



Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu  
*Ministerie van Volksgezondheid,  
Welzijn en Sport*

## **Potentiële stralingsbelasting na het overlijden van patiënten behandeld met radioactieve stoffen**

RIVM Briefrapport 2019-0165  
D. Siegersma et al.





Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu  
*Ministerie van Volksgezondheid,  
Welzijn en Sport*

## **Potentiële stralingsbelasting na het overlijden van patiënten behandeld met radioactieve stoffen**

RIVM Briefrapport 2019-0165  
D. Siegersma et al.

## Colofon

© RIVM 2019

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2019-0165

D. Siegersma (auteur), RIVM  
T. van Dillen (auteur), RIVM  
I.R. de Waard (auteur), RIVM  
L.H.A. Boudewijns (auteur), RIVM

Contact:  
Douwe Siegersma  
Centrum Veiligheid  
douwe.siegersma@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming in het kader van het programma Ondersteuning beleid stralingsbescherming 2019.

Dit is een uitgave van:  
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**  
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven  
Nederland  
www.rivm.nl

## Publiekssamenvatting

### **Potentiële stralingsbelasting na het overlijden van patiënten behandeld met radioactieve stoffen**

Om bepaalde ziekten (zoals prostaatkanker) te behandelen krijgen patiënten radioactieve stoffen toegediend, bijvoorbeeld via een infuus of een pil. Door de behandeling kunnen deze patiënten tijdelijk zelf een bron van straling worden en mensen in hun directe omgeving aan straling blootstellen. Dit kan ook gebeuren als een patiënt kort na behandeling overlijdt en daarna wordt begraven of gecremeerd.

Als bekend is dat de patiënt een bron van straling is, kunnen maatregelen worden genomen om de blootstelling te beperken. Die gaan bijvoorbeeld over het afstand houden tot de patiënt. Als dit niet bekend is, en dus geen maatregelen zijn getroffen, kunnen naasten en personeel van een uitvaartorganisatie worden blootgesteld aan extra straling. Bij een crematie kunnen ook medewerkers van crematoria en omwonenden worden blootgesteld aan de straling die vrijkomt.

Het RIVM heeft daarom onderzocht wat de blootstelling kan zijn wanneer een patiënt kort na een behandeling met radioactieve stoffen overlijdt en er geen maatregelen zijn getroffen. De blootstelling blijkt het hoogst indien een patiënt die lijdt aan neuroblastoom of schildklierkanker kort na de behandeling met jodium-131 overlijdt.

De (over het hele lichaam) meest blootgestelde personen zijn familieleden en werknemers van uitvaartorganisaties die betrokken zijn bij de verzorging van de overledene. De berekende blootstelling is in deze gevallen lager dan de dosiscriteria. Als er meer tijd zit tussen de behandeling en overlijden, zal de blootstelling in alle gevallen (veel) lager zijn. Als de overledene wordt gecremeerd, is de extra blootstelling van mensen die in de buurt van het crematorium wonen lager dan de natuurlijke straling die wij allen tijdens twee dagen ontvangen.

Het is onwaarschijnlijk dat personen die in de uitvaartsector werken de onderzochte situaties meer dan 1 à 2 keer in een jaar tegenkomen.

**Kernwoorden:** straling, uitvaart, begraven, cremeren, medische radionucliden, kunstmatige radioactieve stoffen, nucleaire geneeskunde, radiotherapie, dosis, crematoria



## Synopsis

### **Potential radiation burden after the death of patients treated with radioactive substances**

To treat certain diseases (such as prostate cancer), patients may be administered radioactive substances, for example through an infusion or as a pill. Due to the treatment, these patients can temporarily become a source of radiation, thereby exposing people in their immediate vicinity to radiation. This can also be the case if a patient dies shortly after treatment and is then buried or cremated.

If it is known that the patient is a source of radiation, measures can be taken to limit the exposure. These measures could, for example, relate to the distance to the patient. If this is not known, and therefore no measures have been taken, relatives and funeral centre staff could be exposed to extra radiation. If the deceased is cremated, crematorium staff and local residents could be exposed to the radiation that is released during the cremation.

The National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) has therefore investigated the possible level of exposure in the event of a patient dying shortly after being treated with radioactive substances, without people being made aware of this therapy and without any measures. This research shows that the exposure is highest if a patient dies shortly after treatment of neuroblastoma or thyroid cancer with iodine-131.

Those with the highest level of (whole-body) exposure are family members and funeral centre staff who are involved in taking care of the deceased. The calculated exposure is in these cases lower than the dose criteria. As the time between administration and death becomes longer, the exposure will be (much) lower in all cases. If the deceased is cremated, the additional exposure of people living in the vicinity of the crematorium is less than the amount of naturally-occurring radiation we all receive during two days.

It is improbable that people who are occupationally involved in funerals will face the situations studied in this report more than once or twice a year.

**Keywords:** radiation, funeral, burial, cremation, medical radionuclides, artificial radioactive substances, nuclear medicine, radiotherapy, dose, crematoria



## Inhoudsopgave

### Samenvatting – 9

#### **1 Inleiding – 13**

- 1.1 Aanleiding voor dit onderzoek – 13
- 1.2 Aanpak – 14
- 1.3 Afbakening – 15
- 1.4 Dankwoord – 16

#### **2 Behandelingen – 17**

- 2.1 Selectiecriteria – 17
  - 2.1.1 Aantal toedieningen per jaar – 17
  - 2.1.2 Radiologische gevaarzetting – 17
  - 2.1.3 Toekomstprognoses – 18
- 2.2 Geselecteerde behandelingen – 18

#### **3 Definitie scenario's – 21**

- 3.1 Scenario's en varianten – 21
- 3.2 Aanpak, aannames en uitgangspunten – 21
- 3.3 Scenario 'Begraving' – 22
  - 3.3.1 Variant A: Overlijden 24 uur na toediening – 22
  - 3.3.2 Variant B: Overlijden een maand na toediening – 25
- 3.4 Scenario 'Crematie' – 25
  - 3.4.1 Variant A: Overlijden 24 uur na toediening – 25
  - 3.4.2 Variant B: Overlijden een maand na toediening – 30

#### **4 Modelleren van de blootstelling – 31**

- 4.1 Uitgangspunten – 31
  - 4.1.1 Effectieve dosis – 31
  - 4.1.2 Lokale, equivalente huiddosis – 32
- 4.2 Blootstelling intact lichaam – 32
  - 4.2.1 Effectieve dosis, externe straling – 32
  - 4.2.2 Equivalente huiddosis, externe straling – 33
  - 4.2.3 Equivalente huiddosis, besmetting urine – 33
- 4.3 Blootstelling as – 34
  - 4.3.1 Effectieve dosis, externe straling – 35
  - 4.3.2 Effectieve dosis, ingestie as – 35
  - 4.3.3 Effectieve dosis, inhalatie as – 35
  - 4.3.4 Equivalente huiddosis, externe straling – 36
  - 4.3.5 Equivalente huiddosis, besmetting as – 36
- 4.4 Luchtverspreiding crematie – 37
- 4.5 Lozingen – 38

#### **5 Berekende potentiële blootstelling – 39**

- 5.1 Scenario 'Begraving' – 39
  - 5.1.1 Variant A: Overlijden 24 uur na toediening – 39
  - 5.1.2 Variant B: Overlijden een maand na toediening – 41
- 5.2 Scenario 'Crematie' – 42
  - 5.2.1 Variant A: Overlijden 24 uur na toediening – 42
  - 5.2.2 Variant B: Overlijden een maand na toediening – 44

<b>6</b>	<b>Vergelijking resultaten met (dosis)criteria – 47</b>
6.1	Bepaling van het type blootstellings situatie – 47
6.2	Bepaling van de blootstellingscategorie – 48
6.3	Bepaling van de (dosis)criteria – 48
6.3.1	Criteria voor geplande bevolkingsblootstelling – 48
6.3.2	Criteria voor geplande beroepsmatige blootstelling – 49
6.3.3	Criteria voor geplande medische blootstelling – 49
6.3.4	Triviaal blootstellingsniveau – 50
6.3.5	Lozingen – 50
6.3.6	Samenvatting dosiscriteria voor dit onderzoek – 50
6.4	Vergelijking met criteria – 52
6.4.1	Begraving-Variant A: Overlijden 24 uur na toediening – 52
6.4.2	Begraving-Variant B: Overlijden een maand na toediening – 52
6.4.3	Crematie-Variant A: Overlijden na 24 uur na toediening – 52
6.4.4	Crematie-Variant B: Overlijden een maand na toediening – 53
<b>7</b>	<b>Inschatting van aantal keer per jaar dat scenario's optreden – 55</b>
7.1	Inleiding – 55
7.2	Aanpak – 55
7.3	Factoren die van invloed zijn op het aantal keer per jaar dat een patiënt 24 uur na behandeling overlijdt, waarbij de leefregels niet worden nageleefd – 55
7.4	Aannames en basisgegevens – 56
7.5	Resultaten van schatting van de kans op blootstelling – 57
7.6	Verwachtingen voor de toekomst – 58
<b>8</b>	<b>Conclusies en discussie – 61</b>
8.1	Potentiële blootstelling – 61
8.1.1	Blootstelling naaste – 61
8.1.2	Blootstelling werknemers – 61
8.1.3	Blootstelling omwonenden crematorium – 62
8.1.4	Invloed van de tijd op de berekende blootstelling – 62
8.2	Verspreiding van radioactiviteit – 62
8.3	Inschatting van het aantal keer dat blootstelling in de praktijk optreedt – 62
8.4	Discussie – 63
<b>A</b>	<b>Bijlage: uitgebreide methodiek – 65</b>
A.1	Transmissie bètastraling – 65
A.2	Transmissie gammastraling – 65
A.3	Biologische verwijdering – 66
A.4	Inhalatiedosis as – 70
A.5	Weegfactoren voor dosisconversiecoëfficiënten – 71
<b>B</b>	<b>Bijlage: uitgebreide resultaten – 73</b>
B.1	Overige, niet-geselecteerde behandelingen – 73
B.2	Moment van overlijden – 73
<b>9</b>	<b>Literatuur – 85</b>

## Samenvatting

Aan of in een patiënt (met bijvoorbeeld schildklier- of prostaatkanker) kunnen radioactieve stoffen worden toegediend of ingebracht. Dat kan voor diagnostische en therapeutische doeleinden zijn. Bij een aantal van deze handelingen worden deze stoffen na afloop weer verwijderd, bij een aantal andere handelingen is dit niet mogelijk. In dat laatste geval neemt de activiteit in het lichaam van de patiënt in de loop van de tijd af als gevolg van radioactief verval en/of door uitscheiding via urine en ontlasting. Het gevolg hiervan is dat de patiënt tijdelijk een bron is van ioniserende straling. Mensen in de naaste omgeving kunnen dan worden blootgesteld aan deze straling. Dit geldt ook indien de patiënt overlijdt voordat de radioactiviteit uit het lichaam is verdwenen.

Met het oog op het risico op blootstelling aan straling zijn voor deze patiënten leefregels en instructies opgesteld, die zijn gericht het reduceren van de blootstelling voor derden. Deze leefregels en instructies worden aan de patiënt en familie meegegeven bij ontslag uit het ziekenhuis. Er zijn echter scenario's denkbaar waarin deze onvoldoende worden opgevolgd, of dat naasten eenvoudigweg niet bekend zijn met het feit dat een behandeling met radioactieve stoffen heeft plaatsgevonden. Het gevolg hiervan is dat blootstelling van derden minder wordt gereduceerd dan wenselijk. Dit gebeurde bijvoorbeeld in 2018, toen een overledene werd gecremeerd en kort daarvoor was behandeld met radioactieve stoffen [1].

Om meer duidelijkheid te krijgen over de mogelijke radiologische gevolgen na het overlijden van een patiënt die is behandeld met radioactieve stoffen heeft de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) verzocht te onderzoeken wat de potentiële stralingsbelasting voor derden is in een dergelijk situatie, en deze resultaten te vergelijken met daarvoor geldende (dosis)criteria. Ook is verzocht te kijken naar de kans dat een dergelijk scenario plaatsvindt.

### Conclusies

Door het RIVM is een rekenmodel ontwikkeld waarmee de potentiële effectieve dosis en potentiële equivalente huiddosis van derden kan worden berekend in de hierboven beschreven situatie. Dit model is vervolgens toegepast in een scenario-studie. De resultaten van berekeningen met dit model voor enkele vooraf gedefinieerde scenario's zijn als volgt:

- De hoogste effectieve dosis wordt opgelopen door de naaste, als gevolg van blootstelling aan externe straling afkomstig van jodium-131 tijdens de verzorging van de overledene. Dit geldt voor zowel het scenario 'Begraving' als voor het scenario 'Crematie', in de variant dat de patiënt 24 uur na toediening van radioactieve stoffen overlijdt. De berekende effectieve dosis is in dit scenario maximaal 1,8 mSv, wat lager is dan de in Hoofdstuk 6 vermelde dosisbeperking van 3 mSv per behandeling. Het betreft de behandelingen van schildkliercarcinoom en MIBG-therapie met jodium-131.

- De potentiële effectieve dosis van de werknemer van de uitvaartorganisatie is maximaal 0,63 mSv. Dit is hoger dan de dosisbeperking van 0,3 mSv per behandeling, maar lager dan de limiet van 1 mSv per jaar. Deze dosis wordt bepaald door de handelingen die deze persoon kort na overlijden en op korte afstand uitvoert, zoals het verzorgen van het lichaam van de overledene. Ook hiervoor geldt dat de hoogste potentiële blootstelling het gevolg is van jodium-131. De potentiële effectieve dosis van de schouwarts is relatief laag in vergelijking met de andere representatieve personen, en ligt tussen 0,00 en 0,04 mSv. Het voorgaande geldt voor zowel het scenario 'Begraving' als voor het scenario 'Crematie'. De potentiële effectieve dosis van de werknemer van het crematorium bedraagt ten hoogste 0,22 mSv. Deze doses zijn lager dan de dosisbeperking van 0,3 mSv per behandeling. De potentiële equivalente huiddosis van de werknemer van het crematorium ligt in het scenario 'Crematie' beduidend hoger dan in het scenario 'Begraving'. Deze bedraagt tussen 1,8 en 180 mSv, met als voornaamste blootstellingsroute "besmetting van de huid". Deze dosis kan dus groter zijn dan de bijbehorende limiet van 50 mSv per jaar. Deze besmetting ontstaat hoofdzakelijk wanneer de werknemer zonder handschoenen in contact is met de besmette as, bijvoorbeeld wanneer hij met zijn handen metaal en het identificatiesteentje uit de as verwijdert.
- De potentiële effectieve dosis van de omwonende volwassene is voor alle behandelingen in alle scenario's (veel) lager dan het triviale niveau van 10  $\mu$ Sv [2]. De potentiële effectieve dosis van het kind ten gevolge van ingestie is ten hoogste  $8,2 \cdot 10^{-5}$  mSv.
- Indien wordt uitgegaan van overlijden een maand na toediening kan worden geconcludeerd dat de potentiële blootstelling voor alle representatieve personen en voor alle behandelingen significant lager is dan in geval van overlijden 24 uur na toediening. Deze verschillen zijn het kleinst voor de behandelingen met jodium-125, lutetium-177 en thorium-227, wat het gevolg is van hun langere halveringstijd. Enkel voor brachytherapie met jodium-125 liggen de potentiële effectieve doses van de naaste en de medewerker van het crematorium boven het triviale blootstellingsniveau van 10  $\mu$ Sv per jaar.
- Het is onmogelijk om de kans te bepalen dat de hierboven beschouwde scenario's, en daarmee de berekende blootstelling, zich in de praktijk zullen voordoen. Daarom moet worden volstaan met een grove en conservatieve schatting van het aantal keer per jaar dat dit zou kunnen voorkomen. Op conservatieve wijze is een bovengrens afgeschat voor het aantal keer dat de scenario's en daarmee de hoogst bepaalde potentiële blootstellingen in de praktijk onopgemerkt voorkomen. Afhankelijk van de behandeling ligt dit getal tussen de (bijna) 0 en (maximaal) 2 keer per jaar. De hoogste waarde wordt gevonden voor behandeling met radium-223. Het aantal keer per jaar dat de scenario's optreden waarvoor de hoogste potentiële effectieve dosis is bepaald (schildklier carcinoom en neuroblastoom met jodium-131) wordt ingeschat op minder dan 1 keer per jaar. Het lijkt onwaarschijnlijk dat beroepsgroepen die

betrokken zijn bij uitvaarten (schouwartsen, medewerkers van uitvaartcentra en crematoria) meer dan 1 à 2 keer per jaar worden geconfronteerd met de in dit rapport onderzochte situaties. Meervoudige blootstelling in een gegeven jaar lijkt met andere woorden onwaarschijnlijk.

Zoals hiervoor aangegeven heeft de in dit onderzoek berekende potentiële blootstelling slechts betrekking op enkele gedefinieerde scenario's. Het kan niet worden uitgesloten dat de blootstelling in de praktijk, afhankelijk van de omstandigheden, groter of (waarschijnlijker) kleiner is dan de berekende potentiële blootstelling. Bij de duiding van de "ernst" van de scenario's moet verder ook de kans worden betrokken.



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding voor dit onderzoek

Bij een aantal handelingen worden radioactieve stoffen aan een patiënt toegediend. Het doel hiervan is bijvoorbeeld het bestrijden van kanker. Als gevolg hiervan is de patiënt tijdelijk een bron van ioniserende straling geworden. Dit kan leiden tot blootstelling van bijvoorbeeld (medisch) personeel en naasten aan ioniserende straling. In slechts een paar gevallen worden de radioactieve stoffen na afloop van de behandeling weer verwijderd. De stoffen blijven in de meeste gevallen in de patiënt achter. Het gevolg hiervan is dat de patiënt bij ontslag uit het ziekenhuis nog steeds een bron van straling is. Daarom krijgen deze patiënten bij ontslag leefregels mee, die erop gericht zijn de blootstelling van naasten aan straling te minimaliseren. Na verloop van tijd is door radioactief verval en biologische verwijdering de hoeveelheid radioactiviteit in het lichaam van de patiënt zodanig gereduceerd dat de radiologische risico's voor de directe omgeving geen leefregels meer rechtvaardigen.

In de praktijk kan het gebeuren dat een patiënt overlijdt voordat de radioactieve stoffen (al dan niet door radioactief verval) uit het lichaam zijn verwijderd. Als de omgeving niet op de hoogte is van de behandeling, kan de overledene worden begraven of gecremeerd zonder dat beschermende maatregelen worden genomen. Dit kan vervolgens leiden tot blootstelling aan straling bij derden, zoals familieleden en vrienden van de overledene en personeel werkzaam bij uitvaartorganisaties of crematoria. Dit is in 2018 gebeurd in een Nederlands crematorium [1].

Voor behandelingen met jodium-125 en jodium-131 zijn aanbevelingen gedaan aan de uitvaartbranche met betrekking tot dit onderwerp [3]. Ontwikkelingen in de medische techniek maken duidelijk dat het aantal nucleair-geneeskundige behandelingen in de toekomst verder zal toenemen. Hierbij wordt een grotere verscheidenheid aan radionucliden en toedieningsvormen verwacht. Van nieuwe(re) behandelingen is, bij overlijden van de behandelde patiënt, echter niet altijd duidelijk wat de consequenties kunnen zijn voor de stralingsbelasting van derden.

Daarom heeft de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) verzocht te onderzoeken wat de potentiële blootstelling van derden is als een patiënt overlijdt kort na behandeling met radioactieve stoffen. Hierdoor wordt meer duidelijkheid verkregen over de mogelijke radiologische gevolgen. Voor zover mogelijk en relevant is de berekende potentiële blootstelling vervolgens vergeleken met dosiscriteria. Om meer duiding te kunnen geven aan het belang van een bepaald scenario is ten slotte gekeken naar de kans dat een scenario in de praktijk optreedt.

## 1.2 Aanpak

Om de bovenstaande vraagstelling te beantwoorden is gekozen voor het uitvoeren van een scenariostudie. Dat houdt in dat een of meer scenario's worden geponeerd, waar nodig aannames worden gedaan, en vervolgens de potentiële blootstelling in deze scenario's wordt berekend. Van belang is op te merken dat een dergelijke "what if.."-benadering niets zegt over de kans dat een bepaald scenario in de praktijk zal optreden, maar alleen informatie biedt over de potentiële blootstelling in dat scenario.

De berekeningen van de potentiële blootstelling in de scenario's zijn zodanig vormgegeven dat de resultaten daarvan als conservatief realistisch moeten worden beschouwd. Dat betekent dat niet kan worden uitgesloten dat blootstelling in de praktijk hoger kan zijn dan is berekend, maar wel dat dit onwaarschijnlijk(er) is.

In het onderzoek is een tweeledige benadering toegepast. Enerzijds zijn de stralingsrisico's onderzocht in het geval een patiënt zeer kort na toediening zou overlijden. Dit is te beschouwen als een "worst case"-benadering. Anderzijds is onderzocht hoe de stralingsrisico's veranderen als er meer tijd zou verstrijken tussen de behandeling en het overlijden van de patiënt. Hiermee wordt inzichtelijk tot welk niveau de stralingsrisico's kunnen afnemen als functie van de tijd die zit tussen behandeling en overlijden.

In Nederland vinden medische handelingen plaats met een verscheidenheid aan radioactieve stoffen en toedieningsvormen. Grofweg geldt dat bij behandelingen met therapeutische hoeveelheden radioactieve stof meer activiteit wordt toegediend dan bij diagnostische handelingen. Bovendien wordt in het laatste geval vaak gebruik gemaakt van kortlevende radionucliden. Dit betekent dat de radiologische risico's bij overlijden van de patiënt met name worden bepaald door therapeutische handelingen. Om deze reden zijn in dit onderzoek diagnostische handelingen buiten beschouwing gelaten. Vervolgens is op basis van interviews en literatuuronderzoek een selectie gemaakt van enkele therapeutische handelingen die veel worden uitgevoerd in de Nederlandse ziekenhuizen, en/of een relatief hoog blootstellingsrisico hebben (Hoofdstuk 2). Deze behandelingen zijn als uitgangspunt genomen bij de berekening van de potentiële stralingsbelasting van enkele representatieve personen die korte of langere tijd verblijven in de nabijheid van de (overleden) patiënt.

De representatieve personen, voor wie de potentiële blootstelling is berekend, zijn derden die betrokken zijn vanaf het moment van overlijden van de patiënt. Het betreft onder meer de schouwarts, de naasten van de overledene en de werknemers van uitvaartorganisaties en crematoria.

Bij het opstellen van de scenario's is een onderscheid gemaakt tussen begravingen en crematies. Om deze scenario's verder in te vullen zijn interviews afgenomen met personeel uit de uitvaartbranche en bezoeken afgelegd aan crematoria. We hebben onder andere bekeken welke handelingen door derden worden uitgevoerd, hoe lang deze duren, op

welke afstand van de overledene deze plaatsvinden en of er kans op besmetting met radioactieve stoffen is. Op basis van deze informatie hebben we blootstellingsscenario's opgesteld voor begravingen en crematies. Daarnaast hebben we een scenario opgesteld voor de potentiële blootstelling van omwonenden van een crematorium aan radioactieve stoffen (Hoofdstuk 3). Bij het opstellen van de scenario's nemen we aan dat de uitvaart op gebruikelijke wijze verloopt. Derden houden dus geen rekening met de aanwezigheid van ioniserende straling.

Op basis van de blootstellingsscenario's zijn vergelijkingen afgeleid die de effectieve doses en equivalente huiddoses van derden beschrijven. Hierbij zijn de bijdragen van externe blootstelling, huidbesmetting en inwendige besmetting (uit inhalatie en ingestie) meegenomen (Hoofdstuk 4). Daarnaast is een methodiek gehanteerd die de maximale potentiële doses berekent van de omwonenden van een crematorium.

De rekenresultaten zijn opgenomen in Hoofdstuk 5. Voor zover mogelijk en relevant zijn deze vervolgens vergeleken met (dosis)criteria (Hoofdstuk 6). Ten slotte is gepoogd een uitspraak te doen over de kans dat een scenario zich in de praktijk zal voordoen. Omdat deze kans geenszins nauwkeurig bleek te bepalen, is hierover slechts een globale uitspraak gedaan (Hoofdstuk 7).

De bevindingen worden samengevat in Hoofdstuk 8, gevolgd door enkele conclusies. Aanvullende resultaten zijn opgenomen in Bijlage B.2.

### 1.3 Afbakening

- Alleen begravingen en crematies zijn beschreven in het onderzoek, omdat deze zijn voorzien in de Wet op lijkbezorging [4].
- In dit onderzoek worden behandelingen met radioactieve stoffen meegenomen die gericht zijn op genezing (curatieve therapie) of op de verlichting van symptomen (palliatieve zorg). Diagnostische onderzoeken met radionucliden en het gebruik van lokalisatiebronnen worden buiten beschouwing gelaten. Deze maken namelijk vaak gebruik van kortlevende radionucliden, of er wordt een relatief lage activiteit toegediend.
- In dit onderzoek is de potentiële stralingsbelasting van personen berekend ten gevolge van een aantal (als conservatief te beschouwen) scenario's, waarbij een patiënt overlijdt kort na behandeling met radionucliden. De resultaten geven daarmee een indicatie van de potentiële stralingsrisico's rondom uitvaarten. Zij zijn hiermee niet een vervanging voor dosisberekeningen voor een individuele casus.
- Bij brachytherapie beschouwen we alleen permanente implantaties. De inwendige bestraling met bronnen die naderhand worden verwijderd valt buiten de scope van dit onderzoek.
- Van de equivalente extremitetendosis wordt aangenomen dat deze kan worden benaderd met de lokale huiddosis. De extremitetendosislimiet (in geplande blootstellingssituaties) geldt voor alle weefsels die zich in de extremiteten bevinden [5]. Bij

het berekenen van de extremitendosis dient dus rekening te worden gehouden met het weefsel dat de hoogste dosis zal ontvangen. Voor verschillende soorten straling zal de huid het meest gevoelige weefsel zijn. Omdat de dosislimieten voor huid en extremiteten bovendien numeriek aan elkaar gelijk zijn, maken we in dit onderzoek geen expliciete vergelijking met de extremitendosislimiet.

- Over het algemeen zal de dosis voor de ooglenzen geen beperkende factor zijn in verhouding tot de huid- en effectieve dosis [6]. Loodrecht invallende bètastraling met een maximale energie hoger dan 1,7 MeV (yttrium-90, holmium-166) kan hierop een uitzondering vormen [6]. De blootstelling aan bètastraling vindt in de beschouwde scenario's een aantal maal plaats. In deze gevallen bevinden de handen – en daarmee de huid – zich echter (veel) dichterbij de radioactiviteit dan de ogen. De huiddosislimiet zal hier naar verwachting beperkend zijn. Daarom wordt in dit onderzoek geen vergelijking met de ooglensdosislimiet gemaakt.
- Lozingen van radioactiviteit naar het openbare riool worden buiten beschouwing gelaten, omdat deze binnen de context van dit onderzoek (d.i. overlijden van patiënt) weinig betekenis hebben. Bovendien geldt dat lozingen van radioactiviteit naar riool en oppervlaktewater naar verwachting niet bepalend zijn voor de blootstelling van leden van de bevolking in de beschouwde scenario's.

#### **1.4 Dankwoord**

De auteurs van dit briefrapport danken de medewerkers van de bezochte crematoria voor hun medewerking. Daarnaast bedanken wij de werknemers van ziekenhuizen die in een enquête geparticipeerd hebben.

Verder danken wij Arjan van Dijk, Astrid Kloosterman, Emma Folkertsma, Martijn van der Schaaf, Pieter Kwakman, Puck Brandhoff en Wouter van Lonkhuyzen voor hun waardevolle bijdragen en opmerkingen.

## 2 Behandelingen

In dit hoofdstuk wordt toegelicht welke behandelingen met radioactieve stoffen zijn geselecteerd voor het onderzoek.

### 2.1 Selectiecriteria

Zoals aangegeven in de afbakening beperkt dit onderzoek zich tot behandelingen met radioactieve stoffen. Omdat niet alle therapieën kunnen worden onderzocht, moet een (zo veel als mogelijk representatieve) selectie worden gemaakt. In deze selectie is per behandeling rekening gehouden met:

- het totaal aantal toedieningen van radioactieve stoffen aan patiënten per jaar;
- de radiologische gevaarzetting van de toegediende radioactieve stof;
- de verwachtingen van het toekomstig gebruik van de behandeling.

#### 2.1.1 Aantal toedieningen per jaar

Voor behandelingen die relatief vaak worden uitgevoerd bestaat een grotere kans dat de potentiële blootstelling in de praktijk optreedt dan voor behandelingen die minder vaak worden uitgevoerd. Het aantal toedieningen per jaar is daarom een belangrijke factor bij de selectie van therapieën. Cijfers over het aantal toedieningen per jaar zijn beschikbaar in het Informatiesysteem Medische Stralingstoepassingen (IMS). Het betreft totalen van alle ziekenhuizen in Nederland. In dit onderzoek zijn cijfers gebruikt over het jaar 2017.

Voor de behandelingen waarvoor in het IMS geen cijfers beschikbaar zijn, zijn cijfers gebruikt uit een enquête onder 8 academische en topklinische medische centra in 2019<sup>1</sup>. Deze enquête was gericht op ziekenhuizen die naast de gangbare behandelingen met radioactieve stoffen ook meer innovatieve behandelingen uitvoeren, die vooralsnog minder in overige ziekenhuizen worden toegepast. Dit betekent dat de cijfers voor deze behandelingen een redelijke schatting geven van het totaal aantal behandelingen per jaar in Nederland.

#### 2.1.2 Radiologische gevaarzetting

De radiologische gevaarzetting van de behandeling wordt bepaald door de volgende factoren<sup>2</sup>:

- *De hoeveelheid radioactiviteit per toediening.* Dit is van belang omdat deze mede bepaalt welke stralingsdoses derden kunnen oplopen. Bij sommige behandelingen wordt hetzelfde radiofarmacon toegepast, maar varieert de toegediende activiteit. In deze gevallen is de hoogste activiteit genomen;
- *De halveringstijd.* De halveringstijd is een andere factor die de stralingsrisico's bepaalt. De fysische halveringstijd is hier

<sup>1</sup> ANVS, persoonlijke mededeling, 15 augustus 2019

<sup>2</sup> De bijdrage van eventuele dochternucliden is niet opgenomen in de dosiscoëfficiënten van Tabel 1. In de berekeningen zijn zij wel verwerkt (zie Bijlage A.5).

gebruikt als conservatieve schatter van de effectieve halveringstijd. In de dosisberekeningen zelf wordt de biologische halveringstijd wel meegenomen.

- *Dosiscoëfficiënten voor inname van radioactiviteit.* Om de effectieve doses ten gevolge van inwendige besmetting in te kunnen schatten, worden dosiscoëfficiënten  $e_{inh}$  en  $e_{ing}$  voor respectievelijk inhalatie en ingestie gebruikt [7]. De waarde van de dosiscoëfficiënt  $e_{inh}$  voor inhalatie is onder andere afhankelijk van de leeftijd van de blootgestelde. Bepalend is hierbij de scenariodefinitie (zie Hoofdstuk 3). Verder hangt  $e_{inh}$  af van de longzuiveringsklasse van het radioactieve materiaal. Voor de jodiumisotopen hanteren we hierbij de numerieke waarden van de gasvorm (conservatieve aanname). Van andere stoffen nemen we hier aan dat de longzuiveringsklasse overeenkomt met het aanbevolen absorptietype bij afwezigheid van specifieke informatie, zoals vermeld in [8]. Als er geen aanbevolen absorptietype gegeven is, wordt de meest conservatieve waarde gebruikt.
- *De omgevingsdosisequivalenttempoconstante.* De effectieve dosis ten gevolge van blootstelling aan externe straling wordt bepaald op basis van omgevingsdosisequivalenttempoconstante  $h(10)$  [9], [10], [11].
- *Dosiscoëfficiënt voor huidbesmetting.* De lokale, equivalente stralingsdosis ten gevolge van uitwendige besmetting van de huid wordt berekend aan de hand van dosiscoëfficiënt  $e_{huid}$  [12].

Behandelingen met "radiotoxische" radionucliden (dat wil zeggen radionucliden met relatief hoge waarden voor de bovenstaande grootheden) worden eerder geselecteerd dan behandelingen op basis van radionucliden met lage waarden.

### 2.1.3 Toekomstprognoses

Zoals eerder aangegeven is de verwachting dat het aantal nucleair-geneeskundige behandelingen in de toekomst verder zal toenemen. Behandelingen waarvoor dit in het bijzonder geldt, zullen eerder worden geselecteerd dan behandelingen waarvoor de verwachting is dat het aantal behandelingen per jaar af zal nemen [13].

## 2.2 Geselecteerde behandelingen

Op basis van bovenstaande overwegingen zijn tien behandelingen geselecteerd voor het onderzoek. Deze zijn, samen met de hierboven genoemde grootheden, in Tabel 1 samen gevat.

De volgende behandelingen zijn geselecteerd omdat zij veel worden toegepast (zie Tabel 1).

- De behandeling van hyperthyreoïdie met jodium-131. Het aantal toedieningen is – samen met de toedieningen bij de behandeling van schildkliercarcinoom – het grootst.
- De behandeling van schildkliercarcinoom met jodium-131. Deze therapie kent, samen met de behandeling van hyperthyreoïdie, het grootste aantal toedieningen.

- Brachytherapie van prostaattumoren met jodium-125. Dit radionuclide heeft bovendien relatief hoge dosiscoëfficiënten voor inhalatie, ingestie en externe straling.

Daarnaast is een aantal behandelingen geselecteerd vanwege hun relatief hoge radiologische gevaarstelling.

- Radio-embolisatie met holmium-166. Er wordt hierbij een hoge hoeveelheid activiteit toegediend, circa 12 000 MBq.<sup>3</sup>
- Radio-embolisatie met yttrium-90, met een toegediende activiteit van 4 000 MBq.<sup>3</sup>
- De behandeling van neuroblastoom met radioactief MIBG (meta-iodobenzylguanidine). Hierbij wordt 11 000 MBq jodium-131 toegediend.<sup>3</sup>
- De behandeling van prostaatkanker met thorium-227-PSMA (Prostaat Specifiek Membraan Antigeen). Thorium-227 vervalt door alfastraling uit te zenden, een proces waar ook gammastraling bij vrijkomt. Door de fotonen die worden uitgezonden, zijn relatief hoge doses mogelijk ten gevolge van externe bestraling. Daarnaast zijn de geproduceerde (klein)dochters zelf ook radioactief, waardoor deze effecten worden versterkt. De waarde van  $e_{inh}$  is bovendien relatief hoog.
- De behandeling van non-hodgkinlymfoom met yttrium-90 gebonden aan ibritumomab tiuxetan (handelsnaam: Zevalin). Het yttrium bevindt zich, in tegenstelling tot de eerder geselecteerde radio-embolisatietherapie, minder lokaal in het lichaam waardoor eventuele besmettingen van derden eenvoudiger kunnen optreden.
- De behandeling van botmetastasen met radium-223-dichloride. Het radionuclide kan in geval van inhalatie of ingestie al snel tot hoge doses leiden. Fotonen die tijdens vervolprocessen worden uitgezonden, kunnen leiden tot externe stralingsdoses.

Tot slot is één behandeling geselecteerd omdat deze naar verwachting veel in de toekomst toegepast zal worden [13]:

- De behandeling van prostaatkanker met lutetium-177-PSMA. We nemen daarnaast aan dat 0,05% van de activiteit afkomstig is van het metastabiele lutetium-177m.<sup>4</sup> Dit heeft een halveringstijd van 160 dagen, waardoor het relatief lang aanwezig blijft.

Informatie over de niet-geselecteerde behandelingen is te vinden in bijlage B.1.

<sup>3</sup> ANVS, persoonlijke mededeling, 15 augustus 2019

<sup>4</sup> Expertbijeenkomst, persoonlijke mededeling, 19 juni 2017

Tabel 1: Selectie van onderzochte behandelingen. Het vervalpad elektronenvangst is genoteerd als 'ε'. De genoemde vervalpaden hebben een waarschijnlijkheid van minstens 1% per desintegratie. Cijfers voor het aantal toedieningen per jaar zijn afkomstig uit het Informatiesysteem Medische Stralingstoepassingen (IMS, 4<sup>e</sup> kolom), en indien daar niet beschikbaar afkomstig uit een enquête onder 8 academische en topklinische medische centra (5<sup>e</sup> kolom).<sup>5</sup> Toegediende activiteiten  $A_0$  zijn afkomstig van [14], [15], [16], persoonlijke mededelingen<sup>5</sup> en verleende vergunningen aan medische centra; waar nodig is aangenomen dat de patiënt 70 kg zwaar is. Halveringstijden  $T_{1/2f}$  zijn afkomstig van [17]. Waarden voor  $e_{inh}$  zijn overgenomen uit [7], annexen G en H, toegepast op referentieleeftijd <<adult>> voor leden van de bevolking. Waarden voor  $e_{ing}$  zijn overgenomen uit [7], annex F, en hiervan de maximaal genoemde waarde voor referentieleeftijd <<adult>> voor leden van de bevolking. Waarden voor  $e_{huid}$  komen uit [18] en [11]. Waarden van  $h(10)$  zijn afkomstig van [9], [10] en [11].

Therapie	Nuclide (straling)	Farmacon/toedieningsvorm	Aantal toedieningen per jaar		$A_0$ per toediening [MBq]	$T_{1/2f}$ [d]	$e_{inh}$ [Sv Bq <sup>-1</sup> ]	$e_{ing}$ [Sv Bq <sup>-1</sup> ]	$e_{huid}$ [Sv s <sup>-1</sup> Bq <sup>-1</sup> cm <sup>2</sup> ]	$h(10)$ [μSv m <sup>2</sup> MBq <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ]
			(bron IMS, 2017)	(bron Enquête, 2019)						
Radio-embolisatie (lever)	Ho-166 (β <sup>-</sup> , γ)	Microsferen	-	30	12 000	1,12	6,5E-10	1,4E-09	4,7E-10	5,0E-03
Radio-embolisatie (lever)	Y-90 (β <sup>-</sup> )	Microsferen	-	207	4 000	2,7	1,5E-09	2,7E-09	4,4E-10	2,4E-06
Hyperthyreoïdie (klinisch)	I-131 (β <sup>-</sup> , γ)	Natriumjodide	934		1 000	8,02	2,0E-08	2,2E-08	3,9E-10	6,6E-02
Schildklier carcinoom	I-131 (β <sup>-</sup> , γ)	Natriumjodide	826		7 400	8,02	2,0E-08	2,2E-08	3,9E-10	6,6E-02
Neuroblastoom (kinderen)	I-131 (β <sup>-</sup> , γ)	MIBG	-	26	11 000	8,02	2,0E-08	2,2E-08	3,9E-10	6,6E-02
Radio-immunotherapie	Lu-177 (β <sup>-</sup> , γ)	PSMA	-	400	6 000	6,64	1,2E-09	5,3E-10	3,6E-10	6,3E-03
Radio-immunotherapie	Th-227 (α, γ)	PSMA	-	10	7	18,8	1,0E-05	8,8E-09	5,0E-11	2,3E-02
Radio-immunotherapie	Y-90 (β <sup>-</sup> )	Y-ibritumomab tiuxetan	-	2	1 480	2,7	1,5E-09	2,7E-09	4,4E-10	2,4E-06
Botmetastasen	Ra-223 (α, γ)	Radiumdichloride	1021	-	3,85	11,4	7,4E-06	1,0E-07	1,4E-10	2,4E-02
Brachytherapie	I-125 (ε, γ)	Zaadjes	-	278	2 000	59,4	1,4E-08	1,5E-08	4,4E-12	3,4E-02

<sup>5</sup> ANVS, persoonlijke mededeling, 15 augustus 2019

## 3 Definitie scenario's

In dit hoofdstuk worden de blootstellingsscenario's gedefinieerd. Voor elk van deze scenario's worden vervolgens de representatieve personen en de (deel)handelingen die zij uitvoeren gedefinieerd. Verder worden waar nodig aanvullende scenario-specifieke aannames gedaan.

### 3.1 Scenario's en varianten

In deze studie zijn de scenario's 'Begraving' en 'Crematie' gedefinieerd. In beide scenario's definiëren we vervolgens twee varianten. In variant A overlijdt de patiënt thuis, 24 uur na toediening van de radioactiviteit. In variant B gebeurt dit pas een maand na toediening van de radioactiviteit. Vergelijking van deze waarden maakt inzichtelijk tot welk niveau de stralingsrisico's kunnen afnemen als functie van de tijd tussen toediening en overlijden.

### 3.2 Aanpak, aannames en uitgangspunten

- In het algemeen geldt dat een patiënt die behandeld is met radioactieve stoffen leefregels meekrijgt bij ontslag uit het ziekenhuis. Ook naasten krijgen vaak instructies in verband met de mogelijke blootstelling. Voor alle scenario's en varianten is echter de aanname gedaan dat deze leefregels en instructies niet bekend zijn bij de betreffende personen, en dat zij niet op de hoogte zijn van de aanwezigheid van radioactieve stoffen in het lichaam van de overleden patiënt, en hier dus ook geen rekening mee houden.
- Omdat een uitvaart vaak vijf à zes dagen na overlijden plaatsvindt, wordt aangenomen dat de begraving/crematie 5,5 dagen na overlijden start.
- Per scenario is onderzocht wat de typische (deel)handelingen zijn, wie deze uitvoert, en hoe lang deze handelingen duren. De personen die betrokken zijn bij een uitvaart en van wie we verwachten dat zij de hogere doses ontvangen zijn beschouwd als representatieve personen. Waar mogelijk is per blootgestelde groep het gemiddelde gedrag geschat [19]. Voor deze representatieve personen is vervolgens de potentiële blootstelling berekend.
- De verschillende deelhandelingen kunnen in beginsel door verschillende personen worden uitgevoerd, met als gevolg dat de potentiële blootstelling over deze personen wordt verdeeld. In deze studie is aangenomen dat deze handelingen telkens door dezelfde persoon worden uitgevoerd. Voorbeelden zijn de naaste en de medewerker van de uitvaartorganisatie.
- Indien men gedurende een langere periode slechts een deel van de tijd aanwezig is, is dat verrekend met een blootstellingsfractie (ook wel: verblijfsfractie/*occupancy factor*). Dat is bijvoorbeeld het geval als vrienden en familie de overledene meermaals bezoeken, verdeeld over meerdere dagen. Verder is geschat op welke afstand tot de overledene de handeling plaatsvindt en wat

de kortste afstand is tussen de overledene en de huid van de blootgestelde.

- Als een handeling kan worden beschouwd als een lozing van activiteit naar het milieu, is dat aangegeven in de scenario's.
- Verder is aangegeven of de activiteit zich in het intacte lichaam van de overledene of in as bevindt, omdat dit invloed heeft op de transmissie van straling (zie Hoofdstukken A.1 en A.2). Als het lichaam van de overledene intact is en de activiteit zich vlak onder de huid bevindt, wordt een transmissie van 100% verondersteld voor gammastraling (bijvoorbeeld voor die jodiumtherapieën waarbij het jodium grotendeels naar de schildklier gaat). Als de activiteit zich niet in het intacte lichaam van de overledene bevindt (maar bijvoorbeeld in urine of as) wordt aangenomen dat de transmissie van gammastraling 100% is (geen afscherming). In overige gevallen wordt aangenomen dat de activiteit een puntbron is die door 15 centimeter water wordt afgeschermd.
- Als de activiteit zich na crematie in as bevindt, wordt ook aangenomen dat deze een puntbron vormt, omdat de as compact is en de afstand tot de romp van de blootgestelde persoon relatief groot is.
- Het gebruik van persoonlijke beschermingsmiddelen (zoals handschoenen) is gewenst [20], maar wordt conservatief verwaarloosd omdat men deze kan vergeten te gebruiken.

### 3.3 Scenario 'Begraving'

#### 3.3.1

*Variant A: Overlijden 24 uur na toediening*

*Het scenario start na het thuis overlijden van de patiënt. Een uur na overlijden verschijnt een schouwarts om de dood vast te stellen. Een medewerker van een uitvaartorganisatie komt een half uur later aan om samen met een nabestaande de overledene te verzorgen. Er komt enige ontlasting en urine vrij uit het lichaam van de overledene, waardoor linnengoed en kleding besmet raakt. Dit wordt later opgeruimd door de medewerker van de uitvaartorganisatie en de naaste.*

*Na verdere verzorging wordt de overledene circa vijf en een halve dag thuis opgebaard, en volgen bezoeken van familieleden. De naaste bevindt zich gedurende deze dagen geregeld thuis in de buurt van de overledene.*

*Na vervoer naar het uitvaartcentrum vindt de uitvaart-ceremonie plaats, en wordt de overledene begraven, waarmee dit scenario eindigt.*

Toelichting en aannames

- Representatieve personen zijn de schouwarts, de naaste en de medewerker van de uitvaartorganisatie. Gezien de handelingen die deze naaste uitvoert (zoals het afleggen van de overledene) wordt aangenomen dat deze persoon volwassen is. Verder wordt aangenomen dat potentiële blootstelling van andere personen, zoals een familielid dat alleen bij de begrafenis aanwezig is, significant kleiner is dan deze representatieve personen, vanwege kortere blootstellingstijden en vanwege radioactief verval. Om deze reden wordt de blootstelling van deze personen niet apart berekend.

- Van de ontlasting wordt het niet aannemelijk geacht dat deze tot huidbesmetting, ingestie of inhalatie zal leiden. Dit geldt eveneens voor ingestie en inhalatie van urine. Huidbesmetting ten gevolge van contact met urine sluiten we niet uit, omdat de activiteit over een groter oppervlak is verspreid en de onbeschermdde huid gemakkelijker in contact kan komen met de besmetting. Van de urine wordt aangenomen dat deze zich op het moment van overlijden verdeelt over linnengoed of kleding. Voor de werknemer van een uitvaartorganisatie en de naaste die dit opruimen, nemen we aan dat een deel van de handen in contact komt met het besmette textiel. Verder nemen we aan dat een deel van de huid enige tijd volledig in contact is met het besmette textiel (100% overdracht naar de handen) en dat deze besmetting nog enige tijd aanwezig is voordat zij volledig weg wordt gewassen.
- De blootstelling van personen in de rouwkamer wordt aangenomen homogeen te zijn verdeeld ('uitgesmeerd') over de volledige periode. Per handeling wordt deze blootstellingsfractie gegeven in Tabel 2.
- Bij een aantal handelingen zullen de handen van de naaste zich bij het lichaam bevinden zonder besmet te raken, waardoor deze blootgesteld zijn aan gammastraling vanuit de patiënt. Per handeling is daarom de kortste afstand tussen blootgestelde huid en (het middel van) de overledene weergegeven. Van eventuele uitgezonden elektronen wordt aangenomen dat hun dracht dusdanig klein is dat zij het lichaam van de overledene niet verlaten.
- We nemen aan dat de activiteit na begraving zodanig lang besloten zal zijn in het lichaam van de overledene en de omhullende kist, dat er geen sprake is van lozing van radioactiviteit naar de bodem. Voor de volledigheid nemen we dit in de berekeningen wel mee als lozing.

In Tabel 2 zijn de belangrijkste parameters van dit scenario samengevat.

Tabel 2: Scenario Begraving. Na 5,5 dagen (132 uren) begint men met de uitvaart.

Handeling	Blootgestelde(n)	Start [h]	Duur [h]	Blootstel- lingsfractie	L [m]	L <sub>huid</sub> [m]	Status lichaam	Besm. urine	Lozing
Dood vaststellen	Schouwarts	1	0,25	1	1	0,5	intact		
Overledene verzorgen	Werknemer u.v.o., naaste	1,5	1,5	1	1	0,5	intact	ja	
Overledene opbaren in bed	Werknemer u.v.o., naaste	3	0,25	1	1	0,5	intact		
Overledene bezoeken	Naaste	3,5	20,5	0,25	2	2	intact		
Overledene kisten	Werknemer u.v.o., naaste	24	0,5	1	1	0,5	intact		
Overledene is opgebaard; bezoeken	Naaste	24,5	107,5	0,25	2	2	intact		
Overledene van huis naar auto brengen	Werknemer u.v.o., naaste	132	0,5	1	1	0,5	intact		
Overledene vervoeren naar uitvaartcentrum	Werknemer u.v.o., naaste	132,5	1	1	3	3	intact		
Kist van auto naar koffiekamer brengen	Werknemer u.v.o., naaste	133,5	0,1	1	1	0,5	intact		
In koffiekamer zitten	Naaste	133,6	0,5	1	2	2	intact		
Indragen	Werknemer u.v.o., naaste	134,1	0,1	1	0,5	0,5	intact		
Deelnemen aan plechtigheid	Werknemer u.v.o., naaste	134,2	1	1	4	4	intact		
Overledene naar graf dragen	Werknemer u.v.o., naaste	135,2	0,25	1	0,5	0,5	intact		
Dienst	Werknemer u.v.o., naaste	135,5	0,25	1	2	2	intact		
Overledene in graf laten zakken	Naaste	135,8	0,1	1	2	2	intact		bodem
Afscheid nemen	Naaste	135,9	0,1	1	3	3	intact		

### 3.3.2 *Variant B: Overlijden een maand na toediening*

Dit scenario is identiek aan *Begraving-Variant A*, zij het dat de patiënt overlijdt een maand na toediening van de radioactiviteit, in plaats van na 24 uur. Als gevolg van radioactief verval gedurende deze maand is de radioactiviteit in de patiënt (en daarmee de potentiële blootstelling) gedurende het gehele scenario kleiner dan in Variant A.

## 3.4 **Scenario 'Crematie'**

### 3.4.1 *Variant A: Overlijden 24 uur na toediening*

*Het scenario start na het thuis overlijden van de patiënt. Een uur na overlijden verschijnt een schouwarts om de dood vast te stellen. Een medewerker van een uitvaartorganisatie komt een half uur later aan om samen met de nabestaande de overledene te verzorgen. Er komt enige ontlasting en urine vrij uit het lichaam van de overledene, waardoor linnengoed en kleding besmet raakt. Dit wordt later opgeruimd door de medewerker van de uitvaartorganisatie en de naaste.*

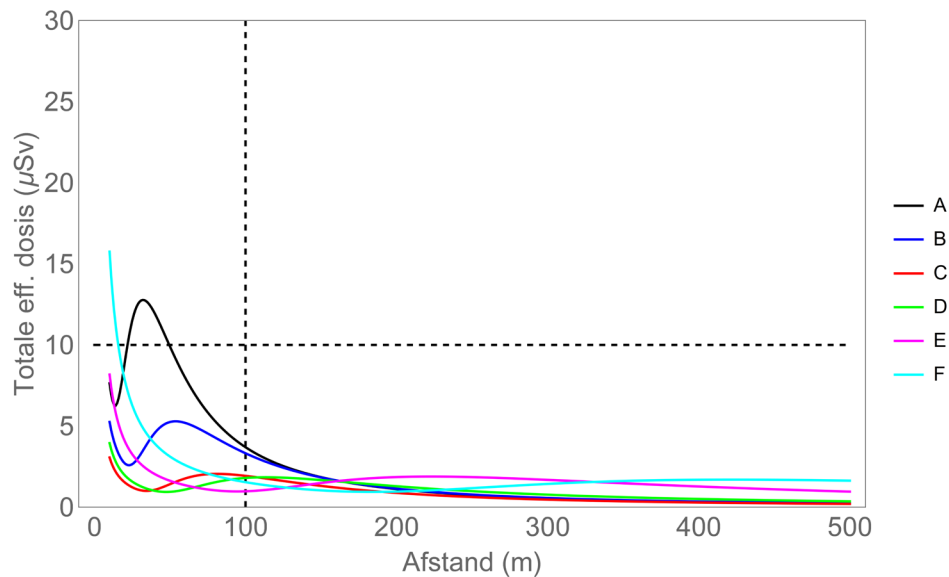
*Na verdere verzorging wordt de overledene circa vijf en een halve dag thuis opgebaard, en volgen bezoeken van familieleden. De naaste bevindt zich gedurende deze dagen geregeld thuis in de buurt van de overledene.*

*Na vervoer naar het uitvaartcentrum vindt de uitvaart-ceremonie plaats. Na de uitvaart-ceremonie wordt de kist door de medewerker van het crematorium naar de crematieoven gebracht. Vervolgens wordt het lichaam in een kist gecremeerd. De medewerker van het crematorium voert daarbij en daarna enkele crematie-specifieke werkzaamheden uit. Als gevolg van de crematie verdwijnt radioactiviteit door de schoorsteen naar buiten, verspreidt zich door de lucht, en slaat deels neer op de grond. Een kind speelt op de grond, en krijgt een deel hiervan binnen. Dit scenario eindigt met het uitstrooien van de as door de naaste, een maand later.*

#### Toelichting en aannames

- Het eerste deel van dit scenario verloopt hetzelfde als scenario 'Begraving', met dezelfde aannames.
- Vanaf de start van de crematie wordt aangenomen dat de activiteit zich in as- en botresten bevindt.
- Werknemers van een crematorium voeren handelingen uit met de overgebleven as- en botresten, zoals het verwijderen van metaal en het vermalen van deze resten (cremuleren). Hierbij wordt aangenomen dat de activiteit in de as homogeen is uitgespreid in een werkbak, en dat men de handen hier op of in legt. Dit contact tussen hand en as kan enkele minuten duren.
- Daarnaast kunnen de handen ook in kleine hoeveelheden besmet zijn met as. Deze besmetting kan het gevolg zijn van de hiervoor beschreven handeling in de werkbak, maar ook van het opstuiven van as. Het is aannemelijk dat een persoon die een besmetting ziet snel zijn handen zal wassen. Wanneer de oppervlakteconcentratie van de as op de handen echter kleiner is dan  $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , bestaat de kans dat de besmetting onopgemerkt blijft [21]. Als deze persoon zijn besmette handen naar zijn mond zou brengen, bijvoorbeeld tijdens het eten, kan activiteit worden ingenomen. We nemen aan dat dit gebeurt direct na de huidbesmetting.

- Doordat de as tijdens sommige handelingen gedeeltelijk opstuift, raakt de lucht in de ruimte besmet. Vanuit het perspectief van fijn stof in het algemeen, voorziet de Arbocatalogus voor crematoria [20] een arbeidsrisico bij het schrapen en vegen van de oven en het verwerken van de as. Voor de werknemer van het crematorium die deze handelingen uitvoert, wordt daarom rekening gehouden met de inhalatie van as.
- Er zijn situaties waarbij de handen van een blootgestelde persoon zich bij de as bevinden zonder besmet te raken. Deze ontvangen hierdoor een lokale, equivalente huiddosis ten gevolge van externe straling (elektronen en gammastraling).
- Uiterst conservatief wordt aangenomen dat 100% van de aanwezige activiteit in de lucht wordt geloosd en dat tegelijkertijd 100% in de as achterblijft. In werkelijkheid zal de naar lucht geloosde fractie sterk beperkt zijn door de gebruikte filterinstallatie van een crematorium. Daarnaast zal de emissie nog lager zijn bij bepaalde toedieningsvormen, zoals ingekapselde bronnen en botzoekers [22]. De berekende doses moeten daarom als uiterst conservatieve waarden beschouwd worden.
- Bij het uitstrooien van de as kan het voorkomen dat de persoon in kwestie een deel van de as inhaleert. We nemen aan dat de as zich instantaan verspreidt over een halve bol rondom deze persoon. Door depositie zullen de zwaardere deeltjes snel neervallen. De lichtere, meer respirabele deeltjes zullen juist eerder weg waaien. De blootstellingstijd zal hierdoor beperkt zijn.
- De potentiële blootstelling van een omwonende is onder andere afhankelijk van de afstand tot het lozingspunt. De Vereniging Nederlandse Gemeenten publiceert richtafstanden tussen milieubelastende activiteiten en woningen. Voor crematoria geeft de handreiking een richtafstand van 100 meter aan [23]. Deze afstand wordt voor de berekeningen overgenomen als afstand tussen het crematorium en de volwassen omwonende, waarvoor de blootstelling wordt berekend. Het ademtempo van deze persoon wordt gelijkgesteld aan 8 300 m<sup>3</sup>/jaar, wat representatief is voor een volwassen man die rustige werkzaamheden verricht [24]. Van de lozing is verder aangenomen dat deze plaatsvindt op een effectieve hoogte van 10 meter en dat dit 1,5 uur duurt.
- Voor wat betreft de blootstelling van omwonenden geldt dat, op 100 meter afstand, de hoogste blootstelling wordt bereikt in een landelijke omgeving met regen bij Pasquill-klasse A (Figuur 1). Deze combinatie van omstandigheden is gebruikt voor de verdere luchtverspreidingsberekeningen.



Figuur 1: Effectieve dosis omwonende ten gevolge van inhalatie, groundshine en submersie na lozing van 1 000 MBq jodium-131. Het beschouwde subscenario is de blootstelling van een volwassene. Met landelijke omgeving; regen; Pasquill-klassen A tot en met F.

- De potentiële blootstelling van de volwassene omwonende wordt uitgedrukt in een multifunctionele individuele dosis (MID). De ingestiedosis wordt hierbij buiten beschouwing gelaten, omdat ingestie niet aannemelijk wordt geacht. Dit geldt niet voor het kind, dat speelt op de grond. De potentiële blootstelling daarvan wordt bepaald door de ingestiedosis (ingestie van zand en dergelijke) [7], waarbij wordt aangenomen dat het kind 100 mg per dag binnenkrijgt [25].
- Bij brachytherapie met jodium-125 kan de radioactieve stof zijn ingekapseld in titanium, zogeheten 'zaadjes'. Het titanium heeft een smeltpunt dat hoger is dan de temperatuur in een crematieoven. Toch kunnen zaadjes beschadigd raken tijdens het crematieproces, waardoor de radioactieve stof verspreid kan worden [1] [26]. Het is moeilijk in te schatten of, wanneer en hoeveel zaadjes beschadigd raken. Daarom wordt vanaf de start van een crematie (als bovengrens) aangenomen dat alle activiteit niet-ingekapseld is.

In Tabel 3 zijn de belangrijkste parameters van dit scenario samengevat.

Tabel 3: Scenario Crematie. Na 5,5 dagen (132 uren) begint men met de uitvaart. Circa 30 dagen na crematie strooit men de as uit.

Handeling	Blootgestelde(n)	Start [h]	Duur [h]	Blootstel- lingsfractie	L [m]	L <sub>huid</sub> [m]	Status lichaam	Besm. urine	Besm. as	Contact- duur hand-as [h]	Lozing
Dood vaststellen	Schouwarts	1	0,25	1	1	0,5	intact				
Overledene verzorgen	Werknemer u.v.o., naaste	1,5	1,5	1	1	0,5	intact	ja			
Overledene opbaren in bed	Werknemer u.v.o., naaste	3	0,25	1	1	0,5	intact				
Overledene bezoeken	Naaste	3,5	20,5	0,25	2	2	intact				
Overledene kisten	Werknemer u.v.o., naaste	24	0,5	1	1	0,5	intact				
Overledene is opgebaard; bezoeken	Naaste	24,5	107,5	0,25	2	2	intact				
Overledene van huis naar auto brengen	Werknemer u.v.o., naaste	132	0,5	1	1	0,5	intact				
Overledene vervoeren naar uitvaartcentrum	Werknemer u.v.o., naaste	132,5	1	1	3	3	intact				
Kist van auto naar koffiekamer brengen	Werknemer u.v.o., naaste	133,5	0,1	1	1	0,5	intact				
In koffiekamer zitten	Naaste	133,6	0,5	1	2	2	intact				
Indragen	Werknemer u.v.o., naaste	134,1	0,1	1	0,5	0,5	intact				
Deelnemen aan plechtigheid	Werknemer u.v.o., naaste	134,2	1	1	4	4	intact				
Kist naar oven brengen en in oven brengen	Werknemer crem., naaste	135,2	0,25	1	2	2	intact				lucht
Asresten van oven naar naverbrander duwen/trekken	Werknemer crem.	137	0,05	1	0,4	0,4	as		ja		

<b>Handeling</b>	<b>Blootgestelde(n)</b>	<b>Start [h]</b>	<b>Duur [h]</b>	<b>Blootstel- lingsfractie</b>	<b>L [m]</b>	<b>L<sub>huid</sub> [m]</b>	<b>Status lichaam</b>	<b>Besm. urine</b>	<b>Besm. as</b>	<b>Contact- duur hand-as [h]</b>	<b>Lozing</b>
Asresten in aslade laten vallen en laten afkoelen	Werknemer crem.	137,8	0,05	1	0,4	0,4	as		ja		
Metaal verwijderen	Werknemer crem.	138,35	0,05	1	0,4	0,4	as		ja	0.05	
Asresten cremuleren en opslaan	Werknemer crem.	138,4	0,1	1	0,5	0,5	as		ja		
As overgieten in uitstrooibus	Werknemer crem.	858	0,25	1	0,4	0,4	as		ja		
Met as naar uitstrooiveldje lopen en uitstrooien	Naaste	858,5	0,5	1	1	1	as		ja		bodem, water

### 3.4.2

#### *Variant B: Overlijden een maand na toediening*

Dit scenario is identiek aan *Crematie-Variant A*, zij het dat de patiënt overlijdt een maand na toediening van de radioactiviteit, in plaats van na 24 uur. Als gevolg van radioactief verval gedurende deze maand is de radioactiviteit in de patiënt (en daarmee de potentiële blootstelling) gedurende het gehele scenario kleiner dan in Variant A.

## 4 Modelling van de blootstelling

### 4.1 Uitgangspunten

Er zijn verschillende wegen waarop men aan straling kan worden blootgesteld. We onderscheiden:

- externe straling afkomstig van een bron zonder dat er sprake is van besmetting;
- inwendige besmetting in de vorm van ingestie of inhalatie;
- uitwendige besmetting, ofwel huidbesmetting.

Per betrokken persoon worden de totale effectieve dosis (zijnde het totaal van inhalatie, ingestie en externe straling) en de equivalente dosis voor de huid berekend.

In het algemeen geldt dat, waar keuzes moeten worden gemaakt, wordt gekozen voor een conservatieve benadering. Dit geldt bijvoorbeeld bij het doen van aannames voor atmosferische omstandigheden bij de verspreidingsberekeningen. Een ander voorbeeld is het buiten beschouwing laten van de afschermdende werking van kisten en bekleding, omdat het gebruik van materialen sterk kan verschillen.

Waar mogelijk, is bij het bepalen van de biologische verwijderingsconstante(n) rekening gehouden met de conditie van de patiënten (Bijlage A.3). Wanneer hier onvoldoende gegevens van bekend zijn, zijn data gebruikt die voor werknemers zijn afgeleid.

#### 4.1.1 Effectieve dosis

De totale effectieve dosis van een persoon is opgebouwd uit de effectieve volgdosis ten gevolge van inwendige besmetting (ingestie en inhalatie) en de effectieve dosis ten gevolge van externe straling.

Deze laatste term wordt geschat met het omgevingsdosisequivalent ten gevolge van gammastraling.

- Voor gammastraling is dit een conservatieve methode [27].
- De bijdrage van alfastraling wordt hier buiten beschouwing gelaten. De alfastraling van de radionucliden uit dit onderzoek heeft een maximale energie van 7,4 MeV (thorium-227), wat overeenkomt met een maximale dracht van circa 76  $\mu\text{m}$  in water. Zij komt hiermee net door de epidermis en draagt daarmee zeer beperkt bij aan de effectieve dosis.
- De bijdrage van elektronenstraling wordt hier ook buiten beschouwing gelaten. De maximale energie van de bètastraling uit dit onderzoek bedraagt namelijk 2,3 MeV (yttrium-90), met een dracht van circa 1,1 cm in water. Het weglaten van de elektronenbijdrage geeft een beperkte onderschatting, die bij samenloop van de meest ongunstige omstandigheden wordt geschat op 1 à 3  $\mu\text{Sv}$  per blootgestelde minuut. Van deze blootstelling wordt bovendien verwacht dat deze slechts enkele minuten plaatsvindt.

#### 4.1.2 Lokale, equivalente huiddosis

De lokale, equivalente huiddosis wordt berekend als de som van de equivalente huiddosis ten gevolge van huidbesmetting en externe straling.

Voor de bijdrage van externe bètastraling aan de huiddosis wordt onderscheid gemaakt tussen een wel of niet intact lichaam.

Zoals eerder toegelicht, bedraagt de dracht maximaal 1,1 cm in water (2,3 MeV elektronen, yttrium-90). Van de elektronen afkomstig uit het intacte lichaam wordt aangenomen dat zij volledig worden geabsorbeerd in het lichaam van de patiënt en hiermee geen bijdrage leveren aan de huiddosis. Als de activiteit zich vlak onder de huid bevindt, geeft dit een onderschatting van de dosis. Als de activiteit zich in as bevindt, wordt de bijdrage van externe bètastraling aan de huiddosis wel berekend. Zelfafscherming en de afscherming van lucht (en mogelijk de urn) worden hierbij verwaarloosd. De transmissie van zowel elektronen als fotonen wordt dus 100% verondersteld.

## 4.2 Blootstelling intact lichaam

Aan de patiënt is op tijdstip  $t=0$  radioactief materiaal toegediend met een totale activiteit  $A_0$ . Op het moment dat de patiënt overlijdt ( $t_d$ ) is de activiteit door biologische verwijdering en radioactief verval afgenomen tot  $A_d$ :

$$A_d = A_0 \cdot e^{-(\lambda_f + \lambda_b) \cdot t_d} \quad (1)$$

met

$A_d$	de activiteit, aanwezig in de patiënt, op moment van overlijden (MBq);
$\lambda_b$	de biologische verwijderingsconstante tot $t_d$ ( $\text{h}^{-1}$ );
$\lambda_f$	de fysische verwijderingsconstante ( $\text{h}^{-1}$ ).

In deze vergelijking is slechts één biologische verwijderingsconstante gebruikt. Als het biokinetische gedrag van een radiofarmacon zich beter laat beschrijven door meerdere verwijderingsconstanten, wordt  $\lambda_b$  als functie van tijd gevarieerd (zie Bijlage A.3).

Na overlijden vindt alleen nog fysisch verval plaats. Om de notatie te vereenvoudigen wordt een nieuwe tijdschaal gehanteerd, aangeduid met  $t'$ , die op 0 begint bij overlijden. De activiteit in de patiënt (MBq) wordt vanaf overlijden dus beschreven als:

$$A_{pat}(t') = A_d \cdot e^{-\lambda_f t'} \quad (2)$$

#### 4.2.1 Effectieve dosis, externe straling

Het omgevingsdosisequivalent ( $\mu\text{Sv}$ ) waaraan een persoon wordt blootgesteld ten gevolge van externe gammastraling (afkomstig uit de patiënt) gedurende een periode  $\Delta t$  is (puntbronbenadering):

$$H^*(10) = \frac{h_\gamma(10) \cdot f_{tli}}{L^2} \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} A_{pat}(t') dt' \quad (3)$$

met

- $t_1$  het starttijdstip van de handeling (h);  
 $\Delta t$  de gemiddelde tijdsduur van de handeling (h);  
 $h_\gamma(10)$  de omgevingsdosisequivalenttempoconstante ten gevolge van gammastraling ( $\mu\text{Sv h}^{-1} \text{ m}^2 \text{ MBq}^{-1}$ ), afkomstig van [9] [10] [11];  
 $f_{tli}$  de transmissie door het lichaam van de patiënt, per behandeling uitgewerkt in Bijlage A.2 (-);  
 $L$  de afstand van het middel van de overledene tot de blootgestelde persoon (m).

Wanneer een handeling meermalen plaatsvindt gedurende een langere periode, wordt een alternatieve vergelijking gebruikt. In dat geval wordt de blootstelling homogeen verdeeld ('uitgesmeerd') over de volledige periode  $\Delta T$ :

$$H^*(10) \approx \frac{h_\gamma(10) \cdot f_{tli}}{L^2} \cdot f_{exp} \cdot \int_{t_1}^{t_1 + \Delta T} A_{pat}(t') dt' \quad (4)$$

met

- $t_1$  het starttijdstip van de beschouwde periode (h);  
 $\Delta T$  de tijdsduur van de volledige, overkoepelende periode (h);  
 $f_{exp}$  de blootstellingsfractie, gelijk aan  $n\Delta t/\Delta T$  (-);  
 $n$  het aantal keer dat de handeling wordt uitgevoerd tijdens  $\Delta T$  (-).

#### 4.2.2 *Equivalente huiddosís, externe straling*

De lokale, equivalente huiddosís ( $\mu\text{Sv}$ ) ten gevolge van externe straling wordt berekend als (puntbronbenadering):

$$H_h = \frac{h_\gamma(0,07) \cdot f_{tli}}{L_h^2} \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} A_{pat}(t') dt' \quad (5)$$

met

- $h_\gamma(0,07)$  de dosisequivalenttempoconstante op 0,07 mm diepte in de ICRU-bol ( $\mu\text{Sv h}^{-1} \text{ m}^2 \text{ MBq}^{-1}$ ) ten gevolge van gammastraling [11];  
 $L_h$  de afstand van de bron tot de handen, als het dichtstbijzijnde deel van de huid (m).

#### 4.2.3 *Equivalente huiddosís, besmetting urine*

Van de urine wordt aangenomen dat deze, voorafgaand aan het overlijden, gedurende een bepaalde periode in de blaas is verzameld. De activiteit in de urine (MBq) is dan op het moment van overlijden ( $t = t_d$ ):

$$A_{urine}(t_d) = f_{urine} [A_{pat,-\tau} e^{-\lambda_f \tau} - A_d] \quad (6)$$

met

- $f_{urine}$  de fractie van biologische verwijdering die naar de urine gaat (-);  
 $\tau$  de periode waarin de blaas wordt gevuld met urine (4 h);

$A_{pat,-\tau}$  de activiteit aanwezig in de patiënt,  $\tau$  uren voor overlijden, gegeven door  $A_0 \cdot e^{-(\lambda_f + \lambda_b) \cdot (t_d - \tau)}$  (MBq) bij nucliden met één biologische verwijderingsconstante.

Bij overlijden kan het voorkomen dat de patiënt urine verliest, waardoor linnengoed of kleding besmet raakt. Dit kan, bij het opruimen hiervan, tot een huidbesmetting leiden. De equivalente huiddosis ( $\mu\text{Sv}$ ) ten gevolge van deze besmetting is (fysisch verval tussen het moment van overlijden van de patiënt en huidbesmetting van de derde is verwaarloosd):

$$H_h \approx \frac{A_{urine}(t_d) DC_h \Delta t}{O_{tex}} \times 10^{12} \quad (7)$$

met

$\Delta t$  de tijd waarin een deel van de huid besmet is (120 s);  
 $DC_h$  de dosisconversiecoëfficiënt voor huidbesmettingen ( $\text{Sv s}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{cm}^2$ ) [18] [11];  
 $O_{tex}$  het oppervlak van het textiel dat besmet is ( $50 \times 50 \text{ cm}^2$ ) [21].

### 4.3 Blootstelling as

Als de overledene wordt gecremeerd, blijft een deel van de activiteit in de as. Van dit deel wordt aangenomen dat het homogeen over de as is verdeeld. De activiteitsconcentratie  $C_{as}(t')$  in MBq/g wordt gegeven door:

$$C_{as}(t') = \frac{A_{pat}(t')}{m_{as}} f_{as} \quad (8)$$

waarin

$m_{as}$  de massa van de overgebleven as na de crematie (2 500 g) [21];  
 $f_{as}$  fractie van de activiteit in de overleden patiënt die in de as (met massa  $m_{as}$ ) aanwezig blijft (1).

A priori is niet duidelijk welk deel van de activiteit waar terecht komt tijdens de crematie. Dit is onder andere afhankelijk van het radionuclide, de gebruikte toedieningsvorm, de temperatuur en ventilatie van de crematieoven, en de efficiëntie van de gebruikte filterinstallatie voor het te beschouwen radionuclide. Men verwacht dat een deel van de activiteit in de as achterblijft als het botzoekers of ingekapselde bronnen betreft; van andere stoffen verwacht men dat zij tijdens de crematie uit het lichaam zullen vervliegen en dus niet in de as terecht zullen komen [22]. Daarmee hoeft de activiteit nog niet naar de buitenlucht te worden geloosd, omdat deze eerst wordt gefilterd. Van jodium-125 brachytherapie lijkt  $f_{as}$  circa 18% [28] à 30% [29] te zijn. Omdat er weinig feitelijke data beschikbaar is, wordt op dit punt gekozen voor een conservatieve aanpak:  $f_{as}$  wordt op 100% gezet en tegelijkertijd wordt aangenomen dat 100% van de activiteit tijdens de crematie in de lucht wordt geloosd.

#### 4.3.1 Effectieve dosis, externe straling

Analoog aan vergelijkingen (3) en (4) wordt het omgevingsdosisequivalent ( $\mu\text{Sv}$ ) ten gevolge van externe gammastraling gedurende één of meerdere handelingen berekend als:

$$H^*(10) = \frac{h_\gamma(10) \cdot f_{tas}}{L^2} \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} C_{as}(t') m_{as} dt' \quad (9)$$

$$H^*(10) \approx \frac{h_\gamma(10) \cdot f_{tas}}{L^2} \cdot f_{exp} \cdot \int_{t_1}^{t_1+\Delta T} C_{as}(t') m_{as} dt' \quad (10)$$

met

$f_{tas}$  de transmissie van gammastraling door de as (1).

#### 4.3.2 Effectieve dosis, ingestie as

Deze onopgemerkte huidbesmetting met as kan tot ingestie van activiteit leiden. De effectieve volg dosis ten gevolge van ingestie ( $\mu\text{Sv}$ ) wordt beschreven als:

$$E_{ing} = e_{ing} C_{as}(t_1) \sigma_{hand} O_{hm} \times 10^{12} \quad (11)$$

waarin

$e_{ing}$  de volg dosiscoëfficiënt voor ingestie (Sv/Bq) [7];  
 $\sigma_{hand}$  de oppervlakteconcentratie van het besmette deel van de handen (0,0001 g/cm<sup>2</sup>) [21];  
 $O_{hm}$  het oppervlak van de besmette handen van waaraf ingestie plaatsvindt (10 cm<sup>2</sup>) [21].

Hierbij wordt aangenomen dat de besmettingsoverdracht van hand naar mond volledig is.

#### 4.3.3 Effectieve dosis, inhalatie as

De as stuift tijdens sommige handelingen in het crematorium gedeeltelijk op, waardoor de lucht in de ruimte besmet raakt. Voor de persoon die deze handelingen uitvoert, wordt de effectieve volg dosis ( $\mu\text{Sv}$ ) ten gevolge van inhalatie conservatief geschat op (zie Bijlage A.4):

$$E_{inh} = e_{inh} C_{as}(t_1) m_{resp} \times 10^{12} \quad (12)$$

met

$e_{inh}$  de volg dosiscoëfficiënt voor inhalatie (Sv/Bq) [7], met het aanbevolen absorptietype voor deeltjesaerosolen uit [8];  
 $m_{resp}$  de massa van de geresuspendeerde as die respirabel en geïnhaleerd is (0,001 g). De waarde voor  $m_{resp}$  is gebaseerd op onderzoek naar fijnstof in crematoria [30] en sluit aan op eerdere dosisberekeningen voor werknemers van crematoria [21].

Bij het uitstrooien van as kan het voorkomen dat men een deel ervan inhaleert. De inhalatiedosis (in  $\mu\text{Sv}$ ) voor deze persoon wordt berekend als:

$$E_{inh} = \frac{C_{as}(t_1)m_{as}f_{resp}}{2\pi R^3/3} I \Delta t e_{inh} \times 10^{12} \quad (13)$$

met

- $f_{resp}$  de fractie van de as die ingeademd wordt en respirabel is (15%);  
 $R$  de straal van de halve bol waarin de uitgestrooide as zich bevindt (5 m);  
 $I$  het inhalatietempo van de persoon die uitstrooit (1,4 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> voor een volwassene tijdens lichte werkzaamheden) [31];  
 $\Delta t$  de tijdsduur waarin de persoon zich in de aswolk bevindt (10 s, ofwel 10/3600 h).

De submersiedosis ten gevolge van externe straling vanuit de besmette lucht wordt verwaarloosd. Ter indicatie: een verblijf van 10 seconden in een wolk van 1 000 MBq zuiver jodium-131 zou tot een inhalatiedosis van circa 300 µSv leiden, terwijl de submersiedosis circa 0,6 µSv zou zijn.

#### 4.3.4 *Equivalente huiddosis, externe straling*

Voor situaties waarbij de handen zich bij de as bevinden zonder besmet te raken, worden de lokale, equivalente huiddoses (µSv) ten gevolge van externe straling analoog aan vergelijking (5) berekend met (onafgeschermd, zie paragraaf 3.4.1):

$$H_h = \frac{h(0,07)}{L_h^2} \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} C_{as}(t') m_{as} dt' \quad (14)$$

met

- $h(0,07)$  de dosisequivalenttempoconstante op 0,07 mm diepte in de ICRU-bol (µSv h<sup>-1</sup> m<sup>2</sup> MBq<sup>-1</sup>) ten gevolge van elektronen en gammastraling, afkomstig van [11].

#### 4.3.5 *Equivalente huiddosis, besmetting as*

Als men de as- en botresten met de handen aanraakt, wordt de hieruit volgende 'contactdosis' berekend als een huidbesmetting (µSv):

$$H_h = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t_{bak}} C_{as}(t') \sigma_{bak} DC_h dt' \times 10^{12} \quad (15)$$

met

- $t_1$  het tijdstip van de handeling, gerekend vanaf het moment van overlijden (s);  
 $\Delta t_{bak}$  de tijdsduur van het directe contact van de huid met de as (s);  
 $\sigma_{bak}$  de oppervlakteconcentratie van de as in de werkbak (2,8 g/cm<sup>2</sup>), gelijk aan de massa van de as (2500 g) gedeeld door het oppervlak van de bak (900 cm<sup>2</sup>);

De handen kunnen ook in kleine hoeveelheden besmet zijn met as, wat hierdoor onopgemerkt blijft [21]. De equivalente huiddosis (µSv) ten gevolge van deze besmetting is gelijk aan:

$$H_h = \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t_{bes}} C_{as}(t') \sigma_{hand} DC_h dt' \times 10^{12} \quad (16)$$

met

$\Delta t_{bes}$  de duur van de onopgemerkte besmetting (maximaal 4·3600 s);  
 $\sigma_{hand}$  de oppervlakteconcentratie van het besmette deel van de handen (0,0001 g/cm<sup>2</sup>) [21];

#### 4.4 Luchtverspreiding crematie

Bij de crematie kan radioactief materiaal via de schoorsteen in de lucht worden geloosd. Om de verspreiding van activiteit in de lucht te kunnen modelleren, is aangenomen dat deze Gaussisch beschreven kan worden [32]. De depositie van activiteit is in het model verwerkt en kan zowel droog als nat (regen) plaatsvinden. Typische windsnelheden zijn overgenomen uit [33]. Correctiefactoren voor de lozingsduur worden gehaald uit [34].

Tabel 4: Voor het luchtverspreidingsmodel wordt de atmosferische stabiliteit beschreven aan de hand van Pasquill-klassen [32].

Pasquill-klasse	Atmosferische stabiliteit
A	Extreem instabiel
B	Matig instabiel
C	Enigszins instabiel
D	Neutraal
E	Enigszins stabiel
F	Matig stabiel

In de berekeningen is onderzocht wat de invloed is van het type omgeving (stedelijk of landelijk), de atmosferische stabiliteit en het regentempo. Voor verschillende combinaties van deze omstandigheden is de lozing van 1 000 MBq jodium-131 gemodelleerd. Hieruit zijn de meest conservatieve omstandigheden geselecteerd.

Onder deze omstandigheden zijn in twee varianten voor alle behandelingen de potentiële effectieve en equivalente huiddosis van een volwassen lid van de bevolking en van een kind berekend.

- a) De potentiële blootstelling van een volwassen lid van de bevolking is, zo veel als mogelijk gebaseerd op de Rekenregels Analyse Gevolgen Ioniserende Straling (AGIS) [24] berekend als een eenmalige Multifunctionele Individuele Dosis:

$$MID = f_{woning} \cdot ID_{ext} + ID_{inh} + ID_{sub} + ID_{ing} \quad (17)$$

met

$f_{woning}$  een globale schatting van de afschermdende werking die door de woning van deze persoon wordt geboden (0,25) [24];

$ID_{ext}$  de individuele externe dosis. In dit geval ten gevolge van straling vanaf besmette bodem (*groundshine*) (μSv);

$ID_{inh}$  de individuele inhalatiedosis (μSv);

$ID_{sub}$  de individuele submersiedosis ( $\mu\text{Sv}$ );  
 $ID_{ing}$  de individuele ingestiedosis ( $\mu\text{Sv}$ ). De ingestiedosis wordt voor deze persoon buiten beschouwing gelaten en apart berekend voor een kind.

- b) De potentiële blootstelling van een kind ten gevolge van de ingestie van zand en dergelijke (in  $\mu\text{Sv}$ ).

De aanwezigheid van dochternucliden (door ingroei) is verrekend door de dosisconversiecoëfficiënten voor inhalatie, ingestie, groundshine en submersie middels een weging te sommeren (zie Bijlage A.5). Dit is, voor dit onderzoek, met name van belang voor behandelingen met radium-223 en thorium-227.

#### 4.5 Lozingen

Zoals toegelicht in hoofdstuk 3, worden de vrijstellingsgrenzen voor lozingen uitgedrukt in radiotoxiciteitsequivalenten ( $Re$ ) per jaar. Voor de innamepaden ingestie en inhalatie wordt een  $Re$  berekend als:

$$1 \text{ Re}_{ing} = \frac{1}{e_{ing(50)}} \quad (18)$$

$$1 \text{ Re}_{inh} = \frac{1}{e_{inh(50)}} \quad (19)$$

Voor lozingen naar de bodem en het oppervlaktewater is  $Re_{ing}$  relevant, naar de lucht  $Re_{inh}$  (art. 10.3 Bbs).

Bij crematies wordt uitgerekend welke hoeveelheid radiotoxiciteitsequivalenten naar lucht, bodem en oppervlaktewater kan gaan.

## 5

## Berekende potentiële blootstelling

Dit hoofdstuk presenteert en bespreekt de berekende potentiële blootstelling in de eerder gedefinieerde scenario's (Hoofdstuk 3).

### 5.1 Scenario 'Begraving'

#### 5.1.1

Variant A: Overlijden 24 uur na toediening

Tabel 5 vat de resultaten samen van de dosisberekeningen voor het scenario 'Begraving', in de variant dat de patiënt overlijdt 24 uur na toediening van de radioactiviteit. Per representatieve persoon zijn de (totale) potentiële effectieve dosis en de potentiële, lokale, equivalente huiddosis vermeld.

*Tabel 5: Potentiële effectieve dosis en potentiële, lokale, equivalente huiddoses van representatieve personen voor scenario "Begraving - variant A": Overlijden patiënt 24 uur na toediening radioactiviteit, en onbekendheid met aanwezigheid radioactiviteit in het lichaam. Uitvaartorganisatie' is afgekort tot 'u.v.o.'.*

Behandeling (activiteit per toediening)	Representatieve persoon	Effectieve dosis (mSv)	Equivalente huiddosis (mSv)
Ho-166 microsferen (12 000 MBq)	Schouwarts	5,7E-03	1,3E-01
	Werknemer u.v.o.	4,7E-02	1,1E+00
	Naaste	9,7E-02	1,4E+00
Y-90 microsferen (4 000 MBq)	Schouwarts	1,9E-06	2,5E-05
	Werknemer u.v.o.	2,0E-05	2,3E-04
	Naaste	5,1E-05	3,4E-04
I-131 hyperthyr., klinisch (1 000 MBq)	Schouwarts	7,2E-03	2,6E-02
	Werknemer u.v.o.	1,0E-01	3,7E-01
	Naaste	2,9E-01	5,4E-01
I-131 schildkliercarc. (7 400 MBq)	Schouwarts	4,4E-02	1,6E-01
	Werknemer u.v.o.	6,3E-01	9,9E+00
	Naaste	1,8E+00	1,1E+01
I-131-MIBG (11 000 MBq)	Schouwarts	4,2E-02	1,5E-01
	Werknemer u.v.o.	6,0E-01	1,4E+01
	Naaste	1,7E+00	1,5E+01
Th-227-PSMA (7 MBq)	Schouwarts	5,2E-05	4,0E-04
	Werknemer u.v.o.	8,5E-04	1,5E+00
	Naaste	2,4E-03	1,5E+00
Y-90 ibr. tiux. (1 480 MBq)	Schouwarts	<1,0E-06	9,1E-06
	Werknemer u.v.o.	7,1E-06	5,6E-02
	Naaste	1,9E-05	5,6E-02
Ra-223-dichloride (3,85 MBq)	Schouwarts	3,0E-05	1,7E-04
	Werknemer u.v.o.	4,6E-04	8,7E-02
	Naaste	1,3E-03	8,9E-02

Behandeling (activiteit per toediening)	Representatieve persoon	Effectieve dosis (mSv)	Equivalente huiddosis (mSv)
I-125-brachytherapie (2 000 MBq)	Schouwarts	4,0E-04	1,8E-03
	Werknemer u.v.o.	7,0E-03	2,4E-02
	Naaste	2,0E-02	3,8E-02
Lu-177-PSMA (6 000 MBq)	Schouwarts	6,2E-03	5,3E-02
	Werknemer u.v.o.	8,6E-02	5,1E+00
	Naaste	2,4E-01	5,5E+00

Uit de tabel kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Voor alle representatieve personen geldt in dit scenario dat de potentiële effectieve doses het hoogst is in het geval de overledene was behandeld met jodium-131, in het bijzonder bij de behandeling van schildkliercarcinoom en MIBG-therapie. Externe straling is in dit scenario de belangrijkste blootstellingsroute. De bijdragen van ingestie en inhalatie spelen slechts een beperkte rol.
- De potentiële effectieve dosis is het hoogste voor de naaste. Deze ligt in dit scenario, afhankelijk van de behandeling, tussen  $1,9 \cdot 10^{-5}$  en 1,8 mSv. Blootstelling betreft grotendeels externe straling, welke plaatsvindt tijdens het opbaren van de overledene, waarbij de naaste zich gedurende lange tijd op relatief korte afstand van de overledene bevindt. Voor de behandeling van schildkliercarcinoom en MIBG-therapie met jodium-131 is de potentiële blootstelling hoger dan 1 mSv.
- De potentiële effectieve dosis van de werknemer van de uitvaartorganisatie ligt in dit scenario tussen  $7,1 \cdot 10^{-6}$  en 0,63 mSv. Deze wordt bepaald door de handelingen die deze persoon kort na overlijden en op korte afstand uitvoert, zoals het verzorgen van het lichaam van de overledene. Ook hiervoor geldt dat de hoogste potentiële blootstelling het gevolg is van jodium-131.
- De potentiële effectieve dosis van de schouwarts is in dit scenario relatief laag (maximaal  $4,4 \cdot 10^{-2}$  mSv) in vergelijking met de andere representatieve personen.
- De potentiële equivalente huiddosis wordt in dit scenario voornamelijk opgelopen als gevolg van een huidbesmetting met besmette urine tijdens het verzorgen van de overledene door de naaste en de medewerker van de uitvaartorganisatie. Afhankelijk van de behandeling ligt deze tussen  $9,1 \cdot 10^{-6}$  (yttrium-90 microsferen) en 15 mSv (jodium-131 MIBG). Bij behandelingen met een eerste, snelle lichaamsklaring van het toegediende radiofarmacon (bijvoorbeeld die met natriumjodide) zal de urine relatief veel activiteit bevatten. Dit is van belangrijke invloed op de huidbesmetting en huiddosis. Als biologische verwijdering niet (langer) of nauwelijks plaatsvindt, is deze besmettingsroute veel minder belangrijk.

### 5.1.2 Variant B: Overlijden een maand na toediening

De bovenstaande berekeningen zijn herhaald voor een groot aantal verschillende perioden tussen toediening en overlijden. De resultaten hiervan zijn opgenomen in Bijlage B.2. Hieruit blijkt dat het effect van een langere tijd tussen toediening en overlijden is dat de radiologische gevaarstelling als gevolg van radioactief verval afneemt.

Ter illustratie van de omvang van dit effect zijn in Tabel 6 de resultaten samengevat van de dosisberekeningen voor het scenario 'Begraving', in de variant dat de patiënt overlijdt een maand na toediening van de radioactiviteit. Per blootgestelde persoon zijn de potentiële totale effectieve dosis en de potentiële, lokale, equivalente huiddosis vermeld.

Tabel 6: Potentiële effectieve dosis en potentiële, lokale, equivalente huiddoses van representatieve personen voor scenario "Begraving - variant B": Overlijden patiënt een maand na toediening radioactiviteit, en onbekendheid met aanwezigheid radioactiviteit in het lichaam. 'Uitvaartorganisatie' is afgekort tot 'u.v.o.'.

Behandeling (activiteit per toediening)	Representatieve persoon	Effectieve dosis (mSv)	Equivalente huiddosis (mSv)
Ho-166 microsferen (12 000 MBq)	Schouwarts	<1,0E-06	<1,0E-06
	Werknemer u.v.o.	<1,0E-06	<1,0E-06
	Naaste	<1,0E-06	<1,0E-06
Y-90 microsferen (4 000 MBq)	Schouwarts	<1,0E-06	<1,0E-06
	Werknemer u.v.o.	<1,0E-06	<1,0E-06
	Naaste	<1,0E-06	<1,0E-06
I-131 hyperthyr., klinisch (1 000 MBq)	Schouwarts	1,3E-04	4,7E-04
	Werknemer u.v.o.	1,8E-03	6,6E-03
	Naaste	5,2E-03	9,7E-03
I-131 schildklierarc. (7 400 MBq)	Schouwarts	1,5E-04	5,4E-04
	Werknemer u.v.o.	2,1E-03	6,1E-03
	Naaste	5,9E-03	9,6E-03
I-131-MIBG (11 000 MBq)	Schouwarts	8,2E-05	3,0E-04
	Werknemer u.v.o.	1,2E-03	3,4E-03
	Naaste	3,3E-03	5,4E-03
Th-227-PSMA (7 MBq)	Schouwarts	1,1E-05	8,7E-05
	Werknemer u.v.o.	1,8E-04	1,1E-03
	Naaste	5,2E-04	1,7E-03
Y-90 ibr. tiux. (1 480 MBq)	Schouwarts	<1,0E-06	<1,0E-06
	Werknemer u.v.o.	<1,0E-06	<1,0E-06
	Naaste	<1,0E-06	<1,0E-06
Ra-223-dichloride (3,85 MBq)	Schouwarts	<1,0E-06	<1,0E-06
	Werknemer u.v.o.	1,3E-06	2,5E-04
	Naaste	3,6E-06	2,5E-04
I-125-brachytherapie (2 000 MBq)	Schouwarts	2,9E-04	1,3E-03
	Werknemer u.v.o.	5,0E-03	1,7E-02
	Naaste	1,4E-02	2,7E-02

Behandeling (activiteit per toediening)	Representatieve persoon	Effectieve dosis (mSv)	Equivalente huidddosis (mSv)
Lu-177-PSMA (6 000 MBq)	Schouwarts	2,3E-04	1,9E-03
	Werknemer u.v.o.	3,4E-03	2,1E-02
	Naaste	9,4E-03	3,3E-02

Er kan worden geconcludeerd dat de potentiële blootstelling voor alle representatieve personen voor alle behandelingen significant lager is dan in Variant A. Deze verschillen zijn kleiner voor de behandelingen met jodium-125, lutetium-177 en thorium-227, wat het gevolg is van de langere halveringstijd. Enkel voor brachytherapie met jodium-125 ligt de potentiële blootstelling boven het triviale blootstellingsniveau van 10 µSv.

## 5.2 Scenario 'Crematie'

### 5.2.1

*Variant A: Overlijden 24 uur na toediening*

Tabel 7 vat de resultaten samen van de dosisberekeningen voor het scenario 'Crematie', in de variant dat de patiënt overlijdt 24 uur na toediening van de radioactiviteit. Omdat de potentiële blootstelling van schouwarts, naaste, en medewerker van de uitvaartorganisatie (vrijwel) identiek zijn aan die in scenario 'Begraving', zijn alleen de potentiële effectieve dosis van de medewerker van het crematorium, de omwonende volwassene en het omwonende kind (ten gevolge van ingestie) vermeld. Deze zijn specifiek voor dit scenario. Verder is de potentiële lokale equivalente huidddosis voor de medewerker van het crematorium gegeven.

*Tabel 7: Potentiële effectieve dosis en potentiële, lokale, equivalente huiddoses van representatieve personen voor scenario "Crematie - variant A": Overlijden patiënt 24 uur na toediening radioactiviteit, en onbekendheid met aanwezigheid radioactiviteit in het lichaam.*

Behandeling (activiteit per toediening)	Representatieve persoon	Effectieve dosis (mSv)	Equivalente huidddosis (mSv)
Ho-166 microsferen (12 000 MBq)	Medew. crematorium	1,4E-03	1,9E+01
	Volw. omwonende	1,6E-05	-
	Omwonend kind	<1,0E-06	-
Y-90 microsferen (4 000 MBq)	Medew. crematorium	1,2E-03	6,9E+01
	Volw. omwonende	2,2E-04	-
	Omwonend kind	<1,0E-06	-
I-131 hyperthyr., klinisch (1 000 MBq)	Medew. crematorium	3,1E-02	2,5E+01
	Volw. omwonende	9,9E-04	-
	Omwonend kind	5,6E-06	-
I-131 schildkliercarc. (7 400 MBq)	Medew. crematorium	2,2E-01	1,8E+02
	Volw. omwonende	7,0E-03	-
	Omwonend kind	3,9E-05	-
I-131-MIBG (11 000 MBq)	Medew. crematorium	2,1E-01	1,7E+02
	Volw. omwonende	6,6E-03	-
	Omwonend kind	3,8E-05	-

Behandeling (activiteit per toediening)	Representatieve persoon	Effectieve dosis (mSv)	Equivalente huid dosis (mSv)
Th-227-PSMA (7 MBq)	Medew. crematorium	2,0E-02	6,4E+01
	Volw. omwonende	4,7E-04	-
	Omwonend kind	1,2E-06	-
Y-90 ibr. tiux. (1 480 MBq)	Medew. crematorium	4,3E-04	2,5E+01
	Volw. omwonende	6,2E-03	-
	Omwonend kind	5,3E-06	-
Ra-223-dichloride (3,85 MBq)	Medew. crematorium	6,9E-03	7,9E+01
	Volw. omwonende	7,9E-05	-
	Omwonend kind	<1,0E-06	-
I-125- brachytherapie (2 000 MBq)	Medew. crematorium	1,7E-01	1,8E+00
	Volw. omwonende	2,1E-03	-
	Omwonend kind	1,9E-06	-
Lu-177-PSMA (6 000 MBq)	Medew. crematorium	2,0E-02	1,6E+02
	Volw. omwonende	4,2E-03	-
	Omwonend kind	8,2E-05	-

*Tabel 8: Potentiële effectieve dosis en potentiële, lokale, equivalente huiddoses van representatieve personen voor scenario "Crematie - variant A": Overlijden patiënt 24 uur na toediening radioactiviteit, en onbekendheid met aanwezigheid radioactiviteit in het lichaam.*

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- Net als in het scenario 'Begraving' is de potentiële blootstelling van naaste het hoogst, behalve bij de behandelingen met yttrium-90 (beide) en jodium-125. In deze gevallen is de potentiële effectieve dosis van de medewerker van het crematorium het hoogst.
- De potentiële effectieve dosis van de omwonende volwassene en het omwonende kind (ten gevolge van ingestie) is voor alle behandelingen (veel) lager dan 10  $\mu$ Sv. Dit is ook het geval op grotere afstanden. Eerdere studies naar de blootstelling ten gevolge van lozingen van 2 200 MBq jodium-125 [28] en 1 000 MBq jodium-131 [35] berekenden ook doses lager dan 10  $\mu$ Sv. De werkelijke doses kunnen, gezien de conservatieve aannames, nog (veel) lager zijn dan de gerapporteerde waarden.
- De potentiële effectieve dosis van de werknemer van het crematorium ligt in dit scenario tussen  $4,3 \cdot 10^{-4}$  en 0,22 mSv.
- De potentiële effectieve dosis van het kind (ten gevolge van ingestie) is in dit scenario maximaal  $8,2 \cdot 10^{-5}$  mSv. De hoogste waarde correspondeert met behandeling met lutetium-177.
- De potentiële, lokale, equivalente huiddosis van de werknemer van het crematorium ligt in dit scenario beduidend hoger dan in het scenario 'Begraving'. Deze bedraagt tussen 1,8 en  $1,8 \cdot 10^2$  mSv, met als voornaamste blootstellingsroute "besmetting van de huid". Deze besmetting ontstaat hoofdzakelijk wanneer de werknemer in direct contact is met de besmette as, bijvoorbeeld wanneer hij met zijn handen metaal en het identificatiesteentje uit de as verwijdert.

## 5.2.2

*Variant B: Overlijden een maand na toediening*

Tabel 8 vat de resultaten samen van de dosisberekeningen voor het scenario 'Crematie', in de variant dat de patiënt overlijdt een maand na toediening van de radioactiviteit. Per blootgestelde persoon zijn de potentiële totale effectieve dosis en de potentiële, lokale, equivalente huiddosis vermeld. De potentiële blootstelling van omwonenden is niet opnieuw berekend, aangezien deze in variant A al lager was dan het triviale niveau van 10 µSv.

*Tabel 8: Potentiële effectieve dosis en potentiële, lokale, equivalente huiddoses van representatieve personen voor scenario "Crematie - variant B": Overlijden patiënt een maand na toediening radioactiviteit, en onbekendheid met aanwezigheid radioactiviteit in het lichaam. 'Uitvaartorganisatie' en 'crematorium' zijn afgekort tot 'u.v.o.' en 'crem.'.*

<b>Behandeling</b> (activiteit per toediening)	<b>Representatieve persoon</b>	<b>Effectieve dosis (mSv)</b>	<b>Equivalente huiddosis (mSv)</b>
Ho-166 microsferen (12 000 MBq)	Medew. crematorium	<1,0E-06	<1,0E-06
	Volw. omwonende	-	-
	Omwonend kind	-	-
Y-90 microsferen (4 000 MBq)	Medew. crematorium	<1,0E-06	3,6E-02
	Volw. omwonende	-	-
	Omwonend kind	-	-
I-131 hyperthyr., klinisch (1 000 MBq)	Medew. crematorium	5,6E-04	4,5E-01
	Volw. omwonende	-	-
	Omwonend kind	-	-
I-131 schildkliercarc. (7 400 MBq)	Medew. crematorium	7,3E-04	6,0E-01
	Volw. omwonende	-	-
	Omwonend kind	-	-
I-131-MIBG (11 000 MBq)	Medew. crematorium	4,1E-04	3,3E-01
	Volw. omwonende	-	-
	Omwonend kind	-	-
Th-227-PSMA (7 MBq)	Medew. crematorium	4,3E-03	1,4E+01
	Volw. omwonende	-	-
	Omwonend kind	-	-
Y-90 ibr. tiux. (1 480 MBq)	Medew. crematorium	<1,0E-06	1,2E-02
	Volw. omwonende	-	-
	Omwonend kind	-	-
Ra-223-dichloride (3,85 MBq)	Medew. crematorium	1,9E-05	2,2E-01
	Volw. omwonende	-	-
	Omwonend kind	-	-
I-125-brachytherapie (2 000 MBq)	Medew. crematorium	1,2E-01	1,3E+00
	Volw. omwonende	-	-
	Omwonend kind	-	-
Lu-177-PSMA (6 000 MBq)	Medew. crematorium	1,1E-03	5,2E+00
	Volw. omwonende	-	-
	Omwonend kind	-	-

In grote lijnen kan worden geconcludeerd dat de potentiële blootstelling voor alle representatieve personen significant lager is dan in Variant A. Deze verschillen zijn kleiner voor de behandelingen met jodium-125, lutetium-177 en thorium-227, wat het gevolg is van de langere halveringstijd.



## 6 Vergelijking resultaten met (dosis)criteria

Voor het gebruik van bronnen van ioniserende straling geldt een breed scala aan wettelijke voorschriften. Het betreft regels voor de productie, het transport, het gebruik en de afvoer van radioactieve stoffen. De blootstellings situatie bepaalt de van toepassing zijnde dosiscriteria. In dit hoofdstuk wordt toegelicht welke dosiscriteria van toepassing kunnen zijn, en worden de resultaten uit hoofdstuk 5 hiermee vergeleken.

### 6.1 Bepaling van het type blootstellings situatie

Het Bbs [36] maakt onderscheid tussen geplande blootstellings situaties, radiologische noodsituaties en bestaande blootstellings situaties (art. 1.1 Bbs). De bijbehorende Nota van toelichting [37] geeft aan dat:

- *"een geplande blootstellings situatie een blootstellings situatie is die voortkomt uit het geplande gebruik van een stralings bron of uit een menselijke handeling die wijziging brengt in de blootstellings routes. Geplande blootstellings situaties omvatten zowel normale als potentiële blootstellingen;*
- *een radiologische noodsituatie een ongewone situatie of gebeurtenis is waarbij een stralings bron is betrokken en die onmiddellijke maatregelen vereist om ernstige negatieve gevolgen voor de gezondheid en veiligheid van de mens, de levenskwaliteit, het eigendom of het milieu te beperken;*
- *een bestaande blootstellings situatie een blootstellings situatie is die al bestaat op het ogenblik dat een beslissing over de controle ervan wordt genomen en die niet of niet langer dringende maatregelen vereist."*

Toediening van radioactiviteit aan een patiënt is te beschouwen als een handeling met radioactieve stoffen, en is op grond van artikel 3.8, derde lid, van het Bbs expliciet vergunningplichtig. Deze handeling vindt plaats in het ziekenhuis, waardoor evident is dat er in het ziekenhuis, als gevolg van het toedienen, sprake is van een geplande blootstelling van de patiënt en werknemers en verzorgers<sup>6</sup>. Minder evident is hoe de blootstelling van leden van de bevolking, niet zijnde verzorgers, en werknemers buiten het ziekenhuis moet worden aangemerkt. Betoogd zou kunnen worden dat ook deze blootstelling als gepland moet worden beschouwd. Immers, de vergunningplicht voor het toedienen van radioactiviteit aan personen brengt voor de vergunninghouder de verplichting met zich mee om de (reguliere en potentiële) blootstelling te ramen van de personen die het risico lopen te worden blootgesteld als gevolg van deze handeling. Het is niet onlogisch om daaronder ook de blootstelling van leden van de bevolking, niet zijnde verzorgers, en werknemers buiten het ziekenhuis mee te nemen, en dus ook deze blootstelling te 'plannen'. Iets dergelijks wordt ook aanbevolen door het ICRP [38].

<sup>6</sup> Dit volgt ook eenvoudig uit het feit dat controlestelsel alleen van toepassing is verklaard op geplande blootstellings situaties.

Anderzijds kunnen er redenen zijn om de blootstelling als een ander type blootstellingssituatie te beschouwen. Voor dit onderzoek worden berekende resultaten, bij gebrek aan andere criteria, om praktische redenen vergeleken met criteria voor geplande blootstelling.

## 6.2 Bepaling van de blootstellingscategorie

Vervolgens is de vraag welke blootstellingscategorieën het betreft. Hiervoor worden de begripsomschrijvingen in Bijlage 1 van het Bbs toegepast. Op basis hiervan komen we tot de volgende categorië-indeling:

- De blootstelling van de schouwarts, van de werknemer van de uitvaart-organisatie en van de werknemer van het crematorium wordt in dit onderzoek beschouwd als beroepsmatige blootstelling.
- De blootstelling van de volwassen omwonende en het omwonende kind worden beschouwd als bevolkingsblootstelling.
- De blootstelling van de naaste wordt beschouwd als medische blootstelling.

## 6.3 Bepaling van de (dosis)criteria

### 6.3.1 *Criteria voor geplande bevolkingsblootstelling*

Voor geplande bevolkingsblootstelling gelden op grond van artikel 9.1 van het Bbs enkele dosislimieten. Van belang is op te merken dat deze gelden voor de cumulatieve blootstelling (d.w.z. ten gevolge van geplande blootstelling aan meerdere bronnen) gedurende een jaar. Verder zijn in artikel 9.2 twee beperkingen vastgesteld voor de effectieve dosis. Voor dit onderzoek lijkt de dosisbeperking voor blootstelling buiten de locatie (de "locatielimiet") op het eerste gezicht relevanter dan de dosisbeperking voor blootstelling binnen de locatie, al was het maar omdat de laatste kwantitatief niet verschilt van de dosislimiet.

Opgemerkt wordt echter dat kanttekeningen kunnen worden geplaatst bij een vergelijking van de potentiële blootstelling van een lid van de bevolking (ten gevolge van een van de beschreven scenario's) met de hierboven genoemde waarden voor blootstelling gedurende een kalenderjaar. Dit geldt vooral voor de vergelijking met dosislimieten, die ook nog eens gelden voor de cumulatieve doses ten gevolge van blootstelling aan meerdere bronnen. Zuiverder lijkt het om de berekende potentiële blootstelling te vergelijken met de door de Europese Commissie aanbevolen dosisbeperking voor de blootstelling van een lid van de bevolking, niet zijnde verzorgers, ten gevolge van nucleair-geneeskundige behandelingen van 0,3 mSv per behandeling [39].<sup>7</sup> Een vergelijking met de dosislimieten, in tweede instantie, is vervolgens slechts ter verdere duiding van de mate van blootstelling.

Zoals aangegeven in de afbakening (Hoofdstuk 1.3) worden de equivalente ooglensdosis en de equivalente extremitendosis in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

<sup>7</sup> De dosisbeperkingen uit dat stuk worden voorgesteld voor behandelingen met jodium-131. Voor dit onderzoek worden de dosisbeperkingen ook voor andere behandelingen gehanteerd.

Tabel 9: Geselecteerde dosiscriteria geplande bevolkingsblootstelling.

Criterium	Beperking voor effectieve dosis buiten locatie ten gevolge van handelingen op deze locatie (mSv/jaar)	Limiet voor cumulatieve effectieve dosis (mSv/jaar)	Limiet voor cumulatieve equivalente dosis huid <sup>8</sup> (mSv/jaar)
Waarde	0,1	1	50

### 6.3.2 Criteria voor geplande beroepsmatige blootstelling

Voor geplande, beroepsmatige blootstelling van niet-blootgestelde werknemers gelden op grond van artikel 7.3 van het Bbs enkele dosislimieten. Wederom wordt opgemerkt dat deze van toepassing zijn op de cumulatieve blootstelling.

De Europese Commissie beschouwt de blootstelling van derden (daar gedefinieerd als: geen familie en vrienden) als blootstelling van leden van de bevolking [39]. Voor geplande, beroepsmatige blootstelling ten gevolge van behandelingen met radioactieve stoffen is daarom de eerder genoemde dosisbeperking van 0,3 mSv per behandeling van toepassing [39].<sup>9</sup>

Tabel 10: Geselecteerde dosiscriteria geplande beroepsmatige blootstelling.

Criterium	Limiet voor cumulatieve effectieve dosis (mSv/jaar)	Limiet voor cumulatieve equivalente dosis huid <sup>8</sup> (mSv/jaar)
Waarde	1	50

Net als bij de bevolkingsblootstelling worden de equivalente ooglensdosis en de equivalente extremitetendosis in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

Verder geldt, net als bij de bevolkingsblootstelling, dat vergelijking van de potentiële, beroepsmatige blootstelling met de dosislimieten slechts dient ter duiding van de mate van blootstelling.

### 6.3.3 Criteria voor geplande medische blootstelling

Voor geplande, medische blootstelling van verzorgers zijn geen limieten opgenomen in de Nederlandse regelgeving. Wel beveelt het ICRP voor de blootstelling van niet-professionele "carers and comforters" (in het Nederlands vertaald als "verzorgers" van patiënten) na behandeling met radioactieve stoffen, niet zijnde ingekapselde bronnen, een dosisbeperking aan van 5 mSv per behandeling [38].

<sup>8</sup> Gemiddeld over enig huidoppervlak van 1 cm<sup>2</sup>.

<sup>9</sup> De dosisbeperkingen uit dat stuk worden voorgesteld voor behandelingen met jodium-131. Voor dit onderzoek worden de dosisbeperkingen ook voor andere behandelingen gehanteerd.

De Europese Commissie stelt voor familie en vrienden van de patiënt dosisbeperkingen voor, afhankelijk van de leeftijd van de blootgestelde [39].

- Voor kinderen (tot en met 10 jaar): 1 mSv per behandeling (van de patiënt).
- Voor kinderen (ouder dan 10 jaar) en volwassenen (jonger dan 60 jaar): 3 mSv per behandeling.
- Voor volwassenen (ouder dan 60 jaar): 15 mSv per behandeling.

In dit onderzoek worden deze, door de Europese Commissie voorgestelde, dosisbeperkingen gehanteerd.

In de scenariodefinitie is aangenomen dat de naaste een volwassene is. Omdat de leeftijd van deze persoon niet is gespecificeerd, wordt de meest conservatieve dosisbeperking voor volwassenen (3 mSv per behandeling) genomen.

#### 6.3.4 *Triviaal blootstellingsniveau*

Voor geplande blootstellingsituaties bestaat ten slotte een blootstellingsniveau dat als "triviaal" wordt beschouwd. Voor geplande blootstelling aan kunstmatige bronnen geldt daarvoor een waarde van 10  $\mu$ Sv per jaar. Dit wordt internationaal ook gehanteerd als een grens waaronder verdere optimalisatie door middel van regulering niet meer zinvol wordt geacht [2]. Vergelijking van de potentiële blootstelling ten gevolge van een individuele behandeling met het "triviale" niveau van 10  $\mu$ Sv per jaar draagt bij aan de duiding van de mate van blootstelling.

#### 6.3.5 *Lozingen*

Het vrijkomen van radioactieve stoffen naar de omgeving kan als een lozing beschouwd worden. Dit is in de beschouwde scenario's mogelijk aan de orde bij de begraving van de overledene (lozing naar bodem), bij het crematieproces (lozing naar lucht), het uitstrooien van as naar de bodem (lozing naar bodem), en het uitstrooien van as naar oppervlaktewater (lozing naar oppervlaktewater). Om deze reden wordt, waar relevant, eveneens vergeleken met de vrijstellingsgrenzen voor lozingen.

*Tabel 11: Vrijstellingsgrenzen voor lozing van radioactiviteit.*

criterium	Vrijstellingsgrens voor lozing naar bodem ( $Re_{ing}/\text{jaar}$ )	Vrijstellingsgrens voor lozing naar lucht ( $Re_{inh}/\text{jaar}$ )	Vrijstellingsgrens voor lozing naar oppervlaktewater ( $Re_{ing}/\text{jaar}$ )
Waarde	$10^{-6}$	1	0,1

#### 6.3.6 *Samenvatting dosiscriteria voor dit onderzoek*

Op grond van het voorgaande worden de berekende potentiële blootstellingen in de verschillende scenario's vergeleken met de criteria in Tabel 12.

Tabel 12: Geselecteerde criteria voor vergelijking met berekende resultaten. Crematorium en uitvaartorganisatie zijn afgekort als crem. en u.v.o..

Representatieve persoon in scenario	Blootstellings-categorie [40]	Effectieve dosis			Equivalente huid dosis
		Triviaal niveau (mSv/jaar)	Dosisbeperking (mSv/behandeling) [39]	Limiet (mSv/jaar)	Limiet (mSv/jaar)
Naaste	Medisch	0,010	3 (volwassene jonger dan 60 jaar)	-	-
Omwonende crem. (volw.)	Bevolking		0,3	1	50
Omwonende crem. (kind)	Bevolking				
Schouwarts	Beroepsmatig				
Werknemer crem.	Beroepsmatig				
Werknemer u.v.o.	Beroepsmatig				

## 6.4 Vergelijking met criteria

### 6.4.1 *Begraving-Variant A: Overlijden 24 uur na toediening*

- De potentiële effectieve dosis van de naaste komt in dit scenario voor twee behandelingen boven de 1 mSv maar blijft onder de dosisbeperking van 3 mSv. Het betreft de behandeling van schildkliercarcinoom (jodium-131) en van neuroblastoom (jodium-131-MIBG). Voor 5 van de 10 behandelingen is de potentiële effectieve dosis van de naaste in de orde van of lager dan het triviale niveau van 10 µSv.
- De potentiële effectieve dosis van de medewerker van de uitvaartorganisatie is in dit scenario maximaal 0,63 mSv, wat hoger is dan de dosisbeperking van 0,3 mSv per behandeling. Dit is dus voor alle behandelingen wel lager dan de limiet van 1 mSv per jaar. De hoogste potentiële blootstelling vindt wederom plaats bij betreft behandeling van schildkliercarcinoom (jodium-131) en van neuroblastoom (jodium-131-MIBG). Voor 6 van de 10 behandelingen is de potentiële blootstelling in de orde van of lager dan het triviale niveau van 10 µSv.
- De potentiële effectieve dosis van de schouwarts is in dit scenario maximaal  $4,4 \cdot 10^{-2}$  mSv, wat lager is dan de dosisbeperking van 0,3 mSv per behandeling. De hoogste potentiële blootstelling vindt wederom plaats bij de behandeling van schildkliercarcinoom (jodium-131) en van neuroblastoom (jodium-131-MIBG).
- Zoals aangegeven bij de aannames wordt er vanuit gegaan dat er geen lozing naar de bodem plaatsvindt. De in Bijlage B.2 berekende waarden voor lozing naar de bodem worden daarom niet vergeleken met de vrijstellingsgrenzen.
- De potentiële equivalente huiddosis is in dit scenario voor alle representatieve personen ten hoogste 15 mSv. Dat is beneden de dosislimiet van 50 mSv. De hoogste equivalente huiddosis is berekend voor de behandeling van neuroblastoom (jodium-131-MIBG).

### 6.4.2 *Begraving-Variant B: Overlijden een maand na toediening*

- Voor alle representatieve personen geldt dat de potentiële blootstelling (aanzienlijk) lager is dan in Variant A. De potentiële effectieve dosis is slechts in het geval van behandeling met jodium-125 hoger dan het triviale niveau van 10 µSv.

### 6.4.3 *Crematie-Variant A: Overlijden na 24 uur na toediening*

- In aanvulling op de conclusies voor het scenario 'Begraving' geldt voor de medewerker van het crematorium dat de potentiële effectieve dosis ligt tussen  $4,3 \cdot 10^{-4}$  en 0,22 mSv. Dit ligt onder de dosisbeperking van 0,3 mSv per behandeling. De potentiële equivalente huiddosis ligt tussen 1,8 en  $1,8 \cdot 10^2$  mSv. Dat is boven de dosislimiet van 50 mSv. In beide gevallen is de hoogste waarde het gevolg van behandeling met jodium-131 voor schildkliercarcinoom.
- De potentiële effectieve dosis van de omwonende volwassene ligt tussen  $1,6 \cdot 10^{-5}$  en  $7,0 \cdot 10^{-3}$  mSv. De potentiële effectieve dosis van het omwonende kind (ten gevolge van ingestie) is maximaal

$8,2 \cdot 10^{-5}$  mSv. Deze doses zijn lager dan het triviale niveau van 10  $\mu$ Sv.

- De geloosde hoeveelheid radiotoxiciteit is berekend in Bijlage B.2. Op grond van deze conservatieve resultaten wordt geconcludeerd dat het uitstrooien van de as in geval voor alle behandelingen, met uitzondering van holmium-166, een (soms forse) overschrijding oplevert van de vrijstellingsgrens voor lozing naar de bodem.

#### 6.4.4 *Crematie-Variant B: Overlijden een maand na toediening*

- Net als bij 'Begraving' geldt voor alle representatieve personen dat de potentiële blootstelling (aanzienlijk) lager is dan in Variant A. De potentiële effectieve dosis van de medewerker van het crematorium is – net als in het scenario 'Begraving' slechts in het geval van behandeling met jodium-125 – hoger dan het triviale niveau van 10  $\mu$ Sv. De potentiële equivalente huiddosis is maximaal 14 mSv (behandeling met thorium-227-PSMA), lager dan de dosislimiet van 50 mSv.



## 7 Inschatting van aantal keer per jaar dat scenario's optreden

### 7.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken is de potentiële blootstelling van representatieve personen in enkele scenario's bepaald. Tot nog toe zijn echter geen uitspraken gedaan over hoe vaak (per jaar) een bepaald scenario (en dus de blootstelling) in werkelijkheid in Nederland zou kunnen optreden. Informatie hierover biedt meer duiding over het belang van een bepaald scenario. Daarnaast biedt het mogelijk inzicht in de kans dat een persoon in een jaar meerdere keren wordt blootgesteld. Dit laatste zou bijvoorbeeld het geval kunnen zijn voor personen die beroepsmatig betrokken zijn bij uitvaarten.

### 7.2 Aanpak

Een manier om iets te zeggen over het aantal keer per jaar dat een bepaald scenario optreedt, is het analyseren van het aantal vergelijkbare gebeurtenissen in het verleden. In 2006 [26] en in 2018 [1] overleden personen relatief kort na een behandeling met radioactieve stoffen. Zij werden gecremeerd zonder rekening te houden met de blootstellingsrisico's. Na afloop is dit alsnog opgemerkt. Onbekend is echter of deze situatie vaker is opgetreden (en zo ja, hoe vaak), zonder dat dit is opgemerkt. Dat betekent dat deze informatie niet zomaar kan worden gebruikt om het aantal keer per jaar te bepalen dat de in dit onderzoek beschouwde scenario's zich voordoen. Er is dus een andere aanpak nodig.

Het maken van een gedetailleerde kansberekening per scenario valt buiten de scope van dit onderzoek. Wel kan een analyse worden gemaakt van de factoren die de kans bepalen dat een patiënt vlak na behandeling overlijdt, en dat de leefregels en instructies niet worden nageleefd. Dit hebben immers alle beschouwde scenario's met elkaar gemeen. De verhouding tussen het aantal begravingen en het aantal crematies zegt daarnaast iets over de "verdeling" van het aantal overledenen patiënten over de scenario's "Begraving" en "Crematie". Het voorgaande zegt overigens niets over hoe vaak bepaalde deelhandelingen (zoals besmetting van handen) voorkomen.

Het ingeschatte aantal keer per jaar kan worden gekoppeld aan de blootstelling(en) die in dit onderzoek is/zijn berekend voor het betreffende scenario.

### 7.3 Factoren die van invloed zijn op het aantal keer per jaar dat een patiënt 24 uur na behandeling overlijdt, waarbij de leefregels niet worden nageleefd

Het aantal keer per jaar dat een patiënt 24 uur na behandeling overlijdt, waarbij de leefregels niet worden nageleefd, wordt bepaald door:

- *Het aantal toedieningen per jaar.* Hoe vaker radioactieve stoffen per jaar worden toegediend, des te hoger de kans per jaar is dat een patiënt overlijdt vlak na toediening. Het aantal toedieningen per jaar verschilt per type behandeling.

- *De kans op overlijden 24 uur na toediening.* Per aandoening (en dus per type behandeling) kan de kans op overlijden kort na behandeling verschillen. Hierover zijn geen cijfers bekend. Om hier toch een gevoel voor te krijgen kunnen getallen worden afgeleid van de 1-jaars overlevingskans van het ziektebeeld dat correspondeert met het type behandeling.
- *De kans dat derden niet bekend zijn met de recente behandeling van de patiënt,* als gevolg waarvan de leefregels na overlijden onvoldoende worden nageleefd, en de blootstelling onopgemerkt blijft. Er is geen reden om aan te nemen dat deze kans afhankelijk is van het type behandeling, behalve misschien dat men mogelijk bij de behandeling van kinderen een hogere mate van bewustzijn heeft. Dit is echter niet meegenomen in dit onderzoek.
- *De verdeling van het aantal overledenen over begraving en crematie.* De scenario's 'Begraving' en 'Crematie' zijn tot en met de uitvaart-ceremonie identiek, daarna vindt alleen in het crematie-scenario nog blootstelling plaats. De verhouding tussen het aantal begravingen en het aantal crematies per jaar in Nederland bepaalt mede de waarschijnlijkheid van de twee scenario's: indien bijvoorbeeld begravingen jaarlijks twee keer zoveel voorkomen als crematies, is de kans op het scenario 'Begraving' twee keer zo groot als de kans op het scenario 'Crematie'.
- *Het gemiddeld aantal overledenen per crematorium.* Hoe meer overledenen per jaar worden gecremeerd in één crematorium, des te hoger de kans op blootstelling van crematorium-medewerkers, of omwonenden ten gevolge van crematie van een patiënt die kort na toediening van radioactiviteit is overleden. Tevens is de kans hoger dat meervoudige blootstelling van crematorium-medewerkers voorkomt.

#### **7.4 Aannames en basisgegevens**

- Aangenomen wordt dat een patiënt niet twee keer dezelfde behandeling krijgt binnen een jaar. Dat betekent dat het maximaal aantal patiënten dat per jaar kan overlijden kort na behandeling gelijk is aan het aantal behandelingen.
- Per behandeling is het aantal patiënten dat wordt behandeld met radioactieve stoffen af te leiden van het aantal toedieningen per jaar. Cijfers hiervoor zijn opgenomen in Tabel 1 in dit rapport. Voor een aantal behandelingen geldt dat deze uit meerdere toedieningen bestaan. Omdat de mogelijkheid bestaat dat de patiënt overlijdt voordat de behandeling is afgerond, en dus nog niet alle toedieningen heeft gehad, wordt aangenomen dat voor deze behandelingen de laatste toediening wordt gemist. Met andere woorden: het aantal patiënten wordt voor deze behandelingen bepaald op basis van een kleiner aantal toedieningen dan in Tabel 1.
- Indien cijfers bekend zijn over de 1-jaars overleving voor het ziektebeeld dat (uniek) hoort bij de behandeling, kunnen deze worden omgerekend naar percentages sterfte binnen 1 jaar. Hiervoor hebben we de aanname gedaan dat 10% hiervan kan

worden toegerekend aan de eerste 24 uur. Merk hierbij op dat niet alle patiënten met een bepaald ziektebeeld (op dezelfde wijze) worden behandeld. Dat betekent dat het op deze manier berekende aantal sterftegevallen hoger kan zijn dan in werkelijkheid.

- Indien geen cijfers bekend zijn over de 1-jaars overleving voor het ziektebeeld dat (uniek) hoort bij de behandeling, moet een aanname worden gedaan voor de sterfte binnen 24 uur. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen curatieve en palliatieve behandelingen. De aanname is dat van de patiënten die palliatief worden behandeld 10% binnen 24 uur overlijdt. Voor de patiënten die curatief worden behandeld is dit 5%. De behandeling van levermetastasen van het colorectaal carcinoom wordt beschreven als een *'salvage'* therapie [41]. Dit wordt, voor dit onderzoek, als curatief beschouwd.
- Aangenomen wordt dat de kans op het niet naleven van leefregels gelijk is aan 10%. Hiervoor bestaat geen wetenschappelijke onderbouwing, en waarschijnlijk is dit bijzonder conservatief.
- In 2017 werd 63,8% van de overledenen gecremeerd. Volgens de Landelijke Vereniging van Crematoria zal zowel het percentage van de overledenen in Nederland dat wordt gecremeerd als het aantal crematies de komende jaren verder toenemen [42]. Indien we bij benadering aannemen dat overledenen die niet worden gecremeerd worden begraven, komen we uit op 65% crematie en 35% begraving.
- Om de kans te bepalen dat eenzelfde persoon gedurende een jaar meerdere keren wordt blootgesteld, kunnen de geschatte kansen vergeleken worden met het aantal schouwartsen, crematoria, etc.
- De bovenstaande aannames en uitgangspunten zijn, samen met de resultaten, samengevat in Tabel 13.

## 7.5 Resultaten van schatting van de kans op blootstelling

Op basis van het voorgaande is op zeer conservatieve wijze een bovengrens afgeschat voor het aantal keer dat de scenario's en daarmee de hoogst bepaalde potentiële blootstellingen in de praktijk onopgemerkt voorkomen. Afhankelijk van de behandeling ligt dit getal tussen de (bijna) 0 en (hooguit) 2 keer per jaar. De hoogste waarde wordt gevonden voor behandeling met radium-223. Het aantal keer per jaar dat de scenario's optreden waarvoor de hoogste potentiële effectieve dosis is bepaald (schildklier carcinoom en neuroblastoom met jodium-131) wordt ingeschat op minder dan 1 keer per jaar.

Het lijkt onwaarschijnlijk dat beroepsgroepen die betrokken zijn bij uitvaarten (schouwartsen, medewerkers van uitvaartcentra en crematoria) meer dan 1 à 2 keer per jaar worden geconfronteerd met de in dit rapport onderzochte situaties. Meervoudige blootstelling lijkt met andere woorden onwaarschijnlijk.

Voor het aantal keren per jaar dat de berekende blootstelling van medewerkers van crematoria en omwonenden van crematoria optreedt,

moet nog worden gewogen met 65% (het percentage van overledenen in Nederland dat wordt gecremeerd).

## **7.6 Verwachtingen voor de toekomst**

De bovenstaande cijfers zijn bepaald op basis van actuele data. Niet uit te sluiten valt dat het aantal behandelingen, of de verdeling van het aantal patiënten over de verschillende behandelingen, in de toekomst zal veranderen. Afhankelijk van de mate waarin dit gebeurt, zal de inschatting van de kans, net als de berekende potentiële blootstelling, opnieuw moeten worden gedaan.

Dit is relevant omdat in zijn algemeenheid de verwachting is dat nucleair-geneeskundige behandelingen in de toekomst meer toegepast zullen worden. In het bijzonder is de verwachting dat het aantal behandelingen met lutetium-177-PSMA sterk zal toenemen [13].

Tabel 13: Factoren die van belang zijn bij het schatten van het aantal keer per jaar dat blootstelling optreedt.

Ziektebeeld	Behandeling	Curatief/ palliatief	Nuclide	Farmacon/ toedie- ningsvorm	Aantal toedie- ningen per jaar	(Max.) aantal toedie- ningen per patiënt	Aanname voor gemiddeld aantal toedie- ningen	Aantal pa- tiënten per jaar	% eerste- jaars overleving	Aantal overle- denen in eerste 24 uur	Aantal overledenen in eerste 24 uur, èn onbekend- heid leefregels
Hepato- cellulair carcinoom (HCC)	Radio- embolisatie (lever)	Curatief	Ho-166	Microsferen	30	1	1	30	37	1,5	0,2
Lever- metastasen colorectaal carcinoom									onbekend		
Hepato- cellulair carcinoom (HCC)	Radio- embolisatie (lever)	Curatief	Y-90	Microsferen	207	1	1	207	37	10,4	1,0
Lever- metastasen colorectaal carcinoom									onbekend		
Hyper- thyreoïdie	Hyper- thyreoïdie	Curatief	I-131	Natrium- jodide	934	1	1	934	>91	8,0	0,8
Schildklier- carcinoom	Schildklier- carcinoom	Curatief	I-131	Natrium- jodide	826	1	1	826	91	7,4	0,7
Neuro- blastoom (kinderen)	Neuro- blastoom (kinderen)	Curatief	I-131	MIBG	26	1	1	26	88	0,3	0,0
Castratiere- sistent	Radio- immuno-	Palliatief	Lu-177	PSMA	400	3 tot 5	4	100	onbekend	10,0	1,0

Ziektebeeld	Behandeling	Curatief/ palliatief	Nuclide	Farmacon/ toedie- ningsvorm	Aantal toedie- ningen per jaar	(Max.) aantal toedie- ningen per patiënt	Aanname voor gemiddeld aantal toedie- ningen	Aantal pa- tiënten per jaar	% eerste- jaars overleving	Aantal overle- denen in eerste 24 uur	Aantal overledenen in eerste 24 uur, èn onbekend- heid leefregels
prostaatcarci- noom	therapie										
	Radio- immuno- therapie	Palliatief	Th-227	PSMA	10	3 tot 5	4	3	onbekend	0,3	0,0
Botmetastas en t.g.v. prostaatcarci- noom	Botmeta- stasen	Palliatief	Ra-223	Radium- dichloride	1021	6	5	204	onbekend	20,4	2,0
Prostaatcarci- noom	Brachy- therapie	Curatief	I-125	Zaadjes	278	1	1	278	97	0,8	0,1
Non-hodgkin lymfoom	Radio- immuno- therapie	Palliatief	Y-90	Y- ibritumomab tiuxetan	2	1	1	2	onbekend	0,1	0,0

## 8 Conclusies en discussie

In dit onderzoek zijn de radiologische risico's onderzocht van derden in de situatie dat een patiënt korte tijd na behandeling met radioactieve stoffen overlijdt. Daartoe zijn enkele scenario's opgesteld en is de potentiële blootstelling berekend van enkele representatieve personen in deze scenario's. Hierbij is aangenomen dat deze personen geen rekening houden met de aanwezigheid van radioactieve stoffen in het lichaam van de overleden patiënt. De berekende blootstelling is vervolgens vergeleken met dosiscriteria. Ten slotte is gekeken naar de kans dat de scenario's, en daarmee de berekende blootstelling, in de praktijk zou kunnen optreden. De conclusies hiervan worden in dit hoofdstuk kort samengevat en besproken.

### 8.1 Potentiële blootstelling

#### 8.1.1 *Blootstelling naaste*

Uit de berekeningen blijkt dat de hoogste effectieve dosis wordt opgelopen door de naaste, als gevolg van blootstelling aan externe straling afkomstig van jodium-131 tijdens de verzorging van de overledene. Dit geldt voor zowel het scenario 'Begraving' als voor het scenario 'Crematie', in de variant dat de patiënt 24 uur na toediening overlijdt. De berekende effectieve dosis is in deze scenario's maximaal 1,8 mSv, wat onder de dosisbeperking van 3 mSv ligt zoals voorgesteld door de Europese Commissie (zie Hoofdstuk 6). Het betreft de behandelingen van schildkliercarcinoom en MIBG-therapie met jodium-131.

#### 8.1.2 *Blootstelling werknemers*

De potentiële effectieve dosis van de werknemer van de uitvaartorganisatie is maximaal 0,6 mSv. Dit is hoger dan de dosisbeperking van 0,3 mSv per behandeling, maar lager dan de cumulatieve dosislimiet van 1 mSv per jaar voor een niet-blootgestelde werknemer bij een geplande, beroepsmatige blootstelling (zie Hoofdstuk 6). Deze dosis wordt bepaald door de handelingen die deze persoon kort na overlijden en op korte afstand uitvoert, zoals het verzorgen van het lichaam van de overledene. Ook hiervoor geldt dat de hoogste potentiële blootstelling het gevolg is van jodium-131. De potentiële effectieve dosis van de schouwarts is relatief laag in vergelijking met de andere representatieve personen, maximaal  $4,4 \cdot 10^{-2}$  mSv. Dit is lager dan de dosisbeperking van 0,3 mSv per behandeling. Het voorgaande geldt voor zowel het scenario 'Begraving' als voor het scenario 'Crematie'.

De potentiële effectieve dosis van de werknemer van het crematorium bedraagt ten hoogste 0,22 mSv. Dit is lager dan de dosisbeperking van 0,3 mSv per behandeling.

De potentiële equivalente huiddosis van de werknemer van het crematorium ligt in het scenario 'Crematie' beduidend hoger dan in het scenario 'Begraving'. Deze bedraagt tussen 1,8 en  $1,8 \cdot 10^2$  mSv, met als voornaamste blootstellingsroute "besmetting van de huid". Deze dosis

kan dus groter zijn dan de bijbehorende limiet van 50 mSv per jaar. Deze besmetting ontstaat hoofdzakelijk wanneer de werknemer in direct contact is met de besmette as, bijvoorbeeld wanneer hij met zijn handen metaal en het identificatiesteentje uit de as verwijdt.

#### 8.1.3 *Blootstelling omwonenden crematorium*

De potentiële effectieve dosis van de omwonende volwassene en het omwonende kind (beiden op 100 meter afstand) is voor alle behandelingen in alle scenario's (veel) lager dan het triviale niveau van 10  $\mu$ Sv.

De potentiële effectieve dosis van het kind ten gevolge van ingestie is ten hoogste  $8,2 \cdot 10^{-5}$  mSv.

#### 8.1.4 *Invloed van de tijd op de berekende blootstelling*

Indien wordt uitgegaan van overlijden een maand na toediening kan worden geconcludeerd dat de potentiële blootstelling voor alle representatieve personen en voor alle behandelingen lager is dan in geval van overlijden 24 uur na toediening. Deze verschillen zijn het kleinst voor de behandelingen met jodium-125 (afname met factor 1,4), thorium-227 en lutetium-177, wat het gevolg is van de langere halveringstijd. Het verschil is het grootst voor de behandeling met holmium-166 (een afname in de orde van 100 miljoen). Enkel voor brachytherapie met jodium-125 liggen de potentiële effectieve doses van de naaste en de medewerker van het crematorium boven het triviale blootstellingsniveau van 10  $\mu$ Sv.

### 8.2 **Verspreiding van radioactiviteit**

Van iedere behandeling is berekend hoeveel radiotoxiciteitsequivalenten (Re's) tijdens een crematie maximaal naar de bodem kunnen gaan (Bijlage B.2). Op grond van deze conservatieve resultaten wordt geconcludeerd dat het uitstrooien van de as in geval voor alle behandelingen, met uitzondering van holmium-166, een (soms forse) overschrijding van de vrijstellingsgrens levert. Hierbij moet wel worden aangetekend dat deze conclusie geldt voor overlijden 24 uur na behandeling.

### 8.3 **Inschatting van het aantal keer dat blootstelling in de praktijk optreedt**

Op conservatieve wijze is een bovengrens geschat voor het aantal keer dat de scenario's en daarmee de hoogst bepaalde potentiële blootstellingen in de praktijk onopgemerkt voorkomen. Hierbij is rekening gehouden met het aantal toedieningen per jaar, de kans dat de patiënt kort na toediening overlijdt en de kans dat derden niet bekend zijn met de behandeling van de patiënt. Afhankelijk van de behandeling ligt deze bovengrens tussen de (bijna) 0 en (maximaal) 2 keer per jaar. De hoogste waarde wordt gevonden voor behandeling met radium-223. Het aantal keer per jaar dat de scenario's optreden waarvoor de hoogste potentiële effectieve dosis is bepaald (schildkliercarcinoom en neuroblastoom met jodium-131) wordt geschat op minder dan 1 keer per jaar.

Het lijkt onwaarschijnlijk dat beroepsgroepen die betrokken zijn bij uitvaarten (schouwartsen, medewerkers van uitvaartcentra en crematoria) meer dan 1 à 2 keer per jaar worden geconfronteerd met de in dit rapport onderzochte situaties. Meervoudige blootstelling lijkt met andere woorden onwaarschijnlijk.

#### **8.4 Discussie**

De in dit onderzoek berekende potentiële doses zijn berekend onder realistisch-conservatieve omstandigheden. Zij zijn slechts geldig voor de in dit rapport beschreven scenario's, en onder de beschreven aannames. Hoewel de scenario's en de berekende potentiële blootstellingen representatief worden geacht voor de praktijk, vormen zij slechts een indicatie van de blootstelling die in de praktijk kan optreden. Het valt niet uit te sluiten dat de werkelijke blootstelling door samenloop van omstandigheden hoger of (wat waarschijnlijker is) lager is. Ter illustratie geeft bijlage B.2 de potentiële doses in het geval de patiënt langere tijd na toediening overlijdt.

Als het gewenst zou zijn beschermingsmaatregelen te treffen tegen de blootstelling aan ioniserende straling, kan men afstand, tijd en afscherming (zoals handschoenen of mondmaskers) in acht nemen. Indien de resultaten van dit onderzoek worden gebruikt bij de onderbouwing van maatregelen, ligt het voor de hand om ook de kans op blootstelling mee te wegen. De in dit rapport vermelde kansen moeten daarbij hooguit worden beschouwd als orde van grootte. Bovendien geldt dat deze kans afhankelijk is van het aantal behandelingen per jaar, dat mogelijk in de toekomst zal toenemen.

Verder geldt dat bij beslissingen over het treffen van beschermingsmaatregelen ook niet-radiologische aspecten zullen moeten worden meegewogen. De afweging van radiologische en niet-radiologische aspecten valt voor uitvaartprocedures mogelijk anders uit dan voor blootstelling ten gevolge van andere gerechtvaardigde handelingen.



## A Bijlage: uitgebreide methodiek

In deze bijlage wordt onder andere de gebruikte modellering (Hoofdstuk 4) verder onderbouwd en uitgewerkt.

### A.1 Transmissie bètastraling

De transmissie van bètastraling door kleding en persoonlijke beschermingsmiddelen zoals handschoenen kan worden beschreven als [43]:

$$f_{t\beta} = e^{-17\chi_m E_{max}^{-1,14}}$$

met

$\chi_m$  de oppervlaktemassa van het afschermdende materiaal ( $\text{g cm}^{-2}$ ).

Van de beschouwde radionucliden zendt yttrium-90 bèta-straling uit met de hoogste energie (2,280 MeV). Het gebruik van bijvoorbeeld nitril handschoenen met  $\chi_m = 0,04 \text{ g cm}^{-2}$  [44] zou de transmissie van deze straling terugbrengen tot 77%, waardoor de huiddosis met 23% gereduceerd zou worden. Bij gebruik van zwaardere beschermingsmiddelen of bij blootstelling aan lagere bèta-energieën zal de transmissie nog lager zijn.

### A.2 Transmissie gammastraling

De transmissie van gammastraling door het lichaam wordt gedefinieerd als de verhouding tussen het dosistempo zonder afscherming en het dosistempo met 15 centimeter water. Hierbij wordt rekening gehouden met buildup door verstrooide straling.

Tabel 14 toont per radionuclide de transmissie door het lichaam van de overledene. Waar onvoldoende gegevens bekend zijn, is realistisch conservatief een transmissie van 100% verondersteld.

Bij lutetium-177 is een transmissie groter dan 1 gegeven. De bijdrage van de verstrooide straling (buildup) is hier groter dan de verzwakking van de oorspronkelijke bundel, waardoor de transmissie groter dan 1 wordt. Let wel dat van het afschermdende medium van 15 centimeter is aangenomen dat het oneindig groot is, waardoor de buildup bijdrage waarschijnlijk wordt overschat.

Tabel 14: De transmissie van gammastraling door de patiënt (15 cm water) [45]. Voor berekeningen kan de getoonde significantie groter zijn dan de werkelijke. Radionucliden die als vervuiling worden toegediend zijn cursief gedrukt. \* Bijdrage dochters is meegenomen.

Radionuclide (uitgezonden straling)	$f_{ti}$ (-)
Ho-166 ( $\beta^-$ , $\gamma$ )	0,68
Y-90 ( $\beta^-$ )	1
I-131 ( $\beta^-$ , $\gamma$ )	0,88
Lu-177 ( $\beta^-$ , $\gamma$ )	1,13
<i>Lu-177m</i> ( $\beta^-$ , $\gamma$ )	<i>1</i>
Th-227 ( $\alpha$ , $\gamma$ )	1
Ra-223* ( $\alpha$ , $\gamma$ )	0,76
I-125 ( $\epsilon$ , $\gamma$ )	0,018

### A.3 Biologische verwijdering

De snelheid waarmee de toegediende activiteit biologisch verwijderd wordt, verschilt sterk per patiënt. Van iedere therapie is onderzocht wat de gemiddelde biologische verwijderingsconstante is en welke fractie hiervan naar de urine gaat. Hierbij is aangenomen dat de opname van een radiofarmacon in het lichaam volledig is.

In onderzoeken naar biologische verwijdering wordt de excretie vaak gemeten als een zekere fractie van de toegediende activiteit, afhankelijk van de tijd. Hierbij wordt niet altijd expliciet vermeld of en hoe met fysisch verval rekening is gehouden. In deze gevallen is in dit onderzoek aangenomen dat de gemeten activiteit in excretie is teruggerekend naar de oorspronkelijke activiteit ('gecorrigeerd' voor fysisch verval), zodat alleen de biokinetische component overblijft. Onder de aanname dat er slechts één biologische verwijderingsconstante is, kan vergelijking (6) algemeen worden herschreven tot:

$$f_{A,excretie} = f_{excretie}(1 - e^{-\lambda_b \tau})$$

met

$f_{A,excretie}$	Fractie van de activiteit aanwezig in patiënt $\tau$ uren voor beschouwing die terechtkomt in het betreffende excretiepad (gecorrigeerd voor radioactief verval);
$f_{excretie}$	fractie van de biologische verwijdering die naar het beschouwde excretiepad gaat;
$\lambda_b$	biologische verwijderingsconstante ( $\text{h}^{-1}$ );
$\tau$	de tijd waarin de activiteit in het beschouwde excretiepad accumuleert (h).

Soms wordt de verblijftijd in het lichaam (*total body residence time*)  $t_R$  (h) vermeld. Hiervoor wordt berekend hoeveel desintegraties in totaal plaatsvonden in het lichaam van een persoon. De verblijftijd is de tijd die hypothetisch nodig zou zijn om – buiten het lichaam – met de toegediende en constant gehouden activiteit hetzelfde aantal

desintegraties te bereiken. De biologische verwijderingsconstante wordt hier bepaald als:

$$\lambda_b \approx \frac{1}{t_R} - \lambda_f$$

De ICRP neemt voor werkers aan dat een jodide voor 99% via de urine verwijderd wordt [46]. We nemen aan dat deze waarde ook van toepassing is op patiënten met hyperthyreoïdie of schildkliercarcinoom.

Van de behandeling van hyperthyreoïdie met jodium-131 neemt de *American Thyroid Association* aan dat 50% van de toegediende activiteit in de schildklier wordt opgenomen; als effectieve halveringstijd wordt voor dit deel 5 dagen gegeven [47]. Een onderzoek naar patiënten met hyperthyreoïdie geeft effectieve halveringstijden van 5,0 tot 6,0 dagen [48]. Steward neemt aan dat 50% van de activiteit zich buiten de schildklier bevindt en dat dit deel snel geklaard wordt met een effectieve halveringstijd van 8 uren [49]. We nemen op basis van deze publicaties aan dat de activiteit in de patiënt met twee opeenvolgende exponentiële functies benaderd kan worden. De eerste, snelle klaring vindt plaats met een effectieve halfwaardetijd van 16 uren ( $\lambda_b=0,043 \text{ h}^{-1}$ ); na 17,1 uren (het snijpunt) wordt de effectieve halveringstijd 5,0 dagen ( $\lambda_b=0,0022 \text{ h}^{-1}$ ).

Er zijn verscheidene studies naar de biokinetiek van jodium-131 bij patiënten met schildkliercarcinoom. Vijf hiervan worden samengevat in [50] door de retentie in het lichaam als functie van de tijd weer te geven. Van de getabelleerde resultaten kan een gewogen, gemiddelde retentie in het gehele lichaam worden bepaald. De eerste 120 uren laten zich goed beschrijven met een effectieve verwijderingsconstante van  $\lambda_{eff} = 0,037 \text{ h}^{-1}$ , wat overeenkomt met  $\lambda_b=0,033 \text{ h}^{-1}$ . Omdat [50] geen latere metingen toont, wordt aangenomen dat er na 120 uur geen verdere biologische verwijdering optreedt (dus alleen nog fysisch verval).

De biologische verwijdering van het radiofarmacon MIBG vindt vrijwel volledig via de nieren plaats, met minder dan 1% excretie via fecaliën [51]. We nemen derhalve aan dat de fractie naar de urine 100% is. Van de biologische halveringstijd wordt voor neuroblastoompatiënten een waarde gerapporteerd van 13,4 h ( $\lambda_b=0,0517 \text{ h}^{-1}$ ) [52]. In die studie is 96 uur na toediening de laatste representatieve meting gedaan, daarna is vrijwel geen data. Daarom wordt aangenomen dat na deze periode geen biologische verwijdering meer optreedt.

Zowel lutetium-177 als thorium-227 worden toegepast als radio-immunotherapie. Hierbij wordt aangenomen dat beide radionucliden worden gebonden aan het peptide PSMA-617. De behandelingen vertonen hierdoor hetzelfde biokinetische gedrag. Een studie naar de behandeling van prostaatumoren met lutetium-177-PSMA-617 constateert een gemiddelde verblijftijd in het lichaam van 37,5 h [53]. Dat komt, onder toepassing van bovenstaande vergelijking voor  $\lambda_b$ , overeen met  $\lambda_b=0,0223 \text{ h}^{-1}$ . Een tweede studie, waarin prostaatkankermetastasen met lutetium-177-PSMA-617 worden behandeld, rapporteert dat 1%-5% middels fecaliën wordt uitgescheiden

en dat circa 50% van de toegediende activiteit in de eerste 48 uur via urine wordt uitgescheiden [54]. Als gemiddeld 97% via urine wordt uitgescheiden, komt dat onder toepassing van bovenstaande vergelijking voor  $f_{A,excretie}$  overeen met  $\lambda_b=0,015 \text{ h}^{-1}$ . We nemen op basis van deze twee studies aan dat 97% van de excretie via urine plaatsvindt en dat, als gemiddelde van 0,015 en 0,0223,  $\lambda_b=0,019 \text{ h}^{-1}$  gedurende de eerste 48 uur. Verder wordt aangenomen dat daarna geen biologische verwijdering meer plaatsvindt.

Van yttrium-90 ibritumomab tiuxetan (handelsnaam: Y-90 Zevalin) wordt gerapporteerd dat urine de voornaamste route voor biologische verwijdering is. Van de toegediende activiteit wordt, bij patiënten met non-Hodgkin lymfoom, 7,3% in de eerste zeven dagen via urine uitgescheiden [55]. Een tweede onderzoek mat 9,2% in zeven dagen [56]. Een derde onderzoek maakt gebruik van indium-111-Zevalin, een radiofarmacon dat zich biokinetisch gezien vergelijkbaar gedraagt als yttrium-90-Zevalin [57] [58]. Wanneer dit werd toegediend aan patiënten met non-Hodgkin lymfoom, werd 11,5% van de toegediende activiteit in de eerste zeven dagen in de urine uitgescheiden. Er trad geen meetbare excretie via fecaliën op [56] [59]. Op basis van deze gegevens wordt aangenomen dat 100% van de excretie via urine plaatsvindt en dat na zeven dagen een gemiddelde 9,3% van de toegediende activiteit is uitgescheiden. Gebruik makend van bovenstaande vergelijking voor  $f_{A,excretie}$  met  $\tau=168 \text{ h}$  (1 week) en  $f_{urine}=100\%$  komt dit overeen met een gemiddelde biologische verwijderingsconstante van  $0,00058 \text{ h}^{-1}$ . Omdat verdere data ontbreekt, wordt aangenomen dat er na deze periode geen biologische verwijdering is.

Na toediening van radium-223 in de vorm van radiumdichloride vindt excretie voornamelijk plaats via de dunne darm [60]. Producent Bayer van radiumdichloride (merknaam: Xofigo) rapporteert dat, 48 uur na injectie, de cumulatieve excretie naar fecaliën 13% is en de excretie naar urine 2% is [61]. De totale excretie na 48 uur is hiermee 15%. De fractie van biologische verwijdering die naar urine gaat is dan  $2/15 = 13,3\%$ . Verder geeft Bayer aan dat circa 63% van de activiteit na 7 dagen uit het lichaam is verwijderd, waarbij is gecorrigeerd voor fysisch verval [61]. Toepassing van bovenstaande vergelijking voor  $f_{A,excretie}$  voor alle excretiepaden samen ( $f_{excretie} = 100\%$ ) geeft  $\lambda_b = 0,0059 \text{ h}^{-1}$ . Deze waarde komt overeen met een effectieve halveringstijd van 82 h, de waarde die ook naar voren komt uit een enquête onder academische en topklinische medische centra.<sup>1</sup> We nemen aan dat deze waarde ook op latere tijden van toepassing is.

<sup>1</sup> ANVS, persoonlijke mededeling, 15 augustus 2019

Tabel 15: Biokinetiek van geselecteerde therapieën. Als het biokinetisch gedrag beschreven wordt met twee opeenvolgende biologische verwijderingsconstanten, is dat weergegeven met  $\lambda_{b1}$  en  $\lambda_{b2}$ , waarbij de overgang plaatsvindt op  $T_{over}$ . De laatste kolom geeft de fractie van biologische verwijdering die naar de urine gaat. Radionucliden die als vervuiling worden toegediend zijn cursief gedrukt.

Therapie	Radionuclide (veral)	Farmacon/toedieningsvorm	$\lambda_{b1}$ [ $h^{-1}$ ]	$T_{over}$ [h]	$\lambda_{b2}$ [ $h^{-1}$ ]	$f_{urine}$ (-)
Radio-embolisatie (lever)	Ho-166 ( $\beta^-$ , $\gamma$ )	Microsferen	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Radio-embolisatie (lever)	Y-90 ( $\beta^-$ )	Microsferen	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Hyperthyreoïdie (klinisch)	I-131 ( $\beta^-$ , $\gamma$ )	Natriumjodide, oraal/intraveneus	0,043	17,1	0,0022	99%
Schildklier carcinoom	I-131 ( $\beta^-$ , $\gamma$ )	Natriumjodide, oraal/intraveneus	0,033	120	0	99%
Neuroblastoom (bij kinderen)	I-131 ( $\beta^-$ , $\gamma$ )	MIBG, intraveneus	0,0517	96	0	100%
Radio-immunotherapie	Lu-177 ( $\beta^-$ , $\gamma$ )	PSMA, intraveneus	0,019	48	0	97%
	<i>Lu-177m (<math>\gamma</math>)</i>	<i>idem</i>	0,019	48	0	97%
Radio-immunotherapie	Th-227 ( $\alpha$ , $\gamma$ )	PSMA, intraveneus	0,019	48	0	97%
Radio-immunotherapie	Y-90 ( $\beta^-$ )	Y-ibritumomab tiuxetan	0,00058	168	0	100%
Botmetastasen	Ra-223 ( $\alpha$ , $\gamma$ )	Radiumdichloride, intraveneus	0,0059	n.v.t.	n.v.t.	13,3%
Brachytherapie	I-125 ( $\epsilon$ , $\gamma$ )	Zaadjes	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

#### A.4 Inhalatiedosis as

We nemen aan dat een persoon vanaf een tijdstip  $t_1$  in een ruimte verblijft waarin as opstuift of is opgestoven. Deze persoon verblijft hier gedurende een interval  $t_1 \leq t' \leq t_1 + \Delta t$  en inhaleert hierdoor as.

We nemen aan dat deze resuspensie een tijdspanne van  $\Delta t_{susp}$  duurt en dat alle geresuspendeerde activiteit zich direct homogeen over de ruimte verdeelt. De tijdsafhankelijke stofconcentratie in lucht, in  $g\ m^{-3}$ , is dan (met  $\rho_{lucht}(t_1) = 0$  en  $t_1 \leq t' \leq t_1 + \Delta t_{susp}$ ):

$$\rho_{lucht}(t') = \frac{1}{V} \int_{t_1}^{t'} \xi(s) e^{-(\lambda_d + \lambda_v) \cdot (t' - s)} ds$$

met

- $V$  het volume van de ruimte ( $125\ m^3$ );
- $\xi(s)$  de stofmassa die per tijdseenheid de lucht in suspendeert tussen  $t_1$  en  $t_1 + \Delta t_{susp}$  ( $g\ h^{-1}$ ). Vanaf  $t_1 + \Delta t_{susp}$  is  $\xi(s)$  gelijk aan 0 verondersteld;
- $\lambda_d$  de depositieconstante ( $1,4\ h^{-1}$ ). Deze kan worden gevonden door de depositiesnelheid ( $3,6\ m\ h^{-1}$ ) te delen door de hoogte van de ruimte ( $2,5\ m$ ), onder de aanname dat depositie door gravitatie domineert. De depositiesnelheid is een benadering van gemeten waarden voor deeltjes met een diameter van  $5\ \mu m$  [62];
- $\lambda_v$  het ventilatievoud van de ruimte ( $1\ h^{-1}$ );

Bovenstaande stofconcentratie is het gemiddelde voor de gehele ruimte; de lokale stofconcentratie waaraan de aanwezige persoon wordt blootgesteld kan hiervan verschillen. Daarnaast zal het gebruik van persoonlijke beschermingsmiddelen, zoals een stofmasker, de blootstelling beperken. Verder is slechts een deel van het stof fijn genoeg om de longblaasjes te bereiken (respirabel). Tot slot kan de blootgestelde persoon een deel van de tijd afwezig zijn. De massa respirabel stof die door de persoon wordt ingeademd, is daarom:

$$m_{resp}(t') = \frac{1}{V} I f_{resp} f_{pbm} cor_{lucht} \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t'} \xi(s) e^{-(\lambda_d + \lambda_v) \cdot (t' - s)} ds dt'$$

- $I$  het inhalatietempo ( $1,4\ m^3\ h^{-1}$  voor een volwassene tijdens lichte werkzaamheden) [31];
- $f_{resp}$  de respirabele fractie, gedefinieerd als de massafractie van het stof in de lucht die de longblaasjes kan bereiken bij inademing (-);
- $f_{pbm}$  de beschermingsfactor door persoonlijke beschermingsmaatregelen zoals een mondkapje. Het gebruik van persoonlijke beschermingsmiddelen is gewenst, maar wordt conservatief verwaarloosd ( $f_{pbm} = 1$ ) omdat men deze kan vergeten te gebruiken;
- $cor_{lucht}$  de correctiefactor voor luchtconcentratie rondom de receptor (-). Hiermee wordt gecorrigeerd voor het feit dat de luchtconcentratie rondom de persoon hoger kan zijn dan de gemiddelde luchtconcentratie in de ruimte.

Voor dit onderzoek nemen we aan dat resuspensie instantaan optreedt ( $\Delta t_{susp} \rightarrow 0$ ) op  $t_1$ , met een totale massa  $\xi_0 \Delta t_{susp}$  (g). Bovenstaande vergelijking kan dan worden opgelost als:

$$m_{resp}(t') = \frac{\xi_0 \Delta t_{susp}}{V(\lambda_v + \lambda_d)} f_{resp} f_{pbm} f_{exp,inh} cor_{lucht} I (1 - e^{-(\lambda_v + \lambda_d)(t' - t_1)})$$

Deze vergelijking voor  $m_{resp}$  kan worden geïjkt als bekend is hoeveel respirabel stof een werknemer na een zekere tijd heeft geïnhaleerd. Bij onderzoek naar de stofconcentratie in crematoria is dit gemeten. De uitkomsten lagen onder de detectielimiet (0,3 mg/filter,  $t' = 23$  minuten) [30]. We nemen op basis hiervan conservatief aan dat de werknemer na 23 minuten 0,3 mg heeft geïnhaleerd. Als we vervolgens aannemen dat een werknemer oneindig lang wordt blootgesteld aan deze as, zou circa 0,5 mg respirabel stof worden geïnhaleerd.

Op basis van onderzoek naar de stofblootstelling in een Nederlands crematorium [63] [64] wordt geschat dat een werknemer gedurende 4 minuten wordt blootgesteld aan  $2,5 \text{ mg m}^{-3}$  respirabel stof. Met een inhalatietempo van  $1,4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  komt dit overeen met 0,2 mg.

Omdat crematoria onderling behoorlijk verschillen, zowel in constructie als werkwijze, wordt op basis van bovenstaande resultaten conservatief aangenomen dat de werknemer 1 mg respirabel stof inhaleert. Deze waarde sluit aan op eerder onderzoek naar inhalatie van radioactief materiaal in crematoria [21]. Hiermee is de inhalatiedosis ( $\mu\text{Sv}$ ), voor een persoon die op  $t_1$  een handeling uitvoert waarbij as opstuift:

$$E_{inh} = e_{inh} C_{as}(t_1) m_{resp} \times 10^{12}$$

met

$e_{inh}$  de volgdoosiscoëfficiënt inhalatie, afhankelijk van de leeftijdscategorie (Sv/Bq);

$m_{resp}$  de massa respirabel, geïnhaleerd as (0,001 g).

## A.5 Weegfactoren voor dosisconversiecoëfficiënten

Een aantal van de beschouwde radionucliden vervalt naar dochters die op hun beurt ook radioactief zijn. Hierdoor dragen ook dochters bij aan doses. Binnen dit onderzoek speelt dit voornamelijk een rol bij radium-223 en thorium-227: beide hebben een reeks van radioactieve dochters.

De dosisbijdragen die moeder en dochters leveren, worden meegenomen door deze te wegen en een samengestelde dosiscoëfficiënt  $DC_{tot}$  te construeren [65]. Deze methode wordt toegepast op dosiscoëfficiënten  $h_V(10)$ ,  $h_V(0,07)$ ,  $DC_h$ ,  $h(0,07)$ ,  $e_{ing}$  en  $e_{inh}$ .

$$DC_{tot} = \sum_{i=0}^n DC_i w_i$$

met

- $DC_i$  de dosiscoëfficiënt van de moeder ( $i=0$ ) en haar dochters  
 $i=1,2,\dots$ ;
- $w_i$  een weegfactor per radionuclide, afhankelijk van het beschouwde  
moedernuclide en gegeven door [65]. De dosiscoëfficiënt van de  
moeder is per definitie 1. Hierbij is uitgegaan van de  
conservatieve weegfactoren met een maximale blootstellingsduur  
van een week voor de berekeningen van de  
blootstellingsscenario's. In de luchtverspreidingsmodellen is  
afhankelijk van het blootstellingspad gekozen voor een maximale  
blootstellingsduur van een week (inhalatie, submersie) of een  
jaar (*groundshine*, ingestie);
- $n$  het aantal dochters, kleindochters, enz.

Van een aantal dosiscoëfficiënten is de waarde onbekend. Hiervan is aangenomen dat zij 0 zijn.

De gebruikte weegfactoren houden rekening met de ingroei van radioactieve dochters vanaf de start van het beschouwde scenario. De reeds ingegroeide activiteit tussen toediening en de start van het scenario wordt dus buiten beschouwing gelaten. Dit levert alleen bij thorium-227 een mogelijke onderschatting op, omdat het in een glijdend evenwicht is met de dochter radium-223. De gebruikte weegfactoren zijn daarentegen conservatief gekozen, wat hier voor deels compenseert.

De dosiscoëfficiënten voor *groundshine* en submersie van moeder en dochters worden – in geval scenario 'Luchtverspreiding crematie' – ongewogen gesommeerd, omdat de blootstellingsduur lang kan zijn.

## B Bijlage: uitgebreide resultaten

In deze bijlage worden aanvullingen getoond op de selectie van behandelingen (Hoofdstuk 2) en de berekeningen van potentiële doses (Hoofdstuk 5).

### B.1 Overige, niet-geselecteerde behandelingen

Een aantal behandelingen is geëvalueerd op verwachte doses maar niet verder onderzocht. Zij worden bij geëvalueerde academische en topklinische medische centra niet of weinig toegepast.

- Fosfor-32 wordt als fosfaat toegediend bij beenmergaandoening polycythaemia vera. Een andere toepassing van dit radionuclide is als microbrachytherapie.<sup>1</sup>
- Palladium-103 als brachytherapie.<sup>2</sup>
- Renium-186 kan, gekoppeld aan hydroxyethylidene difosfaat (HEDP), gebruikt worden voor de behandeling van prostaatkanker met uitzaaiingen in de botten.<sup>3</sup>
- Bij een ontstoken gewricht kan soms radiosynoviorthesis worden toegepast. Hierbij kunnen radionucliden renium-186, yttrium-90 en erbium-169 worden gebruikt.<sup>3</sup>
- Renium-188 kan gekoppeld worden aan HEDP als behandeling voor botmetastasen [66]. Het radionuclide kan ook worden gebruikt voor microbrachytherapie.<sup>3</sup>
- Samarium-153 kan, gekoppeld aan EDTMP (etheen-diamine-tetramethyleen-fosfaat), worden toegepast als therapie tegen botmetastasen.<sup>1</sup>

### B.2 Moment van overlijden

In de A-varianten van de scenario's is aangenomen dat de patiënt 24 uur na toediening van de activiteit overlijdt. Als de patiënt later zou overlijden, zullen de doses rondom de uitvaart ook anders zijn.

In Tabel 16 t/m Tabel 25 wordt, per behandeling, de stralingsbelasting getoond na overlijden van een patiënt, afhankelijk van de tijd die verstrijkt tussen toediening van activiteit en overlijden. Hierdoor neemt de resterende moederactiviteit af. Op basis hiervan zijn maximale doses berekend voor zowel begraving als crematie. Daarnaast is het aantal radiotoxiciteitsequivalenten (Re) gegeven voor begraving (5,5 dagen na overlijden, naar bodem, geen vergelijking met vrijstellingsgrens) en voor uitstrooien van as (35,75 dagen na overlijden, naar oppervlaktewater en bodem); deze zijn berekend met de activiteit van het toegediende (moeder)nuclide en gewogen dosiscoëfficiënten (Bijlage A.5). Voor de leesbaarheid kan de getoonde significantie groter zijn dan de werkelijke.

Voor zowel begravingen als crematies worden de doses driemaal gerapporteerd:

<sup>1</sup> ANVS, persoonlijke mededeling, 15 augustus 2019

<sup>2</sup> ANVS, persoonlijke mededeling, 17 juli 2019

- de maximale, totale effectieve dosis die enige derde gedurende het gehele scenario kan oplopen;
- idem, maar naasten en de schouwarts worden buiten beschouwing gelaten. Hierdoor komt de blootstelling van werknemers van uitvaartondernemingen en crematoria naar voren;
- de maximale, totale equivalente huiddosis die enige derde gedurende het gehele scenario kan oplopen.

Bij begravingen kunnen de werknemers van een uitvaartorganisatie worden blootgesteld aan equivalente huiddoses vergelijkbaar met de maximale huiddoses per behandeling (Tabel 5). Bij crematies is de werknemer van het crematorium juist de persoon die de hoogste huiddoses kan ontvangen (Tabel 6). De potentiële huiddoses van werknemers van uitvaartorganisaties en crematoria kunnen hierdoor worden afgelezen uit de kolom met maximale, totale equivalente huiddosis.

Ter duiding van de resultaten worden de effectieve doses vergeleken met:

- de dosislimiet van 1 mSv per jaar voor een lid van de bevolking (oranje arcering bij overschrijding);
- de niet-wettelijke dosisbeperving van 0,3 mSv per behandeling voor beroepsmatige en bevolkingsblootstelling (gele arcering bij overschrijding);
- het triviaal blootstellingsniveau van 10  $\mu$ Sv per jaar (groen gearceerd als dosis kleiner is).

De huiddosis wordt vergeleken met de limiet van 50 mSv per jaar (oranje arcering bij overschrijding).

Bij de arcering wordt geen rekening gehouden met de blootstellingscategorie van de betreffende representatieve persoon.

In de scenario's wordt het stoffelijk overschot begraven of als as uitgestrooid. Hierbij gaat een hoeveelheid radiotoxiciteitsequivalenten (Re) naar bodem, lucht en oppervlaktewater. Deze hoeveelheid wordt vergeleken met de bijbehorende vrijstellingsgrenzen.

Tabel 16: Stralingsbelasting na overlijden van een patiënt na toediening van holmium-166 microsferen (12 000 MBq), afhankelijk van de tijd die verstrijkt tussen toediening van activiteit en overlijden. Zie Hoofdstuk B.2, p. 73 voor toelichting bij deze tabel.

Tijd tussen toediening - overlijden	Activiteit bij overlijden [MBq]	Max. E (mSv)	Max. E, excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Begraven, aantal Re naar bodem	Max. E (mSv)	Max. E excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Crematie, aantal Re naar lucht	Uitstrooien, aantal Re naar water	Uitstrooien, aantal Re naar bodem
1 d	6456	0,10	0,05	1,36	2,7E-01	0,10	0,05	19,36	1,3E-01	2,1E-09	2,1E-09
2 d	3473	0,05	0,03	0,73	1,5E-01	0,05	0,02	10,41	6,9E-02	1,1E-09	1,1E-09
4 d	1005	0,02	0,01	0,21	4,2E-02	0,01	0,01	3,01	2,0E-02	3,3E-10	3,3E-10
1 w	156	0,00	0,00	0,03	6,6E-03	0,00	0,00	0,47	3,1E-03	5,1E-11	5,1E-11
2 w	2	0,00	0,00	0,00	8,6E-05	0,00	0,00	0,01	4,0E-05	6,7E-13	6,7E-13
1 m	0	0,00	0,00	0,00	4,2E-09	0,00	0,00	0,00	2,0E-09	3,3E-17	3,3E-17
2 m	0	0,00	0,00	0,00	3,5E-17	0,00	0,00	0,00	1,7E-17	2,8E-25	2,8E-25
4 m	0	0,00	0,00	0,00	2,5E-33	0,00	0,00	0,00	1,2E-33	1,9E-41	1,9E-41
8 m	0	0,00	0,00	0,00	1,2E-65	0,00	0,00	0,00	5,7E-66	9,5E-74	9,5E-74
1 j	0	0,00	0,00	0,00	2,3E-99	0,00	0,00	0,00	1,1E-99	1,8E-107	1,8E-107
2 j	0	0,00	0,00	0,00	1,0E-197	0,00	0,00	0,00	4,9E-198	8,2E-206	8,2E-206
4 j	0	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
8 j	0	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
<b>Ho-166 microsferen (12 000 MBq)</b>		<b>Begraving</b>				<b>Crematie</b>					

**Legenda**

Waarde &gt; limiet

Eff. dosis &gt; beperking

Eff. dosis &lt; triv. niv.

Tabel 17: Stralingsbelasting na overlijden van een patiënt na toediening van yttrium-90 microsferen (4 000 MBq), afhankelijk van de tijd die verstrijkt tussen toediening van activiteit en overlijden. Zie Hoofdstuk B.2, p. 73 voor toelichting bij deze tabel.

Tijd tussen toediening - overlijden	Activiteit bij overlijden [MBq]	Max. E (mSv)	Max. E, excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. Huid (mSv)	Begraven, aantal Re naar bodem	Max. E (mSv)	Max. E excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. Huid (mSv)	Crematie, aantal Re naar lucht	Uitstrooien, aantal Re naar water	Uitstrooien, aantal Re naar bodem
1 d	3083	0,00	0,00	0,00	1,9E+00	0,00	0,00	68,89	1,1E+00	7,5E-04	7,5E-04
2 d	2376	0,00	0,00	0,00	1,5E+00	0,00	0,00	53,10	8,2E-01	5,8E-04	5,8E-04
4 d	1412	0,00	0,00	0,00	8,7E-01	0,00	0,00	31,54	4,9E-01	3,4E-04	3,4E-04
1 w	646	0,00	0,00	0,00	4,0E-01	0,00	0,00	14,44	2,2E-01	1,6E-04	1,6E-04
2 w	104	0,00	0,00	0,00	6,5E-02	0,00	0,00	2,33	3,6E-02	2,5E-05	2,5E-05
1 m	2	0,00	0,00	0,00	1,0E-03	0,00	0,00	0,04	5,6E-04	3,9E-07	3,9E-07
2 m	0	0,00	0,00	0,00	4,1E-07	0,00	0,00	0,00	2,3E-07	1,6E-10	1,6E-10
4 m	0	0,00	0,00	0,00	6,7E-14	0,00	0,00	0,00	3,7E-14	2,6E-17	2,6E-17
8 m	0	0,00	0,00	0,00	1,8E-27	0,00	0,00	0,00	1,0E-27	7,1E-31	7,1E-31
1 j	0	0,00	0,00	0,00	1,2E-41	0,00	0,00	0,00	6,9E-42	4,8E-45	4,8E-45
2 j	0	0,00	0,00	0,00	6,1E-83	0,00	0,00	0,00	3,4E-83	2,4E-86	2,4E-86
4 j	0	0,00	0,00	0,00	1,5E-165	0,00	0,00	0,00	8,5E-166	6,0E-169	6,0E-169
8 j	0	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
<b>Y-90 microsferen (4 000 MBq)</b>		<b>Begraving</b>				<b>Crematie</b>					

**Legenda**

Waarde &gt; limiet

Eff. dosis &gt; beperking

Eff. dosis &lt; triv. niv.

Tabel 18: Stralingsbelasting na overlijden van een patiënt na toediening van jodium-131 als natriumjodide bij de behandeling van hyperthyreoïdie (1 000 MBq), afhankelijk van de tijd die verstrijkt tussen toediening van activiteit en overlijden. Zie Hoofdstuk B.2, p. 73 voor toelichting bij deze tabel.

Tijd tussen toediening - overlijden	Activiteit bij overlijden [MBq]	Max. E (mSv)	Max. E, excl. naaste/ schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Begraven, aantal Re naar bodem	Max. E (mSv)	Max. E excl. naaste/ schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Crematie, aantal Re naar lucht	Uitstrooien, aantal Re naar water	Uitstrooien, aantal Re naar bodem
1 d	616	0,41	0,15	0,76	8,3E+00	0,38	0,12	35,49	7,6E+00	6,2E-01	6,2E-01
2 d	536	0,35	0,13	0,66	7,2E+00	0,33	0,10	30,90	6,6E+00	5,4E-01	5,4E-01
4 d	406	0,27	0,10	0,50	5,5E+00	0,25	0,08	23,42	5,0E+00	4,1E-01	4,1E-01
1 w	268	0,18	0,06	0,33	3,6E+00	0,17	0,05	15,45	3,3E+00	2,7E-01	2,7E-01
2 w	102	0,07	0,02	0,13	1,4E+00	0,06	0,02	5,85	1,2E+00	1,0E-01	1,0E-01
1 m	11	0,01	0,00	0,01	1,5E-01	0,01	0,00	0,64	1,4E-01	1,1E-02	1,1E-02
2 m	0	0,00	0,00	0,00	2,3E-03	0,00	0,00	0,01	2,1E-03	1,7E-04	1,7E-04
4 m	0	0,00	0,00	0,00	5,7E-07	0,00	0,00	0,00	5,2E-07	4,2E-08	4,2E-08
8 m	0	0,00	0,00	0,00	3,4E-14	0,00	0,00	0,00	3,1E-14	2,5E-15	2,5E-15
1 j	0	0,00	0,00	0,00	9,8E-22	0,00	0,00	0,00	8,9E-22	7,2E-23	7,2E-23
2 j	0	0,00	0,00	0,00	1,0E-43	0,00	0,00	0,00	9,1E-44	7,4E-45	7,4E-45
4 j	0	0,00	0,00	0,00	1,0E-87	0,00	0,00	0,00	9,5E-88	7,7E-89	7,7E-89
8 j	0	0,00	0,00	0,00	1,1E-175	0,00	0,00	0,00	1,0E-175	8,5E-177	8,5E-177
<b>I-131 hyperthyr., klinisch (1 000 MBq)</b>		<b>Begraving</b>				<b>Crematie</b>					

**Legenda**

Waarde &gt; limiet

Eff. dosis &gt; beperking

Eff. dosis &lt; triv. niv.

Tabel 19: Stralingsbelasting na overlijden van een patiënt na toediening van jodium-131 als natriumjodide bij de behandeling van schildkliercarcinoom (7 400 MBq), afhankelijk van de tijd die verstrijkt tussen toediening van activiteit en overlijden. Zie Hoofdstuk B.2, p. 73 voor toelichting bij deze tabel.

Tijd tussen toediening - overlijden	Activiteit bij overlijden [MBq]	Max. E (mSv)	Max. E, excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Begraven, aantal Re naar bodem	Max. E (mSv)	Max. E excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Crematie, aantal Re naar lucht	Uitstrooien, aantal Re naar water	Uitstrooien, aantal Re naar bodem
1 d	3063	1,76	0,63	10,93	4,1E+01	1,66	0,51	176,60	3,8E+01	3,1E+00	3,1E+00
2 d	1268	0,73	0,26	4,53	1,7E+01	0,69	0,21	73,09	1,6E+01	1,3E+00	1,3E+00
4 d	217	0,12	0,04	0,78	2,9E+00	0,12	0,04	12,52	2,7E+00	2,2E-01	2,2E-01
1 w	76	0,04	0,02	0,07	1,0E+00	0,04	0,01	4,36	9,3E-01	7,6E-02	7,6E-02
2 w	41	0,02	0,01	0,04	5,6E-01	0,02	0,01	2,38	5,1E-01	4,1E-02	4,1E-02
1 m	10	0,01	0,00	0,01	1,4E-01	0,01	0,00	0,60	1,3E-01	1,0E-02	1,0E-02
2 m	1	0,00	0,00	0,00	1,0E-02	0,00	0,00	0,04	9,5E-03	7,8E-04	7,8E-04
4 m	0	0,00	0,00	0,00	5,9E-05	0,00	0,00	0,00	5,3E-05	4,3E-06	4,3E-06
8 m	0	0,00	0,00	0,00	1,8E-09	0,00	0,00	0,00	1,7E-09	1,4E-10	1,4E-10
1 j	0	0,00	0,00	0,00	3,7E-14	0,00	0,00	0,00	3,3E-14	2,7E-15	2,7E-15
2 j	0	0,00	0,00	0,00	7,2E-28	0,00	0,00	0,00	6,5E-28	5,3E-29	5,3E-29
4 j	0	0,00	0,00	0,00	2,7E-55	0,00	0,00	0,00	2,5E-55	2,0E-56	2,0E-56
8 j	0	0,00	0,00	0,00	4,0E-110	0,00	0,00	0,00	3,7E-110	3,0E-111	3,0E-111
<b>I-131 schildkliercarc. (7 400 MBq)</b>		<b>Begraving</b>				<b>Crematie</b>					

<b>Legenda</b>	
Waarde	> limiet
Eff. dosis	> beperking
Eff. dosis	< triv. niv.

Tabel 20: Stralingsbelasting na overlijden van een patiënt na toediening van jodium-131-MIBG (11 000 MBq), afhankelijk van de tijd die verstrijkt tussen toediening van activiteit en overlijden. Zie Hoofdstuk B.2, p. 73 voor toelichting bij deze tabel.

Tijd tussen toediening - overlijden	Activiteit bij overlijden [MBq]	Max. E (mSv)	Max. E, excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Begraven, aantal Re naar bodem	Max. E (mSv)	Max. E excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Cremeratie, aantal Re naar lucht	Uitstrooien, aantal Re naar water	Uitstrooien, aantal Re naar bodem
1 d	2917	1,67	0,60	15,31	3,9E+01	1,58	0,49	168,21	3,6E+01	2,9E+00	2,9E+00
2 d	774	0,44	0,16	4,06	1,0E+01	0,42	0,13	44,61	9,5E+00	7,7E-01	7,7E-01
4 d	54	0,03	0,01	0,29	7,3E-01	0,03	0,01	3,14	6,7E-01	5,4E-02	5,4E-02
1 w	42	0,02	0,01	0,04	5,7E-01	0,02	0,01	2,42	5,2E-01	4,2E-02	4,2E-02
2 w	23	0,01	0,00	0,02	3,1E-01	0,01	0,00	1,32	2,8E-01	2,3E-02	2,3E-02
1 m	6	0,00	0,00	0,01	7,8E-02	0,00	0,00	0,33	7,1E-02	5,8E-03	5,8E-03
2 m	0	0,00	0,00	0,00	5,8E-03	0,00	0,00	0,02	5,3E-03	4,3E-04	4,3E-04
4 m	0	0,00	0,00	0,00	3,3E-05	0,00	0,00	0,00	3,0E-05	2,4E-06	2,4E-06
8 m	0	0,00	0,00	0,00	1,0E-09	0,00	0,00	0,00	9,3E-10	7,6E-11	7,6E-11
1 j	0	0,00	0,00	0,00	2,0E-14	0,00	0,00	0,00	1,9E-14	1,5E-15	1,5E-15
2 j	0	0,00	0,00	0,00	4,0E-28	0,00	0,00	0,00	3,6E-28	2,9E-29	2,9E-29
4 j	0	0,00	0,00	0,00	1,5E-55	0,00	0,00	0,00	1,4E-55	1,1E-56	1,1E-56
8 j	0	0,00	0,00	0,00	2,2E-110	0,00	0,00	0,00	2,0E-110	1,7E-111	1,7E-111
<b>I-131-MIBG (11 000 MBq)</b>		<b>Begraving</b>				<b>Cremeratie</b>					

**Legenda**

Waarde &gt; limiet

Eff. dosis &gt; beperking

Eff. dosis &lt; triv. niv.

Tabel 21: Stralingsbelasting na overlijden van een patiënt na toediening van lutetium-177-PSMA (6 000 MBq), afhankelijk van de tijd die verstrijkt tussen toediening van activiteit en overlijden. Zie Hoofdstuk B.2, p. 73 voor toelichting bij deze tabel.

Tijd tussen toediening - overlijden	Activiteit bij overlijden [MBq]	Max. E (mSv)	Max. E, excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Begraven, aantal Re naar bodem	Max. E (mSv)	Max. E excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Crematie, aantal Re naar lucht	Uitstrooien, aantal Re naar water	Uitstrooien, aantal Re naar bodem
1 d	3428	0,24	0,09	5,46	1,0E+00	0,23	0,07	162,85	2,3E+00	4,6E-02	4,6E-02
2 d	1958	0,14	0,05	3,12	5,8E-01	0,13	0,04	93,01	1,3E+00	2,7E-02	2,7E-02
4 d	1589	0,11	0,04	0,42	4,7E-01	0,11	0,03	75,54	1,1E+00	2,2E-02	2,2E-02
1 w	1162	0,08	0,03	0,31	3,4E-01	0,08	0,02	55,30	7,9E-01	1,7E-02	1,7E-02
2 w	561	0,04	0,01	0,15	1,7E-01	0,04	0,01	26,76	3,9E-01	8,9E-03	8,9E-03
1 m	106	0,01	0,00	0,03	3,3E-02	0,01	0,00	5,21	8,7E-02	3,0E-03	3,0E-03
2 m	6	0,00	0,00	0,01	3,0E-03	0,00	0,00	0,41	1,8E-02	1,5E-03	1,5E-03
4 m	1	0,00	0,00	0,00	1,3E-03	0,00	0,00	0,15	1,1E-02	1,1E-03	1,1E-03
8 m	0	0,00	0,00	0,00	7,5E-04	0,00	0,00	0,09	6,8E-03	6,6E-04	6,6E-04
1 j	0	0,00	0,00	0,00	4,4E-04	0,00	0,00	0,05	4,0E-03	3,9E-04	3,9E-04
2 j	0	0,00	0,00	0,00	9,1E-05	0,00	0,00	0,01	8,2E-04	8,0E-05	8,0E-05
4 j	0	0,00	0,00	0,00	3,9E-06	0,00	0,00	0,00	3,5E-05	3,4E-06	3,4E-06
8 j	0	0,00	0,00	0,00	7,2E-09	0,00	0,00	0,00	6,5E-08	6,3E-09	6,3E-09
<b>Lu-177-PSMA (6 000 MBq)</b>		<b>Begraving</b>				<b>Crematie</b>					

<b>Legenda</b>	
Waarde	> limiet
Eff. dosis	> beperking
Eff. dosis	< triv. niv.

Tabel 22: Stralingsbelasting na overlijden van een patiënt na toediening van thorium-227-PSMA (7 MBq), afhankelijk van de tijd die verstrijkt tussen toediening van activiteit en overlijden. Zie Hoofdstuk B.2, p. 73 voor toelichting bij deze tabel.

Tijd tussen toediening - overlijden	Activiteit bij overlijden [MBq]	Max. E (mSv)	Max. E, excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Begraven, aantal Re naar bodem	Max. E (mSv)	Max. E excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Crematie, aantal Re naar lucht	Uitstrooien, aantal Re naar water	Uitstrooien, aantal Re naar bodem
1 d	4	0,00	0,00	1,46	2,1E-01	0,04	0,02	64,26	4,8E+01	6,9E-02	6,9E-02
2 d	3	0,00	0,00	0,89	1,3E-01	0,02	0,01	39,25	2,9E+01	4,2E-02	4,2E-02
4 d	2	0,00	0,00	0,00	1,2E-01	0,02	0,01	36,45	2,7E+01	3,9E-02	3,9E-02
1 w	2	0,00	0,00	0,00	1,1E-01	0,02	0,01	32,63	2,4E+01	3,5E-02	3,5E-02
2 w	2	0,00	0,00	0,00	8,3E-02	0,01	0,01	25,19	1,9E+01	2,7E-02	2,7E-02
1 m	1	0,00	0,00	0,00	4,6E-02	0,01	0,00	13,94	1,0E+01	1,5E-02	1,5E-02
2 m	0	0,00	0,00	0,00	1,5E-02	0,00	0,00	4,60	3,4E+00	5,0E-03	5,0E-03
4 m	0	0,00	0,00	0,00	1,6E-03	0,00	0,00	0,50	3,7E-01	5,4E-04	5,4E-04
8 m	0	0,00	0,00	0,00	2,0E-05	0,00	0,00	0,01	4,4E-03	6,4E-06	6,4E-06
1 j	0	0,00	0,00	0,00	1,9E-07	0,00	0,00	0,00	4,3E-05	6,2E-08	6,2E-08
2 j	0	0,00	0,00	0,00	2,6E-13	0,00	0,00	0,00	5,9E-11	8,5E-14	8,5E-14
4 j	0	0,00	0,00	0,00	4,9E-25	0,00	0,00	0,00	1,1E-22	1,6E-25	1,6E-25
8 j	0	0,00	0,00	0,00	1,7E-48	0,00	0,00	0,00	3,9E-46	5,6E-49	5,6E-49
<b>Th-227-PSMA (7 MBq)</b>		<b>Begraving</b>				<b>Crematie</b>					

<b>Legenda</b>	
Waarde	> limiet
Eff. dosis	> beperking
Eff. dosis	< triv. niv.

Tabel 23: Stralingsbelasting na overlijden van een patiënt na toediening van yttrium-90 ibritumomab tiuxetan (1 480 MBq), afhankelijk van de tijd die verstrijkt tussen toediening van activiteit en overlijden. Zie Hoofdstuk B.2, p. 73 voor toelichting bij deze tabel.

Tijd tussen toediening - overlijden	Activiteit bij overlijden [MBq]	Max. E (mSv)	Max. E, excl. naaste/ schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Begraven, aantal Re naar bodem	Max. E (mSv)	Max. E excl. naaste/ schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Crematie, aantal Re naar lucht	Uitstrooien, aantal Re naar water	Uitstrooien, aantal Re naar bodem
1 d	1125	0,00	0,00	0,06	7,0E-01	0,00	0,00	25,14	3,9E-01	2,7E-04	2,7E-04
2 d	855	0,00	0,00	0,04	5,3E-01	0,00	0,00	19,11	3,0E-01	2,1E-04	2,1E-04
4 d	494	0,00	0,00	0,02	3,1E-01	0,00	0,00	11,04	1,7E-01	1,2E-04	1,2E-04
1 w	217	0,00	0,00	0,01	1,3E-01	0,00	0,00	4,85	7,5E-02	5,3E-05	5,3E-05
2 w	35	0,00	0,00	0,00	2,2E-02	0,00	0,00	0,78	1,2E-02	8,5E-06	8,5E-06
1 m	1	0,00	0,00	0,00	3,4E-04	0,00	0,00	0,01	1,9E-04	1,3E-07	1,3E-07
2 m	0	0,00	0,00	0,00	1,4E-07	0,00	0,00	0,00	7,6E-08	5,4E-11	5,4E-11
4 m	0	0,00	0,00	0,00	2,2E-14	0,00	0,00	0,00	1,3E-14	8,8E-18	8,8E-18
8 m	0	0,00	0,00	0,00	6,0E-28	0,00	0,00	0,00	3,4E-28	2,4E-31	2,4E-31
1 j	0	0,00	0,00	0,00	4,1E-42	0,00	0,00	0,00	2,3E-42	1,6E-45	1,6E-45
2 j	0	0,00	0,00	0,00	2,1E-83	0,00	0,00	0,00	1,1E-83	8,1E-87	8,1E-87
4 j	0	0,00	0,00	0,00	5,1E-166	0,00	0,00	0,00	2,8E-166	2,0E-169	2,0E-169
8 j	0	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,00	0,00	0,00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
<b>Y-90 ibr. tiux. (1 480 MBq)</b>		<b>Begraving</b>				<b>Crematie</b>					

**Legenda**

Waarde &gt; limiet

Eff. dosis &gt; beperking

Eff. dosis &lt; triv. niv.

Tabel 24: Stralingsbelasting na overlijden van een patiënt na toediening van radium-223-dichloride (3,85 MBq), afhankelijk van de tijd die verstrijkt tussen toediening van activiteit en overlijden. Zie Hoofdstuk B.2, p. 73 voor toelichting bij deze tabel.

Tijd tussen toediening - overlijden	Activiteit bij overlijden [MBq]	Max. E (mSv)	Max. E, excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Begraven, aantal Re naar bodem	Max. E (mSv)	Max. E excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Crematie, aantal Re naar lucht	Uitstrooien, aantal Re naar water	Uitstrooien, aantal Re naar bodem
1 d	3	0,00	0,00	0,09	2,2E-01	0,01	0,01	79,02	1,7E+01	3,6E-02	3,6E-02
2 d	3	0,00	0,00	0,07	1,8E-01	0,01	0,01	64,52	1,4E+01	2,9E-02	2,9E-02
4 d	2	0,00	0,00	0,05	1,2E-01	0,00	0,00	43,02	9,0E+00	2,0E-02	2,0E-02
1 w	1	0,00	0,00	0,03	6,6E-02	0,00	0,00	23,42	4,9E+00	1,1E-02	1,1E-02
2 w	0	0,00	0,00	0,01	1,6E-02	0,00	0,00	5,67	1,2E+00	2,6E-03	2,6E-03
1 m	0	0,00	0,00	0,00	6,3E-04	0,00	0,00	0,22	4,6E-02	1,0E-04	1,0E-04
2 m	0	0,00	0,00	0,00	1,4E-06	0,00	0,00	0,00	1,1E-04	2,3E-07	2,3E-07
4 m	0	0,00	0,00	0,00	7,5E-12	0,00	0,00	0,00	5,6E-10	1,2E-12	1,2E-12
8 m	0	0,00	0,00	0,00	2,1E-22	0,00	0,00	0,00	1,5E-20	3,3E-23	3,3E-23
1 j	0	0,00	0,00	0,00	2,0E-33	0,00	0,00	0,00	1,4E-31	3,2E-34	3,2E-34
2 j	0	0,00	0,00	0,00	1,4E-65	0,00	0,00	0,00	1,0E-63	2,3E-66	2,3E-66
4 j	0	0,00	0,00	0,00	7,1E-130	0,00	0,00	0,00	5,3E-128	1,2E-130	1,2E-130
8 j	0	0,00	0,00	0,00	1,9E-258	0,00	0,00	0,00	1,4E-256	3,0E-259	3,0E-259
<b>Ra-223-dichloride (3,85 MBq)</b>		<b>Begraving</b>				<b>Crematie</b>					

**Legenda**

Waarde &gt; limiet

Eff. dosis &gt; beperking

Eff. dosis &lt; triv. niv.

Tabel 25: Stralingsbelasting na overlijden van een patiënt na toediening van jodium-125 brachytherapie (2 000 MBq), afhankelijk van de tijd die verstrijkt tussen toediening van activiteit en overlijden. Zie Hoofdstuk B.2, p. 73 voor toelichting bij deze tabel.

Tijd tussen toediening - overlijden	Activiteit bij overlijden [MBq]	Max. E (mSv)	Max. E, excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Begraven, aantal Re naar bodem	Max. E (mSv)	Max. E excl. naaste/schouwarts (mSv)	Max. H <sub>huid</sub> (mSv)	Crematie, aantal Re naar lucht	Uitstrooien, aantal Re naar water	Uitstrooien, aantal Re naar bodem
1 d	1977	0,02	0,01	0,04	2,8E+01	0,17	0,17	1,81	2,6E+01	2,0E+01	2,0E+01
2 d	1954	0,02	0,01	0,04	2,7E+01	0,17	0,17	1,78	2,6E+01	1,9E+01	1,9E+01
4 d	1909	0,02	0,01	0,04	2,7E+01	0,17	0,17	1,74	2,5E+01	1,9E+01	1,9E+01
1 w	1843	0,02	0,01	0,04	2,6E+01	0,16	0,16	1,68	2,4E+01	1,8E+01	1,8E+01
2 w	1698	0,02	0,01	0,03	2,4E+01	0,15	0,15	1,55	2,2E+01	1,7E+01	1,7E+01
1 m	1409	0,01	0,00	0,03	2,0E+01	0,12	0,12	1,29	1,8E+01	1,4E+01	1,4E+01
2 m	993	0,01	0,00	0,02	1,4E+01	0,09	0,09	0,91	1,3E+01	9,8E+00	9,8E+00
4 m	493	0,00	0,00	0,01	6,9E+00	0,04	0,04	0,45	6,5E+00	4,9E+00	4,9E+00
8 m	121	0,00	0,00	0,00	1,7E+00	0,01	0,01	0,11	1,6E+00	1,2E+00	1,2E+00
1 j	28	0,00	0,00	0,00	4,0E-01	0,00	0,00	0,03	3,7E-01	2,8E-01	2,8E-01
2 j	0	0,00	0,00	0,00	5,6E-03	0,00	0,00	0,00	5,2E-03	3,9E-03	3,9E-03
4 j	0	0,00	0,00	0,00	1,1E-06	0,00	0,00	0,00	1,0E-06	7,7E-07	7,7E-07
8 j	0	0,00	0,00	0,00	4,3E-14	0,00	0,00	0,00	4,0E-14	3,0E-14	3,0E-14
<b>I-125 brachyth. (2 000 MBq)</b>		<b>Begraving</b>				<b>Crematie</b>					

**Legenda**

Waarde &gt; limiet

Eff. dosis &gt; beperking

Eff. dosis &lt; triv. niv.

## Literatuur

- [1] ANVS, „ANVS attendeert crematoria op richtlijnen,” 7 augustus 2018. [Online]. Available: <https://www.autoriteitnvs.nl>. [Geopend 26 juni 2019].
- [2] RIVM, „Inventarisatie mogelijke bestaande blootstellingsituaties in Nederland. Onderzoek voor de implementatie van richtlijn 2013/59/Euratom,” 2017.
- [3] Landelijke Vereniging van Crematoria; Vereniging Ondernemingen in de Uitvaartverzorging, „Hoe omgaan met een overleden, met radionucliden behandelde persoon,” 2006.
- [4] „Wet op de lijkbezorging,” [Online]. Available: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0005009/2018-08-01#HoofdstukV>. [Geopend 18 juni 2019].
- [5] ICRP, „Publication 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection,” *Ann. ICRP*, vol. 21, nr. 1-3, 1991.
- [6] F. Draaisma, „Persoondosimetrie van extremiteiten,” 2006.
- [7] ANVS, „Standaardwaarden en standaardrelaties,” 14 februari 2018. [Online]. Available: <https://www.autoriteitnvs.nl>. [Geopend 11 maart 2019].
- [8] ANVS, „ANVS-verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming,” 2018.
- [9] A. Keverling-Buisman, *Handboek Radionucliden*, 2007.
- [10] M. Tschurlovits, A. Leitner en G. Daverda, „Dose rate constants for new dose quantities,” *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 42 No. 2, pp. 77-82, 1992.
- [11] N. Petoussi-Henß, „Dose distributions in the ICRU sphere for monoenergetic photons and electrons and for ca. 800 radionuclides,” *GSF-Bericht 7*, 1993.
- [12] SSK, „Maßnahmen bei radioaktiver Kontamination der Haut,” 1989.
- [13] RIVM, „Recente ontwikkelingen in medische stralingstoepassingen: Update ioniserende straling 2018/2019,” 2019.
- [14] Dutch Society of Nuclear Medicine, *Procedure Guidelines Nuclear Medicine 2016*, 2016.
- [15] W. Fendler, C. Kratochwil, H. Ahmadzadehfar, K. Rahbar, R. Baum, M. Schmidt, A. Pfestroff, U. Lützen en V. Prasad, „Therapie mit <sup>177</sup>Lu-PSMA-617, Dosimetrie und Nachsorge beim metastasierten kastrationsresistenten Prostatakarzinom,” *Nuklearmedizin*, vol. 55, nr. 03, 2016.
- [16] Bayer, „Study to Evaluate the Safety, Tolerability, Pharmacokinetics, and Anti-tumor Activity of a Thorium-227 Labeled Antibody-chelator Conjugate, in Patients With Metastatic Castration Resistant Prostate Cancer,” 12 juni 2019. [Online]. Available: <https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT03724747>. [Geopend 21 juni 2019].
- [17] IAEA, [Online]. Available: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.

- [18] SSK, Band 43, Berechnungsgrundlage für die Ermittlung von Körper-Äquivalentdosen bei äußerer Strahlenexposition, 2017.
- [19] ICRP, „Publication 101, Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public,“ *Annals of the ICRP*, vol. 36, nr. 3, 2006.
- [20] Werkgeversvereniging Nederlandse Crematoria; CNV Dienstenbond; FNV Bondgenoten; De Unie, Arbocatalogus voor de crematoria, 2012.
- [21] NRPB, „Individual and Collective Doses from the Release of 89Sr into the Environment Following Medical Administration,“ 1989.
- [22] Australian Government, Radiation Health Committee, „Statement on Safe Handling of Deceased Persons Recently Treated with Radioactive Material,“ 2012.
- [23] Vereniging Nederlandse Gemeenten, „Handreiking Bedrijven en milieuzonering,“ 2009.
- [24] Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, „Verordening van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming van 9 januari 2018, nr. ANVS-2018/137, houdende nadere regels ter bescherming van personen tegen de gevaren van blootstelling aan ioniserende straling,“ 31 januari 2018. [Online]. Available: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2018-2035.html>. [Geopend 8 augustus 2019].
- [25] U.S. Environmental Protection Agency, „Update for Chapter 5 of the Exposure Factors Handbook, Soil and Dust Ingestion,“ in *Exposure Factors Handbook*, 2017, pp. 5-7.
- [26] VROM-Inspectie, „Signalen met betrekking tot radioactieve stoffen en straling in 2006 en 2007,“ 2008.
- [27] ICRP, „Publication 74, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation,“ *Ann. ICRP*, vol. 26, nr. 3-4, 1996.
- [28] W. Que, „Radiation safety issues regarding the cremation of the body of an I-125 prostate implant patient,“ *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, vol. 2, nr. 3, 2001.
- [29] ICRP, „Publication 98, Radiation Safety Aspects of Brachytherapy for Prostate Cancer using Permanently Implanted Sources,“ *Ann. ICRP*, vol. 35, nr. 3, 2005.
- [30] R. E. Korczynski, „Dust Exposures and Ventilation Control in the Crematorium,“ *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 12, nr. 2, 1997.
- [31] ICRP, „Publication 89, Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values,“ *Ann. ICRP*, 2002.
- [32] Lawrence Livermore National Laboratory, „HotSpot, Health Physics Codes, Version 3.0, User's Guide,“ 2014.
- [33] NRPB, „A Model for Short and Medium Range Dispersion of Radionuclides Released to the Atmosphere,“ 1979.
- [34] NRPB, „Emergency Data Handbook,“ 2002.
- [35] Calais en PJ, „Gaussian plume atmospheric modelling and radiation exposure calculations following the cremation of a deceased thyroid cancer patient treated with iodine-131,“ *J. Radiol. Prot.*, vol. 37, 2017.
- [36] „Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming,“ 1 juli 2018. [Online]. Available:

- <https://wetten.overheid.nl/BWBR0040179/2018-07-01>.  
[Geopend 21 juni 2019].
- [37] „Nota van toelichting besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming,” 21 maart 2017. [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/besluiten/2017/03/21/bijlage-2-nota-van-toelichting-besluit-basisveiligheidsnormen-stralingsbescherming>. [Geopend 15 juli 2019].
- [38] ICRP, „Publication 94, Release of Patients after Therapy with Unsealed Radionuclides,” *Ann. ICRP*, vol. 34, nr. 2, 2004.
- [39] Europese Commissie, „Stralingsbescherming 97, Stralingsbescherming na jodium-131-therapie (blootstellingen door poliklinische of ontslagen klinische patiënten),” 1998.
- [40] ICRP, „Publication 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection,” *Ann. ICRP*, vol. 37, nr. 2-4, 2007.
- [41] Integraal Kankercentrum Nederland, „Colorectaal carcinoom,” 16 april 2014. [Online]. Available: <https://www.oncoline.nl/colorectaalcarcinoom>. [Geopend 19 september 2019].
- [42] Uitvaart, „Crematiecijfers,” [Online]. Available: : <https://www.uitvaart.nl/infotheek/achtergronden/crematiecijfers>. [Geopend 2 september 2019].
- [43] NRPB, „Assessment of Skin Doses,” *Documents of the NRPB*, vol. 8, nr. 3, 1997.
- [44] R. Barker, „Performance of Protective Clothing: A Symposium Sponsored by ASTM Committee F-23 on Protective Clothing,” Raleigh, NC, VS, 1986.
- [45] R. McGinnis, „Rad Pro Calculator,” [Online]. Available: <http://www.radprocalculator.com/Gamma.aspx>. [Geopend 20 juni 2019].
- [46] ICRP, „Publication 137, Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3,” *Ann. ICRP*, nr. 46(3/4).
- [47] The American Thyroid Association Taskforce on Radioiodine Safety, „Radiation Safety in the Treatment of Patients with Thyroid Diseases by Radioiodine-131I: Practice Recommendations of the American Thyroid Association,” *Thyroid*, vol. 21, nr. 4, 2011.
- [48] G. Berg, A. Michanek, E. Holmberg en M. Fink, „Iodine-131 treatment of hyperthyroidism: Significance of effective half-life measurements,” *The Journal of Nuclear Medicine*, vol. 37, nr. 2, 1996.
- [49] P. Steward, „An Excel-Based System to Manage Radiation Safety for the Family of Patients Undergoing 131I Therapy,” *J Nucl Med Technol*, vol. 45, 2017.
- [50] B. Kamil, M. Tomasz, J. Paweł en L. Jadwiga, „Comparison of whole body retention of I-131 in case humans thyroid cancer between model prediction and measurement,” *Nuclear Medicine and Biomedical Imaging*, vol. 2, nr. 1, 2016.
- [51] A. Flotats, „Proposal for standardization of 123I-metaiodobenzylguanidine (MIBG) cardiac sympathetic imaging by the EANM Cardiovascular Committee and the European Council of Nuclear Cardiology,” *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, vol. 37, nr. 9, 2010.

- [52] A. Wafelman, C. Hoefnagel, H. Maessen, R. Maes en J. Beijnen, „Renal excretion of iodine-131 labelled meta-iodobenzylguanidine and metabolites after therapeutic doses in patients suffering from different neural crest-derived tumours,” *European Journal of Nuclear Medicine*, vol. 24, nr. 5, 1997.
- [53] L. Kabasakal, „Lu-177-PSMA-617 prostate-specific membrane antigen inhibitor therapy in patients with castration-resistant prostate cancer: stability, bio-distribution and dosimetry,” *Molecular imaging and radionuclide therapy*, vol. 26, nr. 2, 2017.
- [54] C. Kratochwil, „PSMA-targeted radionuclide therapy of metastatic castration-resistant prostate cancer with 177Lu-labeled PSMA-617,” *Journal of Nuclear Medicine*, vol. 57, nr. 8, pp. 1170-1176, 2016.
- [55] G. Wiseman, B. Leigh en W. Erwin, „Urinary clearance of 90Y activity following Zevalin radioimmunotherapy of B-cell non-Hodgkin’s lymphoma [abstract],” *J Nucl Med*, vol. 42( Suppl), p. 268P, 2001.
- [56] G. Wiseman, E. Kornmehl en B. Leigh, „Radiation Dosimetry Results and Safety Correlations from 90Y-Ibritumomab Tiuxetan Radioimmunotherapy for Relapsed or Refractory Non-Hodgkin’s Lymphoma: Combined Data from 4 Clinical Trials,” *J Nucl Med*, vol. 44, 2003.
- [57] O. Gansow, „Newer approaches to the radiolabeling of monoclonal antibodies by use of metal chelates,” *Int J Rad Appl Instrum [B]*, vol. 18, 1991.
- [58] P. Chinn, „Pre-clinical evaluation of 90Y-labeled anti-CD20 monoclonal anti-body for treatment of non-Hodgkin’s lymphoma,” *Int J Oncol*, vol. 15, 1999.
- [59] G. Wiseman, „Phase I/II 90Y-Zevalin (yttrium-90 ibritumomab tiuxetan, IDEC-Y2B8) radioimmunotherapy dosimetry results in relapsed or refractory non-Hodgkin’s lymphoma,” *European Journal of Nuclear Medicine*, vol. 27, nr. 7, p. 766-777, 2000 .
- [60] M. Harrison, T. Wong en A. Armstrong, „Radium-223 chloride: a potential new treatment for castration-resistant prostate cancer patients with metastatic bone disease,” *Cancer Manag Res*, vol. 5, 2013.
- [61] Bayer HealthCare, „Indications and usage,” 2018. [Online]. Available: [http://labeling.bayerhealthcare.com/html/products/pi/Xofigo\\_PI.pdf](http://labeling.bayerhealthcare.com/html/products/pi/Xofigo_PI.pdf). [Geopend 6 augustus 2019].
- [62] T. Thatcher en D. Layton, „Deposition, Resuspension, and Penetration of Particles within a Residence,” *Atmospheric Environment*, vol. 29, nr. 13, 1995.
- [63] S. Hilhorst, R. Houba en V. Zaat, „Onderzoek naar de blootstelling aan stof en zware metalen bij werkzaamheden in crematoria,” *Tijdschrift voor toegepaste Arbowetenschap*, nr. 3-4, 2013.
- [64] S. Hilhorst, R. Houba en V. Zaat, „Onderzoek naar stofblootstelling bij werkzaamheden in een crematorium – Stoffelijke overschot?,” in *23e NVvA symposium Hypes: waar of waardeloos?*, Zeist, 2014.
- [65] T. Van Dillen, A. Van Dijk, A. Kloosterman, F. Russo en C. Mommaert, „Accounting for ingrowth of radioactive progeny in

- dose assessments: generic weighting factors for dose coefficients," *J. Radiol. Prot.*, vol. in press, 2019.
- [66] H. Palmedo, S. Guhlke, H. Bender en J. Sartor, „Dose escalation study with rhenium-188 hydroxyethylidene diphosphonate in prostate cancer patients with osseous metastases," *European Journal of Nuclear Medicine*, vol. 27, nr. 2, 2000.
- [67] J. Longo, S. Lutz en C. Johnstone, „Samarium-153-ethylene diamine tetramethylene phosphonate, a beta-emitting bone-targeted radiopharmaceutical, useful for patients with osteoblastic bone metastases," *Cancer Manag Res.*, vol. 5, p. 235–242, 2013.
- [68] Nederlands Huisartsen Genootschap, „NHG-Standaard Schildklierandoeningen," [Online]. Available: <https://www.nhg.org/?tmp-no-mobile=1&q=node/1764#idp14768>. [Geopend 19 september 2019].
- [69] Centraal Bureau voor de Statistiek, [Online]. Available: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/>. [Geopend 19 september 2019].
- [70] Integraal Kankercentrum Nederland, „Cijfers over Kanker," [Online]. Available: [www.cijfersoverkanker.nl](http://www.cijfersoverkanker.nl). [Geopend 19 september 2019].
- [71] Integraal Kankercentrum Nederland, „Hepatocellulair carcinoom," 10 april 2013. [Online]. Available: <https://www.oncoline.nl/hepatocellulair-carcinoom>. [Geopend 12 september 2019].
- [72] UitvaartMedia, „Marktontwikkelingen en concurrentieverhoudingen," *UitvaartBranchemonitor*, augustus 2017.
- [73] M. Kesavan, J. Turner, D. Meyrick, S. Yeo, G. Cardaci en N. Lenzo, „Salvage Radiopeptide Therapy of Advanced Castrate-Resistant Prostate Cancer with Lutetium-177-Labeled Prostate-Specific Membrane Antigen: Efficacy and Safety in Routine Practice," *Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals*, vol. 38.

**RIVM**

*De zorg voor morgen begint vandaag*