



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

Stralingsblootstelling door registratieplichtig afval

Stralingsblootstelling door registratieplichtig afval

RIVM-rapport 2025-0022

Colofon

© RIVM 2025

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-2025-0022

Y.Z. Szeto (auteur), RIVM

L.C.J. Smulders (auteur), RIVM

Contact:

Yenny Szeto

Stralingsonderzoek, Kennis en Beleid

yenny.szeto@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van ministerie van Infrastructuur en Waterstaat in het kader van Radioactief afval

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Stralingsblootstelling door registratieplichtig afval

Registratieplichtig afval is radioactief afval waarvoor geen vergunning nodig is van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS). Het zendt zo weinig straling uit, dat het mag worden gestort op speciale stortplaatsen voor gevaarlijk afval. Bedrijven waar dit afval ontstaat, moeten dat wel melden bij de ANVS. Het valt daarmee onder het zogeheten controlestelsel van de Kernenergiewet.

Radioactief afval is registratieplichtig als het een heel lage hoeveelheid radioactieve stoffen bevat, die ook in de natuur voorkomen (tot een bepaald maximum, dat per stof verschilt). Deze hoeveelheid bepaalt voor een deel hoeveel straling mensen kunnen 'ontvangen' door dit registratieplichtige afval. Verder hebben het type straling en de manier waarop mensen met deze stoffen in contact komen invloed op hun blootstelling aan straling.

Boven het bepaalde maximum mag radioactief materiaal soms toch op de speciale stortplaatsen worden gestort (specifiek vrijgegeven afval). Bedrijven moeten dan wel aantonen dat de hoeveelheid straling die mensen van dat radioactieve materiaal kunnen ontvangen, niet gevaarlijk is voor de gezondheid. Dit materiaal valt dan buiten het controlestelsel, terwijl er wel meer radioactieve stoffen in zitten dan in registratieplichtig materiaal.

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) wil de regelgeving voor deze soorten zeer laag radioactief afval eenvoudiger en logischer maken, mits dit veilig kan. Daarom heeft het ministerie het RIVM gevraagd te berekenen hoeveel straling werknemers en omwonenden van stortplaatsen kunnen ontvangen door registratieplichtig afval.

Uit de berekeningen voor het jaar 2020 bleek dat de hoeveelheid straling door registratieplichtig afval in Nederland zo laag is, dat het buiten het controlestelsel zou kunnen vallen. Maar in theorie kan de hoeveelheid straling wel te hoog zijn voor wat volgens de wet is toegestaan. Daarom kan IenW nu niet zomaar besluiten om al het registratieplichtige radioactieve afval uit het controlestelsel te halen. Hoe dat wel zou kunnen, kan verder worden onderzocht.

Kernwoorden: registratieplichtig afval, activiteitsconcentratie, effectieve jaardosis, NORM, radioactieve stoffen, industrie, deponie

Synopsis

Radiation exposure from radioactive waste subject to registration

Radioactive waste for which no permit is required from the Dutch Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection (ANVS) is known as radioactive waste subject to registration (*registratieplichtig afval*). It emits so very little radiation that it can be disposed of at a disposal site for hazardous substances. However, companies that produce this waste must report it to the ANVS. As a result, it falls under the regulatory control of the Nuclear Energy Act.

Radioactive waste is subject to registration if it contains only a very small amount of naturally occurring radioactive substances (up to a specified limit, depending on the substance). In addition, the type of radiation and the way in which people come into contact with these substances influence the degree of radiation exposure.

Material with radioactive substances above the specified limit can sometimes still be disposed of at disposal sites (specifically cleared waste). In such cases, companies must show that the radiation levels from this material are safe for people. The material is then released from regulatory control, even though it contains more radioactive substances than radioactive waste that is subject to registration.

The Ministry of Infrastructure and Water Management wants to make the rules for this very low-level radioactive waste simpler and clearer, provided it is safe to do so. That is why the Ministry asked RIVM to calculate how much radiation workers and nearby residents could be exposed to from radioactive waste subject to registration.

Using data from 2020, calculations showed that the radiation levels in radioactive waste subject to registration in the Netherlands were so low that this type of waste could be safely released from the regulatory control. However, in theory, the amount of radiation could be higher than what is allowed by law. Therefore, the Ministry cannot simply decide to release all radioactive waste subject to registration from regulatory control. More research is needed to see how this can be done.

Keywords: radioactive waste subject to registration, activity concentration, annual effective dose, NORM, radioactive substances, industry, disposal site

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 11

- 1.1 Aanleiding — 11
- 1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen — 12
- 1.3 Onderzoeksaanpak — 12
- 1.4 Afbakening van het onderzoek — 14

2 Gebruikte gegevens — 15

- 2.1 Activiteitsconcentratie als parameter voor dosisberekeningen van bulkhoeveelheden radioactief materiaal — 15
- 2.2 Maximale activiteitsconcentraties in registratieplichtig afval — 16
- 2.3 Samenstelling van het gestort registratieplichtig afval — 17
- 2.4 Aanpassingen van parameterwaarden voor de Nederlandse deponie ('aangepaste' scenario) — 18

3 Rekenmethodes voor de effectieve jaardosis — 21

- 3.1 Registratieplichtig afval met de wettelijke maximale activiteitsconcentratie — 21
- 3.2 Gestort registratieplichtig afval met realistische activiteitsconcentratie — 22

4 Resultaten: de effectieve jaardosis ten gevolge van registratieplichtig afval bij wettelijke maximale activiteitsconcentraties — 25

- 4.1 Werken op een deponie — 25
- 4.2 Wonen vlak bij een deponie — 26

5 Resultaten: de effectieve jaardosis ten gevolge van gestort registratieplichtig afval met realistische activiteitsconcentratie — 29

- 5.1 Werken op een deponie — 29
- 5.2 Wonen vlak bij een deponie — 29

6 Discussie — 31

- 6.1 Discussie over de resultaten — 31
- 6.2 Vergelijking met eerder onderzoek door DHV en NRG — 34
- 6.3 Ontwikkelingen — 35
- 6.4 Registratieplichtig afval en het controlestelsel — 37

7 Conclusies en aanbevelingen — 39

Dankwoord — 41

Literatuur — 43

Begrippenlijst — 45

A	Grenswaarden van registratieplichtig en meldingsplichtig afval — 47
B	Samenstelling en eigenschappen van NORM-afval op de deponie — 48
C	Dosis per activiteitsconcentratie – methode en resultaten — 51
C.1	Blootstellingsscenario's en blootstellingsparameters — 51
C.2	Toegepaste rekenmethode per blootstellingsscenario — 53
C.2.1	Transport — 54
C.2.2	Werken op een deponie — 55
C.2.3	Wonen vlak bij een deponie — 57
C.3	Resultaten — 59
C.3.1	Transport — 59
C.3.2	Werken op een deponie — 60
C.3.3	Wonen vlak bij een deponie — 61
D	Dosisconversiecoëfficiënten (DCC's) — 65
D.1	Inhalatie — 65
D.2	Ingestie — 65
D.3	Externe straling — 66
D.3.1	Transport — 67
D.3.2	Werken op een deponie — 67
D.3.3	Wonen vlak bij een deponie — 67
E	Gamma-afschermingsfactor — 69
F	Reductiefactor stofconcentratie — 73
G	Resultaten: blootstellingsscenario 'Transport' — 74

Samenvatting

In verschillende Nederlandse industrieën wordt afval geproduceerd met daarin radioactieve stoffen van natuurlijke oorsprong (*naturally occurring radioactive material*, NORM). Voorbeelden van deze industrieën zijn pigmentproductie, staalproductie, olie- en gaswinning en geothermie. Afhankelijk van de samenstelling van dat afval, en met name de activiteitsconcentratie van de aanwezige radionucliden, kan dit afval op een aangewezen deponie voor gevaarlijk afval worden gestort. In het huidige beleid worden zowel registratieplichtig als specifiek vrijgegeven afval gestort op een dergelijke deponie. Het registratieplichtige afval valt onder het controlestelsel van de Kernenergiewet. Het specifiek vrijgegeven afval daarentegen valt buiten het controlestelsel, terwijl dit afval radionucliden bevat met een hogere activiteitsconcentratie dan registratieplichtig afval. Hierdoor lijkt er een inconsistentie in het beleid te zijn, omdat een strengere regelgeving van toepassing is op een afvalcategorie met een lagere activiteitsconcentratie. De graduele aanpak in de regelgeving – het principe waarbij een hoger risico leidt tot strengere eisen en meer toezicht op handelingen – betreft echter, zoals gesteld, het risico en niet de activiteitsconcentratie. Binnen deze context wordt het risico bepaald door de dosis en deze is voor registratieplichtig afval onbekend.

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat wil verkennen of het veilig zou zijn om registratieplichtig afval als categorie specifiek vrij te geven, onder voorwaarde van stort op een aangewezen deponie voor gevaarlijk afval. Hiertoe heeft het ministerie het RIVM opdracht gegeven om de stralingsrisico's van registratieplichtig afval in kaart te brengen. Dit zou de wetgeving logischer maken, omdat deze dan beter aansluit bij de graduele aanpak van risico's. Een bijkomend voordeel is dat er dan nog slechts één afvalcategorie zou zijn voor NORM-afval dat naar een aangewezen deponie mag worden afgevoerd. In dit rapport is aan de hand van verschillende blootstellingsscenario's de effectieve dosis berekend die mensen kunnen ontvangen als registratieplichtig afval op een aangewezen deponie voor gevaarlijk afval wordt gestort. Hierbij zijn de doses bepaald voor registratieplichtig afval met de wettelijk vastgestelde maximale activiteitsconcentraties én voor het registratieplichtige afval met de daadwerkelijke activiteitsconcentraties die zijn gestort op één deponie. Deze deponie ontving in de onderzochte periode veruit de grootste stroom registratieplichtig afval.

Voor dit onderzoek is gebruikgemaakt van een rekentool die de rekenmethodiek en de blootstellingsscenario's voor 'Afvoer van NORM-afval' heeft overgenomen uit het rapport *Radiation Protection 122, part 2* (RP122-II) van de Europese Commissie. Voorliggend rapport beschouwt dosisberekeningen voor twee scenario's: 'Werken op een deponie' en 'Wonen vlak bij een deponie'. Hiervoor zijn een verzameling conservatieve blootstellingsparameterwaarden uit RP122-II (het 'standaard' scenario) en een verzameling blootstellingsparameterwaarden die de Nederlandse situatie beter representeert (het 'aangepaste' scenario) gebruikt.

De effectieve doses ten gevolge van de wettelijke maximale activiteitsconcentraties zijn berekend voor de meest voorkomende radionucliden en vervalreeksen die aanwezig zijn in het registratieplichtige afval. Voor alle scenario's heeft Th-232sec de hoogst berekende effectieve jaardosis. De maximale jaardosis van Th-232sec voor de berekende 'standaard' scenario's is 2,7 mSv en 2,8 mSv (respectievelijk voor werknemers en leden van de bevolking). Voor de 'aangepaste' scenario's is de hoogste berekende jaardosis 0,7 mSv voor werknemers (Werken op een deponie) en 1,3 μ Sv voor een lid van de bevolking (Wonen vlak bij een deponie).

De blootstelling door de daadwerkelijke hoeveelheid registratieplichtig afval die gestort is op een deponie, is doorgerekend op basis van gegevens uit 2020 van één deponie. Voor 'Werken op een deponie' is een totale jaardosis berekend van 0,5 mSv ('standaard') en 0,1 mSv ('aangepast'). Een effectieve jaardosis van 0,3 mSv ('standaard') en 0,3 μ Sv ('aangepast') is gevonden voor 'Wonen vlak bij een deponie'. In alle gevallen bleek dat afval dat van pigmentproductie afkomt, veruit de grootste bijdrage leverde aan de stralingsblootstelling door registratieplichtig afval.

Op basis van de effectieve doses bij de maximale wettelijke activiteitsconcentraties kan zonder verdere analyse registratieplichtig afval niet uit het controlestelsel worden gehaald onder voorwaarde van stort. De dosis kan immers het jaardosiscriterium van 0,3 mSv overschrijden. De jaardosis door de hoeveelheid registratieplichtig afval dat in werkelijkheid werd gestort op de deponie, is volgens de scenario's die de Nederlandse praktijk beter benaderen wel lager dan 0,3 mSv.

Het RIVM beveelt aan om te onderzoeken wat de juridische, sociale en financiële gevolgen zijn van het schrappen van de categorie registratieplichtig afval. Afval dat natuurlijke radionucliden bevat met een activiteitsconcentratie boven de generieke vrijgavegrens, zou op basis van de dosis mogelijk specifiek vrijgegeven kunnen worden en zo niet meer onder het controlestelsel vallen. Het risico wordt namelijk bepaald door de dosis en niet door de activiteitsconcentratie. Daarnaast beveelt het RIVM aan om de voor- en nadelen te onderzoeken van het verhogen van het jaardosiscriterium voor specifieke vrijgave van 0,3 mSv naar 1 mSv, wat een veel gebruikt criterium is binnen de Europese Unie.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Nederland is, net als alle andere EU-lidstaten, verplicht om iedere 10 jaar een nationaal programma te publiceren voor het actuele en toekomstige beheer van radioactief afval en verbruikte splijtstoffen [1, 2]. Radioactief afval kan ook materialen bevatten met radionucliden van natuurlijke oorsprong (hierna: NORM). In 2023 heeft het Internationaal Atoomenergie Agentschap (IAEA) een document gepubliceerd, na het uitvoeren van de *Integrated Regulatory Review Service* (IRRS)-missie, met aanbeveling om de regelgeving voor het NORM-afval dat naar een aangewezen deponie voor gevaarlijk afval (hierna: deponie) wordt afgevoerd te verbeteren [3]. Deze aanbeveling is meegenomen in het concept Nationaal Programma Radioactief Afval (NPRA) 2025.

Radioactief afval wordt op basis van de activiteitsconcentratie onderverdeeld in verschillende categorieën. In het huidige Nederlandse beleid – vigerend sinds 2018 – mogen twee categorieën met NORM-afval naar een deponie worden afgevoerd [4]. Het gaat daarbij om registratieplichtig en specifiek vrijgegeven afval. Details van het huidige wettelijke kader voor deze twee categorieën staan uitvoerig beschreven in een recent gepubliceerd RIVM-rapport [5]. Registratieplichtig afval heeft vaak een lagere activiteitsconcentratie dan specifiek vrijgegeven afval en valt onder het controlestelsel van de Kernenergiewet (Kew) [6]. Het specifiek vrijgegeven afval met een hogere activiteitsconcentratie is vrijgegeven uit het controlestelsel onder voorwaarde van stort op een deponie. Een lagere activiteitsconcentratie leidt echter niet direct ook tot een lagere effectieve jaardosis.

Er lijkt sprake te zijn van een inconsistentie in het beleid, omdat een strengere regelgeving van toepassing is op een afvalcategorie met een lagere activiteitsconcentratie. De graduele aanpak in de regelgeving – het principe waarbij een hoger risico leidt tot strengere eisen en meer toezicht op handelingen – heeft echter betrekking op het risico en niet op de activiteitsconcentratie. Wanneer het risico van het registratieplichtige afval voldoende laag is, zou ook dit afval specifiek vrijgegeven kunnen worden. Daarvoor moet eerst geverifieerd worden of de lagere activiteitsconcentraties van het registratieplichtige afval overeenkomen met een lagere dosis en dus een lager risico. Als dat waar zou zijn, dan zou de wetgeving vereenvoudigd kunnen worden, omdat er dan nog slechts één afvalcategorie zou zijn voor NORM-afval. Dit zou dan in overeenstemming zijn met bovengenoemde IRRS-aanbeveling.

Momenteel wordt de stralingsbelasting voor leden van de bevolking ten gevolge van het storten van het registratieplichtige afval niet geschat. Wel zijn er in het verleden risico-analyses uitgevoerd met betrekking tot de stralingsbelasting voor werknemers en leden van de bevolking door het storten van al het NORM-afval (destijds één categorie, nu verdeeld in registratieplichtig en specifiek vrijgegeven afval) op deponieën. De laatste studie dateert uit 2005 [7] en werd uitgevoerd door DHV Milieu

en Infrastructuur BV (DHV), in samenwerking met de *Nuclear Research and consultancy Group* (NRG). In die studie is gerekend met de wettelijke maximale activiteitsconcentratie in het afval en met de hoeveelheden meldingsplichtig NORM-afval (destijds ZELA, zeer laag actief, genoemd) dat werd gestort. Vervolgens zijn op basis van die gegevens en verschillende blootstellingsscenario's dosisberekeningen uitgevoerd. De meldingsplicht stamt uit de tijd van het Besluit Stralingsbescherming (Bs) en is vergelijkbaar met de registratieplicht van het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs) [4]. Het grote verschil is dat ten tijde van de meldingsplicht voor een aantal radionucliden andere generieke vrijgavewaarden golden. De minimale en maximale activiteitsconcentraties in meldingsplichtig afval kunnen dus afwijken van de activiteitsconcentraties in registratieplichtig afval, zoals weergegeven in Tabel A.1 in bijlage A. In de studie van DHV en NRG is gerekend met de maximale activiteitsconcentratie die toentertijd gold. De stralingsbelasting door de huidige stroom registratieplichtig afval kan niet worden geschat op grond van de cijfers uit 2005. Naast dat de activiteitsconcentratiegrenzen verschillend kunnen zijn, bestaat het NORM-afval uit meer dan alleen registratieplichtig afval. Bovendien zijn de gestorte hoeveelheden veranderd.

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (I&W) heeft daarom het RIVM opdracht gegeven om onderzoek te doen naar de stralingsbelasting voor werknemers en leden van de bevolking als gevolg van de stroom registratieplichtig afval die nu op (aangewezen) deponieën mag worden gestort.

1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen

De opdrachtgever wil verkennen welke ruimte er is om registratieplichtig afval – onder voorwaarde van stort – uit het controlestelsel te halen, wanneer dat vanuit het oogpunt van de stralingsveiligheid mogelijk is. Dit zou namelijk de wetgeving vereenvoudigen. Deze studie is gedaan ter ondersteuning van die verkenning en dient om realistische stralingsrisico's van registratieplichtig afval in kaart te brengen. Daarbij zijn de volgende twee onderzoeksvragen opgesteld:

Onderzoeksvragen

Wat is de stralingsbelasting voor werknemers en leden van de bevolking als gevolg van het registratieplichtige afval:

1. dat op een aangewezen deponie voor gevaarlijk afval mag worden gestort bij de wettelijke maximale activiteitsconcentraties?
2. dat op een aangewezen deponie voor gevaarlijk afval jaarlijks daadwerkelijk wordt gestort?

1.3 Onderzoeksaanpak

Dit onderzoek is gradueel opgezet, beginnend met een *screening approach* die aansluit bij de meeste mogelijke situaties, gevolgd door een meer realistische benadering die beter aansluit bij de Nederlandse context.

Voor de beantwoording van de onderzoeksvragen zijn effectieve jaardoses door registratieplichtig afval als gevolg van verschillende

blootstellingsscenario's berekend. Hierbij is gebruikgemaakt van een methode die door de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) geschikt wordt geacht om specifieke vrijgavegrenzen te bepalen op basis van verschillende blootstellingsscenario's. Deze blootstellingsscenario's zijn overgenomen uit deel 2 van de publicatie *Radiation Protection 122* (RP122-II) [8]. De berekende effectieve jaardoses in dit voorliggend rapport worden daarnaast getoetst aan het jaardosiscriterium van 0,3 mSv. Dit criterium is één van de voorwaarden waaraan de afvalstof moet voldoen, voordat het specifiek vrijgegeven en gestort mag worden op een aangewezen deponie. Voor het afleiden van grenswaarden is het gebruikelijk om conservatieve aannames (parameterwaarden) te gebruiken om een brede dekking van verschillende blootstellingsscenario's te waarborgen (*screening approach*).

Deze 'standaard' conservatieve parameterwaarden zullen in de meeste situaties een overschatting geven van de stralingsblootstelling. De grenswaarden die hieruit voortkomen zullen dan aan de veilige kant zitten. Wanneer de effectieve doses die gerelateerd zijn aan deze grenswaarden onder het gestelde dosiscriterium liggen, is aanvullend onderzoek overbodig. Als de doses het gestelde dosiscriterium overschrijden, is er geen definitieve conclusie te trekken. Dan kan men berekeningen uitvoeren met blootstellingsparameterwaarden die representatief zijn voor die specifieke situatie (realistische benadering).

De effectieve jaardosis is bepaald door de activiteitsconcentratie te vermenigvuldigen met de dosis als gevolg van een activiteitsconcentratie van $1 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ (dosis per activiteitsconcentratie). Dit is uitgevoerd voor de meest voorkomende radionucliden die aanwezig zijn in het registratieplichtige afval voor verschillende blootstellingsscenario's onder conservatieve ('standaard') aannames én onder aannames die de Nederlandse situatie realistischer weerspiegelen. De activiteitconcentraties die gebruikt zijn, komen uit de Nederlandse wet- en regelgeving en uit data die gebruikt zijn voor eerdere RIVM-rapporten (Hoofdstuk 2).

Met behulp van de doses per activiteitsconcentratie zijn eerst de effectieve jaardoses bepaald ten gevolge van de wettelijke maximale activiteitsconcentraties voor registratieplichtig afval (de *screening approach*). Deze maximale mogelijke effectieve jaardosis die per nuclide(reeks) is berekend, geldt voor al het registratieplichtige afval. Vervolgens is met dezelfde dosis per activiteitsconcentratie de effectieve jaardosis berekend als gevolg van de jaarlijkse hoeveelheid registratieplichtig afval die daadwerkelijk op de deponie is gestort. Dit geeft een realistischer beeld van de stralingsblootstelling door registratieplichtig afval. Deze effectieve jaardosis is op elke deponie anders en verschilt daarnaast van jaar tot jaar. Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van data uit het jaar 2020 van één deponie¹. De methoden voor deze berekeningen staan beschreven in hoofdstuk 3. Tabel 1.1 geeft een overzicht van de blootstellingsscenario's en toont

¹ Tijdens het onderzoek waren alleen de volledige data van 2018 tot en met 2020 van één deponie beschikbaar. Omdat de samenstelling van het registratieplichtige afval op deze deponie niet sterk verschilde van jaar tot jaar, is besloten om enkel de data uit 2020 te gebruiken in plaats van het gemiddelde van deze drie jaren.

per methode met welke aannames (conservatief ('standaard') of realistisch ('aangepast')) de dosisberekeningen zijn uitgevoerd.

Tabel 1.1 Overzicht van de toegepaste aannames (conservatief ('standaard') of realistisch ('aangepast')) per blootstellingsscenario en methode (maximale wettelijke activiteitenconcentratie voor registratieplichtig afval en de jaarlijkse hoeveelheid registratieplichtig afval) die gebruikt zijn voor de berekening van de effectieve jaardosis door registratieplichtig afval.

Blootstellingsscenario	Maximale activiteitenconcentratie	Hoeveelheid afval
Transport ²	'standaard'	-
Werken op een deponie	'standaard' 'aangepast'	'standaard' 'aangepast'
Wonen vlak bij een deponie	'standaard' 'aangepast'	'standaard' 'aangepast'

In hoofdstuk 6 worden de resultaten bediscussieerd en getoetst aan het jaardosiscriterium van 0,3 mSv.

1.4 Afbakening van het onderzoek

De focus van dit onderzoek ligt op registratieplichtig afval. Het onderzoek is als volgt afgebakend:

- Kunstmatige radionucliden zijn buiten beschouwing gelaten.
- Alleen registratieplichtig afval dat naar een deponie wordt afgevoerd en op een deponie is gestort, is meegenomen in de dosisberekeningen. Al het andere NORM-afval dus niet.
- Enkel voor werknemers die registratieplichtig afval naar de deponie vervoeren en die op een deponie werken, is de stralingsbelasting berekend.
- Dosisberekeningen voor leden van de bevolking zijn alleen uitgevoerd voor leden die dicht bij een deponie wonen (maximaal 1 km afstand).
- Stralingsbelasting door het registratieplichtige afval op al gesloten deponieën of deponieën na hun exploitatieperiode, zijn in dit rapport niet meegenomen.
- De dosisberekeningen zijn alleen uitgevoerd voor volwassenen.
- Voor de dosisberekeningen is gebruik gemaakt van een rekentool die gebaseerd is op RP122-II. Het valideren van de methode die in de rekentool is gebruikt, valt buiten de scope van dit rapport.

² De focus van dit rapport ligt op het registratieplichtige afval op de deponie. Voor het blootstellingsscenario 'Transport' is een conservatieve schatting gemaakt van de effectieve jaardosis voor een chauffeur, uitgaande van registratieplichtig afval met de maximale wettelijk toegestane activiteitenconcentraties. De resultaten staan in Bijlage G

2 Gebruikte gegevens

Dit hoofdstuk licht de aannames en de gegevens toe, die gebruikt zijn bij het berekenen van de effectieve jaardosis als gevolg van registratieplichtig afval.

Het registratieplichtige afval komt uit diverse sectoren binnen de procesindustrie. Deze industrieën zijn uitvoerig beschreven in het RIVM-rapport over Radioactieve rest- en afvalstromen in Nederland [9]. Het afval bestaat voornamelijk uit K-40 en radionucliden uit de uranium- (U-238), actinium- (U-235) en thoriumreeks (Th-232) [8]. Zie bijlage B voor meer informatie over de aard van registratieplichtig afval. Daar staan ook de andere gemaakte aannames, bijvoorbeeld over seculair evenwicht en retentie in het lichaam.

Voor de dosisberekeningen is de activiteitsconcentratie, en niet de activiteit zelf, de relevante parameter. Daarnaast is het registratieplichtige afval ingedeeld op basis van activiteitsconcentratie. In paragraaf 2.1 leggen we eerst uit waarom deze parameter bepalend is voor bulkhoeveelheden radioactief afval. Paragraaf 2.2 toont de activiteitsconcentratie-grenswaarden voor de verschillende radionucliden uit het registratieplichtige afval.

In paragraaf 2.3 staat de samenstelling beschreven van het gestorte registratieplichtige afval die gebruikt is voor de dosisberekeningen. Hiervoor zijn gegevens uit het jaar 2020 gebruikt vanwege de beschikbare data uit een eerder RIVM-onderzoek [9].

De blootstellingsscenario's die gebruikt zijn voor de berekeningen zijn overgenomen uit RP122-II. In dat document zijn de scenario's opgedeeld in twee categorieën, waarvan alleen de scenario's uit de categorie 'Afvoer van NORM-afval' in dit rapport zijn opgenomen. Die scenario's zijn: 'Transport', 'Werken op een deponie' en 'Wonen vlak bij een deponie'. Deze studie richt zich op 'Werken op een deponie' en 'Wonen vlak bij een deponie', waarvoor twee benaderingen zijn uitgewerkt: het 'standaard' scenario en het 'aangepaste' scenario. De meeste parameterwaarden van een 'standaard' scenario zijn overgenomen uit RP122-II. Dit scenario schetst een generiek beeld van een deponie. Het 'aangepaste' scenario geeft een betere representatie van de Nederlandse situatie weer. In paragraaf 2.4 worden aan de hand van de beschrijving van de Nederlandse deponie de parameters van het 'aangepaste' scenario die verschillen van de 'standaard' parameters toegelicht. Een beknopte beschrijving van de blootstellingsscenario's en de parameters staan in bijlage C. De bijdrage van de externe straling hangt af van de gekozen geometrie. De verantwoording voor de keuzes die hierin zijn gemaakt, staan in bijlage D.3.

2.1 Activiteitsconcentratie als parameter voor dosisberekeningen van bulkhoeveelheden radioactief materiaal

Jaarlijks worden grote hoeveelheden radioactieve afvalstoffen naar de aangewezen deponieën afgevoerd. In de periode van 2018- 2020

belandde er jaarlijks gemiddeld 85.000 ton NORM-afval op de deponieën [9]. De totale activiteit die jaarlijks op een dergelijke deponie terecht komt, kan oplopen tot honderden GBq [9]. Gezien de lange halveringstijden van de relevante radionucliden uit NORM en de continue nieuwe aanvoer van afval, neemt de activiteit op de deponie van jaar tot jaar toe. Hoewel een bepaalde activiteit zich in een dosis vertaalt, is deze grootte niet alleen onpraktisch voor het vaststellen van een vrijgavewaarde³, maar ook voor de bepaling van de stralingsbelasting voor grote hoeveelheden materialen die radionucliden bevatten. Voor grote hoeveelheden is de totale activiteit namelijk ook groot, maar dat geldt niet voor de stralingsdosis: meer materiaal met radionucliden – en dus een hogere totale activiteit – leidt dan niet tot een hogere stralingsdosis. Dit geldt voor elk van de drie blootstellingswegen.

Het externe dosistempo door een grote hoeveelheid materiaal – enkele tientallen tonnen bijvoorbeeld – dat radionucliden (met uniforme activiteitsconcentratie) bevat, zal namelijk al nagenoeg gelijk zijn aan het dosistempo dat afkomstig is van een half-oneindige hoeveelheid van datzelfde materiaal [11, 12]. Nog meer materiaal leidt dan niet tot een nog hoger dosistempo. Dit komt door de zelfafscherming van de uitgezonden ioniserende straling in het betreffende materiaal. De relevante grootte die de blootstelling aan ioniserende straling (ofwel, de stralingsdosis) bepaalt, is daarom de activiteitsconcentratie (in $\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) en niet de totale activiteit (Bq).

Bij inhalatie en ingestie zal slechts een klein deel van de activiteit uit het materiaal daadwerkelijk in het lichaam terechtkomen: de activiteitsconcentratie van de binnengekegen stof bepaalt in dat geval de effectieve volgdosis door inname, en niet de totale hoeveelheid activiteit die zich in de bulkhoeveelheid bevindt.

Bij de berekeningen met activiteitsconcentraties wordt verondersteld dat de activiteit gelijkmatig over de bulkhoeveelheden is verdeeld. Deze aanname is een versimpeling van de werkelijkheid.

2.2 Maximale activiteitsconcentraties in registratieplichtig afval

Voor radionucliden uit de U-238-, U-235- en Th-232-reeksen gelden generieke vrijgavewaarden van $1 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$. Voor K-40 geldt een generieke vrijgavewaarde van $10 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ [4]. Om het afval als registratieplichtig afval te mogen afvoeren, moet de radionuclide met de hoogste individuele activiteit een activiteitsconcentratie hebben tussen éénmaal en tienmaal de generieke vrijgavewaarde [4]. Tabel 2.1 vat de wettelijke maximale activiteitsconcentraties A_{max} van deze nucliden samen. Een vervalreeks waarbij de moedernuclide in seculair evenwicht is met zijn dochternucliden, is aangeduid met 'sec'.

³ De vrijstellings- en vrijgavewaarden voor ongelimiteerde hoeveelheden radioactief materiaal zijn ook in activiteitsconcentratie uitgedrukt in het Bbs [4]. Deze zijn overgenomen uit de *Safety Reports Series no. 44* [10].

Tabel 2.1 Maximale wettelijke activiteitsconcentraties bij het afvoeren van radionucliden van natuurlijke oorsprong voor registratieplichtig afval.

Nuclide / Nucliden in vervalreeks	$A_{\max}$ [Bq·g ⁻¹]
U-235sec	10
U-238sec	10
Th-232sec	10
K-40	100

2.3

Samenstelling van het gestort registratieplichtig afval

De radionucliden binnen een vervalreeks zijn in de natuur in seculair evenwicht met hun dochternucliden. Natuurlijk uranium is een mengsel in vaste verhouding van U-235 en U-238, in seculair evenwicht met hun dochternucliden. Dat wordt aangeduid met U-natsec. Door industriële processen kan dat evenwicht worden verstoord. Hierdoor kunnen alleen een deelreeks of enkele radionucliden uit de natuurlijke vervalreeksen achterblijven. Een voorbeeld is afval met alleen de radionucliden Pb-210+ (Pb-210 inclusief zijn vervalproducten) en Po-210. Deze vluchtige radionucliden kunnen door verhitting vrijkomen uit NORM en hechten zich vervolgens aan een ander materiaal dat als afval wordt afgevoerd.

De exacte nuclidesamenstelling van het afval wordt niet geregistreerd. Bij het afvoeren van registratieplichtig afval is meestal alleen het nuclide met de hoogste individuele activiteitsconcentratie vermeld. Voor onze dosisberekeningen is daarom verondersteld dat het afval altijd U-natsec en Th-232sec bevat. Wanneer het afval nucliden bevat die afkomstig zijn uit thermische processen, is er gerekend met alleen Pb-210+ en/of Po-210. Tabel 2.2 vat de gegevens samen van het registratieplichtige afval, waarmee de effectieve jaardoses zijn berekend voor het jaar 2020⁴.

Tabel 2.2 Overzicht van het per sector afgevoerde registratieplichtig afval in het jaar 2020. Per sector zijn de afvalstoffen gegroepeerd op basis van de activiteitsconcentratie (A). Per groep zijn de massafractie (f_m) van de totale hoeveelheid NORM-afval dat is afgevoerd naar de desbetreffende deponie in dat jaar en de belangrijkste radionucliden gegeven. De totale massafractie is niet gelijk aan 1, omdat niet al het NORM-afval op de deponie registratieplichtig afval is.

Sector	A [Bq·g ⁻¹]	f_m [-]	Nuclide(reeks)
Pigmentproductie	1,5	8,37E-01	U-natsec; Th-232sec
Staalproductie	2,5	1,01E-05	Pb-210+ ; Po-210
Zirkoon	2,52	6,14E-03	U-natsec; Th-232sec
	1,9	1,11E-03	U-natsec; Th-232sec
	2,5	2,16E-04	U-natsec; Th-232sec
	1,3	4,92E-05	U-natsec; Th-232sec
	6,9	4,07E-05	U-natsec; Th-232sec

⁴ Uit de jaarrapportage van de deponie.

Sector	A [$\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$]	f_m [-]	Nuclide(reeks)
Geothermie	5,79	3,13E-05	Pb-210+ ; Po-210
	1,38	1,82E-05	Pb-210+ ; Po-210
	4,61	1,47E-05	Pb-210+ ; Po-210
	1,5	8,15E-06	Pb-210+ ; Po-210
	5,5	6,52E-06	Pb-210+ ; Po-210
	1,4	4,56E-06	Pb-210+ ; Po-210
Schrootverwerking	9,1	4,82E-05	U-natsec; Th-232sec
	1,5	2,18E-05	U-natsec; Th-232sec
	2,3	1,24E-05	U-natsec; Th-232sec
Ontmanteling, decontaminatie en bewerking	4,56	2,12E-04	U-natsec; Th-232sec
	3,86	3,26E-07	U-natsec; Th-232sec
Fosforproductie	6,6	4,92E-03	U-natsec; Th-232sec
	3,7	2,17E-04	U-natsec; Th-232sec
	1,27	1,05E-03	Pb-210+
	1,96	5,04E-04	Pb-210+ ; Po-210
	2,88	3,75E-04	U-natsec; Th-232sec
Overig	8,7	4,17E-05	U-natsec; Th-232sec
	1,38	3,75E-05	U-natsec; Th-232sec
	3,5	7,49E-06	U-natsec; Th-232sec
	10	7,49E-06	U-natsec; Th-232sec
	6	5,08E-05	U-natsec; Th-232sec
	2,71	6,84E-06	U-natsec; Th-232sec

2.4 Aanpassingen van parameterwaarden voor de Nederlandse deponie ('aangepaste' scenario)

Er zijn momenteel drie deponieën actief die zijn aangewezen als instelling voor de ontvangst van NORM-afval, én die daartoe bereid zijn [9]. Leden van de bevolking die vlak bij een dergelijke deponie wonen, zouden door dit afval een dosis kunnen ontvangen. De afstand tussen de woning en de deponie die in RP122-II is gekozen (en dus ook is verwerkt in het 'standaard' scenario) is 25 meter. In Nederland zijn er geen woningen binnen een straal van 1 km van een deponie met NORM-afval. Bij het 'aangepaste' scenario is de afstand daarom op 1 km gezet. Dit heeft invloed op de externe straling en de stofconcentratie die bij een woning in Nederland kan worden aangetroffen. Voor de externe straling is een verzwakkingsfactor Z_{ext} toegepast. De deponie is hier als een puntbron benaderd, waarbij de dosis kwadratisch afneemt met de afstand. De stofconcentratie neemt ook af met de afstand. Dit effect is verwerkt in een reductiefactor Z_{stof} . Voor de schatting van deze reductiefactor is gebruikgemaakt van een eenvoudig pluimmodel, zie bijlage F.

Deze deponieën ontvangen ook afval met andere gevaarlijke stoffen, zoals asbest en kwikverbindingen. Per deponie en per jaar wisselen het aanbod en dus de afvalsamenstelling op de deponie. Dit geldt ook voor het NORM-afval. De verhouding tussen het NORM-afval en het andere

afval op dezelfde deponie is in grote lijnen constant in de tijd, maar deze verschilt wel tussen de verschillende deponieën. De (massa)fractie van NORM-afval ten opzichte van het totale afval (f_N) varieert tussen 0,01 en 0,4. Om onderschattingen te voorkomen, hebben wij ervoor gekozen om zowel in het 'standaard' als het 'aangepaste' scenario $f_N = 0,4$ te gebruiken.

Voordat afvalstoffen aangeboden worden, wordt er eerst beoordeeld of ze binnen de vereisten van de vergunning en wet- en regelgeving verwerkt kunnen worden op deponie. Er kunnen voorwaarden verbonden zijn aan de aanlevering, bijvoorbeeld om stofemissies tijdens verwerking te minimaliseren. Wanneer het afval per vrachtwagen aankomt bij de deponie wordt het geregistreerd. Onderdeel van die registratie is het bepalen van het gewicht op de weegbrug [7]. Daarna rijdt de chauffeur door naar het stortfront. Daar wordt de vracht gelost en komt het op de stortplaats terecht. Vervolgens wordt het afval afgedekt met afdek materiaal met een laagdikte van minimaal 10 cm. Deze laag dient allereerste ter voorkoming van opstuiving van stofdeeltjes. Als het om een NORM-afvalstof gaat, zorgt deze laag ook voor de afscherming van straling. Daarnaast helpt het bij het egaliseren en stabiliseren van de afvalberg, doordat het afdek materiaal eventuele gaten opvult. In het model van RP122-II is het afdek materiaal niet meegenomen. Bij het 'aangepaste' scenario is ervoor gekozen om de minimale laagdikte van 10 cm aarde op te nemen. Voor de afscherming van externe straling door deze laag is een nieuwe parameter geïntroduceerd: gewogen gamma-afschermingsfactor (*Gamma Shielding Factor for soil*, GSF) f_{GSF} . Bijlage E beschrijft hoe deze factor is berekend.

Tijdens bedrijf, maar ook na sluiting van de deponie, zouden gevaarlijke stoffen in het afval kunnen uitloggen of verstuiven. Om dit te voorkomen, maken deponieën gebruik van verschillende strategieën. In beginsel dienen NORM-afvalstoffen verpakt te worden in 'big bags' [7]. Wanneer het afval een afwijkende vorm heeft, wordt ook gebruikgemaakt van krimpfolie. Bulkhoeveelheden die moeilijk verpakt kunnen worden, worden vochtig aangeleverd. Al deze opties dragen bij aan het sterk beperken van verstuiving, waarmee RP122-II geen rekening heeft gehouden. Minder verstuiving resulteert in een lagere stofconcentratie en ingestietempo. In de 'aangepaste' scenario's worden lagere waarden gehanteerd voor de stofconcentratie (C_{stof}) en ingestietempo (r_{ing}).

Daarnaast kunnen sterk uitlogende stoffen geïmmobiliseerd worden. In dat geval worden bindmiddelen en additieven aan de afvalstoffen toegevoegd. Het immobilisaat hardt uit en de afvalstoffen worden vastgelegd. Met als gevolg dat verspreiding van gevaarlijke stoffen wordt voorkomen en de sterk uitlogende stof toch op de deponie gestort kan worden.

Om emissies van gevaarlijke stoffen naar de bodem en het grondwater te voorkomen, worden deponieën in Nederland voorzien van onderafdichtingen [13, 14]. Tijdens bedrijf worden deze onderafdichtingen voorzien van een drainagesysteem voor de opvang van percolaatwater. Dit water wordt vervolgens gezuiverd in een waterzuiveringsinstallatie.

Het 'standaard' scenario houdt geen rekening met het immobiliseren en de onderafdichtingen. In het 'standaard' scenario vindt dus uitloging van radioactieve stoffen plaats. Deze uitgeloopte stoffen komen in lokaal verbouwde groenten en fruit terecht. Een lid van de bevolking wordt door het eten van dit voedsel blootgesteld aan een 'indirecte' ingestiedosis. Bij het 'aangepaste' scenario vindt deze uitloging niet plaats en kan indirecte ingestie daarmee uitgesloten worden.

Na de exploitatieperiode wordt de deponie in principe voorzien van een eindafwerking. Daarbij wordt gebruikgemaakt van een bovenafdichting die uit meerdere lagen bestaat: een steunlaag, een water- en gasdichte constructie, een drainagelaag en een grondlaag [\[14\]](#). Het folie is een laag waterdicht materiaal, vaak HDPE (hoge dichtheid polyethyleen), die voorkomt dat regenwater het afval kan bereiken. Het gevallen regenwater blijft dankzij de bovenafdichting schoon en hoeft daarom niet gezuiverd te worden voordat het in het oppervlaktewater wordt opgenomen.

Tijdens bedrijf (en wellicht voortgezet in de nazorg) vindt monitoring plaats om de kwaliteit van de onderafdichting, bovenafdichting en uiteindelijk de eindafwerking van de deponie op een juiste werking te controleren.

3 Rekenmethodes voor de effectieve jaardosis

Uit praktische overwegingen is ervoor gekozen om dosisschattingen te splitsen in een dosisberekening voor een activiteitsconcentratie van $1 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$, en deze vervolgens in een tweede stap te vermenigvuldigen met de beoogde activiteitsconcentratie. Hierdoor hoeft de complexe eerste stap slechts een keer uitgevoerd te worden. Het tussenresultaat is gebruikt voor de dosisberekeningen voor twee verschillende gevallen:

1. registratieplichtig afval met de wettelijke maximale activiteitsconcentraties (Paragraaf 3.1);
2. het daadwerkelijk gestorte registratieplichtig afval met realistische activiteitsconcentraties (Paragraaf 3.2).

Voor de eerste stap gebruiken we de rekentool van NRG, een implementatie van RP122-II, voor de berekening van de scenario- en nuclidespecifieke dosis per activiteitsconcentratie. De methode staat beschreven in bijlage C.2.

3.1 Registratieplichtig afval met de wettelijke maximale activiteitsconcentratie

De activiteitsconcentratie van een radionuclide mag voor registratieplichtig afval wettelijk niet hoger zijn dan 10 keer de generieke vrijgavewaarde. De maximale effectieve jaardosis per nuclide(reeks) is berekend door de dosis per activiteitsconcentratie te vermenigvuldigen met 10 keer de generieke vrijgavewaarde van de desbetreffende nuclide(reeks):

$$E = 10A_{\text{gen.vrijg}}E_m, \quad (3-1)$$

met $A_{\text{gen.vrijg}}$ de activiteitsconcentratie voor generieke vrijgave voor een bepaald nuclide. De maximale activiteitsconcentratie A_{max} die wettelijk is toegestaan voor registratieplichtig afval is dan als volgt gedefinieerd:

$$A_{\text{max}} = 10A_{\text{gen.vrijg}}. \quad (3-2)$$

Hoewel bij het toetsingsproces voor registratieplichtig afval gebruik wordt gemaakt van de hoogste activiteitsconcentratie van een radionuclide in het materiaal (Bbs [4], art. 3.17 lid 2 en art. 3.20 lid 2), is hier gekozen om de totale dosis te berekenen voor de verschillende vervalreeksen en een enkel individueel radionuclide, zoals beschreven in bijlage B. Bij blootstelling aan straling door registratieplichtig afval, ontvangt een individu namelijk niet een dosis van slechts een enkel radionuclide. Daarom is ervoor gekozen om de doses over alle nucliden van de U-natsec- en Th-232sec-reeksen (gewogen) te sommeren. Door bepaalde industriële processen is het mogelijk dat de nucliden in het afval niet meer in seculair evenwicht zijn. De doses voor die deelreeksen zijn ook een gewogen sommatie van de doses van de nucliden in de desbetreffende (deel)reeks.

Voor de berekening is gebruikgemaakt van de wettelijke maximale activiteitsconcentraties (Tabel 2.1) en de doses per activiteitsconcentratie uit bijlage C. Bij de berekening van de effectieve dosis per activiteitsconcentratie is uitgegaan van de totale massa NORM-afval op de deponie. Onder NORM-afval valt ook niet-registratieplichtig afval. Voor dit deel van het onderzoek is gekozen om de fractie registratieplichtig afval van het totale afval gelijk te stellen aan de fractie NORM-afval (verdunningsfactor f_N) van het totale afval⁵.

3.2 Gestort registratieplichtig afval met realistische activiteitsconcentratie

Voor de berekening van de totale effectieve jaardosis is eerst voor elk type afvalstof de effectieve jaardosis uitgerekend. De vergelijking van de effectieve jaardosis door een afvalstof i is:

$$E_i = \sum_j E_{m_i,j} A_{ij} f_{m_i}, \quad (3-3)$$

met $E_{m_i,j}$ de dosis per activiteitsconcentratie van nuclide j in afvalstof i , A_{ij} de activiteitsconcentratie van nuclide j in afvalstof i en f_{m_i} de fractie van de massa van afvalstof i van de totale massahoeveelheid ontvangen NORM-afval in dat jaar. De totale hoeveelheid ontvangen afval is namelijk al meegenomen in de berekening van de dosis per activiteitsconcentratie middels de verdunningsfactor f_N (zie paragraaf C.2).

Door de effectieve jaardoses over alle typen afvalstoffen te sommeren, is vervolgens de totale effectieve jaardosis berekend:

$$E = \sum_i E_i = \sum_i \sum_j E_{m_i,j} A_{ij} f_{m_i}. \quad (3-4)$$

De activiteitsconcentraties en de massafracties van de verschillende afvalstoffen die gebruikt zijn voor de berekening van de totale effectieve doses, staan in Tabel 2.2. De doses per activiteitsconcentratie zijn te vinden in bijlage C. Bij de berekeningen is verondersteld dat de radionucliden in seculair evenwicht zijn. Voor alle relevante radionucliden is de activiteitsconcentratie van de radionuclide met de hoogste individuele activiteit gebruikt voor de dosisberekeningen, waarbij de bijdragen aan de dosis binnen de nuclidereeks gewogen zijn gesommeerd.

Uit bijlage C.3 volgt dat de doses voor een werknemer per activiteitsconcentratie gelijk zijn voor alle materiaalsoorten. Voor een lid van de bevolking zijn deze doses door zand en as hoger dan die ten gevolge van steen en slak. Omdat zowel zand als as een conservatieve schatting opleveren, maar as slechts een klein deel van het afgevoerde

⁵ De verhouding tussen registratieplichtig en specifiek vrijgegeven afval varieert per jaar. Om mogelijke onderschattingen te voorkomen is voor dit onderdeel ervan uitgegaan dat al het NORM-afval registratieplichtig is. Wij gaan uit van de gegevens van het jaar 2020; in de discussie wordt nader ingegaan op de implicaties hiervan.

NORM-afval uitmaakt, is voor de berekeningen gekozen voor zand als materiaalsoort.

4 Resultaten: de effectieve jaardosis ten gevolge van registratieplichtig afval bij wettelijke maximale activiteitsconcentraties

De effectieve jaardosis per nuclide(reeks) is berekend voor de maximale activiteitsconcentratie die wettelijk is toegestaan voor registratieplichtig afval. Dit is gedaan voor de blootstellingsscenario's 'Werken op een deponie' en 'Wonen vlak bij een deponie'. De totale effectieve doses zijn gegeven voor de nuclidereeksen en enkele nucliden beschreven in bijlage B. Voor U-natsec en Th-232sec zijn de doses ook gegeven voor de drie verschillende blootstellingswegen.

Voor de volledigheid staan in bijlage G de resultaten voor het scenario 'Transport' die met de 'standaard' parameterwaarden uit RP122-II zijn berekend.

4.1 Werken op een deponie

In Tabel 4.1 en Tabel 4.2 staan de resultaten voor de effectieve doses voor werknemers die op een deponie werken ten gevolge van de maximale wettelijke activiteitsconcentraties voor registratieplichtig afval. Hierin zijn zowel de effectieve doses voor het 'standaard' scenario als het 'aangepaste' scenario weergegeven. De effectieve jaardosis is het hoogst voor Th-232sec en bedraagt 2,7 en 0,7 mSv voor respectievelijk het 'standaard' en het 'aangepaste' scenario. Externe straling is voor beide scenario's de belangrijkste blootstellingsweg. Ook hier gelden de resultaten voor alle vier de materiaalsoorten.

Tabel 4.1 Effectieve jaardoses voor werknemers op de deponie ten gevolge van de wettelijk vastgestelde maximale activiteitsconcentraties voor registratieplichtig afval dat gestort wordt op de deponie. Dit is voor het 'standaard' en het 'aangepaste' blootstellingsscenario. De dosis is gegeven per nuclide(reeks).

Nuclide(reeks)	$E_{\text{standaard}}$ [mSv]	$E_{\text{aangepast}}$ [mSv]
U-natsec	1,9E+00	4,8E-01
Th-230	7,7E-02	1,7E-03
Ra-226+	1,6E+00	4,6E-01
Pb210+	5,9E-02	3,3E-03
Po-210	3,6E-02	1,3E-03
Th-232sec	2,7E+00	6,8E-01
Th-232	1,2E-01	2,3E-03
Ra-228+	8,8E-01	2,5E-01
K-40	1,4E-01	4,1E-02

Tabel 4.2 Effectieve jaardoses voor werknemers op de deponie ten gevolge van de wettelijk vastgestelde maximale activiteitsconcentraties voor registratieplichtig afval dat gestort wordt op de deponie voor de U-natsec en Th-232sec reeksen, uitgezet per blootstellingsweg (Ext = externe straling, Inh = inhalatie, Ing = ingestie). Dit is voor het 'standaard' en het 'aangepaste' blootstellingsscenario.

Nuclidenreeks	Scenario	<i>E</i> [mSv]		
		Ext	Inh	Ing
U-natsec,	'standaard'	1,6E+00	2,5E-01	1,2E-01
	'aangepast'	4,7E-01	3,1E-03	7,2E-03
Th-232sec	'standaard'	2,2E+00	4,2E-01	7,4E-02
	'aangepast'	6,7E-01	5,2E-03	4,7E-03

4.2 Wonen vlak bij een deponie

Tabel 4.3 vat de effectieve jaardosis ten gevolge van de maximale activiteitsconcentratie voor nucliden uit het registratieplichtige afval samen voor leden van de bevolking die op een afstand van 25 meter ('standaard' scenario) of 1 km ('aangepaste' scenario) van de deponie wonen. Bij beide scenario's zijn de vier materiaalsoorten weergegeven. Bij het 'aangepaste' scenario is de blootstellingsweg via ingestie niet meer relevant. Hierdoor zijn de uitkomsten van zand en as onderling gelijk, net als die van steen en slak (zie ook bijlage C.3.3). De effectieve doses voor de drie verschillende blootstellingswegen zijn voor U-natsec en Th-232sec voor beide scenario's in Tabel 4.4 te vinden. De effectieve jaardosis is voor Th-232sec het hoogst voor materiaalsoort zand met een waarde van 2,8 mSv voor het 'standaard' scenario. Voor het 'aangepaste' scenario is de hoogste effectieve jaardosis ook voor Th-232sec, met een waarde van 1,3 µSv voor de materiaalsoorten zand en as. De dominante blootstellingsweg hangt af van de materiaalsoort en het blootstellingsscenario. Voor het 'standaard' scenario is dat voornamelijk externe straling, terwijl voor het 'aangepaste' scenario inhalatie dominant is.

Tabel 4.3 Effectieve jaardoses voor leden van de bevolking die dicht bij een deponie wonen, als gevolg van de wettelijk vastgestelde maximale activiteitsconcentraties voor registratieplichtig afval dat op de deponie wordt gestort. Dit is voor het 'standaard' en het 'aangepaste' blootstellingsscenario. De dosis is gegeven per nuclide(reeks) en per materiaalsoort.

Nuclide(reeks)	<i>E</i> _{standaard} [mSv]				<i>E</i> _{aangepast} [mSv]	
	Zand	As	Steen	Slak	Zand / As	Steen / Slak
U-natsec	9,3E-01	1,0E+00	2,1E+00	9,8E-01	8,9E-04	4,1E-04
Th-230	2,4E-02	2,9E-02	6,3E-02	1,6E-02	2,1E-04	8,8E-05
Ra-226+	7,6E-01	7,9E-01	1,0E+00	7,8E-01	1,9E-04	1,2E-04
Pb210+	3,5E-02	6,2E-02	4,5E-01	5,6E-02	8,1E-05	3,4E-05
Po-210	5,8E-02	1,1E-01	5,9E-01	1,0E-01	5,0E-05	2,1E-05
Th-232sec	1,3E+00	1,5E+00	2,8E+00	1,4E+00	1,3E-03	6,3E-04
Th-232	4,4E-02	9,5E-02	5,8E-01	7,3E-02	3,4E-04	1,4E-04
Ra-228+	4,5E-01	5,2E-01	1,6E+00	5,1E-01	2,4E-04	1,2E-04
K-40	6,9E-02	6,9E-02	6,9E-02	6,9E-02	5,9E-06	5,9E-06

Tabel 4.4 Effectieve jaardoses voor leden van de bevolking die dicht bij een deponie wonen, als gevolg van de wettelijk vastgestelde maximale activiteitsconcentraties voor registratieplichtig afval dat op de deponie wordt gestort voor de U-natsec- en Th-232sec-reeksen, uitgezet per blootstellingsweg (Ext = externe straling, Inh = inhalatie, Ing = ingestie) en per materiaalsoort. Dit is voor het 'standaard' en het 'aangepaste' blootstellingsscenario.

soort	Nucliden-reeks	$E_{\text{standaard}}$ [mSv]			$E_{\text{aangepast}}$ [mSv]	
		Ext	Inh	Ing	Ext	Inh
zand	U-natsec	7,6E-01	8,2E-02	9,3E-02	6,1E-05	8,3E-04
	Th-232sec	1,2E+00	1,4E-01	3,9E-02	1,0E-04	1,2E-03
as	U-natsec	7,6E-01	8,2E-02	1,9E-01	6,1E-05	8,3E-04
	Th-232sec	1,2E+00	1,4E-01	1,6E-01	1,0E-04	1,2E-03
steen	U-natsec	7,6E-01	4,0E-02	1,3E+00	6,1E-05	3,5E-04
	Th-232sec	7,9E-01	5,9E-02	2,0E+00	1,0E-04	5,3E-04
slak	U-natsec	7,6E-01	3,5E-02	1,9E-01	6,1E-05	3,5E-04
	Th-232sec	1,2E+00	6,0E-02	1,6E-01	1,0E-04	5,3E-04

5 Resultaten: de effectieve jaardosis ten gevolge van gestort registratieplichtig afval met realistische activiteitenconcentratie

De totale effectieve jaardosis is uiterekend voor de blootstellingsscenario's 'Werken op een deponie' en 'Wonen vlak bij een deponie' voor het registratieplichtige afval dat in het referentiejaar 2020 gestort is op één deponie.

5.1 Werken op een deponie

De effectieve jaardoses voor werknemers zijn zowel voor het 'standaard' als voor het 'aangepaste' scenario per sector samengevat in Tabel 5.1. De totale effectieve jaardoses volgen uit een sommatie van de effectieve jaardoses uit alle sectoren. In het 'standaard' scenario komt de jaardosis dan uit op 0,5 mSv en in het 'aangepaste' scenario wordt dat 0,1 mSv.

Tabel 5.1 Effectieve jaardoses voor werknemers ten gevolge van het registratieplichtige afval dat in 2020 gestort is op een deponie, berekend per sector voor het 'standaard' en het 'aangepaste' scenario.

Sector	$E_{\text{standaard}}$ [mSv]	$E_{\text{aangepast}}$ [mSv]
Pigmentproductie	5,1E-01	1,3E-01
Staalproductie	2,4E-07	1,2E-08
Zirkoon	9,0E-03	2,2E-03
Geothermie	3,1E-06	1,5E-07
Schrootverwerking	2,3E-04	5,8E-05
Ontmanteling, decontaminatie en bewerking	4,5E-04	1,1E-04
Fosforproductie	1,6E-02	4,0E-03
Overig	3,9E-04	9,7E-05
TOTAAL	5,4E-01	1,3E-01

5.2 Wonen vlak bij een deponie

In Tabel 5.2 staan de effectieve jaardoses voor leden van de bevolking die in de omgeving wonen van de deponie per sector, zowel voor het 'standaard' scenario als voor het 'aangepaste' scenario. De totale effectieve jaardosis voor het registratieplichtige afval uit 2020 is 0,3 mSv ('standaard' scenario) en 0,3 μ Sv ('aangepaste' scenario).

Tabel 5.2 Effectieve jaardoses voor leden van de bevolking die vlak bij een deponie wonen ten gevolge van het registratieplichtige afval dat in 2020 gestort is op een deponie, berekend per sector voor het 'standaard' scenario (op 25 m afstand van de deponie) en het 'aangepaste' scenario (op 1 km afstand van de deponie).

Sector	$E_{\text{standaard}}$ [mSv]	$E_{\text{aangepast}}$ [mSv]
Pigmentproductie	2,5E-01	2,5E-04
Staalproductie	2,3E-07	3,3E-10
Zirkoon	4,4E-03	4,3E-06
Geothermie	3,0E-06	4,3E-09
Schrootverwerking	1,1E-04	1,1E-07
Ontmanteling, decontaminatie en bewerking	2,2E-04	2,2E-07
Fosforproductie	7,8E-03	7,7E-06
Overig	1,9E-04	1,9E-07
TOTAAL	2,7E-01	2,6E-04

6 Discussie

De resultaten worden besproken in paragraaf 6.1 en in paragraaf 6.2 vergeleken met die uit het onderzoek van DHV en NRG uit 2005. Paragraaf 6.3 gaat in op mogelijke ontwikkelingen en in paragraaf 6.4 komen we terug op registratieplichtig afval en het controlestelsel.

6.1 Discussie over de resultaten

Eerste onderzoeksvraag

Wat is de stralingsbelasting voor werknemers en leden van de bevolking als gevolg van het registratieplichtige afval dat op een aangewezen deponie voor gevaarlijk afval mag worden gestort, bij de wettelijke maximale activiteitsconcentraties?

Antwoord op de eerste onderzoeksvraag

Standaard scenario

De maximale effectieve jaardosis voor een vervalreeks is voor een werknemer in het scenario 'Werken op een deponie' vastgesteld op maximaal 2,7 mSv (Th-232sec). Voor het scenario 'Wonen vlak bij een deponie' is een maximale jaardosis van 2,8 mSv (Th-232sec, steen) berekend voor een lid van de bevolking dat op een afstand van 25 meter van de deponie woont.

Aangepast scenario

In het scenario 'Werken op een deponie', is voor een werknemer een maximale effectieve jaardosis van 0,7 mSv (voor de vervalreeks Th-232sec) berekend. Voor een lid van de bevolking dat op 1 km afstand van een deponie woont, is in het scenario 'Wonen vlak bij een deponie' een maximale jaardosis van 1,3 µSv (Th-232sec, zand/as) berekend.

Tweede onderzoeksvraag

Wat is de stralingsbelasting voor werknemers en leden van de bevolking als gevolg van het registratieplichtige afval dat op een aangewezen deponie voor gevaarlijk afval jaarlijks daadwerkelijk wordt gestort?

Antwoord op de tweede onderzoeksvraag

Standaard scenario

De effectieve jaardosis voor een werknemer in het conservatieve 'standaard' scenario bedraagt 0,5 mSv, terwijl voor een lid van de bevolking – wonend op een afstand van 25 meter van de deponie – de jaardosis 0,3 mSv is.

Aangepast scenario

Voor het 'aangepaste' scenario is de effectieve jaardosis voor zowel de werknemer als leden van de bevolking – wonend op een afstand van 1 km van de deponie – lager dan 0,3 mSv, namelijk respectievelijk 0,1 mSv en 0,3 µSv.

Uit de resultaten volgt dat de effectieve jaardoses ten gevolge van de wettelijke maximale activiteitsconcentratie voor registratieplichtig afval voor enkele nucliden of nuclidereeksen boven het jaardosiscriterium van 0,3 mSv, kan uitkomen. Voor het daadwerkelijke, in het jaar 2020, gestorte afval blijven de doses wel onder het criterium. Dat laatste kan per jaar en per deponie verschillen.

De dosisberekeningen in dit rapport zijn gebaseerd op conservatieve blootstellingsscenario's. Hoewel de 'aangepaste' scenario's blootstellingsparameterwaarden gebruiken die de Nederlandse praktijk beter benaderen, geven de berekende doses nog steeds een conservatieve schatting weer. Deze paragraaf gaat verder in op de gemaakte keuzes, de beperkingen van de methode en de invloed hiervan op de resultaten.

NORM-afval op de deponieën

De effectieve jaardoses als gevolg van het storten van registratieplichtig afval zijn voor één jaar en op slechts één deponie berekend. Van de andere deponieën die registratieplichtig afval ontvangen, is bekend dat er in verhouding minder NORM-afval wordt gestort. Minder dan 10 procent van het afval dat gestort werd in het referentiejaar 2020 op die deponieën bevatte NORM. Naar verwachting is daarom de effectieve jaardosis ten gevolge van stort van NORM-afval op deze deponieën lager. Voor de deponie waarbij de berekeningen zijn uitgevoerd, leverde in alle gevallen het registratieplichtige afval uit de pigmentindustrie de grootste bijdrage aan de stralingsblootstelling (>90%). Dit komt doordat deze industrie de grootste afvalstroom (98% in massa gemeten en 95% in activiteit) afvoert naar deze deponie. Dit afval besloeg ongeveer 50 procent van het totale NORM-afval (registratieplichtig plus specifiek vrijgegeven) in Nederland uit het jaar 2020 [9]. De stralingsbelasting door registratieplichtig afval op de andere deponieën zal dus veel lager zijn dan berekend in dit rapport. De maximale mogelijke effectieve jaardoses zullen op basis van de kleine fractie registratieplichtig afval op de andere deponieën ook onder de 0,3 mSv komen.

Voor de dosisberekeningen hebben wij een verdunningsfactor f_N van 0,4 aangenomen. Die is representatief voor de deponie waarvoor de stralingsbelasting is berekend in paragraaf 3.2. In de berekening van de effectieve doses als gevolg van het registratieplichtige afval met de wettelijke maximale activiteitsconcentratie (paragraaf 3.1) is aangenomen dat 40 procent van het afval op de deponie uit registratieplichtig afval bestaat, in plaats van uit al het NORM-afval. Wanneer dezelfde verhouding tussen het registratieplichtige afval en het totale NORM-afval wordt aangehouden als bij de berekening met de in 2020 gestorte hoeveelheid afval (waarbij 75% van het NORM-afval uit registratieplichtig afval bestaat), vallen de resultaten ongeveer 25 procent lager uit dan hier gepresenteerd. De jaardoses voor U-238sec en Th-232sec voor werknemers zullen alsnog boven de 0,3 mSv uitkomen.

Samenstelling van het NORM-afval

Voor dit onderzoek is uitgegaan van een seculair evenwicht in de nucliden van een nuclidenreeks. Alle nucliden van de reeks komen in dat geval in dezelfde activiteitsconcentratie voor, waarbij de

activiteitsconcentratie van het nuclide met de hoogste individuele activiteit is gekozen. In werkelijkheid zijn ze vaak niet in meer evenwicht. Daarnaast was uit de gegevens niet altijd duidelijk of een afvalstof zowel U-238sec als Th-232sec bevatte. Door beide reeksen mee te nemen wordt onderschatting voorkomen. Deze twee keuzes hebben geleid tot een overschatting. Daarentegen was het onduidelijk uit de beschikbare data of de afvalstoffen K-40 bevatten. Door K-40 niet mee te nemen in de dosisberekeningen, is het mogelijk dat de doses zijn onderschat. Aangezien de doses per activiteitsconcentratie van U-238sec en Th-232sec minstens een factor 10 groter zijn dan die van K-40, zal deze onderschatting gering zijn.

Voor verschillende vervalreeksen is de maximaal mogelijke effectieve jaardosis berekend. Er is daarbij geen rekening gehouden met het feit dat het registratieplichtige afval ook uit meerdere vervalreeksen kan bestaan, bijvoorbeeld uit U-natsec en Th-232sec. De totale effectieve jaardoses door het registratieplichtige afval zouden dan theoretisch hoger kunnen zijn dan in dit rapport is berekend voor de wettelijke maximale activiteitsconcentraties.

Isolatievoorzieningen deponie

Bij het 'aangepaste' scenario zijn verschillende dosisbeperkende maatregelen meegenomen om de Nederlandse situatie beter te benaderen. De benadering blijft nog steeds aan de conservatieve kant. Er is bijvoorbeeld rekening gehouden met een afdeklaag van zand boven het afval, maar niet met de afscherming van het immobilisaat (beton). Het immobilisaat is niet meegenomen, omdat de afschermende factor hiervan moeilijk was in te schatten met de beschikbare gegevens en omdat niet al het afval wordt geïmmobiliseerd. In vergelijking met zand heeft beton een hogere dichtheid. Een laag beton zou dus meer afscherming bieden tegen externe straling dan een laag zand van dezelfde dikte.

Voor de dosisberekeningen is de minimale afdeklaag van 10 cm zand gebruikt. In het praktijk kan deze laag dus dikker zijn. Bij een dikte van 20 cm zou de dosis door externe straling een factor 3 kleiner zijn geweest (Bijlage E). Dit kan betekenen dat de effectieve doses per nuclide(reeks), bij de wettelijke maximale activiteitsconcentraties, alsnog binnen het dosiscriterium vallen als de afdeklaag dikker is dan 10 cm.

De afdeklaag zorgt ervoor dat er geen verstuiving meer mogelijk is. In de berekeningen is voor minimale verstuiving gekozen. Zo wordt meegenomen dat het afval nog iets kan verstuiven, voordat het wordt afgedekt. Er is hiervoor een factor 10 genomen (zie bijlage C.2.2), wat aan de conservatieve kant zit. In RP122-II is namelijk een stofconcentratie aangenomen die overeenkomt met werkzaamheden waarbij stoffen sterk verstuiven. In het praktijk zou dit vooral voorkomen bij het laden en lossen van het afval. Dit zou slechts een kort tijdsbestek in beslag nemen. De inhalatiedoses zullen daarom nog lager zijn voor de werknemers en zullen praktisch nihil zijn voor omwonenden.

Afstand tot de deponie

Bij het 'standaard' scenario voor 'Wonen vlak bij een deponie' zijn de effectieve jaardoses, voor onder andere U-natsec en Th-232sec, in activiteitsconcentratie van $10 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ hoger dan $0,3 \text{ mSv}$ voor alle materiaalsoorten. Het verschil tussen de resultaten van het 'standaard' en het 'aangepaste' scenario met de wettelijke maximale activiteitsconcentratie kan oplopen tot een factor 10.000. Het voornaamste verschil is dat de afstand tussen bewoner en deponie bij de 'aangepaste' versie 40 keer groter is. De dosis door externe straling neemt kwadratisch af met de afstand. Dit betekent dat de maximale mogelijk effectieve jaardosis voor het 'aangepaste' scenario ver onder de $0,3 \text{ mSv}$ blijft. Voor de berekening van deze verzwakking is de deponie benaderd als een puntbron. Afhankelijk van de grootte van de deponie zou een lijnbron de situatie mogelijk beter benaderen. In dat geval zouden de doses voor externe straling lineair afnemen met de afstand (in plaats van kwadratisch) en dus groter uitvallen. De totale effectieve dosis met de wettelijke maximale activiteitsconcentratie zal dan nog steeds van dezelfde orde grootte zijn. De hoogste waarde van de jaardosis zal dan $5,3 \text{ }\mu\text{Sv}$ zijn, in plaats van $1,3 \text{ }\mu\text{Sv}$ voor Th-232sec (materiaalsoorten zand en as). Daarnaast is bij 1 km afstand geen rekening gehouden met de afscherming van lucht. Hierdoor zal de effectieve dosis nog lager uitvallen.

De grotere afstand heeft niet alleen invloed op de externe straling, maar ook op de inhalatiedosis. De stofconcentratie neemt namelijk ook af met de afstand, maar niet zo snel als de straling afneemt. Dit heeft als gevolg dat de inhalatiedosis op 1 km afstand hoger is dan de dosis door externe straling.

In de praktijk staan er weinig woningen op 1 km afstand van een deponie; de meesten staan verder weg. De berekende doses zullen daarom voor de meeste leden van de bevolking die in de buurt van een deponie wonen, lager uitvallen.

6.2 Vergelijking met eerder onderzoek door DHV en NRG

Waar het voorliggende rapport uitgaat van de scenario's zoals beschreven in RP122-II en zoals toegepast in de NRG-rekentool, zijn in het onderzoek van DHV en NRG uit 2005 [7] andere scenario's gebruikt. De in 2005 beschouwde scenario's maakten, in tegenstelling tot in RP122-II, onderscheid tussen het aanleveren van het afval in *big bags* of het aanleveren van het afval als bulkmateriaal. Ook werd rekening gehouden met de verwerking op de stortplaats in de vorm van immobilisatie. In de scenario's werden parameters als stofconcentratie, blootstellingstijd en afstand tot de bron meegenomen. Ieder scenario werd opgesplitst in meerdere afzonderlijke onderdelen, waarbij afhankelijk van het scenario-onderdeel andere waarden aan de parameters werden toegekend.

De afvalstromen die beschouwd werden, komen voor een groot deel uit dezelfde sectoren als het NORM-afval van 2020. Het ging toen om pigmentproductie, olie- en gasproductie, industrieën met zirkoon en fosforproductie. Net als in 2020 was afval dat uit de pigmentindustrie kwam veruit de grootste van die afvalstromen. Wel was de hoeveelheid

afval uit de pigmentindustrie in 2005 slechts half zo groot (25 kton) als in 2020 (46 kton). Ook in de meeste andere sectoren is de hoeveelheid afval ten opzichte van 2005 gegroeid. Maar omdat deze afvalstromen een stuk kleiner zijn, zal dat minder invloed hebben op de verandering in de effectieve dosis. Afval van staalproductie en geothermie werd in 2005 nog niet gerapporteerd als meldingsplichtig afval. Naast de grootte van de afvalstromen is de activiteitsconcentratie in het afval van belang. De maximaal toelaatbare activiteitsconcentratie voor meldingsplichtig afval wijkt voor enkele radionucliden één of twee ordegrottes af van de activiteitsconcentraties waaraan registratieplichtig afval moet voldoen. Een deel van dat meldingsplichtig afval is tegenwoordig specifiek vrijgegeven.

De dosisberekening met de wettelijke maximale activiteitsconcentraties per nuclide voor meldingsplichtig afval (die destijds golden) is anders uitgevoerd dan in het voorliggende rapport. DHV/NRG hebben de dosis op basis van de gestorte hoeveelheid meldingsplichtig afval (120 kton) berekend met een werktijd van 200 dagen per jaar. Uit hun resultaten blijkt dat de jaardosis ruim boven de 0,3 mSv kan zijn. Voor Pb-210+ (ten tijde van het Bs was de maximale activiteitsconcentratie $1.000 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) zouden werknemers theoretisch een jaardosis van 6 mSv kunnen ontvangen. Voor leden van de bevolking komt datzelfde scenario neer op een jaardosis van minder dan 0,04 mSv. In het voorliggende rapport is de dosis berekend op basis van de activiteitsconcentratie en is de totale gestorte hoeveelheid afval niet meegenomen. De resultaten kunnen daarom niet direct met elkaar vergeleken worden, alhoewel dezelfde conclusie getrokken wordt.

Op basis van het aanbod meldingsplichtig afval in 2005 berekenden DHV en NRG dat de maximale jaardosis voor een werknemer van de deponie 0,14 mSv was en voor leden van de bevolking aan de terreingrens maximaal 5 μSv . Deze waarde is moeilijk te vergelijken met de doses die berekend zijn in het voorliggende rapport. Naast de verschillende gebruikte scenario's omvatte meldingsplichtig afval in principe alle NORM-afval op de deponie, terwijl in dit onderzoek alleen de stralingsbelasting van registratieplichtig afval is meegenomen. Ondanks de verschillen blijft de dosis voor de werknemer van de deponie en de omwonende van de deponie in zowel het rapport uit 2005 als in de 'aangepaste' scenario's in het huidige rapport onder de grenswaarde van 0,3 mSv.

6.3 Ontwikkelingen

Zowel de hoeveelheden NORM-afval dat op de aangewezen deponieën wordt gestort als de samenstelling ervan, kunnen in de toekomst veranderen. Met de stroom registratieplichtig afval in 2020 bleef (volgens berekeningen met het 'aangepaste' scenario) de jaardosis onder het criterium van 0,3 mSv. Of dat zo blijft, hangt af van de ontwikkelingen in de industrie in Nederland.

In 2024 is op de deponie iets minder NORM-afval gestort dan in 2020⁶. Een reden hiervoor kan zijn dat in 2020 het laatste registratieplichtig afval uit de fosforproductie op de deponie is gestort. Ruim driekwart van het NORM-afval uit 2024 is registratieplichtig. Dit percentage lijkt erg op dat van 2020. Een eerste schatting van de effectieve jaardosis op basis van de voorlopige cijfers uit 2024 laat vergelijkbare resultaten zien als in 2020. Dit komt voornamelijk doordat de sector met de (qua stralingsbelasting) grootste bijdrage, de pigmentindustrie, in 2024 min of meer dezelfde kwantiteit heeft afgevoerd als in 2020. Op de deponie waarop het wordt gestort, komt namelijk 98 procent massahoeveelheid van het registratieplichtige afval uit deze industrietak.

Recentelijk werd bekendgemaakt dat het bedrijf dat verantwoordelijk is voor de productie van dit afval gaat sluiten [15]. Het registratieplichtige afval van deze onderneming werd naar slechts één deponie afgevoerd. Het verdwijnen van dat bedrijf zal de totale hoeveelheid NORM-afval dat jaarlijks naar deze deponie wordt afgevoerd met ongeveer 45 kton laten afnemen. Het gevolg is dat de NORM-fractie in het afval op deze deponie zal afnemen van 0,4 naar 0,1⁷ en dat de stralingsblootstelling door registratieplichtig afval dus aanzienlijk afneemt. Als de pigmentindustrie in 2020 geen registratieplichtig afval had afgeleverd, zou in het 'aangepaste' scenario 'Werken op een deponie' een werknemer een jaardosis hebben ontvangen van 6,2 µSv in plaats van 0,1 mSv, een afname van 95 procent. Voor de andere scenario's zal de dosisafname vergelijkbaar zijn. De totale stralingsbelasting door NORM-afval op deze deponie zal niet afnemen met 95 procent. Het grootste deel van het NORM-afval zou dan bestaan uit specifiek vrijgegeven afval (94%). Na de sluiting – net als destijds bij de sluiting van de fosforfabriek – kan alsnog voor een bepaalde periode registratieplichtig afval uit deze industrie naar de deponie worden afgevoerd.

Aan de andere kant wordt er in de geothermie groei verwacht. Dus naar verwachting zal die sector een grotere bijdrage gaan leveren aan de hoeveelheid NORM-afval in Nederland en dus aan de door dit afval veroorzaakte dosis. Naar verwachting zal de geothermie groeien van 3 PJ in 2018 tot meer dan 200 PJ in 2050 [16]. Sinds 2021 is al het NORM-afval uit de geothermie specifiek vrijgegeven, ongeacht de activiteitsconcentratie. Het effect van de groei op de stralingsbelasting is moeilijk te schatten zonder aanvullende informatie. Een toename in registratieplichtig afval betekent namelijk niet altijd een toename in de totale effectieve dosis. De stralingsblootstelling hangt van meerdere factoren af. Naast bijvoorbeeld de dosis per activiteitsconcentratie en de massa van het registratieplichtige afval, heeft de hoeveelheid van het specifiek vrijgegeven en niet-radioactief afval dat wordt gestort, ook invloed op de effectieve dosis. Het niet-radioactief afval 'verdunt' immers het NORM-afval. Het in 2020 gestorte registratieplichtig afval uit geothermie bevat bijvoorbeeld voornamelijk Pb-210+ en Po-210, en veroorzaakt in vergelijking met U-natsec en Th-232sec een lage dosis per activiteitsconcentratie (ongeveer een factor 1.000 lager, voor externe straling). De grote toename in hoeveelheid registratieplichtig

⁶ Deze informatie is verkregen via persoonlijke communicatie met de deponie. De kwantitatieve cijfers uit 2024 zijn niet in dit rapport opgenomen, omdat deze op het moment van schrijven nog niet openbaar beschikbaar waren.

⁷ Dit is berekend op basis van de cijfers uit 2020. In andere jaren kan deze fractie anders zijn.

afval uit geothermie zou een lagere fractie f_m (verhouding tussen de massa van de afvalstof en de totale massahoeveelheid NORM-afval) geven voor de andere afvalstoffen die U-natsec en Th-232sec bevatten. Dit resulteert in een lagere totale effectieve jaardosis. Daarom zal de groei van geothermie meer consequenties hebben voor de capaciteit van de deponie dan voor de stralingsbelasting.

Bij het in kaart brengen van de ontwikkelingen moet dus rekening gehouden worden met verschillende factoren. De capaciteit van de deponie is één van die factoren, aangezien het ontvangen van afval eindig is. Na sluiting van een deponie, komt er meer NORM-afval op een andere deponie terecht. Dit kan leiden tot een hogere stralingsbelasting op de deponie. Maar ook wanneer de deponie gesloten is en voorzien is van een eindafwerking kan het gestorte afval nog bijdragen aan de stralingsbelasting.

6.4 Registratieplichtig afval en het controlestelsel

In dit onderzoek is gekeken naar de stralingsblootstelling door registratieplichtig afval, met als beoogde toepassing het vereenvoudigen van het huidige beleid voor NORM-afval. Een optie zou zijn om registratieplichtig afval, net als specifiek vrijgegeven afval, uit het controlestelsel te halen. In dat geval moet aan een belangrijke voorwaarde uit de regelgeving worden voldaan: de dosis door registratieplichtig afval moet lager zijn dan het dosiscriterium voor specifieke vrijgave van 0,3 mSv per jaar, zowel voor werknemers als voor leden van de bevolking.

Een nadeel van het uit het controlestelsel halen van registratieplichtig afval is het wegvallen van overheidstoezicht. Nu is het nog zo dat de ontdoener nauwkeurig moet bijhouden van welk afval hij zich ontdoet en dat moet door de ANVS zijn op te vragen. De deponieën melden al het NORM-afval bij het Landelijk Meldpunt Afvalstoffen van Rijkswaterstaat, maar zijn daartoe niet verplicht. Verplichting van administratie van het afval is echter bevorderlijk voor het toezicht en kan helpen bij de monitoring van de capaciteit van de deponieën. Een tweede nadeel van het uit het controlestelsel halen van registratieplichtig afval (via dezelfde weg als specifiek vrijgegeven afval) zijn de extra tijd en kosten die de ondernemer kwijt is aan de beschikkingsaanvraag voor specifieke vrijgave.

Registratieplichtig afval uit het controlestelsel halen is niet de enige manier om registratieplichtig en specifiek vrijgegeven afval in één categorie onder te brengen. Specifiek vrijgegeven afval zou ook weer binnen het controlestelsel kunnen vallen. Het voordeel hiervan is dat alle NORM-afval in het controlestelsel (en dus onder overheidstoezicht) blijft en het bespaart ondernemers de uitgebreide en langdurige aanvraagprocedure voor specifieke vrijgave. Door alleen de regelgeving voor specifieke vrijgave te veranderen, blijft de stralingsbelasting door het NORM-afval (het nu registratieplichtig en specifiek vrijgegeven afval) onbekend. Het registratieplichtige afval is namelijk ingedeeld op basis van activiteitsconcentratie en niet op basis van de dosis.

7 Conclusies en aanbevelingen

De effectieve dosis ten gevolge van afval met de wettelijke maximale activiteitsconcentratie van een nuclide(reeks) kan boven het jaardosiscriterium van 0,3 mSv komen. Dit betekent dat op basis van de wettelijke maximale activiteitsconcentratie het registratieplichtige afval niet aan het dosiscriterium voldoet om als specifiek vrijgegeven afval uit het controlestelsel gehaald te worden. De jaardosis ten gevolge van het registratieplichtige afval dat in 2020 op een deponie is gestort, is wel minder dan 0,3 mSv.

Registratieplichtig afval wordt momenteel ingedeeld op basis van activiteitsconcentratie, terwijl het risico door de dosis wordt bepaald. Het RIVM beveelt daarom aan om te onderzoeken wat de juridische, sociale en financiële gevolgen zijn bij het schrappen van de mogelijkheid tot de indeling van registratieplichtig afval. Afval dat natuurlijke radionucliden bevat met een activiteitsconcentratie boven de generieke vrijgavegrens, zou dan op basis van de dosis mogelijk specifiek vrijgegeven kunnen worden van het controlestelsel.

Uit dit onderzoek blijkt dat de effectieve jaardosis mogelijk het dosiscriterium van 0,3 mSv kan overschrijden. Binnen de Europese Unie is 1 mSv een veelgebruikt criterium. Het RIVM raadt dan ook aan om de voor- en nadelen te onderzoeken bij het verhogen van het jaardosiscriterium voor specifieke vrijgave van 0,3 mSv naar 1 mSv.

Dankwoord

De auteurs bedanken de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) voor het ter beschikking stellen van de rekentool waarmee dosisberekeningen zijn uitgevoerd. Collega Dr. Teun van Dillen wordt bedankt voor zijn kritische betrokkenheid als topexpert op het gebied van de stralingsbescherming en zijn bijdrage aan de rekentechnische aspecten van dit onderzoek. Als laatste gaat onze dank uit naar Patricia Bekhuis voor haar deskundige ondersteuning en advies op het gebied van wet- en regelgeving rondom radioactieve afvalstoffen.

Literatuur

1. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. *Platformparticipatie Nationaal Programma Radioactief Afval*. Beschikbaar via www.platformparticipatie.nl/npra/default.aspx. (Geraadpleegd 29 januari 2025).
2. Europese Unie, *Richtlijn 2011/70/Euratom tot vaststelling van een communautair kader voor een verantwoord en veilig beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval*. 2011.
3. IAEA, *Integrated Regulatory Review Service (IRRS) Mission to The Netherlands*, IAEA-NS-IRRS_2023-02, 2023.
4. *Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming*. 2018. <https://wetten.overheid.nl/BWBR0040179/2024-01-01>.
5. P.D.B.M. Bekhuis en S.W.L. Palstra, *Specifieke vrijgave van radioactieve stoffen in Nederland, Regelgeving en toepassing*, RIVM rapport 2024-0073, 2024.
6. *Kernenergiewet (Kew)*. <https://wetten.overheid.nl/BWBR0002402/2022-02-16>.
7. DHV Milieu en Infrastructuur BV, *Verwerking van ZELA op stortplaatsen; Actualisatie criteria VOOR C2- en C3-stortplaatsen*, 2005.
8. European Commission, *RP 122 part 2 Practical use of the concepts of clearance and exemption: Application of the concepts of exemption and clearance to natural radiation sources*, 2002.
9. M. van der Schaaf, P.D.B.M. Bekhuis, en L.H.A. Boudewijns, *Radioactieve rest- en afvalstromen in Nederland, een inventarisatie*, RIVM rapport 2022-0073, 2022.
10. IAEA, *Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance*, Safety Reports Series No. 44, 2005.
11. Q.Q. Chen, et al., *Radiological Assessment of Disposal of Large Quantities of Very Low Level Waste in Landfill Sites*, UK Health Protection Agency HPA-RPD-020, 2007.
12. M.B. Bellamy, et al., *Federal Guidance Report No. 15 External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil*, EPA 402-R-19-002, 2019.
13. R. van Wijhe, *Nazorgplan Mineralz Maasvlakte*, Sweco SWNL0258566, 2020.
14. R. Vis en P.M.F. van Breemen, *Veilige recreatie op stortplaats Nauerna, Locatiespecifieke risicobeoordeling*, RIVM rapport 2024-0173, 2024.
15. IndustrieLinqs, *Tronox sluit fabriek Rotterdam Botlek, 240 banen getroffen*. 2025.
16. Stichting Platform Geothermie, et al., *Masterplan Aardwarmte in Nederland: Een brede basis voor een duurzame warmtevoorziening*, 2018.
17. *Wet milieubeheer, artikel 1.1*. <https://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/2022-05-01/0>.
18. *Besluit stortplaatsen en stortverboden afvalstoffen*. <https://wetten.overheid.nl/BWBR0009094/2024-01-01>.
19. Europese Unie, *Richtlijn 2013/59/Euratom De basisnormen voor de bescherming tegen de gevaren verbonden aan de blootstelling aan ioniserende straling*. 2013.

20. ANVS, *Factsheet: Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming, Algemene informatie*. 2018.
21. ANVS, *Factsheet: Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming, Vrijstelling en vrijgave - natuurlijke radionucliden*. 2019.
22. European Commission, *RP 95 Reference levels for workplaces processing materials with enhanced levels of naturally occurring radionuclides: A guide to assist implementation of Title VII of the European Basic Safety Standards Directive (BSS) concerning natural radiation sources*, 1999.
23. ICRP, *Annals of the ICRP, Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60*, ICRP119, 2012.
24. Grove Software, *MicroShield*.
25. M.B. Bellamy, et al., *Gamma Shielding Factors For Risk Assessment Models*, ORNL/TM-2013/00, 2014.
26. ICRP, *Annals of the ICRP, Nuclear Decay for Dosimetric Calculations*, ICRP107, 2008.
27. Lawrence Livermore National Laboratory, *HotSpot - Health Physics Codes, User's Guide*. 2020.

Begrippenlijst

Afval

Alle stoffen, preparaten of voorwerpen waarvan de houder zich ontdoet, voornemens is zich te ontdoen, of zich moet ontdoen (artikel 1.1 Wet milieubeheer [[17](#)]).

Afvalstroom

Bepaald soort afval of afval dat afkomstig is van een bepaalde industrie.

Blootstellingsscenario

Schets van een situatie die tot een blootstelling aan ioniserende straling kan leiden. Hierbij wordt gekeken naar zaken als de afstand tot een bron, blootstellingstijd, invloed van verstuiving of uitloging van een materiaal, afscherming, en de blootstellingswegen.

Blootstellingsweg

De manier waarop blootstelling van personen door activiteit of straling in de omgeving kan gebeuren. Voorbeelden van blootstellingswegen zijn externe straling, inhalatie en ingestie.

Deponie

Een locatie die is ingericht voor de ontvangst van afvalstoffen voor stort. In dit rapport wordt met het woord 'deponie' specifiek een deponie voor gevaarlijk afval bedoeld.

Dosiscriterium

In dit rapport bedoelen we met het dosis criterium de effectieve jaardosis van 0,3 mSv. Dit wordt genomen als de maximale effectieve jaardosis voor leden van de bevolking als gevolg van een stralingsblootstelling door specifiek vrijgegeven materialen, zoals opgenomen in de Verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Vbs). In de algemeen toegepaste rekenmethodiek en in dit rapport worden werknemers getoetst aan hetzelfde dosis criterium als leden van de bevolking.

Dosis per activiteitsconcentratie

Dosis door blootstelling van straling afkomstig van materiaal met een activiteitsconcentratie van 1 Bq·g⁻¹ van een bepaald nuclide.

Lid van de bevolking

Inwoner van Nederland, niet-zijnde een werknemer gedurende zijn werktijd of een persoon die een medische blootstelling ondergaat.

Materiaalsoort

In dit rapport wordt met materiaal soort een overkoepelend type materiaal bedoeld dat als modelmateriaal dient voor bepaalde afvalstromen en vergelijkbare fysische eigenschappen heeft als materiaal uit die afvalstromen. Er wordt net als in RP122-II onderscheid gemaakt tussen de materiaal soorten zand, slak, steen, slib en as.

NORM

Materialen met radionucliden van natuurlijke oorsprong (Acroniem uit het Engels: *Naturally Occurring Radioactive Material*). De concentratie kan mogelijk door industriële activiteiten verhoogd zijn.

Radioactief afval

Materiaal met daarin radioactieve stoffen waarvan een ondernemer zich wil ontdoen en waarvoor geen gebruik of product- of materiaalhergebruik is voorzien door de ANVS of die ondernemer. En er is geen sprake van specifieke vrijgave of lozing van de stof.

Radioactieve stoffen/materialen

Stoffen/materialen met uitzondering van splijtstoffen en ertsen, waarbij de activiteitsconcentratie boven de generieke vrijgavegrenzen liggen.

Registratieplichtig afval

NORM-afval, bestaande uit vaste stoffen, waarbij de ontdoener verplicht is om het afval te registreren. De activiteitsconcentratie ligt tussen éénmaal en tienmaal de generieke vrijgavegrens (Bbs [4] Bijlage 3). Dit afval mag worden gestort op een daarvoor aangewezen deponie (artikel 11k uit het Besluit stortplaatsen en stortverboden afvalstoffen (Bssa) [18]) en valt onder het controlestelsel van de Kew.

Specifieke vrijgegeven afval

NORM-afval met activiteitsconcentratie boven tienmaal de generieke vrijgavegrens of bestaande uit niet vaste stoffen, waarbij het afval aan verschillende criteria moet voldoen om te garanderen dat de radiologische blootstellingsrisico's laag blijven (Bbs [4] artikel 3.21 lid 2 en Bijlage 3). Dit afval mag op een daarvoor aangewezen deponie (artikel 11k uit het Besluit stortplaatsen en stortverboden afvalstoffen (Bssa) [18]) worden gestort en is vrijgegeven van het controlestelsel van de Kew.

Vrijgavegrens/Vrijgavewaarde

Door de bevoegde autoriteit of in de wetgeving vastgestelde waarden die zijn uitgedrukt in activiteitsconcentraties, waarbij of waaronder materialen kunnen worden vrijgegeven van het controlestelsel.

Werknemer

Persoon die, hetzij in dienst, hetzij onder gezag van de ondernemer (in dit rapport meestal de deponie), gehouden is tot het verrichten van arbeid voor die ondernemer. In dit rapport wordt daarbij bedoeld op niet-blootgestelde werknemers; niet-zijnde blootgestelde werknemers zoals beschreven in artikel 7.11 van het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs) [4].

A Grenswaarden van registratieplichtig en meldingsplichtig afval

Het huidige beleid met betrekking tot registratieplichtig afval is een resultaat van de doorvoering van wijzigingen in 2018. Toen werd de richtlijn 2013/59/Euratom [19] de *Basic Safety Standards* (BSS), overgenomen in de Nederlandse wetgeving. Hiermee verviel het Besluit Stralingsbescherming (Bs) en ging het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs) in werking [20].

Het Bbs geeft grenswaarden uitgedrukt in activiteitsconcentratie voor afval waarvan men zich wil ontdoen. Deze grenswaarden staan ook bekend als vrijgavewaarden. Wanneer de activiteitsconcentratie lager is dan deze vrijgavewaarde heeft men geen vergunning of registratie nodig om zich te ontdoen van dit afval (Bbs [4], artikel 3.20). Daarmee is het afval vrijgegeven van het controlestelsel van de Kew. Andere wetgeving, zoals de Wet milieubeheer, geldt dan nog wel.

Voor 2018 was het afval met radionucliden uit de U-238-, U-235- of Th-232-reeks of K-40 met activiteitsconcentraties tussen de 1 en 10 keer de generieke vrijgavewaarde meldingsplichtig. Tegenwoordig is dit afval registratieplichtig. Een verschil tussen registratie- en meldingsplichtig is dat voor een aantal radionucliden andere generieke vrijgavewaarden gelden. Daarnaast is met de invoering van het Bbs generieke vrijgave alleen mogelijk voor vaste stoffen [21].

De minimale en maximale activiteitsconcentraties in meldingsplichtig afval kunnen dus afwijken van de activiteitsconcentraties in registratieplichtig afval, zoals weergegeven in Tabel A.1.

Tabel A.1 Selectie van activiteitsconcentraties voor onder- en bovengrens van individuele radionucliden en radionucliden uit vervalreeksen in registratieplichtig en meldingsplichtig afval [4, 6, 19].

Nuclide(reeks)	Activiteitsconcentraties [$\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$]	
	registratieplichtig	meldingsplicht
U-natsec	1 – 10	1 – 10
U-238+	1 – 10	10 – 100
Th-230	1 – 10	1 – 10
Ra-226+	1 – 10	1 – 10
Pb-210+	1 – 10	100 – 1000
Po-210	1 – 10	100 – 1000
Th-232sec	1 – 10	1 – 10
Th-232	1 – 10	10 – 100
Ra-228+	1 – 10	1 – 10
Th-228+	1 – 10	1 – 10
K-40	10 – 100	100 – 1000

B Samenstelling en eigenschappen van NORM-afval op de deponie

Materialen die NORM bevatten, worden toegepast in een aantal industrieën [9]. Zij gebruiken en verwerken grondstoffen met daarin voornamelijk de radionucliden U-238, U-235 en Th-232 en hun dochters, of K-40. Deze radionucliden komen vervolgens in de producten, nevenproducten en rest- en afvalstoffen afkomstig van deze industrieën [22]. Dit kan vervolgens leiden tot een verhoogde stralingsblootstelling voor werknemers en leden van de bevolking.

De afvalstromen kunnen ook zeer verschillende materiaaleigenschappen vertonen. Materiaaleigenschappen als verstufbaarheid en uitloogbaarheid kunnen gevolgen hebben voor de effectieve dosis door inhalatie of ingestie. Bij de berekeningen is gebruikgemaakt van de gegevens uit *Radiation Protection 122 part 2* (RP122-II) [8]. Daarbij zijn deze eigenschappen niet voor elke afvalstroom apart bepaald of ingeschat. In RP122-II koos men ervoor om de afvalstromen in te delen in vijf algemene materiaalsoorten, te weten: zand, steen, slak, slib en as.

Zand geeft hogere stofconcentraties in de lucht dan steen, slib en slak. Bovendien wordt gesteld dat zand erg uitloogbestendig is. Steen geeft juist relatief lagere stofconcentraties. De andere materiaalsoorten (slak, slib en as) zijn restproducten van industriële processen. Slak ontstaat bijvoorbeeld bij het maken van staal uit ijzererts, maar ook bij het winnen van andere metalen uit ertsen. Bij het winnen van olie en gas en bij de geothermie ontstaat slib. Dat is een mengsel van water en zand in combinatie met organische verbindingen zoals koolwaterstoffen en anorganische vaste bestanddelen. As ontstaat bij de verbranding van kolen en andere brandstoffen. Net als zand is as goed verstufbaar en kan het daardoor leiden tot verhoogde stofconcentraties.

In de praktijk kan het lastig zijn om één materiaalsoort toe te kennen aan het afval. Er zijn voorbeelden van mechanische, chemische en thermische processen die erg veel invloed hebben op de materiaaleigenschappen. Zo kan het verbranden van steenkool alleen al zorgen voor vliegas met verschillende deeltjesgroottes (relevant voor de inhalatie) of uitloogbaarheid (relevant voor ingestie). In de blootstellingsscenario's die in dit rapport zijn beschouwd, is de materiaalsoort vooral van belang bij het doorrekenen van de dosis voor leden van de bevolking die in de buurt van een deponie wonen [8]. Bij transport en bij storten van registratieplichtig afval op de deponie, heeft de materiaalsoort geen invloed op de blootstellingsparameterwaarden volgens RP122-II.

Voor de nuclidesamenstelling van het NORM-afval heeft RP122-II een selectie gemaakt van de belangrijkste radionucliden uit de industriële NORM-rest- en afvalstoffen voor hun berekeningen. Dit zijn K-40 en de nucliden uit de volgende natuurlijke vervalreeksen: uranium- (U-238), actinium- (U-235) en thoriumreeks (Th-232). Bij het ontdoen van het

registratieplichtige afval wordt meestal alleen de activiteitconcentratie van het nuclide met de hoogste individuele activiteitsconcentratie geregistreerd. Daarom zijn in navolging van RP122-II voor de dosisberekeningen de volgende aannames gemaakt over de radionucliden in het afval:

- U-238 en U-235 komen in hun natuurlijke verhouding voor. De radionucliden uit de actiniumreeks zijn daarom meegenomen als dochters in de uraniumreeks volgens de natuurlijke isotopenverhouding (U-natsec⁸).
- Radionucliden binnen een natuurlijke vervalreeks zijn in seculair evenwicht met hun dochters. Elk dochternuclide uit de bijbehorende vervalreeks heeft dan dezelfde activiteitsconcentratie. De vastgestelde dosis is daarom de gesommeerde dosis over alle nucliden van desbetreffende vervalreeks.
- Door industriële processen is het mogelijk dat alleen een deelreeks of enkele radionucliden uit de natuurlijke vervalreeksen achterblijven. Bijvoorbeeld door verhitting kunnen vluchtige radionucliden, zoals Pb-210 en Po-210 vrijkomen en neerslaan op het materiaal. Dosisberekeningen zijn in dat geval uitgevoerd voor de enkele nucliden uit deze deelreeks.
- De hoeveelheid kalium in het lichaam (en daarmee de hoeveelheid K-40) wordt door het lichaam constant gehouden. Opgenomen K-40 kan daarom geen verhoging in dosis geven (zie ook bijlage D). Hierdoor is voor K-40 alleen blootstelling via externe straling geïnccludeerd.

Uit bovenstaande punten volgt dat in deze studie gerekend is met natuurlijke vervalreeksen, een aantal deelreeksen of een enkel individueel radionuclide.

In Tabel B.1 en Tabel B.2 zijn de meegenomen moeder(nucliden) met hun dochters uit de uranium-, actinium- en thoriumreeks in dit rapport samengevat. Deze zijn in overeenstemming met RP122-II.

⁸ U-natsec wordt in RP122-II 'U-238sec' genoemd.

Tabel B.1 Vervalreeksen en bijbehorende deelreeksen van U-238sec en U-235sec. De percentage geeft de activiteitsverhouding van een dochternuclide ten opzichte van de moedernuclide.

Uranium- en actiniumreeks	
Moeder	Bijbehorende dochternuclide(n) en reeksen
U-natsec	U-238sec, U-235sec (4,6%)
U-238sec	U-238, Th-234, Pa-234m, Pa-234 (0,3%), U-234, Th-230, Ra-226, Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, Po-210
U-235sec	U-235, Th-231, Pa-231, Ac-227, Th-227 (98,6%), Fr-223 (1,4%), Ra-223, Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207, Po-211 (0,3%)
Th-230	Th-230
Ra-226+	Ra-226, Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214
Pb-210+	Pb-210, Bi-210
Po-210	Po-210

Tabel B.2 Vervalreeks en bijbehorende deelreeksen van Th-232sec. De percentage geeft de activiteitsverhouding van een dochternuclide ten opzichte van de moedernuclide.

Thoriumreeks	
Moeder	Bijbehorende dochternuclide(n) en reeksen
Th-232sec	Th-232, Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Po-212 (64,1%), Tl-208 (35,9%)
Th-232	Th-232
Ra-228+	Ra-228, Ac-228

C Dosis per activiteitsconcentratie – methode en resultaten

De *Nuclear Research and consultancy Group* (NRG) heeft een rekentool ontwikkeld voor de bepaling van de doses ten gevolge van een activiteitsconcentratie van 1 Bq·g⁻¹ voor verschillende radionucliden in het NORM-afval. Het volgt de rekenmethodiek die gebruikt is in *Radiation Protection 122 part 2* (RP122-II) [8], waarbij per blootstellingsscenario de nuclidespecifieke dosis per activiteitsconcentratie wordt bepaald. De ANVS acht deze rekentool geschikt als één van de instrumenten ter ondersteuning van de beschikkingaanvraag voor specifieke vrijgave om specifieke vrijgavewaarden vast te stellen [5]. Onze berekeningen zijn ook met deze rekentool uitgevoerd. De details staan verder in deze bijlage beschreven.

In paragraaf C.1 zijn de relevante blootstellingsscenario's - overgenomen uit RP122-II – beschreven, samen met de gebruikte blootstellingsparameters. We presenteren in paragraaf C.2 de rekenmethode en parameterwaarden voor elk scenario. Voor 'Werken op een deponie' en 'Wonen vlak bij een deponie' zijn er twee verschillende sets blootstellingsparameterwaarden: de standaardwaarden gebruikt in RP122-II (hierna: 'standaard' scenario) én de 'aangepaste' waarden die een betere representatie geven van de Nederlandse situatie (hierna: 'aangepaste' scenario).

De radionucliden die voor dit onderzoek zijn gebruikt, zijn overgenomen uit RP122-II en staan voor de volledigheid ook in bijlage B.

C.1 Blootstellingsscenario's en blootstellingsparameters

Met RP122-II kunnen vrijgavewaarden bepaald worden, die geldig zijn voor verschillende blootstellingsscenario's die gebaseerd zijn op (internationaal) gangbare afvalverwerkingsmogelijkheden voor afval- en reststoffen uit de industrie die NORM bevatten. Deze blootstellingsscenario's verschillen van elkaar in de dominantie van de verschillende blootstellingswegen (externe straling, inhalatie en ingestie) en in blootstellingsparameters. Doordat er onder andere grote verschillen zijn tussen afval- en reststoffen, in bijvoorbeeld materiaaleigenschappen en radiologische kenmerken, wordt er bij de beschrijving van de blootstellingsscenario's uitgegaan van erg conservatieve blootstellingsparameterwaarden. De doses, zoals berekend op basis van RP122-II, vormen daarmee altijd een overschatting. Door aanpassing van de parameterwaarden, zoals lagere stofconcentraties, en door toevoeging van bijvoorbeeld een zandlaag als afscherming, komt dit scenario meer overeen met de Nederlandse realiteit. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat de berekening nog steeds conservatief is, hoewel niet langer zeer conservatief.

De scenario's die beschreven staan in RP122-II, zijn opgedeeld in twee categorieën, namelijk 'Hergebruik van NORM' en 'Afvoer van NORM-afval'. Het beschreven onderzoeksdoel is om de stralingsbelasting te bepalen van het afgevoerde registratieplichtig afval. Daarom zijn in dit

rapport alleen de blootstellingsscenario's uit 'Afvoer van NORM-afval' opgenomen, namelijk 'Transport', 'Werken op een deponie' en 'Wonen vlak bij een deponie'. De blootstellingsparameters die zijn gebruikt voor de scenario's, zijn overgenomen uit RP122-II en weergegeven in Tabel C.1. Hierbij is de stofconcentratie afhankelijk van de materiaalsoort.

Tabel C.1 Overzicht van de blootstellingsparameters die gebruikt zijn voor de berekening van de doses per activiteitsconcentratie voor verschillende blootstellingsscenario's.

Parameter	Symbool	Eenheid	Beschrijving
Blootstellingstijd	t	$\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$	Tijdsduur waarin een individu blootgesteld wordt aan de stralingsbron.
Ademvolumetempo	B_r	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Hoeveelheid lucht die in- en uitgeademd wordt per tijdseenheid.
Ingestietempo	r_{ing}	$\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$	Hoeveelheid stof die wordt ingenomen per tijdseenheid.
Stofconcentratie	C_{stof}	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	Hoeveelheid stof aanwezig in een kubieke meter lucht.
Verdunningsfactor	f_N	-	Fractie NORM-afval van het totale afval.
Afschermingsfactor	f_s	-	Mate waarin een beschermende laag/barrière de externe straling tegenhoudt.
Dosisconversie-coëfficiënt	DCC	$\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ $\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (\text{kBq} \cdot \text{kg}^{-1})^{-1}$	Factor die wordt gebruikt om een activiteit(sconcentratie) van een stralingsbron om te zetten in een standaard effectieve stralingsdosis die een individu kan ontvangen. Zie bijlage D.

Voor 'Werken op een deponie' en 'Wonen vlak bij een deponie' zijn ook berekeningen uitgevoerd voor een 'aangepaste' scenario, waarbij drie nieuwe blootstellingsparameters – gamma-afschermingsfactor (*Gamma Shielding Factor for soil*, GSF) voor externe straling, verzwakkingsfactor voor externe straling en reductiefactor voor stofconcentratie – zijn toegevoegd om de Nederlandse situatie beter te kunnen benaderen. Het NORM-afval bevat meestal meerdere radionucliden. In dat geval is gebruikgemaakt van de gewogen GSF. Een beschrijving van deze extra parameters staat in Tabel C.2. Naast deze parameters houden de blootstellingsscenario's ook rekening met de materiaalsoort waaruit het NORM-afval bestaat (zie bijlage B).

in principe is het afval uit voorgaande jaren dat gestort is op de deponie niet in de berekeningen meegenomen. Het oudere afval is namelijk afgeschermd door het nieuwe afval tegen externe straling. Bovendien is er geen sprake meer van verstuiwing, waardoor dit niet kan leiden tot een inhalatie- of directe ingestiedosis. Alleen door uitloging kan er sprake zijn van 'indirecte' ingestie van oudere afvalstoffen. Paragraaf C.2.3 licht dit nader toe.

Tabel C.2 Overzicht van de blootstellingsparameters die niet uit de RP122-II-publicatie komen en gebruikt zijn voor de berekening van de doses per activiteitsconcentratie voor de 'aangepaste' blootstellingsscenario's.

Parameter	Symbool	Eenheid	Beschrijving
Gewogen gamma-afschermingsfactor	f_{GSF}	-	Hoeveelheid externe straling die door de laag zand wordt tegengehouden. Zie bijlage E.
Verzwakkingsfactor	Z_{ext}	-	De mate waarin de stralingsdosis verzwakt wordt door de grotere afstand tussen de (punt)bron en blootstelling. Deze factor is als volgt gedefinieerd: $Z_{\text{ext}} = \left(\frac{d_{\text{org}}}{d_{\text{nieuw}}}\right)^2$, met d_{org} de originele afstand en d_{nieuw} de nieuwe afstand.
Reductiefactor	Z_{stof}	-	De mate waarin de stofconcentratie afneemt door de grotere afstand tussen de bron en blootstelling. Zie bijlage F.

C.2 Toegepaste rekenmethode per blootstellingsscenario

De totale effectieve jaardosis per activiteitsconcentratie, $E_m [\text{mSv} \cdot \text{a}^{-1} (\text{kBq} \cdot \text{kg}^{-1})^{-1}]$, voor een scenario is de sommatie van de doses per activiteitsconcentratie van de drie blootstellingswegen:

$$E_m = E_{m,\text{inh}} + E_{m,\text{ing}} + E_{m,\text{ext}}. \quad (\text{C-1})$$

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van de aanpak zoals uitgevoerd in de NRG-rekentool. De inhalatiedosis voor blootstellingstijd $t[\text{h}]$ is te berekenen met:

$$E_{m,\text{inh}} = \text{DCC}_{\text{inh}} t f_N B_r C_{\text{stof}}, \quad (\text{C-2})$$

de bijdrage door directe ingestie met:

$$E_{m,\text{ing}} = \text{DCC}_{\text{ing}} t f_N r_{\text{ing}}, \quad (\text{C-3})$$

en de bijdrage door externe straling met:

$$E_{m,\text{ext}} = 1000 \cdot \frac{\text{DCC}_{\text{ext}} t f_N}{f_s}. \quad (\text{C-4})$$

De waarde van f_s is 1 wanneer er geen afscherming is, of wanneer de afscherming al in de DCC is verdisconteerd.

Voor één blootstellingsscenario is er sprake van indirecte ingestie. Gezien de vergelijking van deze blootstellingsweg complex is, wordt voor de beschrijving én de vergelijking hiervan verwezen naar de RP122-II-publicatie. De reken tool volgt voor de berekening van de 'indirecte' ingestie de methodiek, zoals gepresenteerd in RP122-II [8].

Voor de 'aangepaste' blootstellingsscenario's wijkt de vergelijking voor externe straling af van vergelijking C-4. Voor 'Werken op een deponie' is de vergelijking:

$$E_{m,ext} = 1000 \cdot \frac{DCC_{ext} t f_N f_{GSF}}{f_s}, \quad (C-5)$$

en voor 'Wonen vlak bij een deponie':

$$E_{m,ext} = 1000 \cdot \frac{DCC_{ext} t f_N f_{GSF} Z_{ext}}{f_s}. \quad (C-6)$$

Daarnaast heeft 'Wonen vlak bij een deponie' ook een extra parameter in de vergelijking voor inhalatie:

$$E_{m,inh} = DCC_{inh} t f_N B_r C_{stof} Z_{stof}. \quad (C-7)$$

In paragrafen C.2.1, C.2.2 en C.2.3 worden de verschillende blootstellingsscenario's (zowel 'standaard' als 'aangepast') kort beschreven, met de bijbehorende parameterwaarden en de exacte vergelijkingen. Voor een gedetailleerde beschrijving van de 'standaard' blootstellingsscenario's en de door RP122-II gekozen 'standaard' parameterwaarden wordt verwezen naar de RP122-II-publicatie [8]. De waarden van de DCC's staan in bijlage D.

C.2.1 Transport

Het NORM-afval wordt van de ondernemer naar de deponie vervoerd in een vrachtwagen. Hierbij worden alleen de chauffeurs (werknemers) blootgesteld aan ioniserende straling die afkomstig is van het afval tijdens het vervoer en het laden en lossen ervan. Tijdens het rijden en bij het laden en lossen van de lading, wordt de chauffeur blootgesteld aan externe straling door het afval. Daarnaast krijgt de chauffeur stofdeeltjes met NORM binnen bij het laden en lossen, wat leidt tot een inhalatie- en ingestiedosis. De chauffeur wordt onder andere door de vrachtwagencabine en de stoel afgeschermd tijdens het rijden. Deze afscherming is gemodelleerd als een afscherming van 1 cm staal.

RP122-II maakt bij dit scenario onderscheid tussen kleine en grote afstanden, waarbij alleen de blootstellingstijden van elkaar verschillen. In Tabel C.3 staan de specifieke blootstellingsparameterwaarden voor deze twee blootstellingsscenario's (kleine en grote afstand). De dosis per activiteitsconcentratie specifiek voor deze twee scenario's is berekend volgens de volgende vergelijking:

$$E_m = DCC_{inh} t_{laden} B_r C_{stof} + DCC_{ing} t_{laden} r_{ing} + 1000 \cdot DCC_{ext,transport} (t_{rijden} + t_{laden}) \quad (C-8)$$

Hoewel de chauffeur is afgeschermd tijdens het rijden, is de afschermingsfactor geen blootstellingsparameter. De afscherming zit al in de DCC voor externe straling, $DCC_{ext,transport}$, verdisconteerd. RP122-II heeft voor dit scenario ervoor gekozen om voor de parameter stofconcentratie dezelfde waarde te gebruiken voor alle materiaalsoorten.

Tabel C.3 Overzicht van de blootstellingsparameterwaarden die gebruikt zijn voor de berekening van de doses per activiteitsconcentratie voor de twee blootstellingsscenario's 'Transport'. De parameterwaarden zijn overgenomen uit RP122-II-publicatie [8].

Parameter	Symbool	Eenheid	Klein	Groot
Blootstellingstijd rijden	t_{rijden}	$h \cdot a^{-1}$	700	850
Blootstellingstijd laden/lossen	t_{laden}	$h \cdot a^{-1}$	400	100
Ademvolumetempo	B_r	$m^3 \cdot h^{-1}$		1,2
Stofconcentratie	C_{stof}	$mg \cdot m^{-3}$		1
Ingestietempo	r_{ing}	$mg \cdot h^{-1}$		10
Dosisconversiecoëfficiënt	DCC_{inh}	$Sv \cdot Bq^{-1}$		Tabel D.1
	DCC_{ing}	$Sv \cdot Bq^{-1}$		Tabel D.2
	$DCC_{ext,transport}$	$Sv \cdot h^{-1} \cdot (kBq \cdot kg^{-1})^{-1}$		Tabel D.3

De blootstellingstijden en hoeveelheid lading zullen in werkelijkheid sterk variëren. Hierdoor is ervoor gekozen om voor deze blootstellingsscenario's de stralingsbelasting niet te berekenen met een 'aangepaste' set parameterwaarden. De resultaten voor de 'standaard' scenario's (korte en lange afstand) dienen als bovengrens van de stralingsbelasting door NORM-afval voor de chauffeurs.

C.2.2

Werken op een deponie

De gebruikte parameterwaarden zowel voor het 'standaard' als het 'aangepaste' scenario zijn samengevat in Tabel C.4. De scenario's zijn hieronder kort beschreven.

Standaard scenario

Voor het conservatieve 'standaard' scenario dat gebruikt is door RP122-II, is de dosis per activiteitsconcentratie voor werknemers berekend met:

$$E_m = t_{dep} f_N \left(DCC_{inh} B_r C_{stof,dep} + DCC_{ing} r_{ing} + 1000 \cdot \frac{DCC_{ext,dep}}{f_s} \right). \quad (C-9)$$

RP122-II veronderstelt dat de werknemer zich tijdens zijn werkzaamheden – het afval verplaatsen en storten op de stortplaats – voornamelijk binnen een stalen truckcabine bevindt. Hij wordt gedurende de werkdag blootgesteld aan externe straling en straling via inhalatie en ingestie. RP122-II gaat uit van een stoffige buitenomgeving, waarbij voor alle materiaalsoorten dezelfde waarde is gebruikt voor de stofconcentratie. Verder zijn de parameterwaarden voor de inhalatie- en ingestiedosis zodanig gekozen, dat zij representatief zijn voor de blootstelling van een gemiddelde werkdag met verschillende werkzaamheden.

Op de deponie wordt naast NORM-afval ook niet-radioactief afval gestort. RP122-II heeft twee scenario's doorgerekend met verschillende fracties NORM-afval ten opzichte van de totale hoeveelheid afval op een deponie, namelijk $f_N = 0,1$ en $f_N = 1$. Aangezien de werkelijke fractie in Nederland varieert tussen 0,01 en 0,4, is ervoor gekozen om alleen voor deze blootstellingsparameter één standaardwaarde te gebruiken die

representatief is voor Nederland, en dus niet de waarden te gebruiken uit RP122-II. Om onderschattingen te voorkomen, is voor zowel het 'standaard' als het 'aangepaste' scenario $f_N = 0,4$ gebruikt. Deze waarde is representatief voor de door ons onderzochte deponie, die als basis is gebruikt voor de dosisberekeningen in paragraaf 3.2.

Tabel C.4 Overzicht van de blootstellingsparameterwaarden die gebruikt zijn voor de berekening van de doses per activiteitsconcentratie voor de 'standaard' en 'aangepaste' blootstellingsscenario 'Werken op een deponie'. De 'standaard' parameterwaarden zijn overgenomen uit RP122-II-publicatie [8], behalve de verdunningsfactor. Voor de verdunningsfactor is voor 'standaard' en 'aangepaste' scenario een voor Nederland realistische waarde gebruikt, namelijk 0,4.

parameter	symbool	eenheid	standaard	aangepast
Verdunningsfactor	f_N	-	0,4	
Blootstellingstijd deponie	t_{dep}	$\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$	1800	
Blootstellingstijd buiten cabine	$t_{\text{dep, buiten}}$	$\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$	-	225
Afscherming	f_s	$\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$	2	
Ademvolumetempo	B_r	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	1,2	
Stofconcentratie	C_{stof}	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	1	0,1
ingestietempo	r_{ing}	$\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$	10	5
Dosisconversie-coëfficiënt	DCC_{inh}	$\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$	Tabel D.1	
	DCC_{ing}	$\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$	Tabel D.2	
	$\text{DCC}_{\text{ext, dep}}$	$\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (\text{kBq} \cdot \text{kg}^{-1})^{-1}$	Tabel D.3	
Gewogen gamma-afschermingsfactor	f_{GSF}	-	Tabel E.2	
			Tabel E.1	
			Tabel E.3	

Aangepast scenario

In het 'aangepaste' scenario is rekening gehouden met de verplichte isolatievoorzieningen op een deponie (zie paragraaf 2.4). In het 'standaard' scenario wordt daarmee géén rekening gehouden. Deze voorzieningen hebben een positieve invloed op de stralingsblootstelling van de werknemer. De vergelijking voor dit scenario heeft een extra parameter voor de afscherming van externe straling door de afdeklaag (blootstellingsparameter GSF):

$$E_m = f_N \left(t_{\text{dep, buiten}} (\text{DCC}_{\text{inh}} B_r C_{\text{stof, dep}} + \text{DCC}_{\text{ing}} r_{\text{ing}}) + 1000 \cdot \frac{\text{DCC}_{\text{ext, dep}} t_{\text{dep}} f_{\text{GSF}}}{f_s} \right). \quad (\text{C-10})$$

De afdeklaag zorgt ook ervoor dat de afvalstoffen niet kunnen verstuiven. Dit zorgt naast een lagere blootstelling aan externe straling, voor een veel lagere stofconcentratie en een veel lager ingestietempo voor de werknemer. In dit scenario hebben wij conservatief gekozen voor de minimale afdeklaagdikte van 10 cm. De berekening van de hieruit volgende GSF-waarde is beschreven in bijlage E. De ANVS heeft een beschikking verleend voor specifieke vrijgave, waarbij voor de

dosisberekeningen voor de minimale verstuifbaarheid van de afvalstoffen een stofconcentratie is aangenomen van een tiende van de RP122-II-waarden en een ingestietempo van de helft van de RP122-II-waarden. Omdat de ANVS deze waarden realistisch heeft geacht, hebben wij ze voor dit scenario in dit onderzoek overgenomen. Daarnaast bevindt de werknemer zich het grootste deel van zijn werktijd in een truckcabine met overdruk en filterinstallatie. Dit betekent dat de werknemer binnen de cabine in principe geen inhalatie- en ingestiedosis ontvangt. Ook dit is meegenomen in het 'aangepaste' scenario.

C.2.3 Wonen vlak bij een deponie

In Tabel C.5 zijn de 'standaard' en 'aangepaste' parameterwaarden weergegeven, die zijn gebruikt bij de berekeningen. RP122-II heeft de berekeningen uitgevoerd voor verschillende leeftijdscategorieën. In dit rapport is ervoor gekozen om de berekeningen alleen voor volwassenen uit te voeren.

Standaard scenario

Alleen leden van de bevolking die voldoende dichtbij een deponie wonen, zouden een dosis kunnen ontvangen ten gevolge van NORM-afval op de deponie. De vergelijking voor de dosis per activiteitsconcentratie is als volgt:

$$E_m = f_N \left(DCC_{inh} B_r (t_{huis} C_{stof,huis} + t_{tuin} C_{stof,tuin} + t_{dep} C_{stof,dep}) + DCC_{ing} (t_{dep} r_{ing}) + (DCC_{ext,huis} t_{huis} + DCC_{ext,tuin} t_{tuin} + DCC_{ext,dep} t_{dep}) \right) + E_{m, sec.ing} \quad (C-11)$$

met $E_{m, sec.ing}$ de dosis per activiteitsconcentratie voor indirecte ingestie. Gezien de complexiteit voor de berekening van deze parameter, wordt voor de vergelijking van $E_{m, sec.ing}$ en gedetailleerde beschrijving verwezen naar RP122-II.

Het gaat hier om dezelfde deponie zoals beschreven in paragraaf C.2.2. RP122-II gaat uit van een lid van de bevolking dat op 25 m afstand van de deponie woont en een moestuin heeft. Deze persoon verblijft gedurende het jaar in zijn huis, in zijn tuin en ook op de deponie⁹. Daarnaast eet deze persoon groente en fruit uit eigen moestuin en van lokale boeren. Zowel in huis, in de tuin als op de deponie wordt dit lid van de bevolking blootgesteld aan externe straling door het gestorte NORM-afval.

De bewoner kan ook worden blootgesteld aan radioactieve stofdeeltjes via ingestie en inhalatie wanneer hij op de deponie staat. Deze stofdeeltjes kunnen ook overwaaien naar de omgeving. De stofconcentratie zou dusdanig hoog zijn, dat de bewoner deze deeltjes in de tuin of in huis kan inhaleren, wat kan leiden tot een inhalatiedosis. Daarentegen zou de stofconcentratie laag genoeg blijven, zodat een ingestiedosis niet aan de orde is. Wel kan die hypothetische aanwonende blootgesteld worden aan een 'indirecte' ingestiedosis door het eten van lokaal verbouwde groenten en fruit. De radionucliden

⁹ RP122-II heeft uit conservatieve overwegingen ook de blootstelling door verblijf op een deponie in dit scenario geïnccludeerd.

kunnen via uitloging in het irrigatiewater terechtkomen waarmee de gewassen worden bewaterd, of als stofdeeltjes via de wind (en neerslag) belanden op de gewassen.

Voor de uitloging van radionucliden veronderstelt RP122-II een totale activiteit van 1 TBq voor de hele deponie, waarvan een deel jaarlijks uitloopt naar het grondwater. Een deel hiervan wordt vervolgens gebruikt als irrigatiewater. Voor meer details zie RP122-II [8].

Tabel C.5 Overzicht van de blootstellingsparameterwaarden die gebruikt zijn voor de berekening van de doses per activiteitsconcentratie voor de 'standaard' en 'aangepaste' blootstellingsscenario 'Wonen vlak bij een deponie'. De 'standaard' parameterwaarden zijn overgenomen uit RP122-II-publicatie [8], behalve de verdunningsfactor.

parameter	symbool	eenheid	materiaal	standaard	aangepast
Verdunningsfactor	f_N	-		0,4	
Blootstellingstijd deponie	t_{dep}	$\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$		100	0
Blootstellingstijd huis	t_{huis}	$\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$		6000	
Blootstellingstijd tuin	t_{tuin}	$\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$		1500	
Ademvolumetempo	B_r	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$		0,925	
Stofconcentratie deponie	$C_{\text{stof,dep}}$	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	Steen	0,2	
			As	0,5	
			Zand	0,5	-
			Slak	0,2	
Stofconcentratie tuin	$C_{\text{stof,tuin}}$	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	Steen	0,05	0,005
			As	0,1	0,01
			Zand	0,1	0,01
			Slak	0,05	0,005
Stofconcentratie huis	$C_{\text{stof,huis}}$	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	Steen	0,02	0,002
			As	0,05	0,005
			Zand	0,05	0,005
			Slak	0,02	0,002
Ingestietempo	r_{ing}	$\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$		5	-
Dosisconversie-coëfficiënt	DCC_{inh}	$\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$		Tabel D.1	
	DCC_{ing}	$\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$		Tabel D.2	
	$\text{DCC}_{\text{ext,dep}}$	$\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (\text{kBq} \cdot \text{kg}^{-1})^{-1}$		Tabel D.3	
	$\text{DCC}_{\text{ext,tuin}}$	$\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (\text{kBq} \cdot \text{kg}^{-1})^{-1}$		Tabel D.3	
	$\text{DCC}_{\text{ext,huis}}$	$\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (\text{kBq} \cdot \text{kg}^{-1})^{-1}$		Tabel D.3	
Gewogen gamma-afschermingsfactor	f_{GSF}	-			Tabel E.2
				-	Tabel E.1
					Tabel E.3
Verzwakkingsfactor	Z_{ext}	-		-	6,25E-04
Reductiefactor	Z_{stof}	-		-	0,1

Aangepast scenario

Realistisch gezien zou een lid van de bevolking geen voet op een in bedrijf zijnde deponie zetten. Deponieën in Nederland zijn namelijk beveiligd en niet toegankelijk voor het publiek. In het 'aangepaste'

scenario is hiermee rekening gehouden. Ook zijn er in Nederland geen woningen binnen een straal van 1 km van een deponie voor gevaarlijke stoffen met isolatievoorzieningen. De vergelijking voor deze dosis heeft daarom drie extra parameters – correctie voor de afstand voor externe straling en stofconcentratie, en voor de afscherming van externe straling – in vergelijking met de ‘standaard’ scenario:

$$E_m = f_N (DCC_{inh} B_r (t_{huis} C_{stof,huis} + t_{tuin} C_{stof,tuin}) Z_{stof} + (DCC_{ext,huis} t_{huis} + DCC_{ext,tuin} t_{tuin}) Z_{ext} f_{GSF}) \quad (C-12)$$

Bij dit ‘aangepaste’ scenario is de afstand tussen het huis en de deponie op 1 km gezet. De verzwakkingsfactor Z_{ext} (zie Tabel C.1) en reductiefactor Z_{stof} (zie bijlage F) zijn toegepast bij de berekeningen om de invloed van de afstandsverandering te corrigeren. Voor de berekening van de verzwakkingsfactor is de deponie als een puntbron benaderd. Door de afdeklaag en onderafdichting op de deponie vindt er minimale verstuiving en geen uitloging plaats. In bijlage E staat beschreven hoe de gewogen gamma-afschermingsfactor (f_{GSF}) voor de radionucliden berekend kunnen worden. Dosis door ‘indirecte’ ingestie kan uitgesloten worden. Net als bij ‘Werken op een deponie’ is vanwege de minimale verstuiving van het stof bij deze situatie voor de stofconcentraties een tiende genomen van de RP122-II-waarden.

C.3 Resultaten

Voor elk blootstellingsscenario is met vier verschillende materiaalsoorten gerekend: zand, as, steen en slak. RP122-II gaat uit van verschillende karakteristieken voor deze vier materiaalsoorten. Dit heeft met name invloed op de stofconcentraties en de uitloging van stoffen uit het materiaal.

C.3.1 Transport

RP122-II hanteert in dit scenario dezelfde parameterwaarden voor de vier materiaalsoorten. De uitkomsten zijn daarom identiek voor elk materiaal. Voor elk scenario presenteert RP122-II slechts één set van resultaten, die maatgevend is voor alle vier de materiaalsoorten. Tabel C.6 geeft de resultaten voor de kleine en grote afstand.

Tabel C.6 Dosis per activiteitsconcentratie [$\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}$] per nuclide of nuclidenreeks behorend bij het blootstellingsscenario voor 'Transport' over kleine en grote afstanden.

Nuclide- (reeks)	$E_{\text{m, klein}} [\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}]$				$E_{\text{m, groot}} [\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}]$			
	$E_{\text{m, ext}}$	$E_{\text{m, inh}}$	$E_{\text{m, ing}}$	E_{m}	$E_{\text{m, ext}}$	$E_{\text{m, inh}}$	$E_{\text{m, ing}}$	E_{m}
U-238sec	8,5E-02	1,4E-02	6,4E-03	1,1E-01	7,3E-02	3,5E-03	1,6E-03	7,8E-02
U-nat	7,8E-04	6,1E-03	3,9E-04	7,3E-03	6,8E-04	1,5E-03	9,9E-05	2,3E-03
Th-230	1,2E-06	3,5E-03	8,4E-04	4,3E-03	1,0E-06	8,6E-04	2,1E-04	1,1E-03
Ra-226+	8,4E-02	1,1E-03	1,1E-03	8,6E-02	7,2E-02	2,7E-04	2,8E-04	7,3E-02
Pb-210+	6,7E-14	5,6E-04	2,7E-03	3,3E-03	5,8E-14	1,4E-04	6,8E-04	8,2E-04
Po-210	3,9E-07	1,1E-03	9,6E-04	2,0E-03	3,4E-07	2,6E-04	2,4E-04	5,0E-04
U-235sec	1,2E-02	4,0E-02	7,9E-03	6,0E-02	1,0E-02	1,0E-02	2,0E-03	2,2E-02
Th-232sec	1,3E-01	2,3E-02	4,1E-03	1,6E-01	1,1E-01	5,8E-03	1,0E-03	1,2E-01
Th-232	2,0E-07	5,8E-03	8,8E-04	6,6E-03	1,8E-07	1,4E-03	2,2E-04	1,7E-03
Ra-228+	4,4E-02	8,2E-04	2,7E-03	4,8E-02	3,8E-02	2,1E-04	6,7E-04	3,9E-02
Th-228+	8,6E-02	1,7E-02	5,7E-04	1,0E-01	7,4E-02	4,1E-03	1,4E-04	7,8E-02
K-40	8,4E-03	0,0E+00	0,0E+00	8,4E-03	7,2E-03	0,0E+00	0,0E+00	7,2E-03

C.3.2 Werken op een deponie

Bij het scenario 'Werken op een deponie' zijn de parameterwaarden voor de vier materiaalsoorten gelijk aan elkaar, net als bij het scenario 'Transport'. En ook hier is slechts één set resultaten per scenario getoond die maatgevend is voor alle vier materiaalsoorten.

Standaard scenario

Tabel C.7 geeft de resultaten van de doses per activiteitsconcentratie per blootstellingweg en de totale doses per activiteitsconcentratie.

Tabel C.7 Dosis per activiteitsconcentratie [$\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}$] per nuclide of nuclidenreeks behorend bij het 'standaard' scenario voor 'Werken op een deponie'.

Nuclide- (reeks)	$E_{\text{m, standaard}} [\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}]$			
	$E_{\text{m, ext}}$	$E_{\text{m, inh}}$	$E_{\text{m, ing}}$	E_{m}
U-238sec	1,6E-01	2,5E-02	1,2E-02	1,9E-01
U-nat	2,2E-03	1,1E-02	7,1E-04	1,4E-02
Th-230	1,4E-05	6,2E-03	1,5E-03	7,7E-03
Ra-226+	1,5E-01	1,9E-03	2,0E-03	1,6E-01
Pb-210+	3,9E-05	1,0E-03	4,9E-03	5,9E-03
Po-210	7,5E-07	1,9E-03	1,7E-03	3,6E-03
U-235sec	4,8E-02	7,2E-02	1,4E-02	1,3E-01
Th-232sec	2,2E-01	4,2E-02	7,4E-03	2,7E-01
Th-232	8,0E-06	1,0E-02	1,6E-03	1,2E-02
Ra-228+	8,2E-02	1,5E-03	4,8E-03	8,8E-02
Th-228+	1,4E-01	3,0E-02	1,0E-03	1,7E-01
K-40	1,4E-02	0,0E+00	0,0E+00	1,4E-02

Aangepast scenario

In Tabel C.8 zijn de doses per activiteitsconcentratie samengevat voor een afdeklaagdikte van 10 cm.

Tabel C.8 Dosis per activiteitsconcentratie [$\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}$] per nuclide of nuclidenreeks behorend bij het 'aangepaste' scenario voor 'Werken op een deponie'.

Nuclide- (reeks)	$E_{\text{m, aangepast}} [\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}]$			
	$E_{\text{m,ext}}$	$E_{\text{m,inh}}$	$E_{\text{m,ing}}$	E_{m}
U-238sec	4,7E-02	3,1E-04	7,2E-04	4,8E-02
U-nat	6,7E-04	1,4E-04	4,4E-05	8,6E-04
Th-230	4,2E-07	7,8E-05	9,5E-05	1,7E-04
Ra-226+	4,5E-02	2,4E-05	1,3E-04	4,6E-02
Pb-210+	7,7E-06	1,3E-05	3,1E-04	3,3E-04
Po-210	2,2E-07	2,4E-05	1,1E-04	1,3E-04
U-235sec	9,6E-03	9,0E-04	8,8E-04	1,1E-02
Th-232sec	6,7E-02	5,2E-04	4,7E-04	6,8E-02
Th-232	7,2E-08	1,3E-04	9,9E-05	2,3E-04
Ra-228+	2,5E-02	1,8E-05	3,0E-04	2,5E-02
Th-228+	4,3E-02	3,7E-04	6,4E-05	4,3E-02
K-40	4,1E-03	0,0E+00	0,0E+00	4,1E-03

C.3.3 Wonen vlak bij een deponie

Standaard scenario

De resultaten van E_{m} zijn samengevat per materiaalsoort in Tabel C.9 (zand), Tabel C.10 (as), Tabel C.11 (steen) en Tabel C.12 (slak).

Tabel C.9 Dosis per activiteitsconcentratie [$\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}$] per nuclide of nuclidenreeks behorend bij het 'standaard' scenario voor 'Wonen vlak bij een deponie' voor materiaalsoort zand.

Nuclide- (reeks)	$E_{\text{standaard, zand}} [\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}]$			
	$E_{\text{m,ext}}$	$E_{\text{m,inh}}$	$E_{\text{m,ing}}$	E_{m}
U-238sec	7,6E-02	8,2E-03	9,3E-03	9,3E-02
U-nat	1,0E-03	3,0E-03	1,2E-04	4,1E-03
Th-230	3,9E-06	2,3E-03	1,1E-04	2,4E-03
Ra-226+	7,4E-02	1,6E-03	7,1E-04	7,6E-02
Pb-210+	1,5E-05	8,5E-04	2,6E-03	3,5E-03
Po-210	3,4E-07	6,5E-04	5,1E-03	5,8E-03
U-235sec	2,0E-02	2,2E-02	2,3E-03	4,4E-02
Th-232sec	1,2E-01	1,4E-02	3,9E-03	1,3E-01
Th-232	1,8E-06	3,8E-03	6,3E-04	4,4E-03
Ra-228+	3,9E-02	2,4E-03	4,0E-03	4,5E-02
Th-228+	7,7E-02	8,0E-03	3,2E-04	8,6E-02
K-40	6,9E-03	0,0E+00	0,0E+00	6,9E-03

Tabel C.10 Dosis per activiteitsconcentratie [$\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}$] per nuclide of nuclidenreeks behorend bij het 'standaard' scenario voor 'Wonen vlak bij een deponie' voor materiaalsoort as.

Nuclide- (reeks)	$E_{\text{standaard, as}} [\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}]$			
	$E_{\text{m,ext}}$	$E_{\text{m,inh}}$	$E_{\text{m,ing}}$	E_{m}
U-238sec	7,6E-02	8,2E-03	1,9E-02	1,0E-01
U-nat	1,0E-03	3,0E-03	4,0E-04	4,4E-03
Th-230	3,9E-06	2,3E-03	5,9E-04	2,9E-03
Ra-226+	7,4E-02	1,6E-03	3,1E-03	7,9E-02
Pb-210+	1,5E-05	8,5E-04	5,3E-03	6,2E-03
Po-210	3,4E-07	6,5E-04	1,0E-02	1,1E-02
U-235sec	2,0E-02	2,2E-02	7,7E-03	4,9E-02
Th-232sec	1,2E-01	1,4E-02	1,6E-02	1,5E-01
Th-232	1,8E-06	3,8E-03	5,7E-03	9,5E-03
Ra-228+	3,9E-02	2,7E-03	1,1E-02	5,2E-02
Th-228+	7,7E-02	8,0E-03	1,0E-03	8,7E-02
K-40	6,9E-03	0,0E+00	0,0E+00	6,9E-03

Tabel C.11 Dosis per activiteitsconcentratie [$\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}$] per nuclide of nuclidenreeks behorend bij het 'standaard' scenario voor 'Wonen vlak bij een deponie' voor materiaalsoort steen.

Nuclide- (reeks)	$E_{\text{standaard, steen}} [\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}]$			
	$E_{\text{m,ext}}$	$E_{\text{m,inh}}$	$E_{\text{m,ing}}$	E_{m}
U-238sec	7,6E-02	4,0E-03	1,3E-01	2,1E-01
U-nat	1,0E-03	1,3E-03	3,2E-03	5,5E-03
Th-230	3,9E-06	9,8E-04	5,4E-03	6,3E-03
Ra-226+	4,9E-02	6,4E-04	5,4E-02	1,0E-01
Pb-210+	8,4E-06	3,8E-04	4,4E-02	4,5E-02
Po-210	3,4E-07	2,7E-04	5,8E-02	5,9E-02
U-235sec	2,0E-02	9,1E-03	6,2E-02	9,1E-02
Th-232sec	7,9E-02	5,9E-03	2,0E-01	2,8E-01
Th-232	1,8E-06	1,6E-03	5,6E-02	5,8E-02
Ra-228+	2,5E-02	1,0E-03	1,4E-01	1,6E-01
Th-228+	7,7E-02	3,4E-03	8,2E-03	8,9E-02
K-40	6,9E-03	0,0E+00	0,0E+00	6,9E-03

Tabel C.12 Dosis per activiteitsconcentratie [$\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}$] per nuclide of nuclidenreeks behorend bij het 'standaard' scenario voor 'Wonen vlak bij een deponie' voor materiaalsoort slak.

Nuclide- (reeks)	$E_{\text{standaard, slak}} [\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}]$			
	$E_{\text{m,ext}}$	$E_{\text{m,inh}}$	$E_{\text{m,ing}}$	E_{m}
U-238sec	7,6E-02	3,5E-03	1,9E-02	9,8E-02
U-nat	1,0E-03	1,3E-03	3,9E-04	2,7E-03
Th-230	3,9E-06	9,8E-04	5,8E-04	1,6E-03
Ra-226+	7,4E-02	6,8E-04	3,1E-03	7,8E-02
Pb-210+	1,5E-05	3,5E-04	5,3E-03	5,6E-03
Po-210	3,4E-07	2,7E-04	9,9E-03	1,0E-02
U-235sec	1,3E-02	5,2E-03	6,6E-03	2,5E-02
Th-232sec	1,2E-01	6,0E-03	1,6E-02	1,4E-01
Th-232	1,8E-06	1,6E-03	5,7E-03	7,3E-03
Ra-228+	3,9E-02	1,1E-03	1,1E-02	5,1E-02
Th-228+	7,7E-02	3,4E-03	1,0E-03	8,2E-02
K-40	6,9E-03	0,0E+00	0,0E+00	6,9E-03

Aangepast scenario

De ingestiedosis – voor zowel directe als indirecte ingestie – is bij dit scenario niet van toepassing. De stofconcentraties van zowel die van zand en as enerzijds, als steen en slak anderzijds, zijn gelijk. Dit resulteert in dezelfde doses per activiteitsconcentratie voor zand en as, en voor steen en slak. Tabel C.13 geeft een overzicht van de resultaten voor zand en as, en Tabel C.14 de resultaten van steen en slak voor een afdeklaagdikte van 10 cm.

Tabel C.13 Dosis per activiteitsconcentratie [$\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}$] per nuclide of nuclidenreeks behorend bij het 'aangepaste' scenario voor 'Wonen vlak bij een deponie' voor materiaalsoort zand en as.

Nuclide- (reeks)	$E_{\text{aangepast, zand/as}} [\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}]$		
	$E_{\text{m,ext}}$	$E_{\text{m,inh}}$	E_{m}
U-238sec	6,1E-06	8,3E-05	8,9E-05
U-nat	7,0E-08	2,6E-05	2,6E-05
Th-230	4,4E-11	2,1E-05	2,1E-05
Ra-226+	6,0E-06	1,3E-05	1,9E-05
Pb-210+	5,1E-10	8,1E-06	8,1E-06
Po-210	2,5E-11	5,0E-06	5,0E-06
U-235sec	7,9E-07	1,9E-04	2,0E-04
Th-232sec	1,0E-05	1,2E-04	1,3E-04
Th-232	5,0E-12	3,4E-05	3,4E-05
Ra-228+	3,0E-06	2,2E-05	2,4E-05
Th-228+	7,1E-06	6,9E-05	7,6E-05
K-40	5,9E-07	0,0E+00	5,9E-07

Tabel C.14 Dosis per activiteitsconcentratie [$\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}$] per nuclide of nuclidenreeks behorend bij het 'aangepaste' scenario voor 'Wonen vlak bij een deponie' voor materiaalsoort steen en slak.

Nuclide- (reeks)	$E_{\text{aangepast, steen/slak}} [\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1})^{-1}]$		
	$E_{\text{m,ext}}$	$E_{\text{m,inh}}$	E_{m}
U-238sec	6,1E-06	3,5E-05	4,1E-05
U-nat	7,0E-08	1,1E-05	1,1E-05
Th-230	4,4E-11	8,8E-06	8,8E-06
Ra-226+	6,0E-06	5,7E-06	1,2E-05
Pb-210+	5,1E-10	3,4E-06	3,4E-06
Po-210	2,5E-11	2,1E-06	2,1E-06
U-235sec	7,9E-07	7,1E-05	7,1E-05
Th-232sec	1,0E-05	5,3E-05	6,3E-05
Th-232	5,0E-12	1,4E-05	1,4E-05
Ra-228+	3,0E-06	9,1E-06	1,2E-05
Th-228+	7,1E-06	2,6E-05	3,3E-05
K-40	5,9E-07	0,0E+00	5,9E-07

D Dosisconversiecoëfficiënten (DCC's)

Deze bijlage geeft een overzicht van de dosisconversiecoëfficiënten (DCC's) voor de verschillende blootstellingswegen en verschillende blootstellingsscenario's die onderzocht zijn in dit rapport. Met een DCC kan de activiteit van de bron omgerekend worden in een effectieve stralingsdosis die een persoon kan ontvangen. Door gebruik te maken van DCC's kan dus voor de verschillende blootstellingsscenario's de dosis worden berekend. Voor deze studie zijn de dosisberekeningen uitgevoerd met de DCC's die al zijn geïntegreerd in de hiervoor gebruikte rekentool (zie hoofdstuk 3 en bijlage C). De rekentool heeft deze waarden overgenomen uit *Radiation Protection 122 part 2* (RP122-II) [8].

In RP122-II zijn de DCC's gegeven voor K-40, de drie natuurlijke vervalreeksen, en een aantal deelreeksen en enkele afzonderlijke radionucliden uit deze vervalreeksen. De inhalatie- en ingestiedosis door K-40 zijn verwaarloosbaar klein. Voor deze blootstellingswegen zijn er geen DCC's voor K-40 gebruikt; zij zijn dan ook niet opgenomen in onderstaande tabellen.

In RP122-II heeft men aangenomen dat U-238 en U-235 in natuurlijke verhouding voorkomen in NORM-rest- en afvalstoffen. Dat is te zien in de DCC's voor U-238sec: daarin is namelijk ook een natuurlijk percentage U-235sec meegenomen. Strikt genomen hadden de auteurs van RP122-II daarvoor eigenlijk beter de term U-natsec kunnen gebruiken dan U-238sec. In ons rapport is ervoor gekozen om de notatie U-natsec te gebruiken, om te benadrukken dat deze DCC's natuurlijk uranium in seculair evenwicht representeren.

De DCC's van de drie blootstellingswegen zijn hieronder in afzonderlijke paragrafen behandeld. Voor het blootstellingspad 'externe straling' is ook een omschrijving gegeven van de blootstellingsscenario's waaruit de DCC's zijn bepaald.

D.1 Inhalatie

De DCC's voor inhalatie (DCC_{inh}) zijn oorspronkelijk overgenomen uit de ICRP-publicatie 119 [23] (hierna: ICRP119). RP122-II heeft voor de werknemer een activiteits-mediane aerodynamische diameter (AMAD) genomen van 5 μm en het langzaamste absorptietype. Voor leden van de bevolking zijn leeftijdsafhankelijke DCC's opgesteld. Voor alle leeftijden is daar ook het langzaamste absorptietype gekozen. In Tabel D.1 zijn de DCC's voor beide blootstellingsgroepen samengevat.

D.2 Ingestie

De DCC's voor ingestie (DCC_{ing}) komen uit dezelfde bron als die voor inhalatie. Zowel voor werkers als leden van de bevolking is gekozen voor de DCC's met de laagste absorptiefractie.

Voor werknemers wijken de DCC's in RP122-II af van ICRP119. Voor deze studie hebben wij ervoor gekozen om deze DCC's te corrigeren in de rekentool, zodat zij in overeenstemming zijn met ICRP119.

Het overzicht van de gebruikte DCC's voor ingestie is in Tabel D.2 gepresenteerd.

Tabel D.1 De dosisconversiecoëfficiënten (DCC's) in $[Sv \cdot Bq^{-1}]$ voor inhalatie voor leden van de bevolking (volwassenen) en werknemers [8, 23].

Nuclide(reeks)	volwassene	werknemer
U-natsec	5,70E-05	2,91E-05
U-nat	1,78E-05	1,28E-05
Th-230	1,40E-05	7,20E-06
Ra-226+	9,53E-06	2,23E-06
Pb-210+	5,69E-06	1,16E-06
Po-210	4,30E-06	2,20E-06
U-235sec	1,33E-04	8,30E-05
U-235+	8,50E-06	5,70E-06
Pa-231	3,40E-05	1,70E-05
Ac-227+	9,07E-05	6,03E-05
Th-232sec	8,46E-05	4,82E-05
Th-232	2,50E-05	1,20E-05
Ra-228+	1,60E-05	1,71E-06
Th228+	4,36E-05	3,45E-05

Tabel D.2 De dosisconversiecoëfficiënten (DCC's) in $[Sv \cdot Bq^{-1}]$ voor ingestie voor leden van de bevolking (volwassenen) en werknemers [8, 23].

Nuclide(reeks)	volwassene	werknemer
U-natsec	2,57E-06	1,60E-06
U-nat	1,00E-07	9,85E-08
Th-230	2,10E-07	2,10E-07
Ra-226+	2,80E-07	2,80E-07
Pb-210+	6,91E-07	6,81E-07
Po-210	1,20E-06	2,40E-07
U-235sec	1,97E-06	1,97E-06
U-235+	4,73E-08	4,63E-08
Pa-231	7,10E-07	7,10E-07
Ac-227+	1,21E-06	1,21E-06
Th-232sec	1,06E-06	1,03E-06
Th-232	2,30E-07	2,20E-07
Ra-228+	6,90E-07	6,70E-07
Th228+	1,43E-07	1,43E-07

D.3 Externe straling

De DCC's voor externe straling zijn zeer afhankelijk van de blootstellingssituatie. Per blootstellingsscenario hebben de auteurs van RP122-II de DCC's voor externe straling bepaald met het softwarepakket *Microshield* [24]. Deze DCC's zijn gedefinieerd voor een radionuclide met een activiteitsconcentratie van $1 Bq \cdot g^{-1}$. Met onder andere de activiteitsconcentratie, de geometrie van de bron, de afstand en het medium tussen persoon en bron, kan *Microshield* een DCC voor

een radionuclide uitrekenen. Hieronder zijn voor de drie blootstellingsscenario's de gebruikte DCC's meer in detail beschreven. Deze DCC-waarden zijn samengevat in Tabel D.3.

D.3.1 *Transport*

Het registratieplichtige afval is gemodelleerd als een homogeen blok van 2 m breed, 2 m hoog en 5 m lang. Het heeft een gewicht van 30 ton, wat resulteert in een dichtheid van $1,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. De afstand tussen de bron en de chauffeur is altijd 1 m. RP122-II heeft geen onderscheid gemaakt in de DCC's tussen het rijden en laden en lossen. Er is dus maar één DCC per radionuclide(reeks) voor dit scenario. Voor transport over korte of lange afstand wordt ook gebruikgemaakt van dezelfde DCC's. Het lijkt erop dat de DCC's zijn berekend met 850 uur rijden met afscherming van 1 cm staal en 100 uur laden en lossen zonder afscherming. De DCC's met de blootstellingstijden van korte afstand zou volgens RP122-II gelijk moeten zijn aan de DCC's voor lange afstand.

D.3.2 *Werken op een deponie*

De deponie is gemodelleerd als een half-oneindig volume met een dichtheid van $1,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, waarbij de werknemer 1 meter boven dit volume met een homogeen verdeelde activiteit zweeft. Afscherming is niet meegenomen in de DCC, maar is een blootstellingsparameter bij dit scenario.

D.3.3 *Wonen vlak bij een deponie*

In tegenstelling tot de DCC's voor inhalatie en ingestie is de DCC voor externe straling niet-leeftijdsafhankelijk. Ook zijn de DCC's voor dit blootstellingsscenario voor drie verschillende situaties berekend: op de deponie, in de tuin en in het huis. De DCC-waarden voor verblijven van een omwonende op de deponie zijn gelijk aan de DCC-waarden van de werknemer op de deponie.

Tabel D.3 De dosisconversiecoëfficiënten (DCC's) in $[\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{kBq}^{-1}]$ voor externe straling voor leden van de bevolking en werknemers [8].

Nuclide-(reeks)	Leden van de bevolking			werknemer	
	Huis	Tuin	Deponie	Transport	Deponie
U-natsec	4,47E-09	5,50E-08	4,31E-07	7,72E-08	4,31E-07
U-nat	2,96E-11	7,55E-10	6,23E-09	7,13E-10	6,23E-09
Th-230	1,11E-14	5,82E-12	3,85E-11	1,06E-12	3,85E-11
Ra-226+	4,43E-09	5,37E-08	4,20E-07	7,61E-08	4,20E-07
Pb-210+	1,01E-20	1,02E-11	1,07E-10	6,08E-20	1,07E-10
Po-210	1,39E-14	2,53E-13	2,07E-12	3,54E-13	2,07E-12
U-235sec	2,16E-10	1,45E-08	1,33E-07	1,09E-08	1,33E-07
U-235+	2,11E-11	3,87E-09	3,58E-08	1,79E-09	3,58E-08
Pa-231	9,95E-12	7,34E-10	6,86E-09	5,90E-10	6,86E-09
Ac-227+	1,85E-10	9,93E-09	9,02E-08	8,53E-09	9,02E-08
Th-232sec	8,85E-09	8,19E-08	6,21E-07	1,18E-07	6,21E-07
Th-232	1,64E-15	2,21E-12	2,23E-11	1,86E-13	2,23E-11
Ra-228+	1,91E-09	2,84E-08	2,27E-07	4,00E-08	2,27E-07
Th228+	6,94E-09	5,35E-08	3,94E-07	7,79E-08	3,94E-07

Voor de DCC's in de tuin en in het huis is de deponie gemodelleerd als een volume met een grondoppervlak van 100.000 m^2 , lengte van 300 m en hoogte van 10 m. In de tuin is de afstand tussen de bewoner en de

dichtstbijzijnde rand van de deponie 20 m. In het huis bevindt de bewoner zich op 25 m afstand van de dichtstbijzijnde rand van de deponie. Hij is daarnaast in zijn huis ook afgeschermd door de muur van de woning, die een dikte van 20 cm heeft. RP122-II heeft deze afscherming in de DCC's verdisconteerd, maar heeft niet gespecificeerd uit welk materiaal de muur bestaat.

E Gamma-afschermingsfactor

Als het radioactieve afval dat op een deponie wordt gestort met een zandlaag wordt afgedekt, zorgt deze laag onder andere voor afscherming van externe straling. In de blootstellingsscenario's in de RP122-II-publicatie [8] is geen rekening gehouden met zo'n afschermingslaag. Voor de 'aangepaste' blootstellingsscenario's (in het voorliggende rapport) is ervoor gekozen om deze afscherming wel te beschouwen.

Om die afscherming van externe straling te verdisconteren in de dosisberekeningen, zijn gamma-afschermingsfactoren ($GSF = \textit{Gamma Shielding Factor for soil}$) voor bodembesmetting gebruikt. De GSF is afgeleid door *Oak Ridge National Laboratory* [25]. Deze afschermingsfactoren worden aangeduid met $GSF_{i,t,h}$. Hierin karakteriseert index i het radionuclide, is t de dikte van de besmette bodemlaag en is h de dikte van de onbesmette, afschermende toplaag (grond of zand). Deze factor is als volgt gedefinieerd:

$$GSF_{i,t,h} = \frac{\dot{D}_{i,t,h}}{\dot{D}_{i,t,0}} \quad (E-1)$$

Hierin is $\dot{D}_{i,t,h}$ het dosistempo (of de dosistempocoëfficiënt) op 1 m hoogte boven een oneindig groot terrein met een afgeschermd bodembesmetting en $\dot{D}_{i,t,0}$ het dosistempo boven een soortgelijk terrein, maar dan zonder de afschermende grondlaag.

Omdat de besmette grond vaak meerdere radionucliden bevat (moeder en ingegroeide dochters bijvoorbeeld), kunnen we voor de aanwezige nuclidevector ook een gewogen afschermingsfactor f_{GSF} berekenen. Deze wordt berekend met de volgende vergelijking:

$$f_{GSF,t,h} = \frac{\sum_i w_i DCC_{i,t} GSF_{i,t,h}}{\sum_i w_i DCC_{i,t}} \quad (E-2)$$

waarin w_i de relatieve activiteit van radionuclide i ten opzichte van moeder- of referentienuclide '1' is, met $w_1 = 1$. Verder is $DCC_{i,t}$ de effectieve dosisconversiecoëfficiënt voor externe straling op 1 meter boven een oneindig grote, uniform besmette bodem zonder afschermende toplaag. Deze gewogen afschermingsfactoren kunnen direct worden toegepast bij dosisberekeningen voor bodembesmetting die uit een mengsel van radionucliden bestaat.

De DCC's zijn afkomstig uit de *Federal Guidance Report 15* (FGR15) [12] en zijn gebaseerd op de nucleaire vervalgegevens uit *International Commission on Radiological Protection* (ICRP)-publicatie 107 [26]. Ze zijn gebaseerd op Monte Carlo-berekeningen, waarbij alle belangrijke foton- en elektroneninteracties, zoals coherente verstrooiing, paarvorming, remstraling en *build-up*, zijn meegenomen. Er is gerekend met een grond dichtheid van $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Wij gaan ervan uit dat het NORM-afval op de deponie alleen bestaat uit K-40 en radionucliden uit de U-natsec- en Th-232sec-reeksen. Omdat een deponie gemodelleerd wordt als een half-oneindig volume, is de uniform besmette grondlaagdikte oneindig, ofwel $t = \infty$. Waarden voor $DCC_{i,\infty}$ staan in Tabel 4.5 uit FGR15 [12]. De weegfactoren w_i van de radionucliden uit de beschouwde vervalreeksen¹⁰ zijn overgenomen uit RP122-II. In Tabel 7 uit het rapport van Bellamy et al. [25] staan de waarden voor $GSF_{i,\infty,h}$ voor verschillende afschermingslaagdiktes h van 10 tot en met 50 cm.

Tabel E.2, Tabel E.1 en Tabel E.3 bevatten de hierboven beschreven grootheden voor, respectievelijk, Th-232sec, U-natsec en K-40. Vervolgens worden de gewogen afschermingsfactor $f_{GSF,\infty,h}$ voor deze reeksen afgeleid.

Tabel E.1 Overzicht van de gebruikte parameterwaarden voor radionucliden i uit de Th-232-reeks voor de berekening van de gewogen gamma-afschermingsfactoren voor verschillende afschermingslaagdiktes ($h = 10, 20, 30, 40$ en 50 cm) bij een oneindig dik besmette grondlaag ($t = \infty$). De weegfactoren w_i zijn overgenomen uit RP122-II [ref], de dosisconversiecoëfficiënten (DCC's) komen uit FGR15 [12] en de GSF's uit [25].

Nuclide i	w_i	$DCC_{i,\infty}$ [Sv·s ⁻¹ (Bq·m ⁻³) ⁻¹]	$GSF_{10,\infty}$	$GSF_{20,\infty}$	$GSF_{30,\infty}$	$GSF_{40,\infty}$	$GSF_{50,\infty}$
Th-232	1	2,7E-21	8,8E-03	8,3E-04	8,9E-05	8,1E-06	2,1E-06
Ra-228	1	7,4E-22	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Ac-228	1	2,8E-17	2,8E-01	1,0E-01	3,6E-02	1,5E-02	5,4E-03
Th-228	1	4,0E-20	8,0E-02	1,2E-02	2,0E-03	2,5E-04	5,4E-05
Ra-224	1	2,6E-19	1,7E-01	2,9E-02	7,7E-03	8,5E-04	2,2E-04
Rn-220	1	1,8E-20	2,4E-01	7,1E-02	2,0E-02	5,4E-03	1,4E-03
Pb-212	1	3,5E-18	1,5E-01	2,7E-02	6,9E-03	7,8E-04	2,1E-04
Bi-212	1	4,4E-18	2,9E-01	1,1E-01	4,0E-02	1,7E-02	6,2E-03
Tl-208	0,359	1,2E-16	3,7E-01	1,7E-01	8,1E-02	4,1E-02	2,1E-02
Po-212	0,641	0	1,0E+00	1,0E+00	1,0E+00	1,0E+00	1,0E+00
Po-216	1	4,7E-22	2,8E-01	9,5E-02	3,1E-02	1,1E-02	3,1E-03
$\sum_i w_i DCC_{i,\infty} GSF_{i,\infty,h} =$			2,5E-17	1,1E-17	4,6E-18	2,2E-18	1E-18
$\sum_i w_i DCC_{i,\infty} =$			7,8E-17				
$f_{GSF,\infty,h} = \frac{\sum_i w_i DCC_{i,\infty} GSF_{i,\infty,h}}{\sum_i w_i DCC_{i,\infty}} =$			0,3	0,1	0,06	0,03	0,01

¹⁰ Voor U-natsec is uitgegaan van: 1 Bq U-238sec → 0,046 Bq U-235sec.

Tabel E.2 Overzicht van de gebruikte parameterwaarden voor radionucliden i uit de U-natsec-reeks voor de berekening van de gewogen gamma-afschermingsfactoren voor verschillende afschermingslaagdiktes ($h = 10, 20, 30, 40$ en 50 cm) bij een oneindig dik besmette grondlaag ($t = \infty$). De weegfactoren w_i zijn overgenomen uit RP122-II [ref], de dosisconversiecoëfficiënten (DCC's) komen uit FGR15 [12] en de GSF's uit [25].

Nuclide i	w_i	DCC $_{i,\infty}$ [Sv·s ⁻¹ (Bq·m ⁻³) ⁻¹]	GSF $_{i,\infty,10}$	GSF $_{i,\infty,20}$	GSF $_{i,\infty,30}$	GSF $_{i,\infty,40}$	GSF $_{i,\infty,50}$
U-238	1	9,2E-22	8,7E-03	3,2E-03	1,4E-03	6,6E-04	3,3E-04
Th-234	1	1,6E-19	4,0E-02	4,2E-03	2,3E-04	1,8E-05	1,3E-06
Pa-234m	1	2,4E-18	2,9E-01	1,1E-01	3,8E-02	1,6E-02	5,8E-03
Pa-234	0,003	4,4E-17	2,7E-01	9,5E-02	3,3E-02	1,3E-02	4,4E-03
U-234	1	1,9E-21	5,5E-03	6,0E-04	4,9E-05	9,3E-06	8,4E-07
Th-230	1	6,2E-21	2,8E-02	3,7E-03	6,7E-04	7,0E-05	1,9E-05
Ra-226	1	1,7E-19	1,5E-01	2,2E-02	3,6E-03	4,9E-04	9,9E-05
Rn-222	1	1,1E-20	2,4E-01	6,6E-02	1,7E-02	4,4E-03	1,2E-03
Po-218	1	1,2E-23	1,0E+00	1,0E+00	1,0E+00	1,0E+00	1,0E+00
Pb-210	1	1,3E-20	6,4E-04	6,6E-06	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Pb-214	1	7,0E-18	1,9E-01	4,9E-02	1,2E-02	2,4E-03	7,6E-04
Bi-214	1	5,0E-17	3,2E-01	1,3E-01	5,3E-02	2,5E-02	1,1E-02
Bi-210	1	6,9E-19	1,7E-01	4,0E-02	9,1E-03	1,3E-03	4,7E-04
Po-210	1	3,0E-22	2,8E-01	9,5E-02	3,1E-02	1,1E-02	3,1E-03
Po-214	1	2,6E-21	2,8E-01	9,5E-02	3,1E-02	1,0E-02	3,1E-03
U-235	0,046	3,8E-18	1,4E-01	2,1E-02	3,5E-03	4,6E-04	9,7E-05
Th-231	0,046	2,5E-19	3,3E-02	3,8E-03	2,9E-04	2,9E-05	5,7E-06
Pa-231	0,046	8,5E-19	1,6E-01	3,9E-02	8,4E-03	1,3E-03	4,8E-04
Ac-227	0,046	2,3E-21	1,6E-02	2,5E-03	4,1E-04	6,7E-05	1,8E-05
Fr-223	0,0006	1,5E-18	1,3E-01	3,5E-02	9,8E-03	2,8E-03	8,1E-04
Th-227	0,045	3,0E-18	1,6E-01	3,4E-02	7,9E-03	1,1E-03	3,5E-04
Ra-223	0,046	3,1E-18	1,5E-01	3,2E-02	7,1E-03	1,2E-03	3,8E-04
Pb-211	0,046	2,8E-18	2,6E-01	8,2E-02	2,5E-02	8,3E-03	2,5E-03
Bi-211	0,046	1,3E-18	1,9E-01	5,0E-02	1,1E-02	2,1E-03	6,7E-04
Tl-207	0,046	1,0E-18	2,8E-01	9,9E-02	3,4E-02	1,3E-02	4,1E-03
Po-211	0,0001	2,5E-19	2,7E-01	8,9E-02	2,9E-02	1,0E-02	3,2E-03
Po-215	0,046	5,0E-21	2,3E-01	6,0E-02	1,4E-02	3,5E-03	9,5E-04
Rn-219	0,046	1,6E-18	1,9E-01	4,6E-02	1,1E-02	2,0E-03	5,7E-04
$\sum_i w_i \text{DCC}_{i,\infty} \text{GSF}_{i,\infty,h} =$			1,8E-17	7,2E-18	2,9E-18	1,3E-18	5,7E-19
$\sum_i w_i \text{DCC}_{i,\infty} =$		6,2E-17					
$f_{\text{GSF},\infty,h} = \frac{\sum_i w_i \text{DCC}_{i,\infty} \text{GSF}_{i,\infty,h}}{\sum_i w_i \text{DCC}_{i,\infty}} =$			0,3	0,1	0,05	0,02	0,009

Tabel E.3 Overzicht van de gebruikte parameterwaarden voor K-40 voor de berekening van de gewogen gamma-afschermingsfactoren voor verschillende afschermingslaagdiktes ($h = 10, 20, 30, 40$ en 50 cm) bij een oneindig dik besmette grondlaag ($t = \infty$). De dosisconversiecoëfficiënt (DCC) komt uit FGR15 [12] en de GSF's uit [25].

Nuclide	DCC_{∞} [Sv·s ⁻¹ (Bq·m ⁻³) ⁻¹]	$GSF_{10,\infty}$	$GSF_{20,\infty}$	$GSF_{30,\infty}$	$GSF_{40,\infty}$	$GSF_{50,\infty}$
K-40	6,3E-18	3,3E-01	1,4E-01	5,9E-02	2,8E-02	1,1E-02
$f_{GSF,\infty,h} = \frac{DCC_{\infty} GSF_{\infty,h}}{DCC_{\infty}} =$		0,3	0,1	0,06	0,03	0,01

F Reductiefactor stofconcentratie

Voor de schatting van de reductiefactor van de stofconcentratie op 1 km afstand is gebruikgemaakt van een eenvoudig pluimmodel. Deze is gebaseerd op de methodiek (*general resuspension model*) die geïmplementeerd is in het programma *HotSpot* (*HotSpot User Manual, version 3.2.1*) [27]. Hieronder is kort beschreven hoe de in dit rapport gebruikte reductiefactor is gekozen.

De deponie is gemodelleerd als zijnde een schijf met een straal van 178 m, wat resulteert in een oppervlakte die gelijk is aan de deponie waarmee RP122-II heeft gerekend (zie bijlage D.3.3). Het stof wordt vanaf de deponie meegenomen door de wind over een landelijk of stedelijk gebied. De referentiehoogte voor de meting van de windsnelheid is op 10 m gezet. De regenvalcoëfficiënt is gezet op $0,0001 \text{ s}^{-1}$. Dit representeert een gemiddelde regenval van $0,5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ over een heel jaar. Dit is de laagst voorkomende waarde voor deze coëfficiënt in HotSpot. De bijbehorende gemiddelde regenval is wel ongeveer een factor 5 hoger dan de gemiddelde regenval die typisch in Nederland kan voorkomen. Voor de afzettingssnelheid (depositie) van droge stof is gekozen voor $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. De standaard *sampling time* is 60 minuten. Deze variabele corrigeert voor de variatie in de windrichting.

De gemiddelde stofconcentratie is vervolgens berekend op 1 km afstand voor variërende windsnelheden ($1 \text{ tot } 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) voor de zes verschillende Pasquill (atmosferische) -stabiliteitscategorieën en de twee verschillende terreinen (landelijk of stedelijk). De reductiefactor is berekend door de stofconcentratie op 1 km afstand te delen door de stofconcentratie boven de deponie. De op die manier berekende reductiefactor varieert van 0,015 tot 0,244. Aangezien in de berekening is uitgegaan van een hogere neerslagintensiteit dan gebruikelijk is in Nederland, is ook de reductiefactor berekend voor een situatie van wanneer er geen neerslag zou vallen in een jaar. Hieruit volgt dat deze factor slechts 3 procent lager zou zijn dan bij een gemiddelde regenval van $0,5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ op 1 km afstand. Een regenval die een factor 5 lager is, beïnvloedt de reductiefactor dus nauwelijks. Voor dit onderzoek is conservatief een reductiefactor gekozen van 0,1.

G Resultaten: blootstellingsscenario 'Transport'

In Tabel G.1 zijn de resultaten samengevat voor de totale effectieve jaardosis voor de chauffeur door registratieplichtig afval bij de wettelijk vastgestelde maximale activiteitsconcentraties voor verschillende nuclide(reeksen). Voor U-natsec en Th-232sec is in Tabel G.2 de totale dosis opgesplitst in de drie blootstellingswegen. Deze resultaten zijn op alle vier materiaalsoorten (zand, as, steen en slak, zie bijlage B) van toepassing. De jaardosis is het hoogst voor Th-232sec met een waarde van 1,6 en 1,2 mSv voor respectievelijk kleine en grote afstanden. De grootste bijdrage komt van het blootstellingspad 'externe straling'.

Tabel G.1 Effectieve jaardoses ten gevolge van de wettelijk vastgestelde maximale activiteitsconcentraties voor transport van registratieplichtig afval over kleine en grote afstand. Per nuclide(reeks) is de dosis voor het 'standaard' scenario berekend. Er is hiervoor geen 'aangepast' scenario gemaakt.

Nuclide(reeks)	E_{klein} [mSv]	E_{groot} [mSv]
U-natsec	1,1E+00	7,8E-01
Th-230	4,3E-02	1,1E-02
Ra-226+	8,6E-01	7,3E-01
Pb-210+	3,3E-02	8,2E-03
Po-210	2,0E-02	5,0E-03
Th-232sec	1,6E+00	1,2E+00
Th-232	6,6E-02	1,7E-02
Ra-228+	4,8E-01	3,9E-01
K-40	8,4E-02	7,2E-02

Tabel G.2 Effectieve jaardoses ten gevolge van de wettelijk vastgestelde maximale activiteitsconcentraties voor transport van registratieplichtig afval over kleine en grote afstand voor de U-natsec en Th-232sec reeksen, uitgesplitst per blootstellingsweg (Ext = externe straling, Inh = inhalatie, Ing = ingestie) De doses zijn alleen voor het 'standaard' scenario berekend. Er is hiervoor geen 'aangepast' scenario gemaakt.

Nuclidenreeks	Scenario	E [mSv]		
		Ext	Inh	Ing
U-natsec,	klein	8,5E-01	1,4E-01	6,4E-02
	groot	7,3E-01	3,5E-02	1,6E-02
Th-232sec	klein	1,3E+00	2,3E-01	4,1E-02
	groot	1,1E+00	5,8E-02	1,0E-02

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

augustus 2025

De zorg voor morgen
begint vandaag