_{\max}$  aan de terreingrens van een locatie worden bepaald waar zich een bron of een toestel bevindt. Daarnaast beschrijft het rapport de berekening van de dosis door blootstelling aan een bron tijdens vervoer.





# 1 Inleiding

## 1.1 Doel van dit rapport

Recent is in Nederland het Besluit stralingsbescherming (Bs) [1] van kracht geworden. Dit besluit vormt ondermeer een implementatie van de Euratom richtlijn 96/29 [2]. Conform het Bs\* dient bij de aanvraag van een vergunning of melding in het kader van de Kernenergiewet o.a. te worden aangegeven wat de gevolgen (jaardosis) voor de bevolking zijn van alle bij de inrichting/locatie behorende lozingen van radioactieve stoffen naar lucht en water en blootstelling aan externe (ioniserende) straling.

In de ministeriële regeling *Analyse Gevolgen Ioniserende Straling voor het milieu* (mr-AGIS) zijn regels gesteld en methoden aangewezen voor de uitvoering van de berekeningen van de jaardosis en de daarbij te gebruiken parameterwaarden [3]. Als ondersteuning van deze regeling zijn twee rapporten geschreven, respectievelijk DOVIS-A en -B (Dosisberekening voor de Omgeving bij Vergunningverlening Ioniserende Straling).

Het rapport DOVIS-A is gericht op de gevolgen van mogelijke reguliere lozingen van radioactieve stoffen in lucht en water en de daaruit volgende jaardosis voor de mens door ingestie en inhalatie van deze stoffen en blootstelling aan externe straling [4]. Het rapport DOVIS-A is grotendeels een herziene versie van het RIBRON-rapport [5].

DOVIS-B, het onderhavige rapport, is gericht op het berekenen van de jaardosis voor de mens door blootstelling aan externe straling afkomstig van toestellen of direct van ingekapselde of open bronnen van radioactiviteit. DOVIS-B is grotendeels een herziene versie van het REA-rapport [6].

Het rapport beschrijft de modellen en parameters waarmee de jaardosis kan worden berekend. Hierbij worden standaarden, verfijningen en eventueel voorschriften gebruikt:

**Standaard:** Sluit aan bij de gebruikelijke nationale en internationale methoden en modellen en wordt geacht voor de meeste vergunningssituaties een realistische doch conservatieve schatting van de dosis op te leveren. In principe dient voor dosisberekeningen de standaard gebruikt te worden.

**Verfijning:** Als (de vergunningaanvrager kan aantonen dat) de standaard een relevante overschatting van de berekende dosis oplevert, mag in de voorkomende gevallen de aanbevolen verfijning worden toegepast.

**Voorschrift:** Onafhankelijk van de feitelijke situatie dient bij de dosisberekeningen uitgegaan te worden van de randvoorwaarden die in de voorschriften gegeven worden.

\* Volgens artikel 44 Bs, eerste lid, onder e, en het achtste lid, en volgens zowel de artikelen 105 en 109 Bs het eerste lid, onder e, en het tweede lid.

Diverse beleidsmatige randvoorwaarden en eindpunten voor het uitvoeren van een dosisberekening zijn gegeven in de bijlage bij mr-AGIS, verder kortweg mr-AGIS genoemd [3]. Hierin zijn ook begrippen als bron, locatie, inrichting, referentiepersoon, de terreingrens en multifunctionaliteit gedefinieerd. Verder wordt in mr-AGIS aangegeven hoe de resultaten van de berekeningen aan de gehanteerde dosisniveaus moeten worden getoetst.

**Voorschrift:** *Bij het berekenen van de dosis aan de terreingrens dient te worden uitgegaan van de beleidsstandpunten, die zijn aangegeven in de ministeriële regeling Analyse Gevolgen Ioniserende Straling voor het milieu (mr-AGIS).*

## 1.2 Indeling van het rapport

Als inleiding op de voorschriften voor de berekening van de dosis door externe blootstelling aan ioniserende straling van radioactieve stoffen en van toestellen wordt in hoofdstuk 2 (*Bronnen van ioniserende straling*) eerst de indeling van bronnen van ioniserende straling volgens het Bs, nader toegelicht [1]. Vervolgens worden in hoofdstuk 2 de kernmerkende eigenschappen van fotonen, neutronen en snelle geladen deeltjes beschreven. Tevens worden eenvoudige modelbenaderingen gepresenteerd die bij dosisberekeningen gebruikt mogen worden. Tenslotte worden de berekening van dosisreductie door afscherming van stralingsbronnen behandeld. Achtergrondinformatie bij de onderwerpen behandeld in hoofdstuk 2, staat onder meer in Appendix I van het REA-rapport [6].

Het rapport behandelt de berekening van de jaardosis door blootstelling aan externe straling conform de volgorde in mr-AGIS: hoofdstuk 3.2 Toepassingsgebied rekenregels.

- Berekening van de dosis door externe blootstelling aan ioniserende straling van open en ingekapselde bronnen met radioactieve stoffen, waarbij de puntbron- of lijnbronbenadering voor de dosisberekening mag worden gebruikt. Deze rekenregels worden besproken in hoofdstuk 3: *Eenvoudige ingekapselde en open bronnen*. Blootstelling aan externe straling tijdens het transport van bronnen wordt eveneens in dit hoofdstuk behandeld.
- Berekening van de dosis door straling van open en ingekapselde bronnen met radioactieve stoffen waarbij de afmetingen van deze bronnen van dezelfde orde van grootte zijn als de afstand tussen de bron en de terreingrens. Deze rekenregels worden behandeld in hoofdstuk 4: *Complexe ingekapselde en open bronnen*.
- De berekening van de dosis door straling van toestellen zoals röntgentoestellen, versnellers en andere complexe toestellen met ioniserende straling. Deze rekenregels worden behandeld in hoofdstuk 5: *Toestellen*.

Verduidelijking van de begrippen en de grootheden in dit rapport wordt gegeven in hoofdstuk 6 *Definities en nadere uitleg*.

## 2 Bronnen van ioniserende straling

### 2.1 Indeling van stralingsbronnen volgens mr-AGIS

Een bron wordt in het Bs [1] gedefinieerd als een toestel dan wel een radioactieve stof. Bronnen kunnen op grond van meerdere criteria in categorieën worden ingedeeld. Zo kunnen bronnen bijvoorbeeld worden onderscheiden op grond van de oorsprong van de aanwezige radioactieve stoffen (kunstmatig bron - natuurlijke bron), de mogelijkheid van vrijkomen van radioactiviteit (open bron - ingekapselde bron), type straling dat vrijkomt, geometrie van het stralingsveld van de bron etc. Dezelfde bron kan daardoor afhankelijk van het selectiecriterium in verschillende categorieën worden ingedeeld. Afhankelijk van de situatie kan voor dezelfde bron dus gesproken worden over een kunstmatige bron, een ingekapselde bron, een puntbron of mobiele bron.

In sectie 1.3 van mr-AGIS worden bronnen ingedeeld in:

**Ingekapselde bronnen**, waaronder apparaten die zo'n bron bevatten.

Een ingesloten hoeveelheid radioactieve stof waarbij de kans op verspreiding van de radioactieve stof onder normale gebruiksomstandigheden verwaarloosbaar is en alleen externe blootstelling aan ioniserende straling een rol speelt en waarbij de dosis aan de terreingrens vrijwel in alle gevallen wordt veroorzaakt door externe blootstelling aan  $\gamma$ -straling, zie hoofdstuk 6: *Definities en nadere uitleg*.

Ingekapselde bronnen kunnen zowel vast (ingebouwd in een installatie) als mobiel zijn, bijvoorbeeld de ingekapselde bronnen voor gammagrafie en het voor transport gekwalificeerd verpakt radioactief materiaal.

#### **Toestellen**

Bij toestellen (voornamelijk röntgentoestellen en versnellers) wordt de ioniserende straling voornamelijk in bundels uitgezonden. Buiten deze bundels is dikwijls minder intense straling in de vorm van stroostraling aanwezig. In dit rapport wordt een kernreactor ook tot de categorie toestellen gerekend, hoewel de straling niet in bundels wordt uitgezonden (uitgezonderd de neutronenbundels bij onderzoeksreactoren).

Bij toestellen wordt de dosis aan de terreingrens vrijwel in alle gevallen veroorzaakt door externe blootstelling aan röntgen- en  $\gamma$ -straling.

#### **Open bronnen**

Een hoeveelheid radioactieve stof wordt in mr-AGIS beschouwd als een open bron indien onder normale gebruiksomstandigheden het vrijkomen van de radioactiviteit niet kan worden uitgesloten. Evenals bij ingekapselde bronnen is bij open bronnen de dosis aan de terreingrens door externe blootstelling vrijwel uitsluitend het gevolg van blootstelling aan  $\gamma$ -straling. Voorbeelden van open bronnen zijn bulkopslag van afval en andere materialen met radioactieve stoffen. Maar ook tanks, reservoirs en installaties en buizen met radioactieve stoffen, die met afsluiters en pluggen (tijdelijk) zijn afgesloten.

Bij blootstelling aan ingekapselde bronnen en toestellen speelt alleen externe blootstelling aan ioniserende straling een rol. Bij open bronnen dragen behalve deze blootstelling ook andere belastingpaden die het gevolg zijn van lozingen in lucht en water bij aan de dosis voor leden van de bevolking buiten de terreingrens van de locatie. De rekenvoorschriften voor de bepaling van de dosis door deze belastingpaden worden gegeven in DOVIS-A [4].

Voor de berekening van de jaardosis aan de terreingrens van een locatie door blootstelling aan externe straling afkomstig van de bronnen en toestellen die op deze locatie aanwezig zijn, is vooral het type ioniserende straling en de geometrie van het stralingsveld van belang. Deze eigenschappen van de bron dienen voorafgaande aan elke berekening van de stralingsdosis bekend te zijn.

**Voorschrift:** *Bij het uitvoeren van een berekening van de dosis door externe blootstelling aan stralingsbronnen volgens bijlage deel II van mr-AGIS dienen de stralingsbronnen ingedeeld te worden op grond van het type ioniserende straling van de bron en de geometrie van het stralingsveld.*

## 2.2 Typen ioniserende straling

Relevant voor het berekenen van de dosis door externe blootstelling aan ioniserende straling is het type ioniserende straling. In dit rapport worden de volgende typen beschouwd:

1. **fotonen** ( $\gamma$ - en röntgenstraling spelen een rol bij bronnen en toestellen);
2. **neutronen** (spelen vooral een rol bij toestellen, zoals versnellers en kernreactoren);
3. **snelle geladen deeltjes** (spelen alleen een rol bij versnellers).

Het type straling bepaalt ook de relatie tussen de equivalente dosis (in eenheden sievert [Sv]) en de geabsorbeerde dosis van straling (in eenheden gray [Gy]). Deze relatie wordt in hoofdstuk 6 nader toegelicht.

### 2.2.1 Fotonen

Fotonen (elektromagnetische straling) komen vrij bij het verval van de meeste radioactieve stoffen (bronnen) of worden geproduceerd met toestellen. Fotonen leiden bij passage door materiaal tot ionisatie, indien hun energie voldoende hoog is ( $> 34$  eV bij passage door lucht). Deze energetische fotonen worden naar gelang hun oorsprong ingedeeld in  $\gamma$ -straling (fotonen gevormd in de atoomkern) en röntgenstraling (fotonen opgewekt buiten de atoomkern).

De gemiddelde dracht van fotonen is afhankelijk van de energie van de fotonen en de dichtheid en atoomgetal van de afscherming. In lucht is ze vele tientallen meters, maar in beton slechts enkele centimeters tot decimeters. Fotonen kunnen met behulp van verschillende typen stralingsdetectoren worden bepaald, zoals ionisatiekamers, proportioneel tellers, Geiger-Müller tellers of varianten daarvan.

### 2.2.2 Neutronen

Een vrij neutron is een neutraal ‘radioactief’ deeltje met een halfwaardetijd van 10,6 minuten, dat onder uitzending van een elektron vervalt tot een proton. Neutronen komen vrij bij het kernsplijtingsproces en bij kernreacties met hoogenergetische deeltjes (hoger dan 8 MeV, de gemiddelde bindingsenergie van een neutron in een kern). Dit betekent dat neutronen voornamelijk met toestellen worden geproduceerd.

Bij het radioactief verval komen in het algemeen geen neutronen vrij. Uitzondering is het verval van zeer zware kernen, waarbij spontane splijting een belangrijk vervalproces is. Hierbij komen neutronen en fotonen vrij. Zo wordt een bron met het radionuclide  $^{252}\text{Cf}$  gebruikt als een neutronenbron voor de kalibratie van neutroondetectoren. Ook kan met behulp van radioactieve stoffen een kernreactie tot stand worden gebracht waarbij ook neutronen vrijkomen. Een voorbeeld hiervan is de  $^{241}\text{Am}$ -Be bron, waarbij de alfadeeltjes afkomstig van  $^{241}\text{Am}$  worden ingevangen in de stabiele nuclide  $^9\text{Be}$ . Hierbij vindt een kernreactie plaats waarbij een neutron wordt uitgezonden.

In kern(research)reactoren worden door plaatsing van diafragma’s bij de reactorkern, neutronen bundels geproduceerd t.b.v. experimenten. Bij een ingekapselde neutronenbron, zoals bij een  $^{252}\text{Cf}$  bron, is de ruimtelijke verdeling van de geëmitteerde neutronen bolsymmetrisch. Het dosistempo tengevolge van blootstelling aan deze neutronenbron neemt af met het kwadraat van de afstand tot deze bron.

Neutronen hebben een groot doordringend vermogen dat echter kleiner is (ca. een factor 10) dan dat van fotonen.

### 2.2.3 Snelle geladen deeltjes

Ioniserende straling in de vorm van  $\alpha$ -deeltjes ( $^4\text{He}$  atoomkern) en  $\beta$ -deeltjes (elektronen) komt vrij bij radioactief verval. De dracht van deze deeltjes in lucht varieert tussen enkele centimeters voor  $\alpha$ -deeltjes en enkele meters voor  $\beta$ -deeltjes, zie ook paragraaf 2.4 (Afscherming van ioniserende straling).

Hoogenergetische  $\alpha$ - en  $\beta$ -deeltjes kunnen door een deeltjesversneller worden geproduceerd. De dracht van deze hoogenergetische deeltjes in lucht is groot. Echter deze versnellers zijn zodanig afgeschermd dat de geproduceerde  $\alpha$ - of  $\beta$ -deeltjes niet buiten dit toestel kunnen treden. Dat geldt eveneens voor de andere snelle geladen deeltjes, zoals protonen, die ook met deeltjesversnellers worden geproduceerd.

### 2.3 Modelbenadering van bronnen

Het dosistempo als functie van de afstand tot de bron wordt bepaald door de ruimtelijke verdeling van de uitgezonden straling, de geometrie van het stralingsveld. Deze geometrie is afhankelijk van de vorm en afmetingen van deze bron en is te benaderen door een van de vijf volgende modellen:

1. **Puntbron** (bolsymmetrisch veld), zie paragraaf 2.3.1.
2. **Lijnbron** (cilindersymmetrisch veld), zie paragraaf 2.3.2.
3. **Oppervlaktebron** (uniform, homogeen veld), zie paragraaf 2.3.3
4. **Bundel** (stralingsveld binnen een beperkte openingshoek), zie paragraaf 2.3.4.
5. **Volumebron** (bron met grote afmetingen en meestal geen symmetrisch veld), zie paragraaf 2.3.5.

Deze ‘bronnen’ zijn slechts wiskundige modellen voor het stralingsveld van een fysische stralingsbron en beschrijven, voor een willekeurig punt buiten de bron, het dosistempo als een eenvoudige functie van de afstand tussen dit punt en de bron. De modellen 1, 2, 3 en 5 beschrijven een onbegrensd stralingsveld, dat optreedt bij onafgeschermd ingekapselde of open bron. Het stralingsveld van een ingekapselde of open bron achter een diafragma en het stralingsveld van een toestel wordt beschreven als een **bundel**.

Bij een volumebron draagt door zelfadsorptie in de bron slechts een gedeelte van de bronactiviteit bij tot de straling buiten de volumebron.

De vijf modellen voor het dosistempo en de voorwaarden waaronder deze vijf modellen bij dosisberekeningen mogen worden toegepast, worden in de volgende vijf paragrafen beschreven. De formules voor het dosistempo in deze paragrafen houden geen rekening met de effecten van de omringende lucht, zoals absorptie en dosisopbouw. Voor bronnen van fotonen met energieën groter dan 100 keV zijn deze effecten tot op afstanden van ca. 10 meter klein. Bij laag energetische fotonen, geladen deeltjes en neutronen zal wel met de afscherming door lucht rekening worden gehouden, zie paragraaf 2.4 (Afscherming) en het begrip ‘opbouwfactor’ in hoofdstuk 6.

In paragraaf 2.3.5 wordt het begrip volumebron toegelicht.

#### 2.3.1 Puntbron-model

Bij een ideale puntbron is de activiteit van de bron geconcentreerd in een klein volume met verwaarloosbare afmetingen waardoor de straling zich zonder beperkingen in alle richtingen kan uitbreiden.

De ruimtelijke verdeling van het dosistempo van een puntbron is bolsymmetrisch. Het dosistempo van een puntbron als functie van afstand  $r$  tot de puntbron wordt beschreven door:

$$\dot{H}^*(10, r) = K_{\text{punt}} / r^2. \quad (2.1)$$

De grootte  $K_{\text{punt}}$  hangt af van het type straling en zijn energie en de intensiteit van de bron.

Behalve bij een klein volume is ook bij een klein stralend oppervlak sprake van een puntbron. In de praktijk mag het dosistempo van een bron met eindige afmetingen op voldoende grote afstand van deze bron (tenminste 5 maal de grootste afmeting van de bron) benaderd worden door het dosistempo van een puntbron, zie sectie 3.4.

### 2.3.2 Lijnbron-model

Bij een ideale lijnbron is de activiteit van de bron geconcentreerd in een oneindig lange cilinder met een verwaarloosbare dwarsdoorsnede, d.w.z. een lijn, waarbij de straling zonder beperkingen vanuit deze lijn naar buiten kan treden. De ruimtelijke verdeling van het dosistempo rondom de lijn is hierdoor cilindrisymmetrisch.

Het dosistempo van een lijnbron als functie van afstand  $r$  tot de lijnbron wordt beschreven door:

$$\dot{H}^*(10, r) = K_{\text{lijn}} / r. \quad (2.2)$$

De grootte  $K_{\text{lijn}}$  hangt af van het type straling en zijn energie en de intensiteit van de lijnbron.

In de praktijk mag het dosistempo van een bron met een langwerpige stralend oppervlak (staafbron), op voldoende kleine afstand tot het midden van deze bron (kleiner dan 1/5 van de lengte van de bron), benaderd worden door het dosistempo van een lijnbron, zie sectie 3.5.

### 2.3.3 Oppervlaktebron-model

Bij de ideale oppervlaktebron is de activiteit van de bron geconcentreerd in een oneindig groot vlak. Het stralingsveld van deze oppervlaktebron is uniform en constant van sterkte, onafhankelijk van de afstand  $r$  tot de bron. Hierdoor is het dosistempo gelijk aan:

$$\dot{H}^*(10, r) = K_{\text{oppervlak}}. \quad (2.3)$$

De grootte  $K_{\text{oppervlak}}$  hangt af van het type straling en zijn energie en de intensiteit van de bron.

In de praktijk mag het dosistempo in het midden van en dicht bij een groot stralend vlak (plaatbron) of nabij het oppervlak van een stralingsbron met een groot volume (afstand kleiner dan 1/5 van de kleinste afmeting van het oppervlak), benaderd worden door het dosistempo van een oppervlaktebron, d.w.z. het dosistempo is constant als functie van de afstand tot de bron, zie sectie 3.6.

### 2.3.4 Bundels

In een bundel komt de straling evenals bij een puntbron vanuit een punt vrij, waarbij het stralingsveld tot een kleine ruimtehoek is beperkt. Bundels worden geproduceerd met behulp van toestellen of door bronnen die vrijwel volledig op een kleine opening na (diafragma) zijn afgeschermd. Hierbij kan worden onderscheiden een **divergente** bundel en de (wiskundige) **evenwijdige** bundel.

Het dosistempo in een **divergente** bundel, als functie van de afstand  $r$  tot de oorsprong van de bundel wordt beschreven door:

$$\dot{H}^*(10, r) = K_{\text{bundel}} / r^2. \quad (2.4)$$

De grootte  $K_{\text{bundel}}$  hangt af van het type straling en zijn energie en de intensiteit van de bron.

Het dosistempo in een **evenwijdige** bundel is constant en wordt beschreven door:

$$\dot{H}^*(10, r) = K_{//\text{bundel}}. \quad (2.5)$$

De grootte  $K_{//\text{bundel}}$  hangt af van het type en energie van de straling en de intensiteit van de bron.

In de praktijk mag een bundel met een openingshoek kleiner dan  $10^\circ$  als een ‘**evenwijdige** bundel’ worden beschouwd. Voor grotere openingshoeken dan  $10^\circ$  wordt de bundel als een ‘**divergente** bundel’ beschouwd.

Bij toestellen treedt naast de primaire bundel ook stroostraling of secundaire straling op. De energie van deze secundaire straling is in het algemeen lager dan de energie van de primaire bundel. Ook verschilt de richting van de secundaire straling vaak van die van de primaire bundel. Er kan ook sprake zijn van lekstraling als het toestel niet voldoende is afgeschermd. Ook hier geldt dat de richting van de lekstraling anders kan zijn dan die van de primaire bundel.

Bij de bepaling van de dosis aan de terreingrens door straling van een toestel zal rekening gehouden moeten worden met de dosisbijdragen van zowel de primaire bundel als van de secundaire straling.

Soms is de geometrie van het stralingsveld van de secundaire straling complex, waardoor de dosisbijdrage van deze secundaire straling alleen met behulp van computermodellen bepaald kan worden, zie hoofdstuk 5 (*toestellen*).

### 2.3.5 Volumebron

Bij een volumebron is de omvang van de bron van de orde van grootte van de afstand tussen de bron en het punt waarin het dosistempo bepaald moet worden. De geometrie van het stralingsveld op deze afstand kan complex zijn in vergelijking met de geometrie van een punt-, een lijn- of een oppervlaktebron, met name wanneer de activiteit van de bron niet homogeen over het volume verdeeld is en de bron ingewikkeld van vorm is.

Methoden voor het berekenen van het dosistempo voor een volumebron worden beschreven in hoofdstuk 4 (*complexe ingekapselde en open bronnen*).

In sommige gevallen, bij een homogene verdeling van de activiteit over het volume en een grote mate van symmetrie van de vorm van de bron, kan bij toenemende afstand tussen de volumebron



en de plaats van blootstelling (dosispunt) het stralingsveld worden benaderd door dat van een, respectievelijk, oppervlaktebron, lijnbron of puntbron. In hoofdstuk 3 (*Eenvoudige ingekapselde en open bronnen*) wordt deze benadering uitgewerkt.

## **2.4 Afscherming van ioniserende straling**

Het dosistempo aan de terreingrens als gevolg van een op de locatie aanwezige bron van ioniserende straling wordt beïnvloed door de objecten die tussen de bron en dichtstbijzijnde terreingrens staan waardoor de straling wordt verstrooid en afgeschermd. Voorbeelden van deze objecten zijn: gebouwen tussen bron en dichtstbijzijnde terreingrens of de muur van het gebouw waarin de bron zich bevindt. Bij grote afstanden tussen bron en terreingrens, mag ook rekening worden gehouden met de afscherming door lucht. Straling wordt ook aan lucht verstrooid (skyshine) zie sectie 3.3.

De mate van afscherming van straling door een object, zoals bijvoorbeeld een muur, hangt af van het materiaal en de dikte van deze muur en van het type straling en de energie van de straling.

De afscherming van fotonen, neutronen en geladen deeltjes wordt in de volgende paragrafen beschreven.

### *2.4.1 Afscherming van fotonen*

#### **Invloed van de afscherming op de geometrie van het stralingsveld**

Bij passage van fotonen door een wand, loodrecht op het stralingsveld, met uniforme dikte en homogeen van samenstelling, zal de geometrie van het stralingsveld weinig veranderen.

Dit behoud van geometrie houdt in dat het dosistempo na transmissie door de wand, dezelfde afstandsafhankelijkheid heeft als het dosistempo vóór de wand. Wel verschuift als gevolg van deze transmissie het energiespectrum van de fotonen in het stralingsveld.

Deze verschuiving van het spectrum van de fotonen ontstaat doordat fotonen bij een hoge energie minder worden geabsorbeerd en verstrooid dan de fotonen bij een lage energie. Deze verschuiving van het energiespectrum door transmissie door de wand wordt groter naarmate de mate van afscherming groter wordt.

De relatieve dosisbijdrage door de verstrooide fotonen achter de wand wordt beschreven door de zogenoemde dosis opbouwfactor (zie hoofdstuk 6). Deze extra bijdrage compenseert voor een deel de afname van het dosistempo na transmissie door de afscherming. De opbouwfactor is groot bij lage foton energieën en bij afscherming met materialen zoals beton, dat is opgebouwd uit elementen met een lage Z-waarde.

Bij transmissie van een evenwijdige bundel van fotonen door een wand is de opbouwfactor vrijwel gelijk aan 1 (de factor is alleen gelijk aan 1 bij een smalle evenwijdige bundel).

De fotonen met de hoogste energie in het stralingsspectrum worden bij transmissie door een wand het minst geabsorbeerd en verstrooid. Achter de wand overheerst de "harde component van het spectrum" in de doorgaande evenwijdige bundel. Deze bundel is echter omgeven door een divergerende bundel van laag energetische fotonen (halo).

Direct achter de wand neemt het dosistempo af met de afstand (door afname van de bijdrage van de divergerende bundel) en vanaf ca. 1 m vanaf de muur blijft het dosistempo vrijwel constant als functie van de afstand. Door de mate van afscherming van de wand te vergroten wordt de intensiteit van de doorgaande bundel steeds kleiner en de intensiteit van de halo steeds groter, waardoor uiteindelijk sprake is van een divergente bundel (dosistempo neemt af evenredig met het kwadraat van de afstand tot de afscherming).

### Afscherming door lucht

Bij transmissie van fotonen door lucht wordt bij fotonenergieën groter dan 100 keV, tot op afstanden van ca. 10 m van de bron, de afname van het dosistempo door de absorptie in lucht vrijwel gecompenseerd door de toename van het dosistempo door dosisopbouw in lucht (de Engelse term hiervoor is 'build-up'). Op een afstand van meer dan 10 m van de bron, wordt de invloed van de absorptie in lucht steeds belangrijker waardoor, in geval van een puntbron, het dosistempo als functie van de afstand  $r$ , sterker zal gaan afnemen dan volgens  $1/r^2$ .

Conservatief wordt bij de berekening van het dosistempo aan de terreingrens als gevolg van fotonen, de invloed van lucht niet beschouwd. Dit leidt tot de volgende regel:

**Standaard:** *Bij het berekenen van het dosistempo aan de terreingrens ten gevolge van op de locatie aanwezige bronnen van fotonen wordt afscherming en build-up door lucht niet in rekening gebracht.*

Daarnaast geldt:

**Verfijning:** *Bij het berekenen van het dosistempo aan de terreingrens ten gevolge van op de locatie aanwezige bronnen van fotonen mag de afscherming door lucht in rekening worden gebracht.*

Deze verfijning heeft met name effect voor afstanden tussen bron en terreingrens groter dan 10 m.

### Reductie van het dosistempo door afscherming

De afname van het dosistempo door een wand met dikte  $d$  wordt berekend met behulp van:

$$\dot{H}^*(10, r) = K_{\text{punt}} \cdot B_{\text{punt}}(\mu, d) \cdot e^{-\mu d} \cdot 1/r^2. \quad (2.6)$$

Hierbij is  $\dot{H}^*(10, r)$  het dosistempo op een afstand van  $r$  van een puntbron. De grootte  $K_{\text{punt}}$  hangt af van de energie van de fotonen en de intensiteit van de bron.

De afschermende wand bevindt zich op meer dan één meter afstand van de bron. Het materiaal van de wand wordt homogeen verondersteld. De parameter  $d$  is de dikte van deze wand. De factor  $\mu$  is de materiaal specifieke lineaire verzwakkingsfactor [ $\text{m}^{-1}$ ] die een functie is van de fotonenergie.

Het product  $\mu d$  is gelijk aan  $\mu/\rho \cdot \rho d$ . De parameter  $\mu/\rho$  is de massieke verzwakkingsdoorsnede. De parameter  $\rho$  is de dichtheid van het materiaal. In hoofdstuk 6 zijn voor een drietal materialen en een aantal fotonenergieën, de waarde van  $\rho$  en de massieke verzwakkingsdoorsneden gegeven.

De factor  $e^{-\mu d}$  is de zogenoemde transmissie van de wand. Bij een stralingsveld dat bestaat uit fotonen van verschillende energieën dient voor elke energie de transmissie van de bijbehorende fotonen te worden berekend. B is de opbouwfactor die afhangt van de waarde van  $\mu$  en  $d$ , maar ook van de geometrie van het stralingsveld.

Omdat formule (2.6) het dosistempo van een puntbron berekent, wordt de opbouwfactor hier aangeduid met  $B_{\text{punt}}$ . Voor nadere informatie over afscherming van eenvoudige stralingsbronnen wordt verwezen naar [6].

Een met formule (2.6) vergelijkbare formule kan worden afgeleid voor de lijnbron, oppervlaktebron en bundel in respectievelijk, formules (2.2), (2.3) en (2.4), door het rechterlid van deze formules te vermenigvuldigen met een factor F, die gelijk is aan het product van de opbouwfactor en de transmissie van de wand:

$$F = B_{\text{geometrie}}(\mu, d) \cdot e^{-\mu d}. \quad (2.7)$$

In de praktijk kan bij het berekenen van de afscherming vaak worden uitgegaan van  $B_{\text{geometrie}}(\mu, d)$  is ongeveer gelijk aan 1. Voor een smalle evenwijdige bundel is opbouwfactor B exact gelijk aan 1. Naarmate de bundel ‘breder’ wordt, zoals bij de geometrie van een puntbron, neemt de waarde van B toe. Hierbij geldt dat de benadering van  $B \approx 1$  correct is indien de wanddikte van de afscherming van de orde is van één “halveringsdikte”(HVD), zie hoofdstuk 6.

Naarmate de wand dikker wordt dan HVD, neemt de waarde van B toe, zie ook bij ‘opbouwfactor’ in hoofdstuk 6. Bij een grote waarde van B, wordt dicht achter de wand, de afname van het dosistempo door absorptie in de wand voor een deel gecompenseerd door de opbouw.

In publicaties ICRP 21 en 33 [8, 9] is voor een aantal radionucliden de mate van afscherming door verschillende materialen van de door deze radionucliden uitgezonden gammastraling gegeven. Met de gegevens uit deze publicaties kan voor een specifieke samenstelling van een wand en de dikte van de wand de afscherming door deze wand worden berekend voor fotonen van verschillende radionucliden, zie ook de tabellen in hoofdstuk 6.

**Standaard:** *Bij het berekenen van het dosistempo van fotonen aan de terreingrens ten gevolge van een bron of bundel die door een relatief dunne wand (dikte  $d < 1$  HVD) wordt afgeschermd, bijvoorbeeld tot enkele centimeters beton of steen bij foton-energieën groter dan 0,5 MeV, wordt de opbouwfactor gelijk gesteld aan 1. Bij afscherming door dikke wanden of bij laag energetische fotonen dient de waarde van B bepaald te worden aan de hand van de diagrammen in ICRP-publicaties ICRP-15/21, ICRP 33 en ICRP-51 [8, 9, 10].*

Indien de afschermdende wand samenvalt met de terreingrens, wordt B gelijk gesteld aan 1. Hiermee wordt de dosis aan de terreingrens onderschat. De extra verhoging van de dosis door opbouw is vooral van belang direct ( $< 1$  m) achter de wand. Indien met behulp van een dosistempomonitor het dosistempo bepaald wordt zal dit niet direct achter een wand moeten gebeuren, vanwege bijdrage van de stroostraling.

- Voorschrift:** *A. Bij het bepalen van het dosistempo achter een wand waarmee een bron wordt afgeschermd, dient men deze bepaling tenminste op 1 m afstand van deze wand uit te voeren.*
- B. Indien de dosis op afstanden van minder dan 1 m van de wand relevant is, moet met dosisopbouw rekening worden gehouden.*

#### 2.4.2 Afscherming van neutronen

Als er neutronenbundels of  $\gamma$ -velden worden geproduceerd dient bijzondere aandacht besteed te worden aan de geometrie en materiaalsamenstelling van de afscherming. Deze parameters bepalen naast het energiespectrum van de neutronen, sterk de effectiviteit van de afscherming. Bij passage van een neutronen door een wand treedt, zoals bij fotonen, absorptie en verstrooiing op. Ook worden neutronen sterk door lucht verstrooid (skyshine). Dit laatste effect kan een dominante bijdrage leveren aan het dosistempo aan de terreingrens als het transport van neutronen vanuit de bron naar de terreingrens door een wand wordt geblokkeerd.

**Standaard:** *Dosis- en afschermingsberekeningen bij neutronenbundels houden rekening met de feitelijke geometrie van bundel, afscherming en terreingrens, alsmede met de bijdrage van skyshine.*

Voor het berekenen van het dosistempo aan de terreingrens veroorzaakt door neutronen, wordt verwezen naar hoofdstuk 5 (Toestellen).

#### 2.4.3 Afscherming van snelle geladen deeltjes

De dracht van  $\alpha$ - en  $\beta$ -deeltjes in lucht is gering in vergelijking tot de afstanden die gebruikelijk zijn als afstand tussen een stralingsbron en de terreingrens van een inrichting. De dracht in lucht van een  $\alpha$ -deeltje met een energie van 5 MeV is 3,5 cm en de dracht in water is slechts 40 micrometer. De conclusie is dat  $\alpha$ -deeltjes van open bronnen geen bijdrage kunnen leveren aan het dosistempo aan de terreingrens. Ingekapselde bronnen kunnen vanwege de inkapseling zonder meer geen  $\alpha$ -deeltjes uitzenden.

Hoogenergetische  $\alpha$ -deeltjes (een energie van meer dan 10 MeV) en andere snelle geladen deeltjes die door toestellen (versnellers) kunnen worden geproduceerd, kunnen wel afstanden van enkele meters in lucht afleggen. Deze snelle geladen deeltjes worden echter altijd door de afscherming van het toestel tegen gehouden.

De dracht  $R$  [cm] van een  $\beta$ -deeltje in (afschermend) materiaal kan beschreven worden met de vuistregel  $R \approx \frac{1}{2} E_{\beta\max}/\rho$ , waarbij  $\rho$  [gram-cm<sup>-3</sup>] de dichtheid van het materiaal is en  $E_{\beta\max}$ [MeV] de maximale energie van het  $\beta$ -deeltje. De dracht in lucht van de  $\beta$ -deeltjes uitgezonden door een <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y bron ( $E_{\beta\max} = 2,28$  MeV) is ruim 8 meter. Toch zullen deze  $\beta$ -deeltjes weinig bijdragen aan het dosistempo aan de terreingrens omdat deze deeltjes grotendeels door de inkapseling van de bron worden tegengehouden. Hoogenergetische elektronen (meer dan 3 MeV) die door toestellen (versnellers) worden geproduceerd, kunnen in lucht grotere afstanden dan 10 meter afleggen. Echter in de constructie van zo'n toestel is voldoende afscherming aangebracht zodat deze elektronen niet naar buiten kunnen treden.

**Standaard:** *Indien de terreingrens verder dan 10 m van de bron verwijderd is, zijn de directe bijdragen van  $\alpha$ - en  $\beta$ -deeltjes van ingekapselde en open bronnen aan het dosistempo aan de terreingrens verwaarloosbaar.*

Bij verstrooiing van energetische  $\beta$ -deeltjes aan materialen met een hoge  $Z$ -waarde (atoomgetal) wordt secundaire straling in de vorm van fotonen geproduceerd, de zogenoemde remstraling. Dit type secundaire straling kan bijdragen tot het dosistempo aan de terreingrens. Bij de  $\beta$ -deeltjes van ingekapselde en open bronnen is de bijdrage van deze secundaire straling zodanig klein dat deze straling niet bijdraagt tot de dosis aan de terreingrens. Echter bij toestellen, zoals versnellers, is de energie van de snelle geladen deeltjes, zoals bijvoorbeeld elektronen, zodanig hoog dat de secundaire straling, die in de afschermende delen van het toestel vrijkomt, wel een bijdrage levert aan de terreingrensdosis. De problematiek van secundaire straling bij toestellen komt aan de orde in hoofdstuk 5.



### 3 Eenvoudige ingekapselde en open bronnen

#### 3.1 Toelichting

In dit hoofdstuk worden voorschriften gegeven voor het berekenen van de dosis aan de terreingrens door ioniserende straling van eenvoudige ingekapselde en open bronnen. Met ‘eenvoudige bronnen’ wordt bedoeld bronnen waarvan de vorm en afmetingen zodanig zijn dat de berekening van de dosis aan de terreingrens met (relatief) eenvoudige formules, zoals die voor een puntbron, een lijnbron of een oppervlaktebron mag worden benaderd.

In figuur 1 is een schema aangegeven aan de hand waarvan voor ‘eenvoudige bronnen’ de toe te passen benaderingen (gebruik van bronconstanten of extrapolatie volgens een puntbron, staaftbron en plaatbron) kunnen worden bepaald. De criteria voor het benaderen van een bron door een puntbron, staaftbron of een plaatbron, zijn aan het begin van de secties 3.4, 3.5 en 3.6 vermeld.

In de twee volgende secties wordt het gebruik van bronconstanten en extrapolatie bij het berekenen van de dosis aan de terreingrens toegelicht. In de daarop volgende secties wordt het gebruik van de eenvoudige formules bij het berekenen van de dosis aan de terreingrens beschreven, zowel op basis van bronconstanten als op basis van extrapolatie van een (gemeten) waarde van het dosistempo op het terrein.

Het hoofdstuk wordt afgesloten met een paragraaf waarin de dosis wordt berekend bij blootstelling aan een bron tijdens vervoer. Een dergelijke blootstelling treedt op bij passage van een transport van radioactieve stoffen.

Een belangrijk toepassingsgebied van stralingsbronnen is het gebruik van ingekapselde bronnen voor meet en regeltechniek. Aanbevelingen met betrekking tot het omgaan met ingekapselde bronnen zijn ondermeer gegeven in een IAEA publicatie [12]. Omdat de bronnen voor meet en regeltechniek meestal fotonen uitzenden en deze bronnen modelmatig als puntbron mogen worden beschouwd kan de jaarlijkse effectieve dosis door externe blootstelling aan de terreingrens geschat worden met de rekenregels beschreven in deel I van de bijlage van mr-*AGIS* [3].

In paragraaf 3.2 worden in aanvulling op dat deel I voorschriften gegeven over het gebruik van bronconstanten als basis voor het berekenen van de dosis aan de terreingrens.

#### 3.2 Gebruik van bronconstanten

Bij een ingekapselde bron, zoals een ijkbron met  $^{137}\text{Cs}$  of met  $^{60}\text{Co}$ , waarvan de opgesloten hoeveelheid activiteit op een bepaald tijdstip (referentiedatum) bekend is, kan het dosistempo op een zekere afstand van deze bron worden berekend met behulp van de zogenoemde bronconstante. Deze bronconstante is het dosistempo op 1 meter van de bron per eenheid van activiteit (MBq). Omdat de afmeting van deze ijkbronnen klein zijn, mag voor extrapolatie van het dosistempo van 1 meter naar een grotere afstand, zoals naar de terreingrens, de puntbron-benadering worden gebruikt (2.1).

In de literatuur zijn bronconstanten voor een groot aantal radionucliden beschikbaar. Echter er worden bij de bepaling van deze bronconstanten verschillende aannamen gedaan. Soms wordt wel

rekening gehouden met de afscherming van de inkapseling van de bron en de zelfadsorptie in de bron, in andere gevallen moet men deze correcties zelf aanbrengen. Ook worden niet alle energieën beschouwd of worden de dosisbijdragen van de röntgenstraling, die eveneens bij verval vrijkomt, niet beschouwd. Omdat zware elementen, zoals de radionucliden van de uranium- en thorium reeks, relatief ‘harde’ röntgenstraling uitzenden zou, bij verwaarlozing van deze röntgenstraling, het dosistempo van deze bronnen worden onderschat.

In dit rapport wordt uitgegaan van de bronconstanten zoals die zijn gegeven in [13] en die ook worden gebruikt in mr-AGIS. Deze bronconstanten, aangeduid met  $h(10)$ , zijn berekend op basis van  $\dot{H}^*(10,r)$  en houden rekening met de dosisbijdrage van de röntgenstraling.

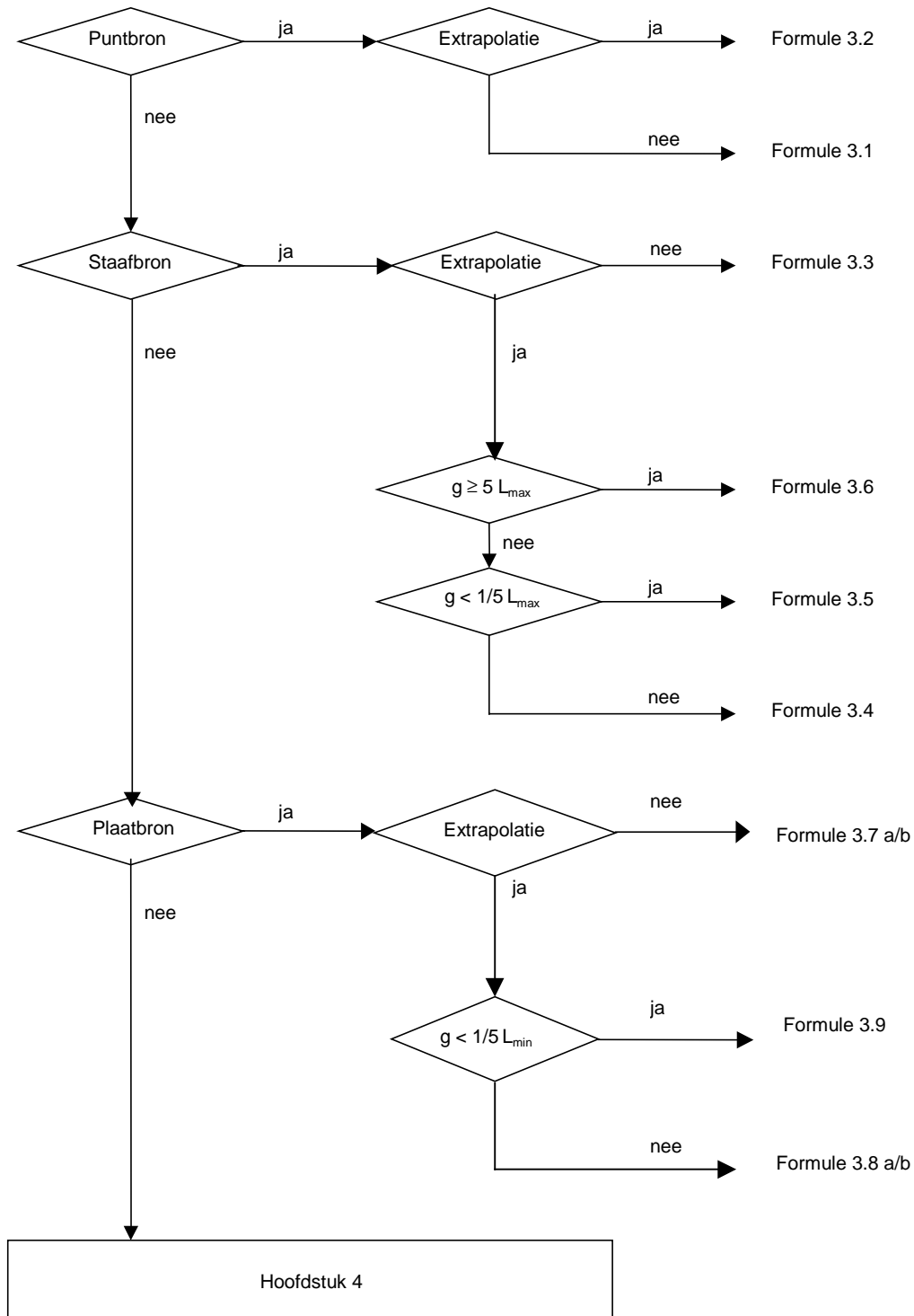
**Standaard:** *Bij de berekening van het dosistempo van ingekapselde bronnen mag worden uitgegaan van een puntbron benadering en de bronconstanten uit ref. [13]. Absorptie in lucht, in de inkapseling en de bronhouder worden niet beschouwd.*

**Verfijning:** *Bij de berekening van het dosistempo mag wel rekening worden gehouden met de invloed van lucht, inkapseling en bronhouder. In geval van commerciële (ingekapselde) bronnen mag worden uitgegaan van de bronspecificaties van de fabrikant. Deze levert vaak polaire diagrammen waarin de gemeten waarden van het dosistempo op verschillende afstanden van de bron en onder verschillende hoeken ten opzichte van de symmetrieas van de bron worden vermeld.*

De bronconstante  $h(10)$  is berekend voor een puntbron en wordt gebruikt in een puntbron formule, zoals in formule (2.1) in sectie 2.3. Door integratie van de bijdragen van een groot aantal puntbronnen, zijn er vergelijkbare eenvoudige formules voor een staafbron en een plaatbron af te leiden, waarin dezelfde bronconstante  $h(10)$  wordt gebruikt, zie secties 3.5 en 3.6.



Bron met stralend oppervlak richting referentiepunt (op afstand  $r$  van het oppervlak) en terreingrens (op afstand  $g$  van het oppervlak). Oppervlak heeft afmetingen  $L_{\min}$  en  $L_{\max}$ .

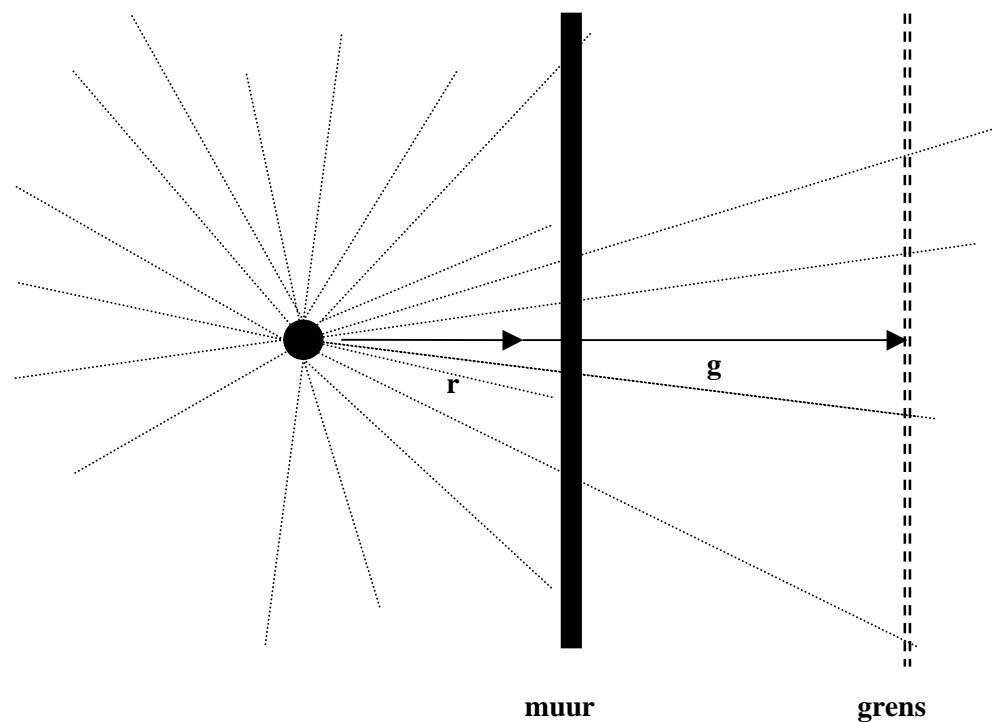


Figuur 1: Schema eenvoudige bronnen

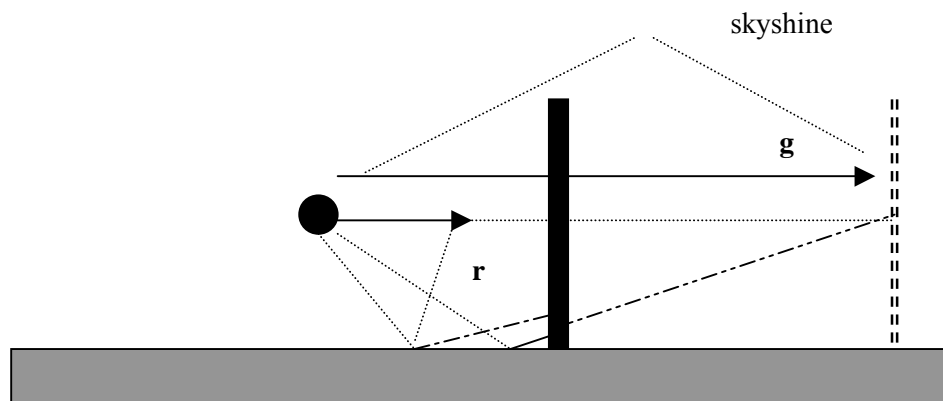
### 3.3 Berekening van de terreingrensdosis op basis van extrapolatie

Indien op een locatie met een stralingsbron het dosistempo binnen de terreingrens door meting is bepaald, is het mogelijk via extrapolatie het dosistempo aan de terreingrens te berekenen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de in paragraaf 2.3 besproken modelbenaderingen.

In Figuur 2 zijn de posities van de bron, het referentiepunt waar het dosistempo bekend is en de terreingrens aangegeven. Ook is de positie van een wand aangegeven, die de straling gedeeltelijk afschermt.



Figuur 2: Geometrie van bron, muur en terreingrens, van bovenaf gezien, bij het berekenen van het dosistempo aan de terreingrens bij een afgeschermd bron.



Figuur 3: Geometrie van bron, muur en terreingrens, van opzij gezien

In Figuur 3 zijn de bijdragen van stroostraling aan het dosistempo weergegeven. Bij een ‘harde’ bodem, zoals bij een bestraat bedrijfsterrein, zal straling vanuit de bron via de bestrating worden weerkaatst. Deze stroostraling draagt wel bij tot het dosistempo in het referentiepunt op afstand  $r$  van de bron, maar draagt slechts in geringe mate bij tot het dosistempo aan de terreingrens. De reden hiervoor is dat verstrooide straling een lagere gemiddelde energie heeft dan de straling uit de bron en daarmee ook beter wordt afgeschermd dan deze straling. Daaruit volgt dat bij extrapolatie, vanuit een referentie-punt voor de afscherming, een conservatieve schatting van het dosistempo achter de afscherming wordt verkregen. Indien de afstanden tussen de muur en bron en de muur en de terreingrens groot zijn ten opzicht van de hoogte van de muur moet ook rekening gehouden worden met ‘skyshine’.

In de volgende paragrafen wordt voor verschillende benaderingen van een bron de formules voor de extrapolatie van het dosistempo gegeven. De keuze welke benadering mag worden gebruikt is in het schema in Figuur 1 aangegeven.

### 3.4 Dosistemp van een bron met een klein stralend oppervlak (puntbron)

**Standaard:** Een bron mag modelmatig als een puntbron worden beschouwd wanneer de grootste afmeting van het stralend oppervlak van de bron ( $L_{max}$ ) tenminste een factor 5 kleiner is dan de afstand tussen het centrum van de bron en het referentiepunt (= meetpunt) van waaruit men het dosistempo wil extrapoleren naar de terreingrens.

### 3.4.1 Berekening met behulp van een bronconstante

Indien van het klein stralend oppervlak de hoeveelheid activiteit  $A$  [MBq] van een specifiek radionuclide en de bronconstante  $h(10)$  [ $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{m}^2$ ] van dat radionuclide bekend is, kan het dosistempo aan de terreingrens  $\dot{H}^*(10, g)$  [ $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ ] op afstand  $g$  [m] van de bron met de volgende formule worden berekend:

$$\dot{H}^*(10, g) = A \cdot h(10) \cdot 1/g^2 \cdot F. \quad (3.1)$$

De factor  $F$  is het product van opbouwfactor en de transmissie van een veronderstelde afscherming tussen de bron en de terreingrens, zie formule (2.7). Als er geen afscherming is en de afscherming door de lucht wordt verwaarloosd (dit mag voor afstanden  $g < 10$  m), dan is de waarde van  $F$  gelijk aan 1, zie paragraaf 2.4.1.

Waarden van  $F$  voor een puntbron bij verschillend wandmaterialen en verschillende fotonenergieën zijn onder andere te vinden in ICRP 21 en 33 [8, 9].

### 3.4.2 Berekening door middel van extrapolatie

Indien op afstand  $r$  van het centrum van de bron het dosistempo gelijk is aan  $\dot{H}^*(10, r)$ , dan is het dosistempo aan de terreingrens  $\dot{H}^*(10, g)$  op afstand  $g$  van de bron gelijk aan:

$$\dot{H}^*(10, g) = \dot{H}^*(10, r) \cdot r^2/g^2 \cdot F_{rg}. \quad (3.2)$$

De factor  $F_{rg}$  is de dosisreductie door een veronderstelde afscherming tussen het referentiepunt en de terreingrens, zie toelichting bij formule (3.1).

Bij commerciële ingekapselde bronnen specificeert de fabrikant vaak het dosistempo op een aantal afstanden en in een aantal richtingen t.o.v. deze bron. In dat geval mag op basis van deze specificaties het dosistempo aan de terreingrens, via extrapolatie, worden berekend.

## 3.5 Dosistempi van een bron met een klein langwerpig stralend oppervlak (staafbron)

**Standaard:** Een bron mag modelmatig als een staafbron worden beschouwd als de grootste afmeting van het stralend oppervlak (de lengte  $L_{max}$ ) tenminste een factor 5 groter is dan de kleinste afmeting van het stralend oppervlak (de lengte  $L_{min}$ ).

Het dosistempo van een staafbron is een relatief eenvoudige functie van de afstand tot de staafbron (loodrecht op de staaf) en van de lengte van de staafbron. Deze formule wordt toegepast als de bronconstante en de activiteit van het stralend oppervlak bekend is of in het geval dat het dosistempo in een punt tussen de bron en de terreingrens gemeten is.

### 3.5.1 Berekening met behulp van een bronconstante

Indien van het langwerpige stralend oppervlak (de staafbron) de hoeveelheid activiteit  $A$  [MBq] van een specifiek radionuclide en de bronconstante  $h(10)$  [ $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{m}^2$ ] van dat radionuclide bekend is, kan het dosistempo  $\dot{H}^*(10, g)$  [ $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ] aan de terreingrens, op afstand  $g$  [m] loodrecht vanuit het midden van het stralend oppervlak, met de volgende formule worden berekend:

$$\dot{H}^*(10, g) = 2A/L_{\max} \cdot h(10)/g \cdot \arctan(1/2 L_{\max}/g) \cdot F. \quad (3.3)$$

Hierbij is  $F$  het product van de opbouwfactor en transmissie als gevolg van een afscherming tussen bron en terreingrens, zie formule (2.7). Indien de dikte van de afscherming groter is dan de halveringsdikte, dan is de opbouwfactor groter dan 1.

In beginsel is de opbouwfactor afhankelijk van de geometrie van het stralingsveld van de bron. Conservatief mag de waarde van de opbouwfactor voor een lijnbron ( $B_{\text{lijn}}(\mu\text{d})$ ) gelijk worden gesteld aan de opbouwfactor voor een puntbron  $B_{\text{punt}}(\mu\text{d})$ .

### 3.5.2 Berekening door middel van extrapolatie

Indien op afstand  $r$ , loodrecht vanuit het midden van een staafbron met lengte  $L_{\max}$ , het dosistempo gelijk is aan  $\dot{H}^*(10, r)$ , dan is de dosistempo aan de terreingrens  $\dot{H}^*(10, g)$ , op afstand  $g$  van het midden van de staafbron, gelijk aan:

$$\dot{H}^*(10, g) = \dot{H}^*(10, r) \cdot r/g \cdot \arctan(1/2 L_{\max}/g)/\arctan(1/2 L_{\max}/r) \cdot F_{rg} \quad (3.4)$$

Hierbij is  $F_{rg}$  het product van de opbouwfactor en transmissie als gevolg van een afscherming tussen referentiepunt en terreingrens, zie toelichting bij formule (3.3). Hierbij is de afstand tussen de afscherming en de bron groter dan de afstand  $r$ .

Indien de afstanden  $r$  en  $g$  beide kleiner zijn dan  $1/5$  van  $L_{\max}$ , maar tenminste een factor 5 groter zijn dan  $L_{\min}$ , dan mag in plaats van formule (3.4) de volgende vereenvoudigde extrapolatieformule worden gebruiken:

$$\dot{H}^*(10, g) = \dot{H}^*(10, r) \cdot r/g \cdot F_{rg}. \quad (3.5)$$

Dit is de formule voor een lijnbron, zie formule (2.2), die gecorrigeerd is voor de afname van het dosistempo tengevolge van de transmissie door een afscherming. Toepassing van deze benadering als het meetpunt dichtbij het stralend oppervlak ligt, geeft een overschatting van het dosistempo aan de terreingrens.

Indien de afstand  $g$ , daarentegen groot is, d.w.z.  $g > 5 L_{\max}$  ( en  $r < 5 L_{\max}$ ), dan mag de  $\arctan$  functie in formule (3.4) (binnen 30%) worden benaderd door  $\arctan(1/2 L_{\max}/g)/g \approx 1/2 L_{\max}/g^2$ . Met deze lijn-puntbron benadering mag formule (3.4) worden vervangen door:

$$\dot{H}^*(10, g) = \dot{H}^*(10, r) \cdot r \cdot \frac{1}{2} L_{\max} / \arctan(1/2 L_{\max} / r) \cdot F_{rg} / g^2. \quad (3.6)$$

In deze benadering mag, vanwege de relatief grote afstand  $g$  tot de staaftbron ( $g > 5 L_{\max}$ ), de staaftbron als een puntbron worden beschouwd. Hierbij neemt het dosistempo op afstand  $g$  van de bron af met het kwadraat van  $g$ .

**Opmerking:**

Indien ook het meetpunt op relatief grote afstand van het stralend oppervlak ligt ( $r > 5 L_{\max}$ ) dan kan conservatief in plaats van (3.6) de zuivere puntbron benadering van (3.2) worden gebruikt.

### 3.6 Dosistempi van een bron met een groot stralend oppervlak (plaatbron)

**Standaard:** Een bron met een groot stralend oppervlak mag modelmatig als een plaatbron worden beschouwd als  $L_{\max} < 5 L_{\min}$  en als de dosis wordt berekend op afstanden loodrecht vanuit het oppervlak.

#### 3.6.1 Berekening met behulp van een bronconstante

Bij het berekenen van het dosistempo op verschillende afstanden, loodrecht vanuit het midden, van een groot stralend oppervlak met  $L_{\max} < 5 L_{\min}$  en  $L_{\max} \geq L_{\min}$ , mag dit oppervlak conservatief worden benaderd door een schijfvormig stralend oppervlak (plaatbron) met een straal van  $1/2 L_{\min}$ . Indien de hoeveelheid activiteit  $A$  [MBq] van het oppervlak en de bronconstante  $h(10)$  [ $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{m}^2$ ] van het radionuclide van de activiteit bekend is, mag het dosistempo  $\dot{H}^*(10, g)$  [ $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ ], op afstand  $g$ [m] loodrecht vanuit het midden van dit stralend oppervlak, met de volgende formule conservatief worden benaderd:

$$\dot{H}^*(10, g) \approx 4A/L_{\min}^2 \cdot h(10) \cdot \ln(L_{\min}^2/(4g^2) + 1) \cdot F. \quad (3.7a)$$

Indien bij het zelfde oppervlak en activiteit het dosistempo op een afstand  $g$  loodrecht vanuit het midden van de rand (midden van een van de zijden,  $L_{\max}$ , of  $L_{\min}$ ) van dit stralend oppervlak berekend moet worden, mag dit dosistempo met de volgende formule conservatief worden benaderd:

$$\dot{H}^*(10, g) \approx A/L_{\min}^2 \cdot h(10) \cdot \ln(L_{\min}^2/g^2 + 1) \cdot F. \quad (3.7b)$$

In beide formules is  $F$  het product van de opbouwfactor en transmissie als gevolg van een afscherming tussen bron en terreingrens, zie formule (2.7). Indien de dikte van de afscherming groter is dan de halveringsdikte, dan is de opbouwfactor groter dan 1. In beginsel is de opbouwfactor afhankelijk van de geometrie van het stralingsveld van de bron. Conservatief mag de waarde van de opbouwfactor voor een oppervlaktebron, zoals de plaatbron, ( $B_{\text{oppervlak}}(\mu\text{d})$ ) gelijk worden gesteld aan de opbouwfactor voor een puntbron  $B_{\text{punt}}(\mu\text{d})$ .

### 3.6.2 Berekening door middel van extrapolatie

Indien op afstand  $r$  [m], loodrecht vanuit het midden van een groot stralend oppervlak met  $L_{\max} < 5 L_{\min}$  en  $L_{\max} \geq L_{\min}$ , het dosistempo gelijk is aan  $\dot{H}^*(10, r)$  [Sv· h<sup>-1</sup>], dan mag het dosistempo aan de terreingrens, op afstand  $g$  [m] loodrecht vanuit het midden van het oppervlak, conservatief worden benaderd door:

$$\dot{H}^*(10, g) \approx \dot{H}^*(10, r) \cdot \ln(L_{\min}^2/(4g^2) + 1)/\ln(L_{\min}^2/(4r^2) + 1) \cdot F_{rg}. \quad (3.8a)$$

Indien bij het zelfde oppervlak en activiteit het dosistempo op een afstand  $r$  [m] loodrecht vanuit het midden van de rand (midden van een van de zijden,  $L_{\max}$ , of  $L_{\min}$ ) van dit stralend oppervlak gelijk is aan  $\dot{H}^*(10, r)$  [Sv· h<sup>-1</sup>], dan mag het dosistempo aan de terreingrens, op afstand  $g$  [m] loodrecht vanuit het midden van de rand van dit oppervlak, conservatief worden benaderd door:

$$\dot{H}^*(10, g) = \dot{H}^*(10, r) \cdot \ln(L_{\min}^2/g^2 + 1)/\ln(L_{\min}^2/r^2 + 1) \cdot F_{rg}. \quad (3.8b)$$

In formules (3.8a) en (3.8b) is  $F_{rg}$  het product van de opbouwfactor en transmissie als gevolg van een afscherming tussen referentiepunt en terreingrens. Hierbij is de afstand tussen de afscherming en de bron groter dan de afstand  $r$ , zie toelichting bij formule (3.7b).

Indien het dosistempo op afstand  $r$  van het midden van een groot stralend oppervlak gelijk is aan  $\dot{H}^*(10, r)$  en zowel de afstand  $r$  als de afstand  $g$  tot de terreingrens kleiner zijn dan 1/5 van de kleinste afmeting van het stralend oppervlak ( $L_{\min}$ ), dan mag de volgende gelijkheid worden verondersteld:

$$\dot{H}^*(10, g) = \dot{H}^*(10, r) \cdot F_{rg}. \quad (3.9)$$

Deze met formule (3.9) beschreven berekening (het oppervlaktebron-model van formule (2.3)) geldt voor situaties waarbij de bron vrijwel aan de terreingrens staat.

## 3.7 Dosisberekening bij het transport van bronnen

Volgens artikel 134 onder B van het Besluit stralingsbescherming [1] valt ook externe blootstelling van leden van de bevolking aan ioniserende straling vanwege het transport van stralingsbronnen onder dit Besluit.

De jaardosis door blootstelling van leden van de bevolking aan regulier transport van stralingsbronnen, is het hoogst bij de groep van personen die in vergelijking met andere leden van de bevolking, het meest aan deze transporten zullen worden blootgesteld.

Voor elk transport zijn twee van deze groepen te identificeren:

- De bewoners van woningen langs de transportroute (omwonenden), met name zij die dicht langs de weg of spoorbaan wonen waarover dit transport plaatsvindt.

- Weggebruikers die dagelijks dezelfde route rijden die het transport ook volgt.

De jaardosis van een persoon door blootstelling aan externe straling bij het regulier transport van stralingsbronnen wordt bepaald door het aantal van dergelijke transporten waaraan deze persoon jaarlijks wordt blootgesteld en de dosis die per blootstelling wordt ontvangen.

Deze dosis per blootstelling is evenredig met:

- (1) De duur van de blootstelling; deze wordt bepaald door de snelheid van het voertuig tijdens de blootstelling of door de duur van het verblijf nabij een stilstaand voertuig.
- (2) Het dosistempo tijdens deze blootstelling; dit wordt bepaald door de afstand tussen de blootgestelde persoon en het voertuig en het dosistempo aan de buitenzijde van het voertuig.

Het toegestane dosistempo aan de buitenzijde van het vervoermiddel (vrachtwagen, treinwagon, schip, container) dient te voldoen aan de eisen die zijn gesteld in het Besluit vervoer splijtstoffen, ertsen en radioactieve stoffen (Besluit vervoer) [14]. Volgens deze eisen mag het dosistempo op 2 meter van de buitenzijde van het voertuig niet meer dan 0,1 mSv/uur bedragen.

De dosis die wordt ontvangen tijdens de voor de omwonenden van een transportroute meest voorkomende blootstelling, d.w.z. de passage van een voertuig, kan met een eenvoudig model worden berekend.

De dosis door blootstelling aan een passerend voertuig met een stralingsbron, is gelijk aan:

$$H^*(10,x) = \pi \cdot K_{\text{eff}} / (v \cdot x). \quad (3.10)$$

Hierbij is:

$H^*(10,x)$ : de dosis [Sv] per passage,

$v$ : de snelheid van het voertuig [ $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ ],

$x$ : de afstand [m] tussen de blootgestelde persoon en het midden van het voertuig waar de bron zich bevindt,

$K_{\text{eff}}$ : de dosistempofactor [ $\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^2$ ].

De effectieve dosistempofactor  $K_{\text{eff}}$  hangt af van de vorm van het voertuig (lengte en breedte), de vorm en afmetingen van de stralingsbron in het voertuig en het veronderstelde dosistempo op 2 m afstand van de buitenzijde van het voertuig.

In [15] zijn voor een aantal situaties de effectieve dosistempofactoren afgeleid, overeenkomend met de wettelijke limiet op 2 m van de buitenzijde van het voertuig van 0,0001 [ $\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ] en een veronderstelde breedte van het voertuig van 2m. De grootste waarde van  $K_{\text{eff}}$  bedraagt 0,0015 [ $\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^2$ ].

Naast blootstelling tijdens passage kunnen personen ook worden blootgesteld aan een stilstaand voertuig. Deze situatie, die optreedt als het voertuig bij een verkeerslicht stopt, zal minder vaak optreden. Deze en andere blootstellingsituaties zijn beschreven in een drietal rapporten [16-18].



**Voorbeeld**

Een voertuig met een ingekapselde kleine bron passeert een voetganger op 1 m afstand (afstand tussen de voetganger en buitenzijde van de wagen) met een snelheid van 50 km/uur. Het dosistempo op 2 m afstand van de buitenzijde van het voertuig gelijk is aan  $0,0001 \text{ [Sv}\cdot\text{h}^{-1}]$ . De wagen heeft een breedte van 2 m. Volgens [15] mag bij deze situatie een  $K_{\text{eff}} = 0,0009 \text{ [Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^2]$  worden gebruikt. Volgens formule (3.6) is de hierbij ontvangen dosis gelijk aan  $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ [Sv]}$ .



## 4 Complexe ingekapselde en open bronnen

### 4.1 Toepassingsgebied en voorbeelden

Dit hoofdstuk behandelt de voorschriften voor de dosisberekeningen van ingekapselde en open bronnen waarvan de afmetingen zodanig groot zijn (*volumebron*) dat extrapolatie van het dosistempo met de eenvoudige modellen van paragraaf 3.3 niet mogelijk is.

Eigenschappen van volumebronnen zijn de volgende:

- De fysieke omvang van de bron (en de vaak inhomogene verdeling van de activiteit in de bron) veroorzaken een sterk plaats afhankelijk dosistempo nabij de bron.
- Het dosistempo nabij de bron is door zelfabsorptie aanzienlijk lager dan op grond van de totale activiteit in het bronvolume mag worden verwacht.
- Het dosistempo nabij het oppervlak van de bron is sterk bepaald door de opbouw.

Een voorbeeld van een complexe openbron met een grote mate van zelfabsorptie is bulkopslag van radioactieve stoffen. Berekening van de doses tengevolge van het vrijkomen van stof van deze bulkopslag wordt in rapport DOVIS, deel A [4] behandeld. Andere praktijkvoorbeelden van complexe open bronnen zijn bijvoorbeeld procesinstallaties waarin stoffen met natuurlijke radioactiviteit voorkomen.

In het algemeen moet het dosistempo van een volumebron met de zogenoemde punt-kern berekeningen worden bepaald, zoals met het programma MARMER [19] of MICROSHIELD, waarbij rekening wordt gehouden met de zelfabsorptie in de bron.

Behalve bij een volumebron, zal ook bij complexe configuraties van bronnen, zelfafscherming door onderlinge afscherming van de bronnen een complicerende factor zijn in de berekening van het dosistempo. Bij dergelijke complexe configuraties zullen “punt-kern” berekeningen moeten worden uitgevoerd.

Voorbeelden van dergelijke configuraties zijn nucleaire faciliteiten waarin een groot aantal systemen met radioactieve stoffen aanwezig is of een radiotherapie-afdeling waar verschillende sterke gamma-bronnen worden toegepast en waarbij de afscherming complex van vorm kan zijn ter bescherming van het personeel (labyrint).

Er zijn twee situaties waarbij het dosistempo van een volumebron, met eenvoudige (extrapolatie) formules bepaald kan worden:

- Op zeer grote afstand van de volumebron ( $> 5 L_{\max}$ ), zodat de puntbron benadering gebruikt mag worden, zie sectie 3.4.
- Dichtbij de volumebron ( $< 1/5 L_{\min}$  van het stralend oppervlak), zodat de benadering in de volgende paragraaf gebruikt mag worden.

## 4.2 Dosisberekening dichtbij een volumebron

Bulkopslag van radioactief materiaal is een open bron en tevens een goed voorbeeld van een ‘volumebron’. De afstand tot de meest nabijgelegen terreingrens is van de orde of vaak kleiner dan de afmetingen van de bron. Voor het uitvoeren van dosisberekeningen ter bepaling van de dosis aan de terreingrens, dient men in principe te beschikken over meetgegevens. Is dat niet het geval, dan kan men met behulp van de rekenregels in deze paragraaf een schatting maken van het dosistempo aan het oppervlak van een volumebron. Omdat in de praktijk deze vorm van bulkopslag alleen wordt toegepast voor materiaal met radionucliden van natuurlijke oorsprong, de zogenoemde ‘Natural Occuring Radioactive Material (NORM)’, zijn berekeningen voor dit materiaal als voorbeeld gebruikt. De hierbij toegepaste methoden mogen echter ook worden gebruikt voor berekeningen van het dosistempo van volumebronnen met kunstmatige radionucliden.

### 4.2.1 Dosistempo nabij buitenzijde deponie

Een deponie van U- en Th-houdend radioactief materiaal vormt een bron van uitwendige bestraling omdat een aantal dochternucliden uit de vervalreeksen van uranium en thorium hoog energetische  $\gamma$ -straling uitzendt. Deze radionucliden en hun gemiddelde fotonenergie per desintegratie zijn gepresenteerd in Tabel 1. Hierbij geeft  $^{208}\text{Tl}$ , een kort-levende dochter van  $^{232}\text{Th}$ , die in 36% van de desintegraties wordt gevormd, de hardste straling (2,615 MeV).

Het dosistempo dichtbij deze deponie is te berekenen met behulp van onderstaande methode.

Tabel 1: Radionucliden met hoogenergetische  $\gamma$ -straling uit de vervalreeksen van U-238, U-235 en Th-232 en hun gemiddelde energie afgifte per desintegratie.

$^{238}\text{U}$ reeks		$^{235}\text{U}$ reeks		$^{232}\text{Th}$ reeks	
Nuclide	MeV/desint	Nuclide	MeV/desint	Nuclide	MeV/desint
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	0,011	$^{235}\text{U}$	0,15	$^{228}\text{Ac}$	0,93
$^{214}\text{Pb}$	0,25	$^{227}\text{Th}$	0,11	$^{212}\text{Pb}$	0,15
$^{214}\text{Bi}$	1,51	$^{223}\text{Ra}$	0,13	$^{212}\text{Bi}$	0,18
		$^{219}\text{Rn}$	0,056	$^{208}\text{Tl}$	1,21
Overigen	0,031	Overigen	0,17	Overigen	0,01
Totaal*)	1,80	Totaal	0,62	Totaal	2,48

\*) Totaal van de gemiddelde uitgezonden  $\gamma$ - en röntgenenergieën in MeV per desintegratie voor moeder en dochternucliden van desbetreffende vervalreeks in evenwicht, zie [24].

Indien de geometrie van het opgeslagen materiaal wordt benaderd door een bron met een ‘oneindig’ groot volume, dan is het dosistempo, direct naast c.q. boven op deze bron te benaderen door:

$$\dot{H}^*(10,0) = 0,3 \cdot C \cdot E_{\text{gem.}} \quad (4.1)$$

Hierbij is:

- $\dot{H}^*(10,0)$ : het dosistempo op 1m direct boven of naast de bron met een groot volume  
 $[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}]$ ;  
 0,3: constante met dimensie  $[\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{g}\cdot\text{MeV}]$ ;  
 C: de activiteitsconcentratie van het radionuclide in het materiaal  $[\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}]$ ;  
 $E_{\text{gem.}}$ : de gemiddelde uitgezonden fotonenergie per desintegratie van het radionuclide  $[\text{MeV}/\text{desintegratie}]$ , zie Tabel 1.

Deze benadering van  $\dot{H}^*(10,0)$  in formule (4.1) is conservatief omdat de energie-absorptie per eenheid van massa (een maat voor de dosis) in het materiaal een factor groter is dan de energie-absorptie per eenheid van massa in menselijk weefsel. Deze factor is ongeveer 1,6 voor kalkhoudend materiaal. In Tabel 1 staan de waarden voor  $E_{\text{gem.}}$  die bij verschillende nuclidensamenstellingen van het materiaal gebruikt moeten worden. Als men de waarde van “Totaal” in deze tabel gebruikt, dan moet men bij C alleen de concentratie van de “moeder” opgegeven, immers de extra activiteit van al de dochters in de vervalketen is al verwerkt in de waarde van “Totaal”.

**Opmerking:** In de praktijk heeft men te maken met niet volledige reeksen. Zo zal vaak alleen  $^{226}\text{Ra}$  + dochters aanwezig zijn.

#### Rekenvoorbeelden:

Bij een deponie met materiaal dat  $1,3 [\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}]$  natuurlijk thorium bevat in evenwicht met dochters, is volgens formule (4.1) het dosistempo dichtbij deze deponie ca.  $1 \mu\text{Sv}/\text{uur}$ . Bij permanent verblijf dichtbij deze deponie is de jaardosis gelijk aan  $8,8 \text{ mSv}$ .

Gegeven een dikke laag materiaal waarin zowel natuurlijk uranium ( $4,5 \text{ act}\% \text{ }^{235}\text{U}$ ) als thorium aanwezig is, beide met een activiteitsconcentratie van  $0,4 \text{ Bq}/\text{gram}$ . Het dosistempo direct boven de laag is gelijk aan  $0,3 \times (0,4 \times 1,80 + 0,018 \times 0,62 + 0,4 \times 2,48) = 0,5 \mu\text{Sv}/\text{uur}$ . Bij permanent verblijf op deze laag is de jaardosis gelijk aan  $4,4 \text{ mSv}$ .

**Standaard:** *Indien sprake is van een volumebron, is met behulp van formule (4.1) en de waarden in tabel 1 een schatting te geven van het dosistempo aan het oppervlak van de volumebron.*



## 5 Toestellen

### 5.1 Röntgentoestellen

#### 5.1.1 Toepassingsgebied

In deze paragraaf worden behalve de röntgentoestellen ook de lineaire (elektron) versnellers (linatrons) behandeld voor zover bij deze versnellers geen andere secundaire deeltjes dan fotonen worden geproduceerd. Linatrons met energieën van 10 MeV of hoger kunnen in principe ook neutronen produceren. Deze categorie linatrons wordt behandeld in paragraaf 5.2. Versnellers.

Röntgentoestellen kunnen over een groot energiebereik ioniserende straling (fotonen) produceren. Afhankelijk van het potentiaal van de röntgenbuis wordt straling geproduceerd van enkele keV's tot enkele honderden keV's. Röntgentoestellen en linatrons worden gebruikt voor medische en industriële diagnostiek. Deze laatste toepassing betreft het niet-destructief onderzoek (NDO) zoals het controleren van lasnaden.

#### 5.1.2 Dosis als gevolg van de (afgeschermd) primaire bundel

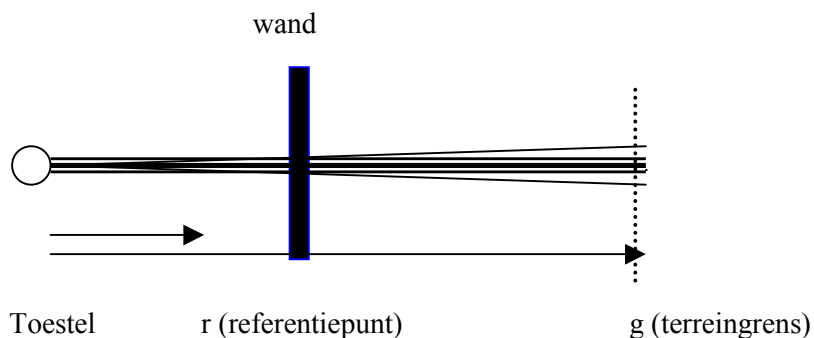
**Voorschrift:** *Bij het berekenen van de dosisbijdrage van de directe on afgeschermd primaire bundel, moet worden uitgegaan van een evenwijdige bundel (openingshoek  $<10^\circ$ ), waarvoor géén kwadratische afname met de afstand wordt verondersteld (zie formulie 2.5).*

Bij transmissie van de primaire bundel door een wand (of door een lichaam bij medische toepassingen), neemt het dosistempo van de verstrooide bundel echter af met het kwadraat van de afstand tot een fictief voorwerpspunt. De ruimtelijke verdeling van de straling achter de wand is niet bolsymmetrisch. Als gevolg hiervan zal de oriëntatie van de plaats waar het dosistempo wordt berekend ten opzichte van de primaire bundel meer het dosistempo gaan bepalen dan de afstand tot het fictieve voorwerpspunt. Naarmate de bundel smaller wordt, d.w.z. de ruimtehoek kleiner, zal deze hoekafhankelijkheid van het dosistempo steeds belangrijker worden voor de bepaling van de dosis aan de terreingrens.

**Standaard:** *Bij het berekenen van de dosisbijdrage van de verstrooide of afgeschermd primaire (divergente bundel) röntgenstraling wordt verondersteld dat het dosistempo in deze bundels afneemt met het kwadraat van de afstand (zie formule (2.4)).*

**Standaard:** *Bij het berekenen van de dosis aan de terreingrens als gevolg van röntgenstraling moet rekening worden gehouden met de sterke hoekafhankelijkheid van de straling na transmissie.*

In Figuur 4 zijn de posities van de stralingsbron, het referentiepunt waar het dosistempo bekend is en de terreingrens aangegeven. Ook de positie van een permanent aanwezige afschermende muur is aangegeven.



Figuur 4: Situatie bij het berekenen van het dosistempo in een afgeschermd (primaire) bundel.

De bijdrage aan de jaardosis aan de terreingrens door de afgeschermd primaire bundel kan met behulp van de onderstaande formule worden berekend. Deze formule is vrijwel identiek aan formule (3.2). Indien geen rekening wordt gehouden met afscherming door eventuele obstakels tussen wand en terreingrens, wordt het maximum van de jaardosis altijd aan de dichtstbijzijnde terreingrens bereikt.

$$H^*(10,g) = t_{\text{bedrijf}} \cdot \dot{H}^*(10,r) \cdot r^2/g^2 \cdot F. \quad (5.1)$$

Hierbij is:

$H^*(10,g)$ : De dosis [Sv] die in een jaar aan de terreingrens, op  $g$  [m] van het toestel, wordt ontvangen.

$t_{\text{bedrijf}}$ : Het aantal uren per jaar dat het toestel in gebruik is.

$F$ : Het product van de opbouwfactor en de transmissie door de wand.

$\dot{H}^*(10,r)$ : Het dosistempo (equivalent) in  $[\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}]$  op  $r$  [m] afstand van de onafgeschermd bron. Bij röntgentoestellen en linatrons bedraagt het dosistempo op 1 m van de anode/trefplaat vele duizenden sieverts per uur.

### 5.1.3 Dosis als gevolg van de afgeschermd secundaire bundel

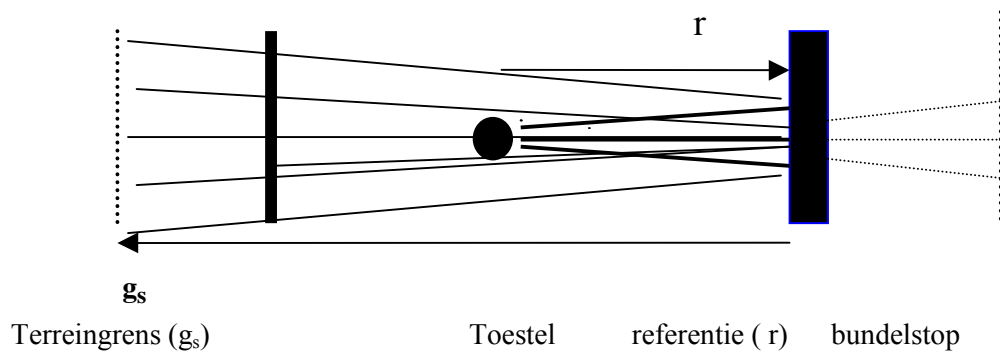
De belangrijkste medische toepassing van röntgenstraling is de diagnostiek. Het energiegebied ligt tussen de 30 en 130 keV, afhankelijk van de toepassing. De directe bundel is grotendeels of geheel afgeschermd waardoor alleen secundaire straling, die vrijkomt bij verstrooiing aan het te onderzoeken object (bijvoorbeeld een patiënt) en opstelling, een belangrijke bijdrage aan het dosistempo aan de terreingrens kan leveren.

Vooraf het dosistempo van achterwaarts gerichte strooistraling ( $150^\circ$ ) kan relatief hoog zijn. Bij 300 kV buisspanning en verstrooiing aan weefsequivalent materiaal, bedraagt per  $100 \text{ cm}^2$  verstrooiend oppervlak het dosistempo door de achterwaarts verstrooide straling ongeveer 0,12 % van het dosistempo in de doorgaande (primaire) bundel.



Bij buisspanningen van 200 kV en 100 kV is de bijdrage respectievelijk, 0,1% en 0,05 %, zie ICRP 15 en 21 [8]. Vooral wanneer de opstelling grenst aan de terreingrens, moet met de dosisbijdrage van de achterwaarts verstrooide straling rekening worden gehouden.

In Figuur 5 zijn de posities gegeven van het toestel, het referentiepunt waar het dosistempo wordt bepaald en de posities van de terreingrens en de twee afscherpende wanden.



Figuur 5: Situatie bij het berekenen van het dosistempo in een afgeschermd bundel secundaire straling veroorzaakt door verstrooiing aan de bundelstop.

Het dosistempo door aan voorwerpen verstrooide straling wordt berekend met behulp van de volgende formule.

$$\dot{H}^*(10, g_s) = \frac{\dot{H}^*(10, r) \cdot F_s \cdot \alpha \cdot A}{r^2 \cdot g_s^2} \quad (5.2)$$

Hierbij is:

$\dot{H}^*(10, g_s)$ : Het dosistempo [ $\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ ] bij blootstelling aan verstrooide straling aan de terreingrens op een afstand van  $g_s$  [m] van het verstrooiend object (= bundelstop).

$\dot{H}^*(10, r)$ : Het dosistempo [ $\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ ] op afstand  $r$  [m] van het toestel.

$F_s$ : Het product van de transmissie en de opbouwfactor van de verstrooide straling door de wand tussen achterzijde van het toestel en de terreingrens. De energie van deze verstrooide straling  $E_s$  hangt af van de hoek  $\theta$  waaronder wordt verstrooid en wordt

berekend met de volgende formule: 
$$\frac{1}{E_s} = \frac{1}{E} + \frac{1}{E_e} (1 - \cos \theta)$$

waarbij de energie  $E$  van de invallende bundel en  $E_s$  in MeV worden uitgedrukt. De waarde van  $E_e$  is 0,511 MeV.

- $\alpha$ : De verstrooiingscoëfficiënt per m<sup>2</sup> vertrooiend oppervlak die afhangt van de energie van de invallende bundel, de strooihoek  $\theta$  (hier 180°) en het materiaal van de bundelstop.
- A: Het oppervlak van de bundelstop in de directe bundel in [m<sup>2</sup>].

Behalve de bijdrage door achterwaartse reflectie van de bundel op de bundelstop en/of bestraald voorwerp, is er ook reflectie aan lucht van de primaire of secundaire bundel die via het dak naar buiten treedt. Deze bijdrage is de skyshine.

Er zijn analytische formules beschikbaar waarmee de skyshine kan worden berekend. Echter deze formule maken gebruik van een aantal empirisch bepaalde waarden. Omdat uitleg hiervan in dit rapport te ver zou voeren, wordt voor toepassing van deze formules verwezen naar [20]. In deze referentie zijn ook de verstrooiingscoëfficiënten  $\alpha$  voor verschillende soorten materialen en energieën gegeven. In Figuur 6 worden deze coëfficiënten weergegeven voor verstrooiing aan beton en ijzer. De twee diagrammen zijn omgewerkt naar gegevens overgenomen uit ref [20].

#### 5.1.4 Vuistregel voor jaardosis aan de terreingrens op basis van buisspanning en buislading

In een publicatie van Shapiro et. al. [21] is een empirische formule gegeven waarmee op basis van buisspanning van het röntgentoestel en de jaarlijks hoeveelheid gebruikte buislading voor opnamen, de jaardosis aan de terreingrens tengevolge van (aan de patiënt) verstrooide straling kan worden bepaald. Voor de terreingrensdosis is de strooistraling tussen 45° en 135° t.o.v. van de primaire bundel van belang, d.w.z. zijwaarts verstrooid richting buitenmuur. Ten opzichte van controlemetingen blijkt de formule binnen een factor 5 nauwkeurig.

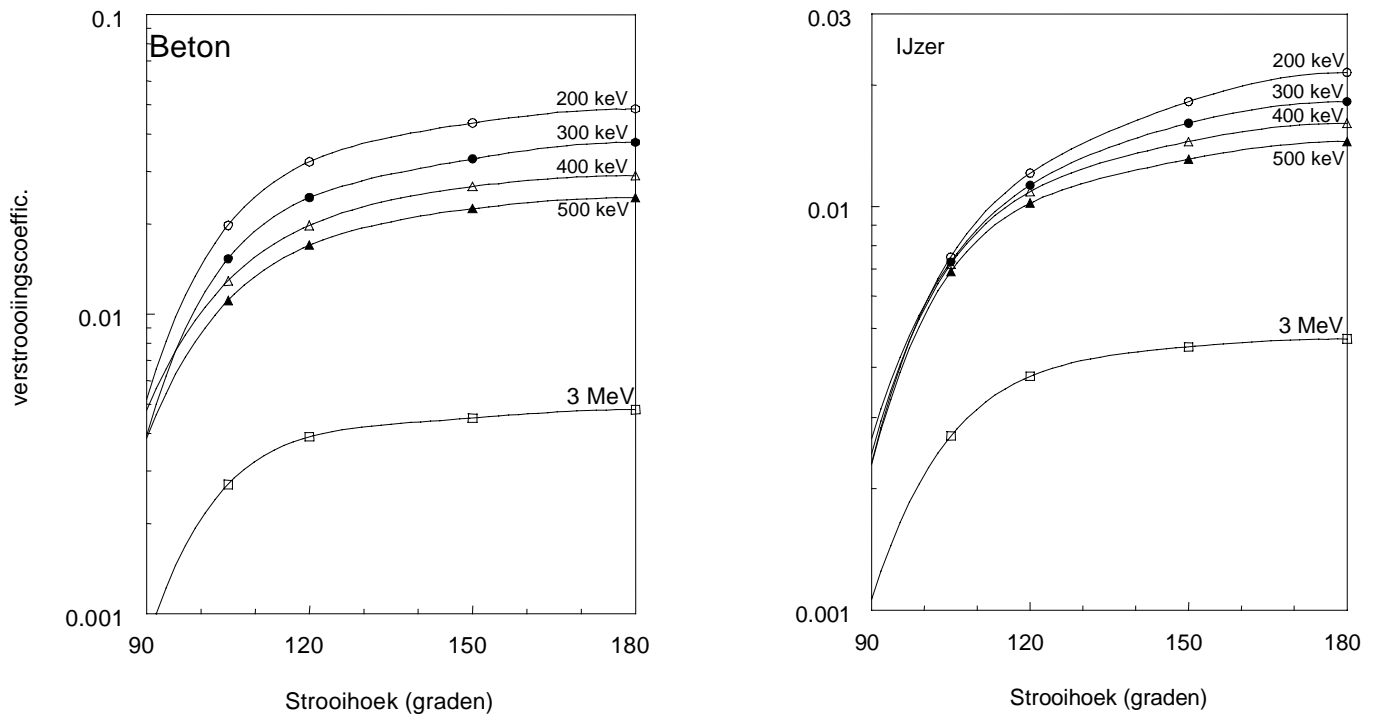
De dosis in een jaar die door deze zijwaarts verstrooide (90°) straling aan de terreingrens wordt ontvangen is gelijk aan:

$$D_t \approx Q/r^2 \cdot [13,055 \cdot V - 546,066]. \quad (5.3)$$

Hierbij is:

- $D_t$ : De effectieve jaardosis aan de terreingrens tengevolge van de verstrooide straling, zonder rekening te houden met afscherming van muren tussen de verstrooiingsbron en de terreingrens.
- V: De effectieve buisspanning in [kV].
- Q: De benodigde buislading in [mA·s], die in een jaar voor diagnostiek is gebruikt.
- r: De afstand [m] tussen verstrooiingsbron en de terreingrens.

De numerieke waarden 13,055 en 546,066 zijn semi-empirisch bepaald.



Figuur 6: Verstrooiingscoëfficiënten ( $\alpha$ ) voor mono-energetische fotonen bij verschillende strooihoeken bij loodrechte inval op beton en ijzer.

## 5.2 Versnellers en andere complexe toestellen

Bij versnellers voor radiotherapie en kernfysische experimenten is de primaire bron een evenwijdige bundel van snelle geladen deeltjes. Door de hoge energie van deze deeltjes en de door botsingen gevormde secundaire deeltjes en fotonen zijn afschermingberekeningen voor versnellers zeer complex.

Een ander complex toestel is een kernreactor. Bij dit toestel dragen de door het splijtingsproces gevormde neutronen niet bij aan de jaarlijkse dosis aan de terreingrens, vanwege de kwaliteit en kwantiteit van de aangebrachte afscherming. De fotonen die bij de verschillende processen in een kernreactor worden geproduceerd bepalen de jaardosis aan de terreingrens. Een belangrijke bijdrage aan deze jaardosis leveren de fotonen die vrijkomen bij het verval van activeringsproducten in de verschillende systeemcomponenten buiten het zwaar afgeschermd reactorvat. Vooral de radio-isotopen van stikstof die zijn gevormd door de neutronenactivering van lucht en water en radioactieve edelgassen, kunnen indien deze gassen buiten het reactorgebouw aanwezig zijn aanzienlijk bijdragen tot het dosistempo aan de terreingrens.

### 5.2.1 Toepassingsgebied

Bij de in paragraaf 5.2 beschreven categorie “versnellers en andere complexe bronnen” zijn toestellen waarbij de jaardosis aan de terreingrens niet met eenvoudige afschermingberekeningen kan worden bepaald. Voorbeelden van toestellen in deze categorie zijn:

- Medische bestralingsapparatuur in de vorm van elektronenversnellers met een energie in het gebied tussen 4 en 15 MeV, waarmee intense bundels fotonen (remstraling) worden opgewekt. Hierbij moet rekening worden gehouden met strooi- en lek straling en de productie van neutronen.
- Versnellers met een zodanig hoge energie of gebruik van zodanige trefplaten (deuterium) dat daarbij neutronen (bundels) worden geproduceerd;
- Versnellers voor wetenschappelijk onderzoek waarmee hoogenergetische bundels van elektronen of andere geladen deeltjes worden geproduceerd;
- Kernreactoren waarbij tijdens bedrijf ook rekening moet worden gehouden met de dosisbijdragen door hoogenergetische  $\gamma$ -straling afkomstig van kortlevende splijtings- en activeringproducten in de verschillende systemen van een kernreactor.

### 5.2.2 Versnellers

Bij versnellers voor radiotherapie (elektronen) en kernfysische experimenten (elektronen en protonen) beschikt de vergunningaanvrager meestal over informatie die de verdeling van het dosistempo aan de buitenzijde van het gebouw beschrijven. Op basis van deze informatie zou de maximale waarde van de jaardosis aan de terreingrens geschat kunnen worden. In de praktijk blijkt dit problemen op te leveren, omdat tijdens bedrijf de verdelingen van het dosistempo aan de buitenzijde van het gebouw kunnen veranderen, bijvoorbeeld door andere experimenten dan oorspronkelijk voorzien. Er moet dus van begin af aan met verschillende situaties rekening worden gehouden.

Ter plaatse van afbuigmagneten en bundelstops worden bij versnellers sterk gerichte bundels (divergent maar niet met een grote openingshoek) van secundaire deeltjes geproduceerd, zoals fotonen en bij hoge energieën ook neutronen. Door sky-shine kunnen dergelijke bundels ook achter een afschermende wand een relatief hoog dosistempo aan de terreingrens veroorzaken. Deze problematiek leidt tot het volgende voorschrift:

**Voorschrift:** *Bij snelle geladen deeltjes ( $> 0,5$  MeV) en bij het gebruik van neutronengenerators (versnelde protonen, deutronen of tritium) dient rekening gehouden te worden met de productie van röntgen en  $\gamma$ -straling. Op basis van de locaties van de bronnen van deze straling, de bronsterktes, de geometrie van de afscherming en de plattegrond van de inrichting, dienen buiten de terreingrens de waarde en de locaties te worden vastgesteld, waar de maximale effectieve jaardosis door een onbeschermd volwassen persoon ontvangen kan worden bij een verblijftijd van 24 h/dag. Vaststellen moet plaatsvinden hetzij door middel van metingen tijdens bedrijf of door middel van een analyse met hiervoor gekwalificeerde computerprogramma's zoals Monte-Carlo Transport codes [11].*

### 5.2.3 Andere complexe toestellen

Indien sprake is van toestellen die zeer hoge neutronenfluxen produceren, zoals in een kernreactor, dient rekening te worden gehouden met de fotonen die vrijkomen als gevolg van neutron-vangstreacties, onder meer in het materiaal van de afscherming. Bij dergelijke situaties zal gebruik gemaakt moeten worden van gekoppelde neutron-gamma berekeningen die toch al uitgevoerd moeten worden in verband met het ontwerp van de afscherming van deze installaties ter bescherming van de werknemers.

Voor deze categorie van berekeningen zijn vooral in de V.S. voor deze analyse gekwalificeerde computerprogramma's ontwikkeld, bijvoorbeeld MCNP [11]. Hierbij wordt gebruik gemaakt van omvangrijke bestanden met werkzame doorsneden van neutron-vangstreacties bij verschillende energieën [22]. Binnen Nederland worden dergelijke programma's frequent gebruikt voor dosimetrie en afschermingsberekeningen bij nucleaire installaties.

**Standaard:** *Dosis- en afschermingsberekeningen bij neutronbundels ter bepaling van de dosis aan de terreingrens, worden uitgevoerd met behulp van de diagrammen in ICRP publicaties ICRP-15/21 en ICRP-51 [8, 10]. Indien het gebruik van deze diagrammen geen oplossing biedt, moeten deze dosisbepalingen met de hiervoor gekwalificeerde computerprogramma's worden uitgevoerd.*



## 6 Definities en nadere uitleg

Voor de toepassing van dit rapport wordt verstaan onder:

**Activiteit (A):** De hoeveelheid radioactiviteit, zie Becquerel.

**Becquerel:** de eenheid van radioactiviteit in het S.I. stelsel met als symbool Bq. Bij 1 Bq radioactiviteit vervalt er één atoomkern per seconde. Een oudere eenheid van radioactiviteit is de curie (Ci), die correspondeert met de activiteit van één gram Radium 226 ( $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ ).

**Bron:** toestel dan wel radioactieve stof.

**Bronconstante:** de factor waarmee het dosistempo berekend kan worden bij blootstelling aan een puntbron met een bekende hoeveelheid activiteit van een bepaald radionuclide. In dit rapport wordt de bronconstante  $h(10)$  gebruikt, die gelijk is aan het omgevingsdosisequivalenttempo op 1 meter afstand van een bron met één MBq van een bepaald radionuclide. In onderstaande tabel zijn voor een aantal radionucliden deze constanten gegeven.

Tabel 2: Bronconstanten voor het berekenen van het omgevingsdosisequivalenttempo

Nuclide	Halveringstijd	$h(10)$ *	Nuclide	Halveringstijd	$h(10)$ *
$^{18}\text{F}$	1109,8 m	0,166	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6,006 u	0,023
$^{22}\text{Na}$	2,60 j	0,33	$^{103}\text{Ru}$	39,27 d	0,081
$^{40}\text{K}$	$1,28 \cdot 10^{+9}$ j	0,021	$^{124}\text{Sb}$	60,20 d	0,27
$^{54}\text{Mn}$	312,5 d	0,13	$^{131}\text{I}$	8,02 d	0,066
$^{59}\text{Fe}$	44,529	0,17	$^{134}\text{Cs}$	2,062 j	0,25
$^{58}\text{Co}$	70,80 d	0,15	$^{137}\text{Cs}$	30,25 j	0,093
$^{60}\text{Co}$	5,271 j	0,36	$^{192}\text{Ir}$	74,0 d	0,139
$^{65}\text{Zn}$	243,9 d	0,086	$^{226}\text{Ra} + \text{d}$	1600 j	0,28
$^{95}\text{Zr}$	63,98 d	0,12	$^{238}\text{U} + \text{d}$	$4,468 \cdot 10^{+9}$ j	0,26
$^{95}\text{Nb}$	35,15 d	0,12	$^{232}\text{Th} + \text{d}$	$1,405 \cdot 10^{+10}$ j	0,36
$^{99}\text{Mo}$	65,94 u	0,026	$^{241}\text{Am}$	432.0 j	0,017

\*) Het dosistempo op 1 meter per eenheid van activiteit [ $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}$ ]. De waarden zijn uit [7] en [13].

**Dosislimiet:** de maximale waarde van de in een gespecificeerd tijdsinterval ontvangen dosis die wettelijk is toegestaan bij koninklijk besluit of overheidsregeling bij het toepassen van ioniserende straling en radioactieve stoffen. De blootgestelde groepen worden onderscheiden in blootgestelde werknemers, overige werknemers en leden van de bevolking. De dosislimieten voor deze groepen zijn vermeld in het Besluit stralingsbescherming [1].

**Effectieve dosis ( $E$ ):** de som van de gewogen equivalente orgaandoses ten gevolge van inwendige en uitwendige bestraling. Hiermee kan het risico van ongelijkmatige bestraling van het lichaam worden vergeleken met dat van een homogene bestraling van het gehele lichaam, zie ICRP-60 [23]. In dit rapport wordt de grootheid ‘dosis’ gebruikt voor de effectieve dosis, mits niet verwezen wordt naar een specifiek orgaan. De eenheid van effectieve dosis is de sievert (Sv).

**Equivalentente dosis ( $H_{[T]}$ ):** de som van de producten van de gemiddelde geabsorbeerde dosis  $D_{T,R}$  in een weefsel of orgaan T ten gevolge van stralingsoort R, en de stralingsweegfactor  $w_R$ . De eenheid van equivalentente dosis is de sievert (Sv).

**Exposietempo:** de som van de elektrische ladingen van alle positieve (of negatieve) ionen die per tijdseenheid door ionisatie in een volume lucht worden gevormd, gedeeld door de massa van dat volume. Deze grootheid wordt uitgedrukt in [C/kg] per s. De oude eenheid voor het exposietempo is de röntgen. Vaak wordt het exposietempo direct vertaald in het dosistempo [Gy/s] in lucht.

**Externe straling:** ioniserende straling afkomstig van bronnen buiten het lichaam waarbij een dosis door uitwendige blootstelling aan deze straling ontvangen wordt.

**Halveringsdikte (HVD):** de dikte van een afscherming waarbij het dosistempo een factor 2 afneemt. De halveringsdikte hangt af van het type straling, de energie van de straling en het materiaal van de afscherming. De halveringsdikte van fotonen van 1 MeV is 90 m in lucht en 4,6 cm in beton. Bij 10 MeV fotonen zijn deze halveringsdikten ongeveer een factor 3 groter. Zie ook **massieke verzwakkingsdoorsnede**.

**Handeling:** het bereiden, voorhanden hebben, toepassen of zich ontdoen van een kunstmatige of van een natuurlijke bron, voor zover deze natuurlijke bron is of wordt bewerkt met het oog op zijn radioactieve eigenschappen dan wel het gebruiken of voorhanden hebben van een toestel, uitgezonderd bij een interventie, een ongeval of een radiologische noodsituatie.

**Ingekapselde bron:** radioactieve stoffen die zijn ingebed in of gehecht aan vast dragermateriaal of zijn omgeven door een omhulling van materiaal met dien verstande dat hetzij het dragermateriaal hetzij de omhulling voldoende weerstand biedt om onder normale gebruiksomstandigheden elke verspreiding van radioactieve stoffen te voorkomen.

In de praktijk betekent dit dat aan de standaard zoals beschreven in ISO 2919/1980 moet worden voldaan. Onder normale gebruiksomstandigheden zal bij een ingekapselde bron alleen externe blootstelling aan ioniserende straling van belang zijn. Ingekapselde bronnen kunnen zowel fotonen ( $\gamma$ -straling), elektronen ( $\beta^-$ -straling) als neutronen uitzenden. Vanwege de vereiste mechanische sterkte van de inkapseling wordt  $\alpha$ -straling en laagenergetische elektronen volledig door deze inkapseling afgeschermd. Dit geldt eveneens voor positronen ( $\beta^+$ -straling) die in de inkapseling worden omgezet tot  $\gamma$ -straling (511 keV).



**Inrichting:** elke door de mens bedrijfsmatig of in een omvang alsof zij bedrijfsmatig was, ondernomen bedrijvigheid die binnen een zekere begrenzing pleegt te worden verricht (art. 1 lid 1 Wet milieubeheer). Daarbij worden als **één inrichting** beschouwd de tot een zelfde onderneming of instelling behorende installaties die onderling technische, organisatorische of functionele bindingen hebben en in elkaars onmiddellijke nabijheid zijn gelegen. Onze Minister kan nadere regels stellen met betrekking tot hetgeen in deze wet en de daarop berustende bepalingen onder inrichting wordt verstaan (art 1 lid 4 Wet milieubeheer 1993).

**Ioniserende straling:** relatief hoog energetische straling die door inwerking op materie daarin ionisatie veroorzaakt. Ioniserende straling bestaat uit geladen deeltjes, zoals  $\alpha$ -straling (bewegende heliumkernen) en  $\beta$ -straling (snel bewegende elektronen) en de zogenoemde indirect ioniserende straling zoals  $\gamma$ -straling en röntgenstraling (elektromagnetische straling) en ongeladen deeltjes zoals neutronen.

**Lineïeke verzwakkingcoëfficiënt:** De coëfficiënt, aangeduid met  $\mu$  [ $\text{cm}^{-1}$ ], die bij transmissie van straling door een materiaal, de mate van verzwakking van deze straling aangeeft per eenheid van afgelegde weg. De waarde van  $\mu$  hangt af van het materiaal en van de energie van de straling. De coëfficiënt  $\mu$  hangt samen met de halveringsdikte  $d_{1/2}$  die gelijk is aan  $\ln 2/\mu$

**Massieke verzwakkingsdoorsnede:** De coëfficiënt, aangeduid met  $\mu/\rho$  [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ], die bij transmissie van straling door een materiaal, de mate van verzwakking van deze straling aangeeft per eenheid van gepasseerde massa. De waarde van  $\mu/\rho$  hangt af van het materiaal en van de energie van de straling. De massadichtheid van het materiaal is  $\rho$  [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]. In Tabel 3 is voor lucht, beton en ijzer de waarde van  $\mu/\rho$  voor fotonen bij verschillende energieën weergegeven.

**NORM:** de afkorting voor Naturally Occuring Radioactive Material.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  en  $^{232}\text{Th}$  en /of de dochternucliden van deze drie isotopen, alsmede  $^{40}\text{K}$  kunnen in principe in NORM materiaal voorkomen.

**Omgevingsdosisequivalent (tempo):** het dosisequivalent(tempo) dat zou worden teweeggebracht in het overeenkomstige, maar uitgeëxpandeerde en uitgelijnde veld in een ICRU bol op een diepte van 10 mm. Het omgevingsdosisequivalent, aangeduid met  $H^*(10)$ , wordt veelal gebruikt als maat voor de jaarlijkse externe blootstellingsdosis bij onafgeschermd gebruik, hetgeen in beginsel een overschatting geeft.

Tabel 3: Massieke verzwakkingsdoorsneden van fotonen voor lucht, beton en ijzer

Fotonenergie [MeV]	$\mu/\rho$ [cm <sup>2</sup> /g] <sup>a)</sup>		
	Lucht ( $\rho = 0,001205$ g/cm <sup>3</sup> )	Beton ( $\rho = 2,35$ g/cm <sup>3</sup> )	IJzer ( $\rho = 7,87$ g/cm <sup>3</sup> )
0,05	0,206	0,395	1,96
0,06	0,187	0,296	1,20
0,08	0,167	0,213	0,595
0,10	0,155	0,178	0,372
0,15	0,136	0,143	0,196
0,2	0,124	0,127	0,146
0,3	0,107	0,108	0,110
0,4	0,0954	0,0963	0,0940
0,5	0,0868	0,0877	0,0841
0,6	0,0804	0,0810	0,0770
0,8	0,0706	0,0710	0,0670
1,0	0,0635	0,0638	0,0600
1,25	0,0568	0,0571	0,0535
1,5	0,0517	0,0520	0,0488
2	0,0444	0,0448	0,0426
3	0,0358	0,0365	0,0362
5	0,0276	0,0290	0,0315
10	0,0205	0,0231	0,0299

a) waarden uit [7]

**Opbouwfactor:** De opbouwfactor (**build-up**), in dit rapport aangegeven door het symbool B, is de relatieve dosisbijdrage van de verstrooide fotonen die vrijkomen bij transmissie van fotonen door materie. De opbouwfactor bij transmissie van fotonen door een afscherming hangt af van de lineïeke verzwakkingcoëfficiënt van het materiaal van de afscherming en de dikte van de afscherming. De opbouwfactor hangt ook af van de geometrie van het stralingsveld van de fotonen; de waarde van B is gelijk aan 1 bij een evenwijdige (smalle) bundel maar wordt groter naarmate dit veld meer uitgebreid is. De opbouwfactor is relatief groot bij een afschermingsmateriaal van lichte elementen en een lage energie van de fotonen. Door combinatie van eerst een laag van licht materiaal en dan een laag van zwaar materiaal in een afscherming, wordt de opbouwfactor na passage van deze twee lagen veel kleiner dan het product van de opbouwfactoren van de afzonderlijke lagen.

In Tabel zijn de waarden van B voor een isotrope puntbron gegeven, bij transmissie door een afscherming van ijzer, respectievelijk van beton, met verschillende diktes en bij verschillende foton energieën.

Tabel 4: Opbouwfactoren voor transmissie door ijzer van fotonen van een isotope puntbron

$\mu d^a)$	Foton energie [MeV] <sup>b)</sup>			
	0,5	1,0	2,0	3,0
1	1,98	1,87	1,76	1,55
2	3,09	2,89	2,43	2,15
4	5,98	5,39	4,13	3,51
7	11,7	10,2	7,25	5,85
10	19,2	16,2	10,9	8,51
15	35,4	28,3	17,6	13,5
20	55,6	42,7	25,1	19,1

a) De parameter d is de dikte van de afscherming en  $\mu$  de energieafhankelijke lineïeke verzwakkingcoëfficiënt voor ijzer.

b) De waarden van B zijn uit [7].

Tabel 5: Opbouwfactoren voor transmissie door beton van fotonen van een isotope puntbron

$\mu d^a)$	Foton energie [MeV] <sup>b)</sup>			
	0,5	1,0	2,0	3,0
1	2,27	1,98	1,77	1,67
2	4,03	3,24	2,65	2,38
4	8,97	6,42	4,61	3,84
7	20,2	12,7	7,97	6,20
10	36,4	20,7	11,7	8,71
15	75,6	37,2	18,6	13,1
20	131	57,1	26,0	17,7

a) De parameter d is de dikte van de afscherming en  $\mu$  de energieafhankelijke lineïeke verzwakkingcoëfficiënt voor beton.

b) De waarden van B zijn uit de database van MICROSIELD (Grove Engineering).

**Punt-kern methode:** deze rekenmethode gaat er van uit dat een volumebron is op te delen in een groot aantal puntbronnen. Vervolgens wordt voor elke puntbron het dosistempo in een bepaald punt (receptorpunt) berekend. Hierbij wordt rekening gehouden met absorptie en opbouw in het materiaal tussen de puntbronnen en het receptorpunt. Door daarna in dat receptorpunt de dosistempobijdragen van alle puntbronnen te sommeren, wordt het dosistempo van de volumebron in het receptorpunt bepaald. Hierbij is ook de zelfabsorptie in deze volumebron in rekening gebracht.

Voorbeelden van computerprogramma's die op de punt-kern methode zijn gebaseerd zijn: MARMER (NEA databank), MICROSIELD (Grove Engineering) en VISIPLAN dat door SCK-CEN in België is ontwikkeld.

**Radionuclide:** een nuclide (atoomkern) die radioactief is, d.w.z. spontaan vervalt onder uitzenden van straling. Hierbij gaat de niet-stabiel nuclide door emissie van straling (deeltjes of

elektromagnetische straling) over in een ander (radio)nuclide (bij emissie van deeltjes) of in een andere toestand van dezelfde nuclide (bij emissie van elektromagnetische straling).

**Radioactieve stof:** iedere stof die een voor de stralingsbescherming relevante hoeveelheid radionucliden bevat. De hiervoor te hanteren radionuclide-specifieke grenzen zijn vermeld in bijlagen bij het Besluit stralingsbescherming.

**Referentiepersoon:** De (hypothetische) persoon waarvoor de dosis voor een bepaalde emissiesoort en belastingpad wordt berekend. Voor de referentiepersoon worden aannames gemaakt met betrekking tot gedrag (referentiegedrag) en fysiologische parameters.

Het **referentiegedrag** is het gedrag dat, gegeven een bepaalde besmetting in het milieu, tot de referentieblootstelling leidt. Het begrip gedrag houdt alle levensgewoonten in: wonen, werken, eten, ademhalen etc. Bij de bepaling van het referentiegedrag worden conservatieve, doch realistische, aannames gedaan. Omdat 'extreem' gedrag of gedrag van een enkeling niet wordt beschouwd, wordt vaak de term referentiepersoon vervangen door referentiegroep.

**Referentiegroep:** de groep van referentiepersonen uit de bevolking die gezien hun omstandigheden, zoals woonplaats en leefgewoonten, jaarlijks aan een hogere dosis tengevolge van alle belastingspaden vanuit de inrichting (de bron) worden blootgesteld dan de overige bevolking.

Bij blootstelling aan **externe straling** vanuit inrichtingen wordt de maximale individuele dosis (buiten de terreingrens) meestal aan de terreingrens bereikt. De referentiegroep is dan automatisch het deel van de bevolking dat in de directe omgeving van de inrichting woont of daar regelmatig werkt (uitgezonderd de werknemers van de inrichting).

**Stralingsweegfactor:** Deze factor ( $w_R$ ) brengt de relatieve biologische werkzaamheid van de diverse vormen van ioniserende straling op integrale wijze in rekening. De eenheid van de factor is [Sv/Gy].

De waarden van  $w_R$  voor verschillende stralingssoorten zijn gegeven in Tabel 5. Voor stralingssoorten en energieën die niet in deze tabel voorkomen kan  $w_R$  worden benaderd door berekening van de gemiddelde kwaliteitsfactor  $Q$  op een diepte  $d$  van 10 mm in de ICRU bol. Deze ICRU-bol, die een diameter heeft van 30 cm en een dichtheid van  $1 \text{ g/cm}^3$ , is bedoeld als een model voor de menselijke romp, zie ook **Omgevingsdosisequivalent**.

Tabel 6: Stralingsweegfactoren  $w_R$

Soort van straling en energiegebied	$w_R$
Fotonen, alle energieën	1
Elektronen en muonen, alle energieën <sup>a)</sup>	1
Neutronen, energie < 10 keV	5
10 - 100 keV	10
> 100 keV tot 2 MeV	20
> 2 – 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protonen, met uitzondering van terugstootprotonen, bij energieën > 2 MeV	5
Alfadeeltjes, splijtingsfragmenten, zware kernen	20

a) Met uitzondering van Auger elektronen uitgezonden door kernen gebonden aan DNA

**‘Voorhanden hebben’:** hieronder wordt mede verstaan: het vervaardigen, bewerken, hanteren en opslaan, met uitzondering van opslag in verband met vervoer.

**Werknemer:** persoon die, hetzij in dienst of onder gezag van een ondernemer, hetzij als zelfstandige, arbeid verricht.

**Werkzaamheid:** het bereiden, voorhanden hebben, toepassen van of zich ontdoen van een natuurlijke bron voor zover die niet wordt of is bewerkt wegens zijn radioactieve eigenschappen, uitgezonderd bij interventie, een ongeval of een radiologische noodsituatie.



## Referenties

- [1] ‘Besluit van 16 juli 2001, houdende vaststelling van het Besluit stralingsbescherming’, Staatscourant 397, 6 september 2001 en ‘Besluit van 29 januari 2002 tot vaststelling van het tijdstip van inwerkingtreding van de Wet van 5 juli 2000 tot wijziging van de Kernenergiewet (implementatie richtlijn 96/29/Euratom tot vaststelling van basisnormen voor de bescherming tegen stralingsgevaar) en tot vaststelling van het tijdstip van inwerkingtreding van het Besluit stralingsbescherming’, Staatscourant 81, jaargang 2002
- [2] 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 nr. L 159, Luxemburg, 29 juni 1996
- [3] Bijlage bij de ministeriële regeling *Analyse Gevolgen Ioniserende Straling voor het milieu (mr-AGIS)*, Deel 1: Rekenregels en Deel 2: Nadere Analyse. Regeling van de Minister van VROM, nr. SAS/2001200144740, houdende analyse van de schadelijke gevolgen van ioniserende straling voor het milieu. Staatscourant 22 d.d. 31 januari 2002 en herplaatsing in Staatscourant 73 d.d. 16 april 2002
- [4] R.O. Blaauboer: *Dosisberekening voor de Omgeving bij Vergunningverlening Ioniserende Straling- DOVIS, A. Lozingen in lucht en water*, RIVM rapport 610310006/2002
- [5] G.M.H. Laheij, R.O. Blaauboer en J.F.M.M. Lembrechts: *Risicoberekening voor in het milieu geloosde radionucliden – Onderbouwing richtlijn voor vergunningen (RIBRON) – Eerste herziene versie*, RIVM rapport 610053005, 1996
- [6] J.F.A. van Hienen en A.Hogenbirk: *Richtlijn externe straling en afscherming - Risicoberekening voor afgeschermd en/of ingekapselde bronnen en bodembesmetting*, ECN-C--96-012, 1996
- [7] A.J.J. Bos, F.S. Draaisma, W.J.C. Okx en C.E. Rasmussen: *Inleiding tot de stralingshygiëne*. Elsevier gezondheidszorg, ISBN 90 352 22601, 2000
- [8] ICRP publications 15 and 21: *Protection against Ionizing Radiation from External Sources and Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources*, Pergamon Press, Oxford, reprint 1980
- [9] ICRP publication 33: *Protection against ionizing radiation from external sources used in medicine*, Pergamon Press, Oxford, 1982
- [10] ICRP publication 51: *Data for Use in Protection Against External Radiation*, Pergamon Press, Oxford, 1987
- [11] J.F. Briesmeister (ed.): *MCNP – A general Monte Carlo Code N-Particle Transport Code, Version 4A*, Report LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, November 1993
- [12] *Recommendations for the Safe Use and Regulations of radiation sources in Industry, Medicine, Research and Teaching*, IAEA Safety Series No. 102, IAEA, Vienna, 1990

- [13] A.S. Keeverling Buisman: *Handboek radionucliden*, ISBN 90-75441-02-3, Beta Text, Bergen, 1996
- [14] *Besluit vervoer splijtstoffen, ertsen en radioactieve stoffen van 8-11-2001*, Staatscourant 516, 2001
- [15] J.F.A. van Hienen en R. Jansma: *Public exposures due to frequent shipments of radioactive materials by road*, RAMTRANS, Vol 10, No. 1 pp 45-49 (1999)
- [16] J.F.A. van Hienen en R. Jansma: *Kwantificering van risico's vervoer radioactieve stoffen*, studie door ECN in opdracht van het Ministerie van VROM, ECN-C--92-047, juni 1992
- [17] R. Jansma en J.F.A. van Hienen: *Risico's van radioactieve stoffen bij vervoer over de weg*, studie door ECN in opdracht van het Ministerie van VROM, ECN-CX--94-171, november 1994
- [18] J.F.A. van Hienen en R. Jansma: *Risico-normering vervoer radioactieve stoffen*, studie door ECN in opdracht van het Ministerie van VROM, ECN-C--96-089, april 1997
- [19] J.L. Kloosterman en J.E. Hoogenboom: *MARMER: A flexible point-kernel shielding code*, RAMTRANS, Vol.1 No. 2 pp. 117-125, 1990
- [20] Radiation protection design guidelines for 0.1 – 100 MeV particle accelerator facilities. ICRP Report No. 51, March 1977
- [21] B. Shapiro, T. Thijssen en R. de Jong: *Bepaling van de Stralingsdosis aan de terreingrens van het Ziekenhuis afkomstig van Radiodiagnostiek*. Publicatie NVS-nieuws, najaar 2000
- [22] M.E. Battat (ed.): *American National Standard Neutron and Gamma-Ray Flux-to-Dose Rate Factors* (American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, 1977) ANSI/ANS-6.1.1-1977
- [23] ICRP Publication 60: *1990 Recommendations of the international commission on radiological protection*, Annuals of the ICRP, Pergamon Press, Oxford, 1991
- [24] ICRP Publication 38: Volumes 11-13 1983 *Radionuclide transformations, Energy and Intensity of Emissions*", Annuals of the ICRP, Pergamon Press, Oxford – New York – Frankfurt