



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

De tijdelijke opslag van radioactief afval in ziekenhuizen

RIVM-briefrapport 2020-0034
L.H.A. Boudewijns | M. van der Linden | D. Siegersma



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

De tijdelijke opslag van radioactief afval in ziekenhuizen

RIVM-briefrapport 2020-0034
L.H.A. Boudewijns | M. van der Linden | D. Siegersma

Colofon

© RIVM 2020

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-2020-0034

L.H.A. Boudewijns (auteur), RIVM
M. van der Linden (auteur), RIVM
D. Siegersma (auteur), RIVM

Contact:

Douwe Siegersma
Centrum Veiligheid
douwe.siegersma@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming in het kader van het programma Ondersteuning beleid stralingsbescherming 2020.

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

Publiekssamenvatting

De tijdelijke opslag van radioactief afval in ziekenhuizen

Ziekenhuizen gebruiken radioactieve stoffen voor onderzoeken en behandelingen van ziekten (zoals prostaatkanker). Hierbij ontstaat vaak radioactief afval. Het grootste deel van dit afval is na twee jaar niet meer radioactief. Dit deel mogen ziekenhuizen daarom zelf twee jaar opslaan in een aparte afgesloten bergruimte. Daarna kan het als conventioneel bedrijfsafval worden afgevoerd naar een afvalverwerker.

Het afval dat langere tijd radioactieve stoffen bevat, wordt voor onbepaalde tijd opgeslagen bij de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA). Een deel daarvan blijkt na enkele jaren weinig radioactief te zijn. Dit zorgt voor onnodige, dure opslag bij de COVRA.

Uit onderzoek van het RIVM blijkt dat ziekenhuizen radioactief afval enkele jaren langer op een veilige manier kunnen opslaan. Hierdoor hoeft er minder afval naar de COVRA te worden afgevoerd.

Vooraf medewerkers van ziekenhuizen staan bloot aan de straling van het afval. Hiervoor nemen zij beschermende maatregelen. Volgens berekeningen van het RIVM neemt deze blootstelling weinig toe als het afval enkele jaren langer blijft staan.

Ziekenhuizen verwachten in de toekomst meer radioactieve stoffen te gebruiken, onder andere door de komst van nieuwe behandelingen in de nucleaire geneeskunde. De kans is groot dat dan meer radioactief afval ontstaat. De Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) heeft het RIVM daarom gevraagd te onderzoeken of ziekenhuizen dit afval veilig langer kunnen opslaan.

Kernwoorden: radioactief afval, radioactieve stoffen, vervalopslag, opslag, medische radionucliden

Synopsis

The temporary storage of radioactive waste in hospitals

Hospitals use radioactive substances for diagnostics and treatments of diseases (such as prostate cancer), which often results in radioactive waste. The bulk of this waste is no longer radioactive after two years and hospitals are therefore permitted to store it in separate, closed storerooms. After this time, it can be transported to a waste processing company as conventional waste.

Waste containing substances that remain radioactive for prolonged periods of time is stored indefinitely at the Central Organisation For Radioactive Waste (COVRA). After a few years in storage, some of this waste contains low levels of radioactivity. However, it will remain at COVRA for a longer time than necessary, and at great expense.

Research carried out by RIVM shows that hospitals can safely store radioactive waste for several years longer than is currently the case. This would mean that less waste would have to be transported to COVRA for storage.

Employees at hospitals, in particular, are exposed to radiation from waste, against which they take protective measures. According to calculations made by RIVM, the increase in this exposure is small if the waste is stored for a few years more.

Hospitals anticipate using more radioactive substances in the future due to, among other things, the emergence of new nuclear medicine treatments. This is likely to result in more radioactive waste. The Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection (ANVS) has therefore commissioned RIVM to investigate whether hospitals can safely store this waste for a longer time.

Keywords: radioactive waste, radioactive substances, decay storage, storage, medical radionuclides

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 11

- 1.1 Aanleiding voor dit onderzoek — 11
- 1.2 Onderzoeksvragen — 11
- 1.3 Afbakening — 12
- 1.4 Aanpak — 12
- 1.5 Dankwoord — 13

2 Achtergrond vigerende wet- en regelgeving — 15

- 2.1 Wettelijk kader vervalopslag — 15
 - 2.1.1 Nederlandse algemeen geldende regelgeving — 15
 - 2.1.2 Vergunningsvoorschriften — 16
 - 2.1.3 Vergunningen industrie — 16
- 2.2 IAEA-documentatie — 16
- 2.3 Omringende landen — 17
- 2.4 Conclusies — 18

3 Afvalstromen afkomstig van ziekenhuizen — 19

- 3.1 Radioactieve afvalstromen — 19
- 3.2 Beheer van radioactief afval — 19
 - 3.2.1 Registratie en scheiding van afval — 20
 - 3.2.2 Opslag van afval — 21
 - 3.2.3 Afvoer of vrijgave — 21
- 3.3 Relevante radionucliden — 23
 - 3.3.1 Kortlevende radionucliden — 23
 - 3.3.2 Mogelijke, toekomstige radionucliden — 23

4 Gevolgen van verruimen eisen vervalopslag — 25

- 4.1 Volumes van afvalstromen — 25
 - 4.1.1 Methode — 25
 - 4.1.2 Gevolg verlenging opslagtermijn en verruimen eis maximum halveringstijd — 27
- 4.2 Stralingsrisico's — 31
 - 4.2.1 Externe blootstelling — 32
 - 4.2.2 Overige blootstellingsroutes — 36
 - 4.2.3 Overige gevolgen — 37

5 Conclusies — 39

A Bijlage: Radionucliden ziekenhuizen — 43

B Bijlage: Model stralingsrisico's — 47

C Bijlage: Gevolg verruimen eisen aan vervalopslag op af te voeren volumes — 51

D Bijlage: Verval van lutetium-177 in een typisch afvalvat — 54

E Literatuur — 55

Samenvatting

Nederlandse ziekenhuizen gebruiken veel verschillende radioactieve stoffen, in diagnostiek en als therapie voor patiënten met kanker. Dit kan in de vorm van ingekapselde en open bronnen. Het radioactief afval dat bij deze toepassingen ontstaat, mag tijdelijk op eigen terrein worden opgeslagen om het te laten vervallen tot onder de vrijgavewaarden, waarna het kan worden afgevoerd als conventioneel bedrijfsafval. Een dergelijke vervalopslag is toegestaan voor een periode van maximaal twee jaar voor afvalstoffen met radionucliden met een halveringstijd van minder dan 100 dagen [1]. Afvalstoffen die niet aan deze voorwaarden voldoen, moeten worden afgevoerd naar de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA). De kosten hiervoor zijn voor rekening van de ziekenhuizen, en zijn doorgaans substantieel hoger dan die voor vervalopslag.

Door het in werking treden van het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (hierna: Bbs) in februari 2018 zijn de vrijgavewaarden voor een groot aantal nucliden aangepast. Een gevolg hiervan is dat vervalopslag voor bepaalde typen radioactieve stoffen niet meer kan worden toegepast, omdat de activiteitsconcentratie na twee jaar nog steeds hoger is dan de nieuwe vrijgavewaarden. Dit leidt tot een toename van de jaarlijkse hoeveelheid als radioactief afval af te voeren materiaal. Verder geldt dat ziekenhuizen, door ontwikkelingen in de nucleaire geneeskunde, steeds meer gebruik maken van 'nieuwe' radionucliden, waarvan sommige een langere halveringstijd hebben dan nucliden die voorheen werden gebruikt. Hierdoor ontstaan ook nieuwe radioactieve afvalstromen, mogelijk met grotere volumes. In beide gevallen is ook sprake van hogere kosten voor de ontdoener (het ziekenhuis).

In Het nationale programma voor het beheer van radioactief afval en verbruikte splijtstoffen [2] heeft het kabinet aangegeven te streven naar het minimaliseren van het ontstaan van radioactief afval. Dit komt neer op het minimaliseren van materiaal dat moet worden afgevoerd naar de COVRA. De hoeveelheid als radioactief afval af te voeren materiaal kan mogelijk worden verminderd door de huidige voorwaarden rond vervalopslag aan te passen.

De Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) heeft daarom het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) verzocht te onderzoeken wat de gevolgen zijn van het verlengen van de termijn voor vervalopslag en/of het verruimen van de beperking tot nucliden met een halveringstijd van minder dan 100 dagen. Het RIVM heeft hierbij gekeken naar mogelijke gevolgen voor de radiologische risico's en de volumes van afvalstromen.

Uit het onderzoek blijkt dat afvalstromen van ziekenhuizen met radionucliden met relatief korte halveringstijden in de huidige situatie doorgaans op locatie kunnen vervallen tot onder de vrijgavewaarden. Deze behoeven dus niet te worden afgevoerd als radioactief afval. Radioactief afval dat daarentegen niet kan worden vrijgegeven, wordt

deels afgevoerd naar de COVRA en deels naar de producent van de bron. COVRA conditioneert radioactief afval voor een opslag van tenminste 100 jaar, waarna eindberging is voorzien [2]. Een deel van dit afval zal na 100 jaar tot onder de vrijgavegrenzen zijn vervallen, waardoor het mogelijkwerijs niet naar de eindberging hoeft [2, 3]. De totale gemiddelde afvoer van radioactief afval afkomstig van Nederlandse ziekenhuizen naar de COVRA wordt in totaal geschat op circa 6 m³ per jaar.

Uit literatuuronderzoek, werkbezoeken en analyse van de naar COVRA afgevoerde vaten volgt dat het verruimen van alleen de eis aan de halveringstijd (zodat de vervalopslagtermijn twee jaar blijft) weinig invloed heeft op de hoeveelheid af te voeren radioactief afval. Als alleen de eis aan de vervalopslagtermijn wordt aangepast (zodat de maximale halveringstijd 100 dagen blijft), geeft dat eveneens een beperkte reductie in het af te voeren volume. Als tegelijkertijd beide eisen worden aangepast, kan de hoeveelheid als radioactief afval af te voeren materiaal afnemen tot circa 2 à 3 m³ per jaar. Dit resterende volume bevat lang(er)levende nucliden.

Bovenstaande conclusies hebben betrekking op de huidige afvalstromen. Ontwikkelingen in de nucleaire geneeskunde kunnen echter gevolgen hebben voor het toekomstige gebruik van radioactieve stoffen. De samenstelling van het ziekenhuisafval zal hierdoor veranderen.

Het toestaan van het langer opslaan van radioactieve (afval)stoffen voor verval kan ertoe leiden dat ziekenhuizen meer radioactiviteit opslaan in de bergplaatsen voor afval. Afhankelijk van het radionuclide kunnen hierdoor de stralingsrisico's voor (vooral) ziekenhuismedewerkers toenemen. In de berekeningen is aangenomen dat men geen aanpassingen doet om de toegenomen stralingsbelasting te beperken; in werkelijkheid zou de verantwoordelijke stralingsbeschermingsdeskundige een nieuwe risico-inventarisatie en -evaluatie opstellen voor de veranderende situatie en eventueel aanvullende maatregelen doorvoeren. Voor dit onderzoek is het stralingsrisico benaderd als het dosistempo in de afvalopslagruimte in een ziekenhuis, onder vereenvoudigde aannames. Potentiële blootstellingsscenario's, bijvoorbeeld als gevolg van brand, zijn in dit rapport niet uitgewerkt.

Het dosistempo ten gevolge van het opgeslagen afval wordt bepaald door de aanwezige nucliden, hun activiteit en de inrichting van de bergplaats. De opgeslagen activiteit kan van jaar tot jaar en van ziekenhuis tot ziekenhuis variëren, afhankelijk van het type en aantal uitgevoerde behandelingen. Het berekende dosistempo bij 2 jaar vervalopslag (de huidige situatie) varieert dan ook sterk. Het berekende dosistempo neemt, bij een verlenging van de vervalopslagtermijn van 2 naar 10 jaar, typisch toe met <10%.

In bovenstaande berekeningen zijn verschillende aannames gedaan waardoor de berekende toename in dosistempo waarschijnlijk een conservatieve schatting geeft van de toename in blootstelling van de werknemers in ziekenhuizen.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding voor dit onderzoek

In ziekenhuizen worden radioactieve stoffen voor verschillende doeleinden gebruikt. Dit kan bijvoorbeeld voor het stellen van een diagnose zijn of voor het behandelen van kanker. Radioactief afval dat hierbij ontstaat, moet veilig worden beheerd. In beginsel wordt het afgevoerd naar de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA). COVRA conditioneert radioactief afval voor een opslag van tenminste 100 jaar, waarna eindberging is voorzien [2].

Als alternatief hiervoor mag een ziekenhuis de radioactieve afvalstoffen met een korte vervaltijd tijdelijk op eigen terrein opslaan, met het oog op vrijgave. De niet-radioactieve afvalstoffen kunnen daarna als conventioneel bedrijfsafval worden afgevoerd. Aan deze zogeheten vervalopslag zijn voorwaarden verbonden. Zo mag het maximaal twee jaar duren, en moet het radionucliden betreffen met een halveringstijd van minder dan 100 dagen [1]. Radioactief afval kan vrijgegeven worden als de activiteitconcentratie onder de vastgestelde vrijgavewaarde komt (zie Bijlage A).

Vervalopslag helpt de hoeveelheid radioactief afval in een eindberging te minimaliseren en sluit daarmee aan op de uitgangspunten van het kabinet zoals geformuleerd in het Nationale programma voor het beheer van radioactief afval [2]. Een bijkomend voordeel is dat het kosten uitspaart die anders door ziekenhuizen zouden moeten worden gemaakt voor afvoer naar COVRA.

Door nieuwe ontwikkelingen in met name de nucleaire geneeskunde lijkt in komende jaren meer radioactief afval te ontstaan. Dit komt door (een toename in) het gebruik van (nieuwe) radionucliden met in sommige gevallen een lange halveringstijd. Dit heeft tot gevolg dat bepaalde radioactieve afvalstoffen niet binnen de gestelde termijn voor vervalopslag (twee jaar) vervallen tot onder de vrijgavewaarden zoals gesteld in het Bbs.

Het voorgaande is voor de ANVS reden geweest aan het RIVM te vragen onderzoek te doen naar de effecten van aanpassing van de huidige eisen aan de halveringstijd en de opslagtermijn voor vervalopslag. Het gaat daarbij om effecten op de hoeveelheden af te voeren radioactief afval en de stralingsrisico's.

1.2 Onderzoeksvragen

In dit rapport zijn de volgende vragen onderzocht:

- Wat zijn, bij vervalopslag, de gevolgen van het verlengen van de opslagtermijn en/of het verruimen van de eis aan de halveringstijd wat betreft
 - de stralingsrisico's voor ziekenhuismedewerkers?
 - de samenstelling van afvalstromen die het ziekenhuis verlaten?
 - de volumes van deze afvalstromen?

- Welke afvalstromen, afkomstig van ziekenhuizen, zouden binnen een langere opslagtermijn vervallen en in welke hoeveelheden?

1.3 Afbakening

- Het onderzoek beperkt zich tot de ziekenhuissector. Producenten van radiofarmaca en andere medische dienstverleners vallen, waar mogelijk, *buiten* de scope van dit onderzoek.
- In sommige gevallen wordt radioactief afval door ziekenhuizen aan de producent of leverancier geretourneerd en daarna afgevoerd. De omvang van deze indirecte afvalstroom wordt *niet* kwantitatief uitgewerkt.
- Het onderzoek richt zich *niet* op mogelijke niet-radiologische risico's van het verlengen van de termijn voor vervalopslag (zoals financiële risico's).
- Het onderzoeken van alternatieve verwerkingsroutes is *niet* aan de orde.
- Het onderzoek richt zich *niet* op radioactief afval dat ontstaat als gevolg van de ontmanteling van uit gebruik genomen installaties.
- Het onderzoek doet *geen* voorstel over wat een optimale opslagtermijn is. Uit praktische overwegingen wordt in berekeningen uitgegaan van een maximale termijn van tien jaar.
- Het onderzoek kijkt *niet* naar de manier waarop ziekenhuizen bepalen of radioactief afval kan worden vrijgegeven.
- Het onderzoek kijkt *niet* naar de afvoer en mogelijke vrijgave van vaten met radioactief besmet specifiek ziekenhuisafval (SZA). In 2015-2019 zijn slechts enkele SZA-vaten naar COVRA afgevoerd [4]. Dit type afval vormt dus slechts een zeer klein deel van de totale afvoer.

1.4 Aanpak

Om de huidige eisen aan vervalopslag te kunnen duiden, is literatuuronderzoek uitgevoerd naar nationale en internationale wet- en regelgeving met betrekking tot dit onderwerp.

Vervolgens is onderzocht welke radioactieve afvalstromen in de praktijk in ziekenhuizen worden geproduceerd en hoe deze worden beheerd. Voor dit onderzoek wordt een radioactieve afvalstroom gedefinieerd als het afval dat bij één handeling of proces ontstaat en in de praktijk niet verder gescheiden wordt. Hiervoor hebben wij een academisch, een gespecialiseerd en een algemeen ziekenhuis bezocht. De bevindingen hiervan zijn geanonimiseerd opgenomen in het rapport.

Daarna is geschat wat het effect kan zijn van aangepaste voorschriften voor vervalopslag op de hoeveelheid af te voeren radioactief afval. Dit laatste kan worden beschouwd als de afgevoerde activiteit (in Bq) of het afgevoerde volume (in m³). Omdat de tarieven van de COVRA – en daarmee de kosten voor de ziekenhuizen – per m³ gelden, wordt de hoeveelheid radioactief afval in dit onderzoek uitgedrukt als een volume (in m³). Hiervoor is in kaart gebracht hoe veel vaten radioactief afval in de afgelopen jaren door ziekenhuizen naar de COVRA zijn afgevoerd. Voor dit afval is aanvullend fysisch verval gesimuleerd, om zo het effect van een aangepaste eis aan de opslagtijd te schatten. Hierbij is rekening gehouden met verschillende eisen aan de halveringstijd.

Als laatste is onderzocht wat het effect is van aangepaste voorschriften voor vervalopslag op de stralingsrisico's van ziekenhuismedewerkers. Hierbij is met name gekeken naar de externe blootstelling in de bergplaats voor afval. Dit wordt, gezien de opslag van afval in dichte verpakkingen, gezien als de belangrijkste blootstellingsroute. Uitgaande van een constant productietempo van afval wordt de activiteit en het bijbehorende dosistempo uitgerekend voor verschillende vervalopslagtermijnen. Dit model is gebruikt om de toename in dosistempo te schatten voor individuele radionucliden en voor de totale jaarlijkse hoeveelheid afval die ziekenhuizen produceren. Hierbij is de eis aan halveringstijd losgelaten.

1.5 Dankwoord

De auteurs bedanken de medewerkers van de COVRA en de ziekenhuizen die aan dit onderzoek hebben meegewerkt. Ook worden vertegenwoordigers van de Nederlandse Vereniging voor Klinische Fysica (NVKF), de Nederlandse Vereniging voor Nucleaire Geneeskunde (NVNG) en de Nederlandse Vereniging voor Stralingshygiëne (NVS) bedankt voor hun waardevolle commentaar.

2 Achtergrond vigerende wet- en regelgeving

In de Nederlandse regelgeving en vergunningsvoorschriften wordt de opslag van radioactieve afvalstoffen op eigen terrein onder enkele voorwaarden toegestaan. In dit hoofdstuk vatten we informatie samen met betrekking tot deze zogeheten 'vervalopslag'. Hiervoor maken we gebruik van (inter)nationale wet- en regelgeving, verleende vergunningen en documentatie van het Internationaal Atoomenergieagentschap (IAEA).

2.1 Wettelijk kader vervalopslag

2.1.1 *Nederlandse algemeen geldende regelgeving*

De Nederlandse regelgeving kent een aantal algemeen geldende regels die betrekking hebben op (het beheer van) radioactieve afvalstoffen. De belangrijkste worden hieronder kort beschreven.

In de Kernenergiewet zijn radioactieve stoffen gedefinieerd als "stoffen met uitzondering van splijtstoffen en ertsen, die in zodanige mate radionucliden bevatten dat zij, voor zover het de bescherming tegen ioniserende straling betreft, niet mogen worden verwaarloosd" [5]. Een radioactieve stof kan op zijn beurt als radioactieve afvalstof worden aangemerkt, als er geen (her)gebruik voor is voorzien [1].

Een afvalstof wordt niet (langer) als radioactieve afvalstof aangemerkt, als de activiteitsconcentratie lager is dan de vrijgavewaarden die per radionuclide zijn vastgelegd [1]. Voor vaste materialen voorziet de regelgeving in vrijgavewaarden die op iedere hoeveelheid kunnen worden toegepast [1, 6]. Op vloeistoffen en vloeistof houdende materialen zijn dezelfde vrijgavewaarden van toepassing, mits zij in een afvalverbrandingsinstallatie worden verbrand [7]. Verder kunnen radioactieve stoffen van elk type materiaal worden vrijgegeven als de activiteit zeer laag is (lager dan vastgelegde grenswaarden [7]).

Het afvoeren van radioactieve afvalstoffen dient zo snel als redelijkerwijs mogelijk te gebeuren, en binnen een door de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) gestelde termijn [1]. Afvoer mag in beginsel alleen naar de COVRA. Die condicioneert radioactief afval voor een opslag van tenminste 100 jaar, waarna eindberging is voorzien [2]. Een deel van dit afval zal na 100 jaar tot onder de vrijgavegrenzen zijn vervallen, waardoor het mogelijkserwijs niet naar de eindberging hoeft [2, 3].¹

Bij wijze van uitzondering op het bovenstaande mag men onder voorwaarden radioactieve afvalstoffen op locatie opslaan voor verval. De radionucliden moeten een halveringstijd hebben van minder dan 100 dagen; de opslag duurt maximaal twee jaar; en de opslag heeft als doel om de radioactieve afvalstoffen na afloop vrij te kunnen geven [1].

¹ Overigens is voor ontmantelingsafval, dat buiten de kaders van dit onderzoek valt, een aanvullende vorm van vervalopslag mogelijk. Hierin worden materialen, afkomstig van ontmantelde installaties, in onverwerkte staat maximaal 25 jaar bij COVRA opgeslagen, als de activiteit van het afval binnen die tijd vervalt tot onder de actuele vrijgavegrenzen [2].

In huidige en voorgaande regelgeving is geen onderbouwing gevonden voor de gekozen waarden voor opslagtermijn (twee jaar) en halveringstijd (maximaal 100 dagen) [1, 5-9].

2.1.2 *Vergunningsvoorschriften*

Naast algemeen geldende regels zijn er ook in diverse vergunningen op grond van de Kernenergiewet voorschriften gesteld aan het beheer van radioactieve afvalstoffen. Dergelijke voorschriften gelden alleen voor de betreffende vergunninghouder.

In meerdere vergunningen van ziekenhuizen is de (tijdelijke) opslag van radioactieve afvalstoffen op locatie niet alleen toegestaan met het oog op vrijgave, maar ook `uit overwegingen die een efficiënte wijze van het zich ontdoen naar een erkende ophaaldienst [COVRA] beogen' [10-13]. Een ziekenhuis kan hierdoor enige tijd radioactief afval verzamelen voor het dit afvoert, en zo kosten besparen. Dit is feitelijk een nadere invulling van de in Hoofdstuk 2.1.1 genoemde algemene verplichting om radioactieve afvalstoffen "zo snel als redelijkerwijs mogelijk" af te voeren. Ook hier is een termijn van twee jaar gesteld voor de opslag [10-13]. Deze vergunningsvoorschriften hebben geen relatie met vervalopslag.

2.1.3 *Vergunningen industrie*

De ANVS verleent ook aan andere Nederlandse bedrijven ('de industrie') vergunningen voor het verrichten van handelingen met radioactieve stoffen. In in ieder geval één vergunning is tijdelijke opslag gedurende een periode langer dan twee jaar toegestaan.

Deze ondernemer mag radioactief afval met iridium-192 vier jaar opslaan [14]. De vergunningverlener heeft in de overwegingen opgenomen dat de afvoer van iridium-192 naar de COVRA tot een ongewenste blootstelling van werknemers leidt; dat men de blootstelling uit stralingshygiënisch oogpunt zo laag als redelijkerwijs mogelijk wil houden; en dat een verlengde opslagtermijn tot een belangrijke reductie van de stralingsbelasting leidt [14].

2.2 **IAEA-documentatie**

Als achtergrond voor de vigerende Nederlandse wetgeving is van publicaties van het Internationaal Atoomenergieagentschap (IAEA) uit de periode 1998-2019 onderzocht welke informatie deze geven omtrent vervalopslag.

Wellicht ten overvloede merkt het IAEA op dat vervalopslag ten doel heeft om op termijn de afvalstoffen vrij te geven [15]. Hierdoor wordt de hoeveelheid als radioactief afval af te voeren materiaal geminimaliseerd. Men kan niet per radionuclide een algemene eis aan de halveringstijd specificeren, omdat deze samenhangt met de geplande opslagtijd, de bijbehorende vrijgavewaarde en de initiële activiteit van het afval [15]. Het IAEA stelt dan ook dat vervalopslag kan worden toegepast op alle soorten afval² [16]. Het stelt ook dat uit de praktijk blijkt dat vervalopslag vooral geschikt lijkt voor radionucliden met halveringstijden kleiner dan 100 dagen; dit kan wellicht verruimd

² Merk op dat bestraalde splijtstof niet als radioactieve afvalstof wordt beschouwd, tenzij als zodanig aangemerkt.

worden tot halveringstijden kleiner dan 365 dagen [15-19]. Door ieder geval apart te beschouwen, kan men ook nog langer levende radionucliden opslaan [19]. Bij de opslag van vloeibaar afval moet men wel rekening houden met aanvullende risico's, zoals lekkages [17].

Als opslagtermijn merkt het IAEA in algemene zin op dat 10 halveringstijden in de praktijk vaak voldoende zijn voor vrijgave van het afval [18].

2.3 Omringende landen

Van een aantal naburige landen is onderzocht hoe zij omgaan met de opslag van radioactief afval. Hiervoor is een vraag uitgezet in het European Radioprotection Authority Network (ERPAN). Daarnaast is Nederlands- en Engelstalige regelgeving bekeken. In Tabel 1 is te zien onder welke voorwaarden men in deze landen radioactief afval mag opslaan. Hieruit is op te maken dat landen op verschillende manieren omgaan met de vervalopslag van radioactief afval.

Tabel 1: Voorwaarden aan halveringstijd en opslagtermijn van radioactief afval in omringende landen. Voor Denemarken, Schotland en Slovenië geldt dat uitzonderingen mogelijk zijn, al dan niet na goedkeuring van een (onafhankelijk) stralingsdeskundige. Voor Zweden geldt in de praktijk dat afval verbrand kan worden als het voldoende is vervallen. In Frankrijk wordt specifiek genoemd dat dit geldt voor het langstlevende nuclide. Merk op dat België en Frankrijk een minimale opslagtermijn hanteren van 10 halveringstijden (activiteit neemt met minstens een factor 1000 af); deze eis wordt gecombineerd met een maximale halveringstijd. In Duitsland wordt dit systeem in de praktijk ook gehanteerd. Z.s.r.m.: zo snel als redelijkerwijs mogelijk.

Vervalopslag voor kortlevende radionucliden in omringende landen									
	Eis aan halveringstijd		Eis aan opslagtermijn						
	<100 dagen	<6 mnd	>10 $T_{1/2}$	Z.s.r.m	<3 mnd	<12 mnd	<2 jaar	<3 jaar	<10 jaar
Nederland	X						X		
België		X	X						
Denemarken						X			
Duitsland	X							X	
Frankrijk	X		X						
Luxemburg									X
Noorwegen						X			
Oostenrijk	X								
Schotland				X					
Slovenië					X				
Zweden				X					
Zwitserland	X								

2.4 Conclusies

In de algemeen geldende Nederlandse regelgeving zijn drie motivaties gevonden voor het toestaan van tijdelijke opslag van radioactieve afvalstoffen op locatie.

Ten eerste wordt radioactief afval in ziekenhuizen opgeslagen om een efficiënte afvoer naar de COVRA te bevorderen. Het afval moet zo snel als redelijkerwijs mogelijk worden afgevoerd. In een aantal vergunningen voor ziekenhuizen vult de vergunningverlener dit in als een termijn van twee jaar.

Een tweede motivatie is vervalopslag, wat bij kan dragen aan het minimaliseren van de hoeveelheid als radioactief afval af te voeren materiaal.

- Er is in de beschikbare documentatie geen onderbouwing gevonden voor de huidige voorwaarden aan de halveringstijd van radionucliden (minder dan 100 dagen) en opslagtermijn (maximaal 2 jaar) uit de Nederlandse regelgeving.
- Het IAEA stelt dat een maximale halveringstijd van 100 dagen (eventueel te verruimen tot 365 dagen) uit de praktijk volgt. Het is mogelijk langer levende radionucliden veilig op te slaan; dit zal men per geval apart moeten beschouwen.
- De eisen die omringende landen stellen aan vervalopslag zijn geenszins uniform.

Ten derde kan een tijdelijke opslag dosisreductie bevorderen. Er is een voorbeeld van voorschriften bij vergunningen aan andere bedrijven (de 'industrie') die een opslagtermijn van vier jaar mogelijk maken. De reden voor deze verlengde opslagtermijn is de reductie in blootstelling van werknemers die men hiermee bereikt. Gezien de halveringstijd van het betreffende nuclide draagt het echter niet bij aan het minimaliseren van radioactief afval.

3 Afvalstromen afkomstig van ziekenhuizen

In dit hoofdstuk wordt een algemeen beeld geschetst van het produceren en beheren van radioactief afval in ziekenhuizen. Daarvoor zijn drie ziekenhuizen bezocht, die ieder een verschillende categorie ziekenhuis vertegenwoordigen (academisch, specialistisch en algemeen). Verder is gebruik gemaakt van data uit eerdere onderzoeken en van de COVRA.

3.1 Radioactieve afvalstromen

Ziekenhuizen gebruiken radioactieve materialen in de vorm van ingekapselde en open bronnen. Ingekapselde bronnen zijn bronnen waar het radioactieve materiaal ingebed of omhuld is door een niet-radioactief materiaal. Hierdoor is verspreiding van radioactieve stoffen onder normale omstandigheden niet mogelijk. Voorbeelden zijn ijkbronnen en *markers*/zaadjes voor brachytherapie. Na gebruik worden deze bronnen, met uitzondering van *markers* die in het lichaam van de patiënt blijven, opgeslagen in een bergplaats, waarna ze worden geretourneerd aan de leverancier [20, 21] of afgevoerd naar de COVRA [22, 23].

Bij open bronnen is geen omhulsel aanwezig en moeten voorzorgsmaatregelen worden genomen om verspreiding van deze radioactieve stoffen te voorkomen. Voorbeelden van open bronnen zijn (verbindingen met) radionucliden die ziekenhuizen inkopen of zelf produceren met versnellers, bijvoorbeeld het veelgebruikte technetium-99m of fluor-18. Na eventuele verdere bereiding in een (*hot cell*) laboratorium worden de nucliden gebruikt voor diagnostiek of als therapie voor patiënten met kanker. Het afval dat ontstaat wordt zo veel mogelijk gescheiden op radionuclide, activiteit en type afval. Dit gebeurt al op de afdelingen en in de laboratoria zelf. Ook kan het gaan om radioactief, pathogeen materiaal na afloop van een operatie.

Daarnaast ontstaat radioactief afval bij de productie van radionucliden voor PET-onderzoeken. Deze worden vaak geproduceerd met behulp van speciale versnellers of cyclotrons. Hierbij worden in de versneller- of cyclotroninstallatie en bijbehorende bouwdelen vaak activeringsproducten gevormd. Een deel hiervan moet als radioactief afval worden afgevoerd. Deze radionucliden worden zelf dus niet toegepast in de nucleaire geneeskunde, maar ontstaan als bijproduct.

3.2 Beheer van radioactief afval

Zoals eerder aangegeven is het op grond van de regelgeving verplicht om radioactief afval zo snel als redelijkerwijs mogelijk af te voeren. Omdat het niet werkbaar is om elke *batch* radioactief afval meteen af te voeren, en omdat een deel van het afval binnen korte tijd vervalt tot onder de vrijgavewaarden, wordt het afval eerst gesorteerd, en indien nodig tijdelijk opgeslagen in een daarvoor geschikte opslagruimte op locatie. Vervolgens wordt het afval *batch*-gewijs afgevoerd of, indien en voor zover mogelijk binnen de huidige voorwaarden, na een periode van vervalopslag vrijgegeven.

Van een aantal ziekenhuizen is onderzocht welke afvalstromen zij produceren en hoe zij deze verwerken, opslaan en afvoeren. Dit is samengevat in het stroomdiagram in Figuur 1. Dit is een algemeen schema waar niet expliciet is meegenomen welke afvalstromen op welke ziekenhuisafdelingen en -laboratoria ontstaan.

3.2.1 *Registratie en scheiding van afval*

Op ziekenhuisafdelingen zijn aparte vaten en zakken aanwezig om het afval direct te scheiden op radionuclide, type en mate van activiteit. Door op deze manier te selecteren wordt het deel dat naar de COVRA moet worden afgevoerd vanaf het begin af aan apart gehouden en kan de afvoer van radioactief afval naar de COVRA worden beperkt.

Bij het scheiden naar radionuclide kan gelet worden op de halveringstijd. Afval met een zeer korte halveringstijd (typisch <24 uur) vervalt vaak op de afdeling die het produceert, en kan snel worden vrijgegeven. Volledige scheiding op radionuclide of van radioactieve en niet radioactieve componenten is dan niet nodig.

Afvalvaten en -zakken die radionucliden met een korte halveringstijd (enkele tot 100 dagen) bevatten, worden in de praktijk opgeslagen in een geschikte bergplaats (zie Hoofdstuk 3.2.2). Het is afhankelijk van de halveringstijd en initiële activiteitsconcentratie of het afval binnen de termijn van 2 jaar vervalt tot de vrijgavewaarde. Dit afval wordt zo veel mogelijk op radionuclide en mate van activiteit gesorteerd om het deel dat naar de COVRA wordt afgevoerd zo klein mogelijk te houden.

Het afval dat radionucliden met een lange halveringstijd (>100 dagen) bevat wordt op dezelfde manier gesorteerd en opgeslagen tot het wordt afgevoerd naar de COVRA. Overigens is een volledige scheiding op nuclide niet altijd mogelijk, omdat bij sommige productiemethoden mengsels van radionucliden worden gevormd.

Bij de scheiding van radioactieve afvalstoffen moet in verband met regelgeving anders dan de regelgeving op grond van de Kernenergiewet ook een onderscheid worden gemaakt in categorieën als vast, vloeibaar, specifiek ziekenhuisafval (SZA)³, naalden, proefdierkadavers en chemisch afval. Ieder type wordt in een daarvoor geschikte bak of zak opgeslagen, zo nodig met afscherming.

Van iedere afvalstroom wordt de inhoud bijgehouden en de activiteit vastgesteld. De verpakking wordt vervolgens geregistreerd en voorzien van een label met de inhoud, de datum waarop het afval is geproduceerd en de eventuele verwachte vrijgavedatum. Door het dosistempo aan het oppervlak van de verpakking te meten, wordt onderzocht of het afval vervalt met de verwachte snelheid. Is dit niet het geval, dan kan het afval worden onderzocht om de activiteit of de samenstelling van radionucliden nauwkeuriger vast te stellen. Over het algemeen worden vaten op de afdelingen dichtgemaakt en daarna niet meer opengemaakt.

³ 'Specifiek ziekenhuisafval' verwijst naar afval van gezondheidszorg bij mens of dier, zoals infectueuze afvalstoffen en niet-infectueuze lichaamsdelen en organen. Dit wordt verder uitgewerkt in [24].

3.2.2 *Opslag van afval*

Open en ingekapselde bronnen die niet in gebruik zijn, moeten worden opgeslagen in een geschikte bergplaats [1]. Deze bergplaats moet voldoen aan een aantal eisen, zoals een brandwerendheid van minimaal 60 minuten, duidelijke markering, een omgevingsdosisequivalenttempo aan de buitenkant van maximaal 1 microsievert per uur, en voldoende ventilatie in het geval van open bronnen [7]. Deze eisen gelden ook voor een opslagplaats voor radioactieve afvalstoffen.

Grote ziekenhuizen beschikken over één of meerdere opslagplaatsen waar het radioactief afval wordt opgeslagen [25, 26]. In algemene ziekenhuizen wordt vooral gewerkt met kortlevende radionucliden zoals technetium-99m en fluor-18 [20]. Een grote afvalopslagplaats is dan niet nodig. Het kortlevende afval is vaak al op de afdeling vervallen tot onder de vrijgavewaarden, maar wordt nog enkele dagen uit voorzorg opgeslagen in een afgeschermd bak in een aparte kamer [20]. Afval met wat langer levende nucliden, zoals radium-223, wordt opgeslagen in een geventileerde brandwerende kast [20].

Over het algemeen is in werkruimten en bergplaatsen additionele afscherming, in de vorm van loden potten of een loodkasteel, aanwezig om fotonen af te schermen.

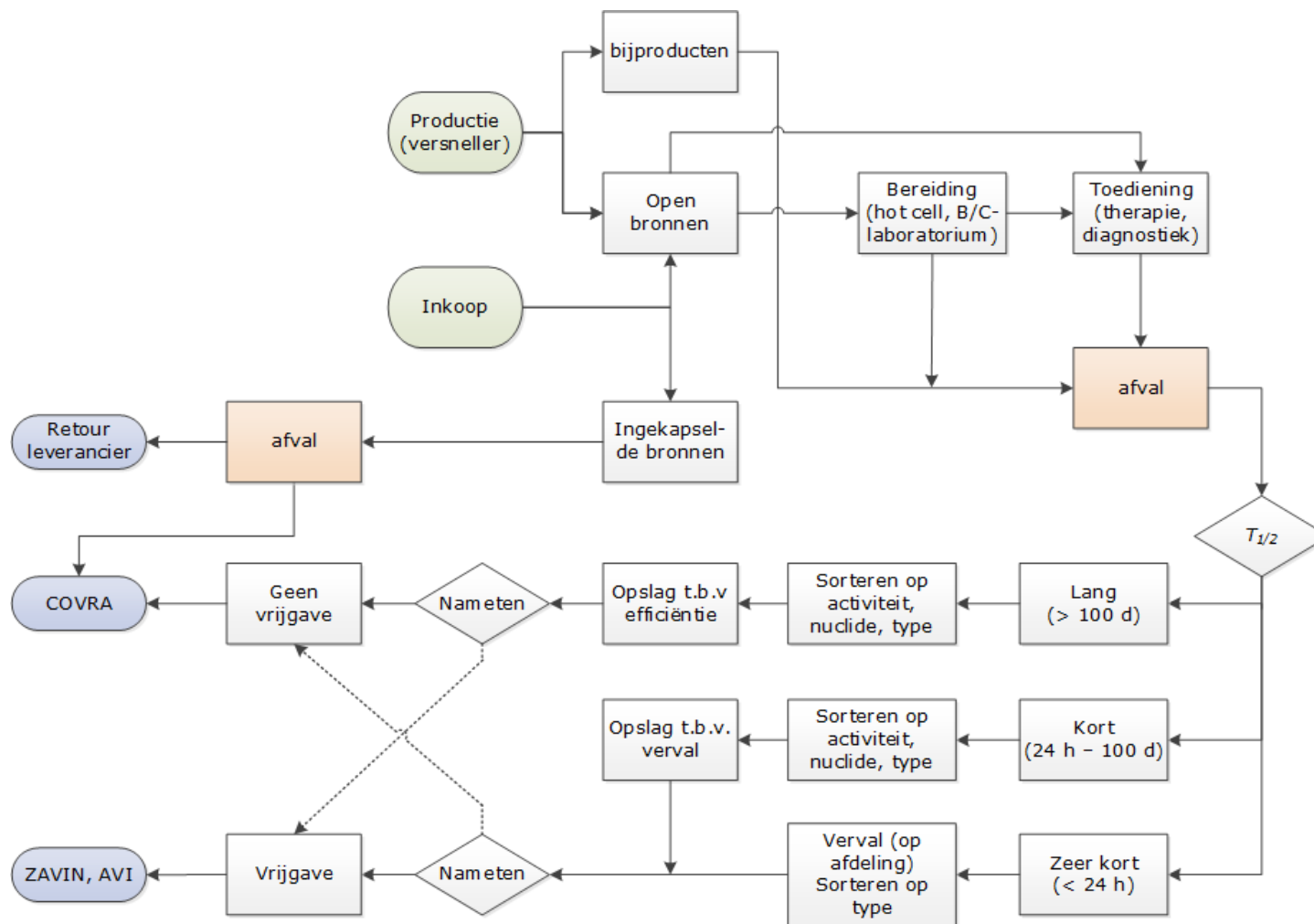
3.2.3 *Afvoer of vrijgave*

Na een opslagperiode van maximaal twee jaar wordt het afval afgevoerd. Voor radioactief afval is de bestemming de COVRA. Voor vrijgegeven specifiek ziekenhuisafval is dit de Ziekenhuisafval Verbrandingsinstallatie (ZAVIN), en voor het overige afval in de meeste gevallen een afvalverbrandingsinstallatie (AVI) voor conventioneel bedrijfsafval.

Om te voorkomen dat radioactief afval per abuis wordt afgevoerd naar de ZAVIN of een AVI meten veel ziekenhuizen de colli voordat afvoer plaatsvindt [25, 27-29].

Om het radioactieve afval zo efficiënt mogelijk af te voeren naar de COVRA worden verschillende kleine potten, zakken, e.d. gecombineerd in COVRA-vaten. Ondanks scheiding aan de bron ontvangt de COVRA daarom toch vaten die mengsels van radionucliden bevatten.

Op dit moment voeren grote ziekenhuizen ongeveer één keer per jaar of om het jaar afval af naar de COVRA [25, 26, 29]. De hoeveelheden afval zijn dermate klein dat een hogere afvoerfrequentie niet gerechtvaardigd is. Algemene ziekenhuizen voeren over het algemeen geen of slechts weinig langlevend radioactief afval af naar de COVRA [20]. Dit laatste heeft te maken met het feit dat in deze ziekenhuizen weinig of geen behandelingen worden uitgevoerd met langlevende nucliden. In de periode 2015-2019 hebben circa twintig ziekenhuizen radioactief afval afgevoerd naar de COVRA [30].



Figuur 1: Radioactieve afvalstromen in een ziekenhuis. Groen: mogelijke route van binnenkomst radioactieve stof in het ziekenhuis. Oranje: de radioactieve stof is radioactief afval geworden. Blauw: mogelijke afvoerroute van radioactief afval. Ruit: beslismoment. Rechthoek: processtap. Ovaal: buiten ziekenhuis(terrein).

3.3 Relevante radionucliden

Nederlandse ziekenhuizen gebruiken veel verschillende radionucliden. Om hiervan een totaaloverzicht te maken, is gebruik gemaakt van drie bronnen van informatie. De eerste is een studie uitgevoerd door de Nederlandse Vereniging voor Stralingshygiëne (NVS), die in 2017 een overzicht heeft opgesteld van radionucliden die werden toegepast of geproduceerd in bedrijven/instellingen met laboratoria, in de medische sector en bij producenten van medische radionucliden [31]. De tweede studie is het in 2019 gepubliceerde RIVM-rapport "Recente ontwikkelingen in medische stralingstoepassingen" [32], dat een aantal aanvullende toepassingen van radionucliden in ziekenhuizen beschrijft. Dit zijn veelal radionucliden die nog niet op grote schaal worden toegepast in de nucleaire geneeskunde. Tot slot is dit aangevuld met radionucliden die gedurende 2015-2019 door meer dan twintig bedrijven uit de medische sector naar COVRA zijn afgevoerd [4].⁴ Het resulterende totaaloverzicht is opgenomen in Bijlage A.

3.3.1 Kortlevende radionucliden

Of vervalopslag zinvol is, is naast de initiële activiteitsconcentratie (in kBq/kg) van de afvalstroom, afhankelijk van twee nuclidespecifieke eigenschappen: de halveringstijd (in dagen) en de vrijgavewaarde (in kBq/kg). Radionucliden met halveringstijden groter dan 100 dagen komen op grond van de huidige regelgeving niet in aanmerking voor vervalopslag.

Veel kortlevende radionucliden (met halveringstijden van circa 15 dagen of korter) kunnen binnen twee jaar vervalopslag vrijgegeven worden. Het is echter niet mogelijk om deze radionucliden volledig buiten beschouwing te laten in dit onderzoek. In de praktijk zullen bepaalde afvalstromen namelijk mengsels van kort- en langlevende radionucliden bevatten. Een complete scheiding van radionucliden is dus niet altijd mogelijk. Dit wordt verder toegelicht in Hoofdstuk 4.

3.3.2 Mogelijke, toekomstige radionucliden

Actinium-227 ($T_{1/2} = 22$ jaar) is het moedernuclide van thorium-227 ($T_{1/2} = 19$ d); thorium-227 is het moedernuclide van radium-223 ($T_{1/2} = 11$ d). Zowel thorium-227 als radium-223 worden gebruikt voor nucleaire alfa-therapie. Radium-223 is al enige tijd in gebruik voor de behandeling van botmetastasen [32]. Het gebruik van thorium-227 voor alfa-therapie is in een onderzoeksfase. Het afval dat ontstaat bij de preparatie van thorium-227 en radium-223 bevat het langlevende actinium-227 als onzuiverheid. De hoeveelheid actinium-227 in radium-223 zou, volgens producent Bayer, met de huidige preparatiemethode zodanig laag moeten zijn dat het onder de vrijgavewaarde valt [33].

Thorium-227 is een veelbelovend radionuclide voor de behandeling van meerdere soorten kanker [32, 34]. Gezien de hoge verwachtingen van alfa-therapie met thorium-227 is het mogelijk dat de stroom van radioactief afval met actinium-227 toeneemt. Bovendien is, na invoering van het Bbs, de vrijgavewaarde van actinium-227 aangepast van 1 kBq/kg naar 0,01 kBq/kg [6, 35].

⁴ Het is mogelijk dat sommige van deze bedrijven geen ziekenhuizen zijn, zoals (medische onderzoeksgroepen in) universiteiten. Het was niet mogelijk deze instellingen uit te sluiten van de data.

In [34] wordt een aantal nucliden als veelbelovend genoemd om in de toekomst een klinische toepassing te krijgen, zoals koper-64 ($T_{1/2} = 13$ uur) en zirkonium-89 ($T_{1/2} = 78$ uur). Dit zijn beide radionucliden voor PET-onderzoek. Voor therapie zijn tin-117m ($T_{1/2} = 14$ d), astat-211 ($T_{1/2} = 7$ uur) en actinium-225 ($T_{1/2} = 10$ dagen) veelbelovend. Deze radionucliden zijn vooralsnog niet of weinig in gebruik in Nederland. Vanwege de korte halveringstijden zullen afvalstromen met deze radionucliden (mits zij geen langlevende onzuiverheden bevatten) vervallen binnen de huidige vervalopslagtermijn.

4 Gevolgen van verruimen eisen vervalopslag

In dit hoofdstuk wordt onderzocht wat de gevolgen zijn van het verruimen van de voorwaarden aan vervalopslag. Hierbij worden de eisen aan de vervalopslagtermijn en de halveringstijd in stappen aangepast. Als mogelijke effecten hiervan worden de volumes van radioactieve afvalstromen bestudeerd, en worden de mogelijke radiologische risico's uitgewerkt.

4.1 Volumes van afvalstromen

4.1.1 Methode

In Bijlage A is een overzicht gemaakt van radionucliden die door ziekenhuizen worden gebruikt of geproduceerd. Als vervolgstap is in kaart gebracht hoeveel radioactief afval ziekenhuizen van 2015 tot en met 2019 naar de COVRA hebben afgevoerd [4]. Dit resulteerde in een lijst van enkele honderden vaten (data niet getoond). Van ieder van deze vaten is bekend wat het brutogewicht ervan is (inclusief vat; in kg), welke radionucliden met welke activiteit in het vat aanwezig waren op het moment van afvoeren (in MBq), en welk type afval het betreft (vast, vloeibaar of telpotjes). Voor dit onderzoek nemen wij aan dat deze beschrijving van de vaten, opgegeven door de ziekenhuizen, correct is.

Zoals in de Afbakening (Hoofdstuk 1.3) is aangegeven, richt het onderzoek zich niet op radioactief afval dat ontstaat als gevolg van de ontmanteling van uit gebruik genomen installaties. Voor dit onderzoek wordt aangenomen dat dergelijke afvalstromen bestaan uit (zeer) grote volumes vast afval. Daarom wordt, van het aangeleverde overzicht met COVRA-vaten, vast afval met volumes groter dan 100 L buiten beschouwing gelaten [36].

Van de resterende vaten is per vat afgeleid wat het volume ervan is: 100 L voor vast afval, 30 tot 60 L voor vloeibaar afval⁵, en 50 L voor telpotjes [37]. Wij nemen aan dat de vaten volledig gevuld zijn met afval, zodat de volumina van de vaten ook van toepassing zijn op die van het afval. Verder is van de verschillende typen vaten bekend wat het gewicht van een lege verpakking is (tarragewicht): 11 à 12 kg voor vaten met vast afval, 3,4 kg voor vaten met vloeibaar afval, en 7 of 12 kg voor telpotjes⁶ [30]. Hiermee kan van ieder vat het nettogewicht van het afval worden berekend.

De activiteitsconcentraties van het radioactief afval op het moment van afvoeren (in kBq/kg) worden berekend uit de aanwezige activiteiten en het nettogewicht van het vat. Per vat wordt van ieder radionuclide berekend wat de verhouding is tussen zijn activiteitsconcentratie en zijn bijbehorende vrijgavewaarde [1, 6]. Deze verhoudingen worden per vat gesommeerd. Als de resulterende waarde niet hoger is dan 1 [1], nemen

⁵ Het werkelijke volume van de beschouwde vaten is niet bekend. De berekeningen zijn uitgevoerd met een volume van 45 liter. Dit leidt, in het af te voeren volume, tot een afwijking van maximaal 0,1 m³ / jaar.

⁶ Het werkelijke tarragewicht van de beschouwde vaten met telpotjes is niet bekend. De berekeningen zijn voor deze vaten uitgevoerd met een tarragewicht van 9,5 kg. Dit leidt, in het af te voeren volume, tot een afwijking van maximaal 0,1 m³ / jaar.

wij aan dat het vat in zijn geheel kan worden vrijgegeven. Wij nemen aan dat vrijgegeven vaten niet langer naar COVRA afgevoerd worden, omdat dat in afgelopen jaren ook bijna niet is gebeurd. Zoals in Hoofdstuk 2.1.1 is aangegeven, zijn de vrijgavewaarden van toepassing op vaste materialen, en op vloeistoffen en vloeistof houdende materialen die in een afvalverbrandingsinstallatie worden verbrand [7]. Van het naar COVRA afgevoerde vloeibare afval (vloeibaar chemisch afval, semi-vast chemisch afval) nemen wij aan dat verbranding bij een afvalverwerker voor chemisch afval inderdaad de conventionele verwerkingswijze was geweest [31]. De vrijgavewaarden voor activiteitsconcentraties worden daarom op alle beschouwde vaten toegepast.

Van alle afgevoerde radionucliden is de halveringstijd bekend [38, 39]. Met deze gegevens is het mogelijk om per vat een langere opslagtijd te simuleren. Door fysisch verval zullen de activiteitsconcentraties van de aanwezige radionucliden lager worden. Het volume van het als radioactief afval af te voeren materiaal zal dan afnemen. De vaten zijn gedurende meerdere jaren afgevoerd (2015 tot en met 2019). Daarom wordt, nadat het totale af te voeren volume (in m³) van deze jaren is berekend, het jaarlijks af te voeren volume bepaald (in m³/jaar). Merk op dat de activiteitsconcentraties van de vaten (in kBq/kg), bepalend voor vrijgave, bij deze middeling ongewijzigd blijven.

In deze simulaties worden twee varianten gehanteerd. Zoals eerder beschreven is het op grond van de regelgeving verplicht radioactief afval zo snel als redelijkerwijs af te voeren. Tegelijkertijd geldt dat het niet praktisch is om elke Bq meteen na het ontstaan af te voeren. In de praktijk vindt de afvoer van radioactief afval daarom in campagnes plaats, uiterlijk twee jaar na het ontstaan ervan. De periode dat afval op locatie verblijft - en vervalt - voordat het wordt afgevoerd ligt daarmee tussen de 0 en de 2 jaar na ontstaan van het afval. Hiervoor moet worden gecorrigeerd. Wij hanteren in de berekeningen daarom twee varianten, die de bandbreedte bepalen van het effect van verlenging van de vervalopslagperiode:

1. Variant A. Hierin wordt aangenomen dat alle vaten pas na twee jaar opslag werden afgevoerd naar de COVRA.
2. Variant B. In het andere, uiterste geval werden de vaten direct na productie afgevoerd naar de COVRA. Zij hadden dus nog twee jaar opslag mogen ondergaan. Een deel van het volume dat in dit scenario afgevoerd is naar de COVRA, had in deze variant niet afgevoerd hoeven worden als het afval nog 2 jaar in de opslag was gebleven.

Bovenstaande analyse wordt meermalen herhaald voor verschillende eisen aan de maximale halveringstijd. Het verlengen van de termijn voor vervalopslag is immers alleen van toepassing op vaten die voor vervalopslag in aanmerking komen. In de praktijk worden ook radionucliden met halveringstijden groter dan 100 dagen enige tijd opgeslagen ten behoeve van een efficiënte afvoer, met een maximum van twee jaar. Het verlengen van de termijn voor vervalopslag betekent niet dat de termijn voor de opslag ten behoeve van een efficiënte afvoer ook wordt aangepast. Daarom wordt in bovenstaande analyse alleen

gekeken naar vaten met radionucliden die allen een halveringstijd hebben die kleiner is dan 100 dagen, 200 dagen, enz.

Verder is per radionuclide onderzocht hoeveel tijd nodig is om het bijbehorende afval vrij te geven (zijn 'karakteristieke vrijgavetijd'). Hiervoor is gebruik gemaakt van hetzelfde overzicht van afgevoerde vaten. Per radionuclide worden de vaten met dit nuclide geselecteerd. Voor deze vaten wordt fysisch verval gesimuleerd, en wordt bepaald wanneer zij kunnen worden vrijgegeven. Na een aantal jaren kan minstens 50 volumeprocent van de geselecteerde vaten worden vrijgegeven (t_{sim}). Wij nemen aan dat dit een goede benadering is van de tijd die het over het algemeen nodig is om afval met een bepaald radionuclide vrij te geven. Omdat de ouderdom van de beschouwde vaten niet met zekerheid bekend is (zijn zij direct of pas na twee jaar naar COVRA afgevoerd?), ligt de karakteristieke vrijgavetijd tussen t_{sim} en $t_{sim}+2$. Deze stappen worden per radionuclide herhaald, om zo voor ieder afgevoerd radionuclide een karakteristieke vrijgavetijd te bepalen. Randvoorwaarden aan deze analyse zijn dat het nuclide in minstens 0,5 m³/jaar voorkwam (zodat de analyse op voldoende vaten wordt uitgevoerd) en de halveringstijd minstens 15 dagen was.

Een beperking van de gebruikte methode is dat de beschouwde, gemiddelde afvoer niet volledig representatief is voor de huidige en toekomstige praktijk. In 2018 is, met de invoering van het Bbs, een aantal vrijgavewaarden veranderd. Het effect hiervan wordt pas met vertraging inzichtelijk, omdat ziekenhuizen hun radioactief afval nog enige tijd (maximaal twee jaar) opslaan voordat afvoer plaats vindt. Op het moment van schrijven is nog weinig data van 2020 bekend. Daarom is ervoor gekozen de oudere afvalstromen te beschouwen. In de berekeningen worden wel de huidige vrijgavewaarden gehanteerd.

Een tweede beperking is dat veel vaten mengsels van radionucliden bevatten. Ziekenhuizen scheiden het afval vaak bij de bron, naar eigenschappen zoals het gebruikte radionuclide, de activiteit en het type afval (zie Hoofdstuk 3). Bij het afvoeren kunnen verschillende afvalstromen alsnog gecombineerd worden in één COVRA-vat. Bij een aangepaste opslagtermijn kunnen ziekenhuizen besluiten deze scheiding anders in te richten. Dat kan de hoeveelheid af te voeren radioactief materiaal verder reduceren dan hier is berekend.

4.1.2 *Gevolg verlenging opslagtermijn en verruimen eis maximum halveringstijd*

Op basis van [4] kan worden geconcludeerd dat ziekenhuizen in de periode van 2015 tot en met 2019 meer dan 300 vaten afvoerden. Dit komt overeen met een gemiddeld volume van circa 6 m³/jaar. Het uiteindelijk opgeslagen volume is echter kleiner, onder andere doordat de COVRA colli met vast afval voor opslag perst [40]. Voor dit onderzoek wordt met de afgevoerde (ongeperste) volumes gerekend.

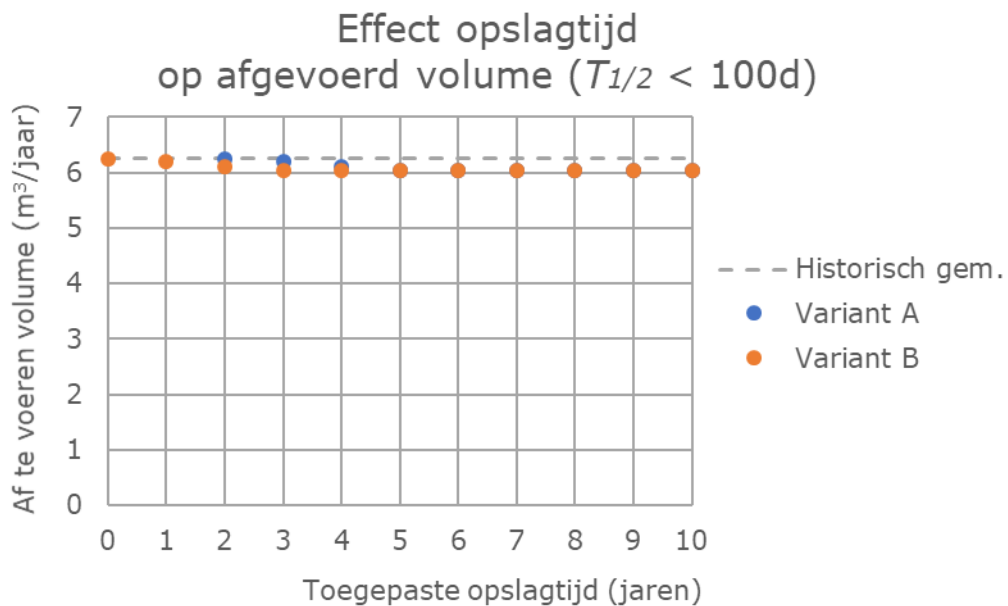
Het effect van een langere opslagtijd op de hoeveelheid af te voeren radioactief afval is in Figuren 2-3 gegeven. Zoals in bovenstaande methode is beschreven, hanteren wij twee varianten, A en B. Het werkelijke volume af te voeren radioactief afval zal zich tussen beide varianten in bevinden. De analyse wordt herhaald voor verschillende

eisen aan de maximale halveringstijd ($T_{1/2} < 100$ dagen, en geen eis aan $T_{1/2}$). Figuren voor overige eisen aan de halveringstijd ($T_{1/2} < 150$ dagen, $T_{1/2} < 200$ dagen, $T_{1/2} < 300$ dagen, $T_{1/2} < 400$ dagen en $T_{1/2} < 500$ dagen) zijn gegeven in Bijlage C.

Het volume dat jaarlijks afgevoerd diende te worden onder de huidige wetgeving, is circa $0,1 \text{ m}^3$ kleiner dan het werkelijk afgevoerde volume (enkele vaten waren vrijgegeven maar zijn wel afgevoerd).

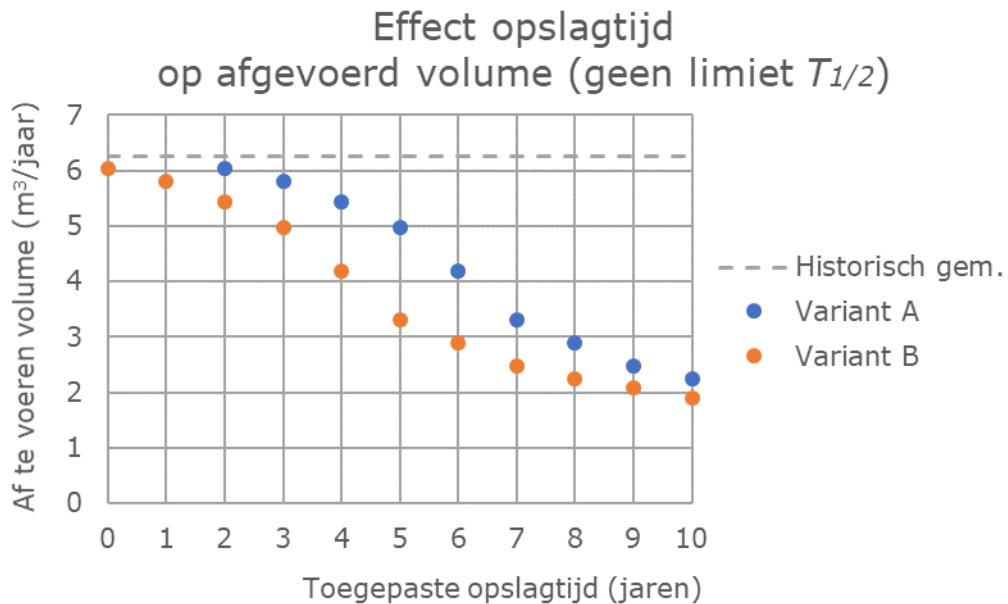
Het verruimen van alleen de eis aan de halveringstijd (zodat de vervalopslagtermijn twee jaar blijft) reduceert het af te voeren volume in het uiterste geval van 6 m^3 per jaar tot 5 à 6 m^3 per jaar (vergelijk Figuren 2-3 met een toegepaste opslagtijd van twee jaren).

Het verlengen van alleen de eis aan de vervalopslagtermijn leidt tot een beperkte reductie in het af te voeren volume (Figuur 2).



Figuur 2: Het minimaal te verwachten effect van een verlengde opslagtermijn op de hoeveelheid af te voeren radioactief afval. Variant A neemt aan dat het afval pas na 2 jaar vervalopslag naar COVRA werd afgevoerd. Variant B neemt aan dat het afval dat de afgelopen jaren daadwerkelijk naar de COVRA is afgevoerd, steeds direct na productie werd afgevoerd. Twee jaar extra verval zou in deze variant ertoe geleid hebben dat een deel van het afval vrijgegeven had kunnen worden. Bij het verlengen van de opslagtijd is aangenomen dat alleen vaten met radionucliden met halveringstijden < 100 dagen in aanmerking kwamen voor vervalopslag.

Het verruimen van beide eisen, dus zowel de halveringstijd als de vervalopslagtermijn, leidt tot minder radioactief afval dat jaarlijks afgevoerd moet worden (zie Figuren 3, 7-11). Onder variant B wordt minder radioactief afval afgevoerd dan onder variant A, omdat het afval daar twee jaar langer vervalopslag ondergaat. Na verloop van tijd vlakkt het effect van een verlengde opslagtermijn af, omdat vooral vaten met langer levende radionucliden resteren, zoals koolstof-14, tritium en kobalt-60.



Figuur 3: Het minimaal te verwachten effect van een verlengde opslagtermijn op de hoeveelheid af te voeren radioactief afval. Variant A neemt aan dat het afval pas na 2 jaar vervalopslag naar COVRA werd afgevoerd. Variant B neemt aan dat het afval dat de afgelopen jaren daadwerkelijk naar de COVRA is afgevoerd, steeds direct na productie werd afgevoerd. Twee jaar extra verval zou in deze variant ertoe geleid hebben dat een deel van het afval vrijgegeven had kunnen worden. Bij het verlengen van de opslagtijd is de eis aan de halveringstijd losgelaten (alle vaten kwamen in aanmerking voor vervalopslag).

De bovenstaande, af te voeren volumes zijn afgeleid voor data uit 2015-2019. Dit hoeft niet representatief te zijn voor toekomstige afvalstromen. Zo zijn, met de invoering van het Bbs in 2018, meerdere vrijgavewaarden aangepast. Omdat ziekenhuizen hun afval twee jaar hebben kunnen opslaan, is het effect hiervan pas vanaf 2020 inzichtelijk. Daarnaast maken ziekenhuizen, door ontwikkelingen in de nucleaire geneeskunde, steeds meer gebruik van 'nieuwe' radionucliden. Om het effect van aangepaste voorwaarden aan vervalopslag op toekomstige afvalstromen beter in te kunnen schatten, is het nuttig om de totale, afgevoerde volumes uit te splitsen naar de onderliggende radionucliden (Tabel 2). Daarbij is, per radionuclide, berekend hoeveel tijd over het algemeen nodig is om de bijbehorende vaten vrij te kunnen geven.

Hierbij wordt opgemerkt dat een lange karakteristieke vrijgavetijd niet altijd hoeft te betekenen dat het een langlevend radionuclide betreft. Zo kunnen relatief hoge startconcentraties ook leiden tot een lange vrijgavetijd.

Daarnaast zullen de werkelijke vrijgavetijden naar verwachting korter zijn dan de hier afgeleide tijden. Veel vaten bevatten namelijk mengsels van radionucliden. In sommige gevallen zal er sprake zijn van radionucliden die niet gescheiden van elkaar kunnen worden afgevoerd (bijvoorbeeld moeder- en dochternucliden). Ook kunnen ziekenhuizen verschillende potten, zakken, e.d. met radioactief afval gezamenlijk afvoeren in hetzelfde COVRA-vat om de afvoer zo efficiënt mogelijk te

maken (zie Hoofdstuk 3.2.3). In deze gevallen is het aannemelijk dat een deel van de inhoud kan worden vrijgegeven na een bepaalde vervalopslagtermijn, maar dat een andere afvalstroom voorkwam dat het gehele vat kon worden vrijgegeven. Bij een verruimde vervalopslagtermijn kunnen ziekenhuizen gestimuleerd worden om bepaalde afvalstromen apart te houden en na vervalopslag vrij te geven. De overgebleven afvalstromen kunnen wederom tezamen worden afgevoerd.

Tabel 2: Per radionuclide is het volume gegeven van vaten met dit nuclide (gemiddeld over de jaren 2015-2019). Daarnaast is de karakteristieke vrijgavetijd gegeven, gedefinieerd als de tijd die nodig is om minstens 50 procent van dit volume vrij te geven. Binnen een cel zijn de radionucliden gesorteerd op massagetal. Afval dat (waarschijnlijk) ontstaan is door activering in een cyclotron en afgevoerd is terwijl het cyclotron in bedrijf was, is als 'Cycl. act.' weergegeven. Nucliden die in minder dan 0,5 m³/jaar voorkwamen, zijn niet getoond; nucliden met halveringstijden kleiner dan 15 dagen zijn eveneens niet getoond.

		Per radionuclide: het gemiddelde, afgevoerde volume van de bijbehorende vaten [m³/jaar]		
		0,5 – 1	1 – 2	2 – 3
Karakteristieke vrijgavetijd [jaren]	0 – 2			
	1 – 3			
	2 – 4			
	3 – 5			
	4 – 6			Lu-177m
	5 – 7			
	6 – 8	Co-56 Cycl.act.	Co-57	
	7 – 9	Mn-54 Co-58 Ge-68		
	8 – 10			
	9 – 11	Zn-65		
	10 – 12			
	>10	H-3 C-14 Co-60		

Verlengen van de vervalopslagtermijn zal, naar verwachting, vooral effect hebben op afvalstromen met relatief grote volumes en korte vrijgavetijden. De volgende afvalstromen komen daarbij naar voren.

- Lutetium-177, lutetium-177m.
Lutetium-177 ($T_{1/2} = 6,71$ d) kan op dit moment op twee manieren via een reactor geproduceerd worden. Bij één van deze productiemethoden wordt ook een kleine hoeveelheid lutetium-177m geproduceerd [34]; na levering op locatie is deze activiteit circa 0,024% van die van lutetium-177 [26]. Door de lange halveringstijd van lutetium-177m ($T_{1/2} = 160$ d) vervalt afval met deze radionucliden niet altijd binnen de huidige opslagtermijn van 2 jaar.

Vaten met lutetium-177m (samen 2 à 3 m³/jaar) worden in de simulaties over het algemeen na 4 tot 6 jaren vrijgegeven. Dit komt goed overeen met berekeningen die zijn gedaan voor individuele afvalvaten met lutetium-177 en lutetium-177m (zie Bijlage D). Een typisch afvalvat met vast afval kan na 5 jaar worden vrijgegeven. Ongeveer 1 op de 10 afvalvaten heeft een hogere activiteitsconcentratie. Om deze afvalvaten vrij te geven is een opslagtermijn van 7 jaar nodig.

- Activeringsproducten bij cyclotronprocessen. Radionucliden voor PET-onderzoeken worden vaak geproduceerd met behulp van speciale versnellers of cyclotrons. Hierbij worden in de versneller- of cyclotroninstallatie en bijbehorende bouwdelen vaak activeringsproducten gevormd, die uiteindelijk bij ontmanteling ervan zullen moeten worden beheerd als radioactief afval. Zoals in de afbakening is aangegeven, wordt dergelijk ontmantelingsafval buiten beschouwing gelaten. Er wordt echter ook afval met activeringsproducten afgevoerd terwijl de installatie nog in bedrijf is. Dit ontstaat bijvoorbeeld tijdens regulier onderhoud. Dergelijk afval wordt voor dit onderzoek niet als ontmantelingsafval beschouwd, omdat het voor de definitieve ontmanteling afgevoerd wordt. Voor dit onderzoek worden vaten tot deze afvalstroom gerekend als zij zowel kobalt-56, kobalt-57 als kobalt-58 bevatten [36] ('Cycl. act.' in Tabel 2). Om een karakteristieke vrijgavetijd van deze radionucliden tezamen af te leiden, zijn hun vaten tot één afvalstroom gecombineerd (Tabel 2, 'Cycl. act.'). Deze vaten bevatten daarnaast vaak – maar niet altijd – mangaan-54 en zink-65. Vaten met dit afval (samen 0,5 à 1 m³/jaar) worden in de simulaties over het algemeen na 6 tot 8 jaren vrijgegeven.
- Germanium-68, gallium-68. Gallium-68 ($T_{1/2} = 68$ min) wordt gebruikt als positronemissietomografie-nuclide (PET). Ziekenhuizen verkrijgen het radionuclide uit een germanium-68/gallium-68-generator. Germanium-68 ($T_{1/2} = 288$ d) vervalt hierin naar gallium-68. Bij het onttrekken van het gallium-68 komt ook germanium-68 mee als onzuiverheid. Het radioactieve afval dat wordt geproduceerd bij de labeling van de tracer en de uiteindelijke toediening aan de patiënt bevat hierdoor beide radionucliden [26, 32, 41]. Vaten met germanium-68 (samen 0,5 à 1 m³/jaar) worden in de simulaties over het algemeen na 7 à 9 jaren vrijgegeven.

4.2 Stralingsrisico's

In deze paragraaf wordt beschreven wat voor ziekenhuismedewerkers de additionele stralingsrisico's zijn van een langere opslagtermijn van radioactief afval bij ziekenhuizen. Voor dit onderzoek is gekeken naar de radiologische gevaarzetting. Dit is uitgesplitst naar externe blootstelling (zonder besmetting) en overige blootstellingspaden.

Bij het berekenen van blootstelling aan externe straling is aangenomen dat de hoeveelheid afval in de bergplaats met een constant tempo toeneemt tijdens de opslagtermijn, en alle overige omstandigheden gelijk blijven. In de praktijk zal een ziekenhuis dat een verhoogd

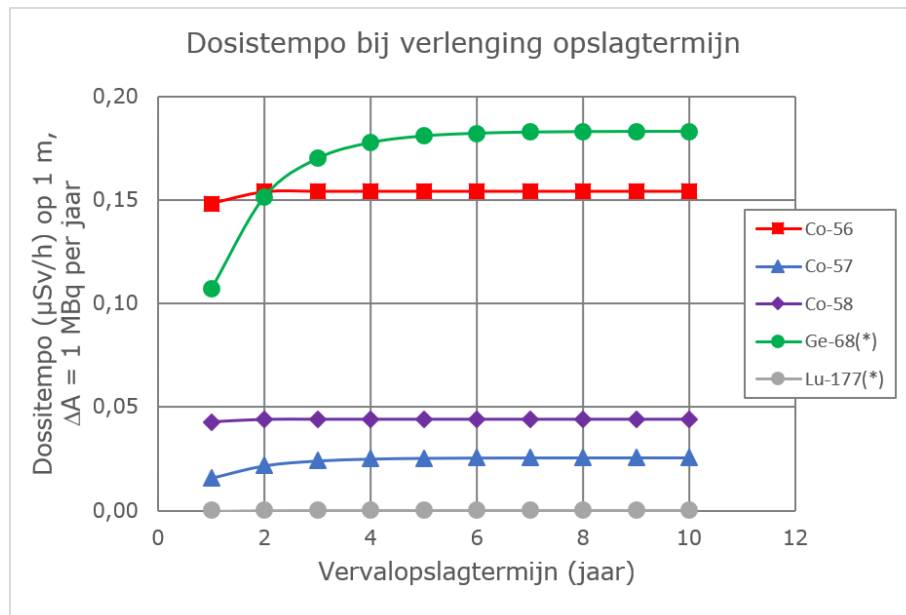
dosistempo constateert aanvullende maatregelen nemen. Zo kan men additionele afscherming plaatsen in de vorm van loden potten of een betonnen muur rond het meer radioactieve afval. In de huidige regelgeving zijn eisen opgenomen waaraan een bergplaats moet voldoen (zie Hoofdstuk 3.2.2). Wanneer verruiming van de regelgeving rond vervalopslag dreigt te leiden tot het overtreden van deze voorwaarden, kunnen ziekenhuizen aanvullende maatregelen nemen. Dergelijke maatregelen hebben volgens de bevroegde stralingsbeschermingsdeskundigen de voorkeur boven afvoer naar de COVRA vanwege de kostenbesparing op lange termijn [20, 25, 26]. De berekende toename in dosistempo vormt daarom een overschatting van de werkelijke toename.

Bij deze berekeningen wordt geen onderscheid gemaakt tussen afval dat is opgeslagen voor efficiënte afvoer en afval dat is opgeslagen voor vervalopslag. Door alle afvalstromen mee te nemen, wordt een conservatieve schatting van de radiologische gevaarzetting gemaakt.

4.2.1 *Externe blootstelling*

Om te kwantificeren hoe de externe blootstelling *verandert* bij verschillende opslagtermijnen, gebruiken wij een eenvoudig model. Wij nemen aan dat het afval met een constant tempo wordt binnengebracht gedurende de opslagtermijn; dat het afval kan worden beschouwd als een puntbron met constante afscherming; en dat een blootgestelde persoon zich op constante afstand van de puntbron bevindt. De bijdrage van direct ioniserende straling is niet meegenomen: wij nemen aan dat deze deeltjes niet door het verpakkingsmateriaal komen. Verder nemen wij in de berekeningen aan dat de verantwoordelijke stralingsbeschermingsdeskundige naar aanleiding van de veranderende situatie geen aanvullende maatregelen doorvoert. Een volledige beschrijving van het model is te vinden in Bijlage B. Merk op dat het berekende dosistempo door de gemaakte aannames geen realistisch beeld geeft van het daadwerkelijke dosistempo in een bergplaats.

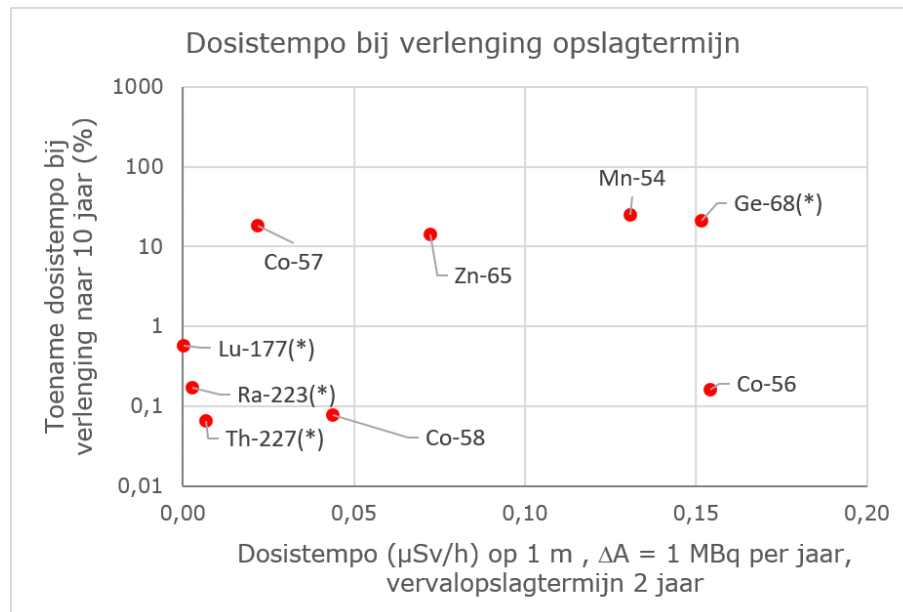
Het dosistempo $\dot{H}_{p,i}(10, t)$ voor verschillende opslagtermijnen t is uitgerekend voor enkele radionucliden i waarvan een groot volume wordt afgevoerd naar COVRA. De resultaten zijn gegeven in Figuur 4. Hieruit blijkt dat in veel gevallen al snel een evenwicht ontstaat tussen productie (toevoer naar bergplaats) en verval, waardoor een langere opslagtermijn nauwelijks leidt tot een toename in de totale opgeslagen activiteit. Het dosistempo neemt daarom ook nauwelijks toe. Voor sommige radionucliden, zoals kobalt-56 en kobalt-58, wordt dit evenwicht al bereikt tijdens de huidige opslagtermijn van 2 jaar. Voor germanium-68 duurt het bereiken van het evenwicht langer, namelijk ongeveer 6 jaar. Als vuistregel kan men nemen dat 95% van de evenwichtsactiviteit wordt bereikt wanneer de opslagtermijn gelijk is of langer dan 4 keer de halveringstijd (zie Bijlage B). Een verlenging van de vervalopslagtermijn zal volgens dit model niet leiden tot een hoger dosistempo voor radionucliden met halveringstijd korter dan 0,5 jaar (de huidige opslagtermijn gedeeld door 4).



Figuur 4: Het dosistempo als functie van opslagtermijn voor enkele radionucliden. Voor ieder radionuclide is de activiteitstoename 1 MBq/jaar gedurende de hele vervalopslagtermijn. (*) Bij deze radionucliden zijn de bijdragen van dochters of onzuiverheden meegenomen (deze bijdragen zijn berekend zoals beschreven in Bijlage B).

Voor een aantal radionucliden is het dosistempo (in $\mu\text{Sv/h}$) voor een opslagtermijn van $t = 2$ jaar berekend, en de toename in dosistempo (in %) wanneer de opslagtermijn wordt verlengd van 2 naar 10 jaar (zie Figuur 5). Deze radionucliden zijn geselecteerd uit Tabel 2 (met karakteristieke vrijgavetijd < 10 jaar) en aangevuld met radionucliden waarvan we verwachten dat het gebruik in de toekomst zal toenemen (Hoofdstuk 3.3.2).

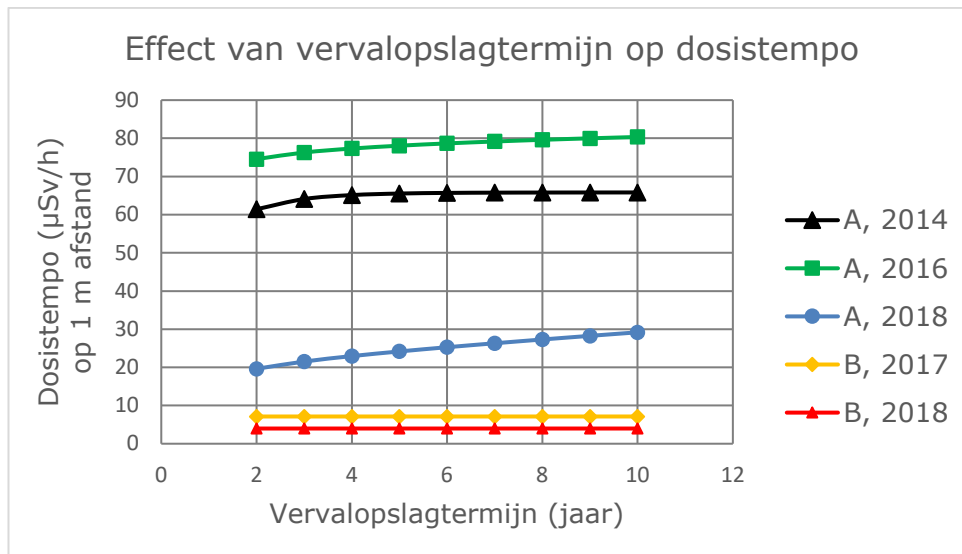
De radionucliden die per MBq de grootste bijdrage kunnen leveren aan de toename van het dosistempo zijn mangaan-54 en germanium-68. Voor lutetium-177 (in combinatie met onzuiverheid lutetium-177m) zijn zowel het dosistempo na 2 jaar als de toename bij verlenging ($< 1\%$) in vergelijking zeer laag. Dit komt omdat deze afvalstroom vooral bestaat uit het kortlevende lutetium-177, wat binnen de huidige vervalopslagtermijn van 2 jaar al vervalt tot de vrijgavewaarde. Voor lutetium-177 geldt daarom dat de opgeslagen activiteit niet toeneemt wanneer de vervalopslagtermijn wordt verlengd (bij een constant productietempo van afval). De activiteit van de onzuiverheid lutetium-177m neemt wel toe, maar omdat de activiteit van deze onzuiverheid 0,024% van die van lutetium-177 is [26], neemt de totale activiteit van lutetium-177 en lutetium-177m weinig toe. Een verlenging van de vervalopslagtermijn zal daarom leiden tot een kleine verhoging van het dosistempo. Dit geldt ook wanneer het gebruik van lutetium-177 toeneemt: het dosistempo wordt vooral bepaald door het lutetium-177 dat als laatste is afgevoerd naar de bergplaats en niet door het lutetium-177m dat al enige tijd is opgeslagen.



Figuur 5: Het dosistempo na 2 jaar vervalopslag en de toename in dosistempo wanneer de opslagtermijn wordt verlengd van 2 naar 10 jaar, voor relevante radionucliden. Voor ieder radionuclide is de activiteitstoename 1 MBq/jaar gedurende de hele opslagtermijn. (*) Bij deze radionucliden zijn de bijdragen van dochters of onzuiverheden meegenomen (deze bijdragen zijn berekend zoals beschreven in Bijlage B).

Het dosistempo in een bergplaats met verschillende radionucliden is de som van de bijdragen van de individuele radionucliden. Om te rekenen met een realistische inhoud van de bergplaats is gebruik gemaakt van de stralingshygiënische jaarverslagen van ziekenhuizen. De ziekenhuizen rapporteren de totale activiteit, per radionuclide, die in een jaar binnenkomt als afval. Vijf scenario's zijn uitgewerkt. Het betreft afvalinventarissen uit verschillende jaren van twee academische ziekenhuizen [23, 42-45]. In deze vijf afvalinventarissen komen in totaal 50 verschillende radionucliden voor, waaronder ook zeer langlevende radionucliden (zoals uranium-238, $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ jaar) en radionucliden die worden gebruikt in wetenschappelijk onderzoek (zoals waterstof-3). In de berekeningen zijn alle gerapporteerde radionucliden meegenomen zonder te selecteren op halveringstijd of toepassing (therapie/diagnostiek of onderzoek).

Figuur 6 toont hoe dit berekende, totale dosistempo afhangt van de opslagtermijn voor de vijf scenario's. Bij het verlengen van de opslagtermijn neemt de totale activiteit in opslag en daarmee het dosistempo toe. Echter is de toename in dosistempo klein vergeleken met de onderlinge verschillen tussen de twee ziekenhuizen en tussen de verschillende jaren. Het dosistempo van de bergplaats wordt dus grotendeels bepaald door de jaarlijkse afvalproductie en in mindere mate door de opslagtermijn.



Figuur 6: Het berekende dosistempo, in $\mu\text{Sv/h}$ op 1 m afstand, voor de gerapporteerde afvalstromen van twee academische ziekenhuizen, A en B. In totaal zijn vijf stralingshygiënische jaarverslagen gebruikt (uit de periode 2014 tot 2018).

Voor vier van de vijf scenario's in Figuur 6 is de toename in dosistempo minder dan 10% wanneer de opslagtermijn wordt verlengd van 2 naar 10 jaar. Het aandeel radionucliden met relatief lange halveringstijd is dus laag. Slechts één scenario (ziekenhuis A, 2018) geeft een grotere toename in dosistempo, van ongeveer 50%. Dit wordt grotendeels verklaard door de aanwezigheid van thorium-232, een langlevend radionuclide ($T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$ jaar) met een lange vervalreeks. In de berekeningen is aangenomen dat ieder jaar dezelfde totale activiteit van ieder radionuclide binnenkomt. Thorium-232 wordt echter niet op grote schaal toegepast in ziekenhuizen. Dit radionuclide komt dan ook niet in iedere afvalinventaris van ziekenhuis A voor. Wanneer dit radionuclide buiten beschouwing wordt gelaten, is de toename in dosistempo 22%.

De toename in dosistempo is dus typisch <10% (onder realistische aannames maximaal 22%), tenzij er sprake is van een veelvoorkomende afvalstroom met langlevende radionucliden. Voor algemene ziekenhuizen, waar vooral kortlevende radionucliden worden gebruikt, zal er vrijwel geen toename in dosistempo zijn bij verlenging van de vervalopslagtermijn. Deze afvalstromen kunnen een grote bijdrage leveren aan het dosistempo wanneer ze net worden binnengebracht in de afvalbergplaats, maar worden binnen de huidige vervalopslagtermijn al vrijgegeven. Zo produceerde ziekenhuis B in zowel 2017 als 2018 vooral afval met kortlevende radionucliden (zoals jodium-131, met $T_{1/2} = 8,04$ d), wat leidt tot een toename in dosistempo van <1% bij verlenging van de opslagtermijn van 2 naar 10 jaar.

De toename in opgelopen dosis voor werknemers zal in de praktijk kleiner zijn dan de berekende toename in dosistempo, omdat werknemers zich zelden in de afvalruimte bevinden en er gebruik wordt gemaakt van afscherming [20, 25, 26]. Ook zal de verantwoordelijke stralingsbeschermingsdeskundige een nieuwe risico-inventarisatie en -

evaluatie opstellen voor de veranderende situatie en eventueel aanvullende maatregelen doorvoeren. Daarnaast is slechts een klein deel van de totale activiteit in een ziekenhuis aanwezig als radioactief afval. De opgelopen dosis door externe blootstelling aan het afval zal (voor een gemiddelde werknemer in het ziekenhuis) dus een fractie zijn van de totale dosis door externe blootstelling aan activiteit. In academische of specialistische ziekenhuizen wordt per jaar circa 10.000 radiotoxiciteitsequivalenten (Re) aan activiteit ingekocht en is op ieder moment 1000-2500 Re aanwezig [21, 46]. In de afvalkelders is met de huidige vervalopslagtermijn typisch enkele tientallen Re opgeslagen, wat neerkomt op een paar procent van de totale activiteit [21, 27]. Als laatste wordt hier nog genoemd dat, wanneer minder (vaak) afval wordt afgevoerd naar de COVRA, de blootstelling van werknemers tijdens het afvoeren kan afnemen. Dit is in dit rapport niet verder uitwerkt.

De berekeningen zijn gedaan met de aanname dat al het radioactieve afval 2-10 jaar wordt opgeslagen. In de praktijk zal dit niet altijd het geval zijn. In de vergunningen van ziekenhuizen is vastgesteld wat de totale activiteit van open bronnen (in Re) en ingekapselde bronnen (in totale activiteit en activiteit per bron) mag zijn. Om hieraan te voldoen kan het voorkomen dat een ziekenhuis afval afvoert naar COVRA vóór de wettelijke opslagtermijn is verstreken (bijvoorbeeld jodium-125-*markers*) [22]. Ziekenhuizen kunnen ook om andere redenen besluiten om bepaalde afvalstromen vroegtijdig af te voeren naar COVRA, bijvoorbeeld wanneer het afval betreft met hoge activiteit en langlevende radionucliden.

4.2.2 *Overige blootstellingsroutes*

Alfa- en bètastralers kunnen een grote bijdrage leveren bij inhalatie, ingestie of huidbesmettingen.

Op dit moment is radium-223 de alfastraler die in ziekenhuizen in Nederland het meest wordt gebruikt. Actinium-225 en thorium-227 worden alleen nog gebruikt in onderzoeksverband. Door de korte halveringstijden ($T_{1/2} = 11$ d, 10 d en 19 d, respectievelijk) van deze radionucliden zullen de afvalstromen binnen de huidige opslagtermijn van 2 jaar vervallen tot de vrijgavewaarde (zie Hoofdstuk 3.3.1). Een verlenging van de opslagtermijn zal daarom geen invloed hebben op de stralingsrisico's, mits de concentratie actinium-227 ($T_{1/2} = 22$ jaar) in afvalstromen met thorium-227 en radium-223 laag blijft.

De kans op besmetting met alfa- en bètastralers is voornamelijk aanwezig bij handelingen met open bronnen, zoals het bereiden en toedienen van radioactieve stoffen. Het radioactieve afval is daarentegen ingepakt in vaten, potten of zakken en zal daarom in een normale situatie niet vrijkomen in de ruimte. Voor deze blootstellingsroutes zijn daarom geen scenario's uitgewerkt. Wel wordt opgemerkt dat de potentiële blootstelling, onder verder gelijke omstandigheden, toe zal nemen als de hoeveelheid Re in de bergplaats toeneemt. Bij een ongeval, zoals brand, zal de radiologische gevaarstelling dan ook groter zijn. Mogelijke maatregelen zijn gericht op het minimaliseren van de kans op het ontstaan van brand in of naast de ruimte [47]. Het aantal Re in de bergplaats zal – bij constant productietempo van afval – vooral toenemen wanneer lang(er)levende

radionucliden met relatief hoge dosisconversiecoëfficiënten voor inhalatie worden opgeslagen, zoals actinium-227 ($T_{1/2} = 22$ jaar). Voor de kortlevende alfastralers radium-223 en thorium-227 wordt al snel een evenwicht bereikt tussen productie en verval, en neemt de opgeslagen hoeveelheid Re dus nauwelijks toe.

4.2.3 *Overige gevolgen*

Het verruimen van de eisen aan vervalopslag kan nog andere gevolgen hebben dan die op het gebied van afgevoerde volumes en radiologische risico's. Zo is uit gesprekken met ziekenhuispersoneel gebleken dat de gebruikte jerrycans (voor vloeibaar afval) en vaten voor specifiek ziekenhuisafval door de fabrikant gegarandeerd zijn tot 5 jaar [25]. De integriteit van de vaten – en hoe deze wordt beïnvloed door factoren zoals straling, licht, temperatuur, en de chemische en biologische eigenschappen van de inhoud – kan hiermee een praktische belemmering zijn.

Verder maken ziekenhuizen door ontwikkelingen in de nucleaire geneeskunde steeds meer gebruik van 'nieuwe' radionucliden, waarvan sommigen een langere halveringstijd hebben dan nucliden die voorheen werden gebruikt. Dit kan leiden tot een grotere hoeveelheid radioactief SZA dat moet worden afgevoerd naar de COVRA, waar het in een vriescel wordt opgeslagen [48]. In 2015-2019 zijn slechts enkele SZA-vaten naar COVRA afgevoerd, met daarin lutetium-177 (met onzuiverheid lutetium-177m) en gallium-68 (met onzuiverheid van het moedernuclide germanium-68) [4]. Van beide radionucliden wordt een toename in het gebruik verwacht [32].

Incidenteel krijgen algemene ziekenhuizen te maken met voor hun ongebruikelijke afvalstromen, bijvoorbeeld wanneer een patiënt opgenomen wordt na elders te zijn behandeld met een 'nieuw' radionuclide [20]. Door de stijging in het aantal behandelingen met 'nieuwe' radionucliden zal het aantal van deze patiënten waarschijnlijk toenemen. Per geval beoordeelt het personeel hoe het afval moet worden opgeslagen. Het is daarom niet uit te sluiten dat algemene ziekenhuizen in de toekomst radioactief afval voor langere tijd moeten opslaan of afvoeren naar de COVRA.

5 Conclusies

Onder de huidige wetgeving mag vervalopslag maximaal twee jaar worden toegepast op radionucliden met een halveringstijd kleiner dan 100 dagen. Onderzocht is of verruiming van deze voorwaarden aan vervalopslag bijdraagt aan een reductie in de hoeveelheid radioactief afval die moet worden afgevoerd naar de COVRA.

Afvalstromen van ziekenhuizen met radionucliden met relatief korte halveringstijden kunnen doorgaans op locatie vervallen tot onder de vrijgavewaarden. Hiertoe behoren bijvoorbeeld fluor-18, technetium-99m en jodium-131. Deze behoeven dus niet te worden afgevoerd als radioactief afval.

Radioactief afval dat daarentegen niet kan worden vrijgegeven, wordt deels afgevoerd naar de COVRA en deels naar de producent van de bron. COVRA conditioneert radioactief afval voor een opslag van tenminste 100 jaar, waarna eindberging is voorzien [2]. Een deel van dit afval zal na 100 jaar tot onder de vrijgavegrenzen zijn vervallen, waardoor het mogelijk is niet naar de eindberging hoeft [2, 3]. De totale gemiddelde afvoer van radioactief afval afkomstig van Nederlandse ziekenhuizen naar de COVRA wordt geschat op circa 6 m³ per jaar, verdeeld over circa zeventig colli. De COVRA ontvangt, ter vergelijking, in totaal circa tweeduizend colli per jaar met laag- en middelradioactief afval [40].

Het verruimen van alleen de voorwaarde aan de halveringstijd (zodat de vervalopslagtermijn twee jaar blijft) heeft weinig invloed op de hoeveelheid af te voeren radioactief afval. Dit heeft te maken met het feit dat in veel vergunningsvoorschriften expliciet toestemming is gegeven om radioactieve afvalstoffen tijdelijk op te slaan ten behoeve van een efficiënte afvoer naar de COVRA. De halveringstijd speelt daarbij geen rol. In de praktijk betekent dit dat radioactief afval in campagnes kan worden afgevoerd. De productie van radioactieve afvalstoffen in ziekenhuizen is dermate laag dat dergelijke campagnes hooguit enkele malen per jaar, of zelfs minder dan één keer per jaar plaatsvinden. In die tijd vindt ook verval plaats van nucliden met halveringstijden groter dan 100 dagen. De eis aan halveringstijd zou hier dus geen invloed hebben op de hoeveelheid af te voeren radioactief afval. Analyse van naar COVRA afgevoerde vaten (die voor een deel vóór invoering van het Bbs zijn afgevoerd) geeft aan dat het verruimen van alleen de eis aan de halveringstijd het af te voeren volume maximaal reduceert tot 5 à 6 m³ per jaar.

Verlenging van alleen de vervalopslagtermijn (waarbij de maximale halveringstijd dus 100 dagen blijft) geeft eveneens een beperkte reductie in het af te voeren volume. De reden hiervoor is dat dan alleen kortlevende radionucliden in aanmerking komen voor vervalopslag. De bijbehorende afvalstromen vervallen over het algemeen al binnen twee jaar tot de vrijgavegrenzen.

Als tegelijkertijd beide eisen (dus zowel de vervalopslagtermijn als de halveringstijd) worden aangepast, hoeft minder radioactief afval naar de COVRA afgevoerd te worden. Zo moet, bij een vervalopslagtermijn van 5 à 7 jaar en het loslaten van de eis aan de halveringstijd, nog maar circa 3 m³ per jaar naar de COVRA afgevoerd worden. Een verdere verlenging van de vervalopslagtermijn levert een beperkte extra reductie: bij een termijn van circa tien jaar wordt een niveau bereikt waarin 2 m³ per jaar moet worden afgevoerd.

De bovenstaande conclusies hebben betrekking op de huidige afvalstromen. Door ontwikkelingen in de nucleaire geneeskunde is de verwachting dat het aantal toedieningen in de toekomst zal toenemen, met een grotere verscheidenheid aan radionucliden. De samenstelling van het ziekenhuisafval zal hierdoor veranderen.

Zo wordt lutetium-177 gebruikt voor de behandeling van verschillende soorten kanker [34]. Het bijbehorende afval kan lutetium-177m bevatten, een relatief langlevende onzuiverheid. Vaten met lutetium-177m worden in de simulaties over het algemeen na 4 tot 6 jaren vrijgegeven. Experts hebben grote verwachtingen van dit radionuclide en verwachten dan ook een grote stijging van het gebruik [32]. Na de invoering van het Bbs (februari 2018) is de vrijgavewaarde voor lutetium-177m aangepast van 10 kBq/kg [35] naar 0,1 kBq/kg [6]. Afhankelijk van de productiemethode van lutetium-177 kan de stijging in het gebruik ervan dus leiden tot een toename van radioactief afval met lutetium-177m [26].

Daarnaast wordt gallium-68 ($T_{1/2} = 68$ min) gebruikt als positronemissietomografienuclide (PET). Bij de productie van het gallium-68 komt ook germanium-68 mee als onzuiverheid. Het bijbehorende afval bevat hierdoor beide radionucliden. Vaten met germanium-68 worden in de simulaties over het algemeen na 7 tot 9 jaren vrijgegeven. De vrijgavewaarde van het langlevende germanium-68 is, met de invoering van het Bbs, met 10 kBq/kg niet aangepast [6, 35]. Door een toename in het aantal PET-onderzoeken wordt verwacht dat gallium-68 vaker toegepast zal worden [32]. De hoeveelheid radioactief afval met germanium-68/gallium-68 kan hierdoor toenemen.

Een andere afvalstroom die wordt afgevoerd, bevat activeringsproducten die in cyclotronprocédés ontstaan. Vaten met dit type afval worden in de simulaties over het algemeen na 6 tot 8 jaren vrijgegeven. Het gebruik van fluor-18, dat in cyclotrons geproduceerd wordt, neemt toe [32, 41]. Verder zijn de vrijgavewaarden van kobalt-56, kobalt-57 en kobalt-58 aangepast van respectievelijk 10, 100 en 10 kBq/kg naar 0,1; 1 en 1 kBq/kg. Hierdoor is het mogelijk dat ook de hoeveelheid radioactief afval van dergelijke activeringsproducten zal toenemen.

Ook is onderzocht wat de invloed van het verruimen van de voorwaarden aan vervalopslag is op de stralingsrisico's voor ziekenhuismedewerkers. Voor dit onderzoek is gekeken naar de radiologische gevaarstelling. Dit is benaderd als het dosistempo in de afvalopslagruimte in een ziekenhuis. Potentiële blootstellingsscenario's, bijvoorbeeld als gevolg van brand, zijn in dit rapport niet uitgewerkt. In de berekeningen is aangenomen dat de verantwoordelijke

stralingsbeschermingsdeskundige geen aanvullende maatregelen doorvoert naar aanleiding van de veranderde situatie. In dit vereenvoudigde model zal de radiologische gevaarstelling toenemen wanneer meer activiteit wordt opgeslagen in de afvalbergplaats.

De totale opgeslagen activiteit wordt bepaald door het type en het aantal uitgevoerde behandelingen in een ziekenhuis. Deze kan van jaar tot jaar en van ziekenhuis tot ziekenhuis verschillen. Het berekende dosistempo na twee jaar vervalopslag varieert daarom eveneens sterk. Op basis van de uitgevoerde berekeningen kan echter in zijn algemeenheid wel worden geconcludeerd dat het verlengen van de vervalopslagtermijn tot een beperkte toename in het dosistempo leidt, typisch minder dan 10% voor een verlenging naar 10 jaar. Veel van de door ziekenhuizen gebruikte radionucliden hebben korte halveringstijden en vervallen binnen de huidige vervalopslagtermijn tot de vrijgavewaarde. Een verlenging van de vervalopslagtermijn heeft daarom geen effect op de opgeslagen activiteit van deze radionucliden, terwijl deze afvalstromen wel een grote bijdrage kunnen leveren aan het dosistempo wanneer ze net worden binnengebracht in de afvalbergplaats.

Hierbij wordt opgemerkt dat de beschermende maatregelen die ziekenhuizen nemen, ook bij aangepaste eisen aan vervalopslag passend moeten blijven. De berekende toename in dosistempo is daarom waarschijnlijk in de praktijk een overschatting van de toename in blootstelling van de werknemers.

A Bijlage: Radionucliden ziekenhuizen

In deze bijlage zijn de radionucliden weergegeven die in ziekenhuizen gebruikt (kunnen gaan) worden en voor radioactief afval (kunnen) zorgen. Hierbij zijn ook de radionucliden weergegeven die als bijproduct ontstaan, bijvoorbeeld door activering met een cyclotron. De gegevens komen uit een overzicht van de Nederlandse Vereniging voor Stralingshygiëne (NVS) gepubliceerd in 2017 [31], het RIVM-rapport "Recente ontwikkelingen in medische stralingstoepassingen: Update ioniserende straling 2018/2019" [32] en data die de COVRA heeft aangeleverd [4].

Tabel 3 geeft van deze radionucliden de halveringstijd in dagen en de vrijgavewaarde in kBq/kg. Ook is weergegeven of het betreffende radionuclide van 2015 tot en met 2019 is afgevoerd naar de COVRA.

Er worden meerdere kortlevende nucliden naar de COVRA afgevoerd. Het betreft telkens een mengsel met andere, langlevende nucliden, zoals een kortlevend nuclide dat samen met een langlevend modernuclide wordt afgevoerd.

Tabel 3: Radionucliden die door hun gebruik door ziekenhuizen voor radioactief afval kunnen zorgen. De radionucliden zijn gerangschikt op halveringstijd $T_{1/2}$ (in dagen). Daarnaast zijn de vrijgavewaarden (kBq/kg) gegeven. De vrijgavewaarden zijn afkomstig uit het Bbs (bijlage 3, onderdeel B, tabel A) [1] of de Rbs (bijlage 3.2, tabel A) [6] en zijn van toepassing op kunstmatige radionucliden van elk type vast materiaal en in elke hoeveelheid.

"-": niet afgevoerd naar de COVRA; "Niet beschikbaar": geen vrijgavewaarde voor het betreffende nuclide beschikbaar; "Dochternuclide in reeks": het betreffende radionuclide is opgenomen in een moeder-dochterreeks, dit betekent dat de dosisbijdragen van de dochter in de dosisberekeningen van de moeder worden meegenomen.

Nuclide	Halveringstijd (dagen)	Vrijgavewaarde (kBq/kg)	Afgevoerd naar COVRA?
Kr-81m	<1	Niet beschikbaar	-
Rh-106	<1	1000	-
Rb-82	<1	Niet beschikbaar	-
O-15	<1	100	-
N-13	<1	100	-
C-11	<1	1000	-
Bi-213	<1	1000	-
Bi-212	<1	1000	-
Ga-68	<1	1000	ja
F-18	<1	10	-
Mn-56	<1	10	ja
Sc-44	<1	100	-
Tb-149	<1	0,1	-

Nuclide	Halveringstijd (dagen)	Vrijgavewaarde (kBq/kg)	Afgevoerd naar COVRA?
Rb-81	<1	1000	-
Tc-99m	<1	100	-
At-211	<1	1000	-
Pb-212	<1	10	-
Cu-64	1	100	-
I-123	1	100	-
Zn-69m	1	10	-
Y-86	1	10	-
Re-188	1	100	-
Tb-152	1	Niet beschikbaar	-
Ho-166	1	100	-
Sm-153	2	100	ja
Cu-67	3	100	-
Y-90	3	1000	ja
Au-198	3	10	-
Mo-99	3	10	-
In-111	3	10	ja
Tl-201	3	100	-
Ga-67	3	100	-
Zr-89	3	100	ja
Sc-47	3	100	-
Re-186	4	1000	ja
Rn-222	4	Dochternuclide in reeks	-
Pt-195m	4	1000	ja
I-124	4	10	ja
Xe-133	5	Niet beschikbaar	-
Tb-155	5	100	-
Mn-52	6	1	-
Lu-177	7	100	ja
I-131	8	10	ja
Er-169	9	1000	-
Ac-225	10	10	-
Ra-223	11	10	ja
Sn-117m	14	100	-
P-32	14	1000	ja
Eu-156	15	1	ja
Pd-103	17	1000	-
Te-121	17	10	ja
Th-227	19	10	-
Sr-82	25	1000	ja

Nuclide	Halveringstijd (dagen)	Vrijgavewaarde (kBq/kg)	Afgevoerd naar COVRA?
P-33	25	1000	-
Cr-51	28	100	ja
Re-184	38	1	-
Fe-59	45	1	-
In-114m	50	10	ja
Sr-89	51	1000	ja
Y-91	59	100	ja
I-125	60	100	ja
Sb-124	60	1	-
Sr-85	65	1	ja
Re-183	70	10	ja
Co-58	71	1	ja
Ir-192	74	1	-
Co-56	79	0,1	ja
Zr-88	83	1	ja
Sc-46	84	0,1	-
Rb-83	86	1	ja
S-35	87	100	ja
Y-88	107	0,1	ja
Ta-182	115	0,1	ja
Se-75	120	1	ja
W-181	121	10	-
Lu-177m	161	0,1	ja
Zn-65	244	0,1	ja
Ag-110m	250	0,1	ja
Co-57	271	1	ja
Ge-68	288	10	ja
Mn-54	313	0,1	ja
Ru-106	368	0,1	-
Cs-134	753	0,1	ja
Na-22	950	0,1	ja
Fe-55	986	1000	ja
Tl-204	1380	1	ja
Co-60	1925	0,1	ja
Eu-154	3214	0,1	ja
H-3	4511	100	ja
Eu-152	4869	0,1	ja
Ac-227	7953	0,01	ja
Sr-90	1,1·10 ⁴	1	ja
Cs-137	1,1·10 ⁴	0,1	ja

Nuclide	Halveringstijd (dagen)	Vrijgavewaarde (kBq/kg)	Afgevoerd naar COVRA?
Eu-150	$1,2 \cdot 10^4$	0,1	ja
Ti-44	$1,7 \cdot 10^4$	0,1	ja
Am-241	$1,6 \cdot 10^5$	0,1	ja
Ho-166m	$4,4 \cdot 10^5$	0,1	ja
Ra-226	$5,8 \cdot 10^5$	0,1	ja
C-14	$2,1 \cdot 10^6$	1	ja
Th-229	$2,7 \cdot 10^6$	0,1	ja
U-233	$5,8 \cdot 10^7$	1	ja
Tc-99	$7,8 \cdot 10^7$	1	ja
Kr-81	$8,4 \cdot 10^7$	Niet beschikbaar	-
Np-237	$7,8 \cdot 10^8$	1	ja
I-129	$5,7 \cdot 10^9$	0,01	ja
U-235	$2,6 \cdot 10^{11}$	1	ja
U-238	$1,6 \cdot 10^{12}$	1	ja
Th-232	$5,1 \cdot 10^{12}$	0,1	ja

B Bijlage: Model stralingsrisico's

De stralingsrisico's van een verlengde termijn voor vervalopslag zijn besproken in hoofdstuk 4.2. Het gebruikte model wordt hier verder toegelicht.

Het ziekenhuis rapporteert bij binnenkomst van afval de activiteit van ieder radionuclide i , en sommeert dit over een jaar tot een activiteitstoename ΔA_i (in Bq/jaar). We definiëren een gemiddeld productietempo \dot{P}_i (in Bq) als de fictieve toename van activiteit van radionuclide i , waarbij we geen rekening houden met tussentijds verval. Het gemiddelde productietempo van een radionuclide i hangt af van de vervalconstante λ_i (in jaar⁻¹) en de activiteitstoename:

$$\dot{P}_i = \frac{\Delta A_i}{\lambda_i}$$

De toename in activiteit per tijdseenheid is afhankelijk van het productietempo en het radioactief verval en wordt beschreven door de volgende differentiaalvergelijking:

$$\frac{dA_i}{dt} = \lambda_i \dot{P}_i - \lambda_i A_i$$

Het oplossen van de differentiaalvergelijking, wanneer er op $t = 0$ geen afval aanwezig is, geeft een uitdrukking voor de activiteit als functie van de opslagtijd t :

$$A_i(t) = \dot{P}_i (1 - e^{-\lambda_i t})$$

Bij het afleiden van deze uitdrukking hebben we aangenomen dat het productietempo constant is. Indien afval slechts binnenkomt aan het begin of aan het eind van de opslagtermijn, geeft de uitdrukking een over- of onderschatting van de daadwerkelijke activiteit. Ziekenhuizen gebruiken echter het hele jaar door radionucliden voor therapie en diagnostiek. Met uitzondering van enkele bijzondere gevallen (weinig gebruikte therapieën, incidenten die leiden tot veel afval in één keer) zal het gemiddelde productietempo de werkelijkheid goed beschrijven.

Met de activiteit $A_i(t)$ kan een persoonsdosisequivalenttempo $\dot{H}_{p,i}(10, t)$ van de afvalkelder berekend worden, dat afhankelijk is van opslagtijd t . Daarvoor nemen we de activiteit van alle radionucliden samen als puntbron (inclusief de activiteiten van onzuiverheden en dochternucliden). Voor de bronconstante worden de waarden voor $h_{p,i}(10)$ "shielded" uit [49] gebruikt. De bijdrage van direct ioniserende straling is hier niet in meegenomen: wij nemen aan dat deze deeltjes niet door het verpakkingsmateriaal komen. Verder worden voor alle berekeningen de transmissie van fotonen T en afstand r als constant genomen. Deze factoren zijn afhankelijk van de geometrie en de inrichting van de bergplaats, die sterk kan variëren van ziekenhuis tot ziekenhuis. Om tot een algemeen model te komen worden $T = 1$ en $r = 1$ meter gebruikt in de berekening. Voor dit onderzoek is het van

belang om de toename in dosistempo bij verlenging van de opslagtermijn te berekenen, en niet het dosistempo zelf. De gebruikte benaderingen (puntbron, geen afscherming, één afstand) zijn daarom acceptabel.

Het dosistempo op ieder tijdstip t wordt berekend volgens

$$\dot{H}_p(10, t) = \sum_i \frac{h_{p,i}(10)A_i(t)}{r^2}$$

Vuistregel voor opslagtermijn en halveringstijd

Voor veel radionucliden ontstaat al snel een evenwicht tussen productie en verval. De maximale activiteit, $A_{max,i} = \dot{P}_i$, wordt bereikt wanneer $e^{-\lambda_i t} = 0$. Dit is het geval wanneer de opslagtermijn t lang is ten opzichte van de halveringstijd ($T_{1/2,i} = \ln 2 / \lambda_i$).

Voor de vuistregel wordt de opslagtermijn genomen waarbij de activiteit 95% van de maximale activiteit is, dat wil zeggen $e^{-\lambda_i t} = 0,05$. Hieruit volgt $T_{1/2,i} \approx t/4$.

Activiteit van onzuiverheden

Enkele veel gebruikte radionucliden bevatten onzuiverheden. Deze zullen ook bijdragen aan het dosistempo in de afvalkelder. De activiteitstoename van de onzuiverheid is gegeven door $\Delta A_{onzuiverheid} = \varphi \Delta A_{hoofduclide}$ waarbij φ de fractie van de onzuiverheid is (gegeven in Tabel 4). Voor de berekeningen gaan wij uit van een constante fractie. In werkelijkheid is enige variatie mogelijk, afhankelijk van het productieproces van het hoofduclide [50] en het zuiveringsproces [51].

Tabel 4: Fracties van onzuiverheden in veel gebruikte radionucliden.

Radionuclide	Onzuiverheid	Fractie φ onzuiverheid	Referentie
Sm-153	Eu-152	$1,04 \cdot 10^{-5}$	[52]
	Eu-154	$3,1 \cdot 10^{-5}$	[53]
Lu-177	Lu-177m	$2,4 \cdot 10^{-4}$	[26]
Ra-223	Ac-227	$6 \cdot 10^{-6}$	[51]
Th-227	Ac-227	(gerekend met de fractie Ac-227 in Ra-223)	

Activiteit van dochternucliden

Een aantal radionucliden vervalft niet direct naar een stabiel atoom. Om het totale dosistempo te berekenen moet daarom ook rekening worden gehouden met de activiteit van de dochternucliden. In de eenvoudigste situatie vervalft de moeder via een radioactieve dochter in twee stappen naar een stabiel atoom (zie Tabel 5). De activiteit van de dochter is dan (onder de aanname dat haar beginactiviteit 0 is):

$$A_D(t) = y \dot{P}_M \left(1 - \frac{\lambda_D}{\lambda_D - \lambda_M} e^{-\lambda_M t} + \frac{\lambda_M}{\lambda_D - \lambda_M} e^{-\lambda_D t} \right)$$

met y de *branching ratio*, \dot{P}_M het productietempo van de moeder, en λ_M en λ_D de vervalconstanten van respectievelijk de moeder en dochter.

Tabel 5: Radionucliden die in twee stappen vervallen naar een stabiel atoom.

Moeder	Dochter
Ge-68	Ga-68
Sr-90	Y-90
Zr-88	Y-88
Tc-95m	Tc-95
Tc-99m	Tc-99
I-123	Te-123
Lu-177m	Lu-177
Re-183	W-183

Voor radionucliden met lange vervalreeksen bestaat geen eenvoudige analytische uitdrukking voor de activiteit. De activiteit van de dochters wordt daarom voor een periode van 10 jaar gemodelleerd met Nucleonica [54], waarbij is aangenomen dat de beginactiviteit $A_D = 0$ Bq is. De dochternucliden worden ingedeeld in één van de onderstaande categorieën:

1. Na 10 jaar is de activiteit van de beschouwde dochter minder dan 1% van de activiteit van de moeder.
2. Na 10 jaar is de activiteit van het dochternuclide meer dan 1% van de activiteit van de moeder

Dochters in categorie 1 zijn niet meegenomen in de berekeningen ($A_D = 0$ Bq). Om de berekeningen eenvoudig te houden, wordt voor dochters in categorie 2 aangenomen dat het evenwicht zich al aan het begin van de opslagperiode heeft ingesteld zodat op ieder tijdstip geldt $A_D = A_M$ (in veel gevallen stelt het evenwicht zich al na enkele maanden in). Indien het evenwicht zich nog niet heeft ingesteld bij binnenkomst in de afvalkelder wordt de activiteit van de dochter in dit geval overschat. Omdat het kleine hoeveelheden betreft, zal deze overschatting een beperkte invloed hebben op het totale dosistempo. Een overzicht van de radionucliden met vervalreeksen is gegeven in Tabel 6.

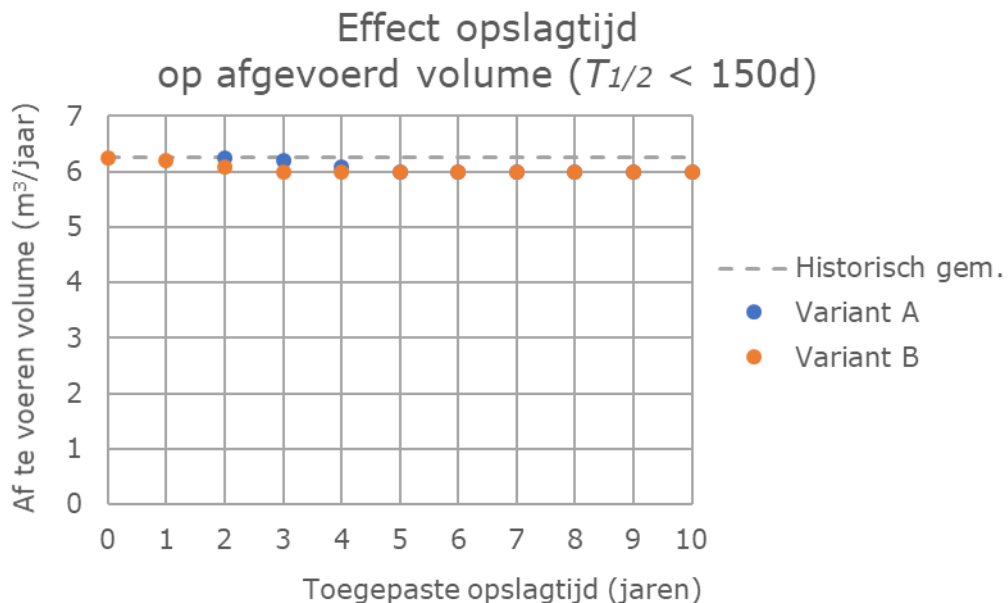
Tabel 6: Radionucliden met vervalreeksen. In de berekeningen is aangenomen dat dochters in de tweede kolom in evenwicht zijn met de moeder (eerste kolom). Dochters in de derde kolom worden buiten beschouwing gelaten.

Moeder	Dochters, $A_D = A_M$	Dochters, $A_D = 0$
Eu-152		Gd-152, Sm-148, Nd-144
Ac-227	Th-227, Ra-223, Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207, Fr-223	Po-211
Ra-223	Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207	Po-211
Ra-226	Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, Po-210	Tl-210, At-218
Th-227	Ra-223, Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207	Po-211
Th-229	Ra-225, Ac-225, Fr-221, At-217, Bi-213, Po-213, Pb-209, Tl-209	Bi-209, Rn-217, Ra-221
Th-232	Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Po-212, Tl-208	
U-233		Th-229, Ra-225, Ac-225, Fr-221, At-217, Bi-213, Po-213, Pb-209, Bi-209, Tl-209, Rn-217, Ra-221
U-235	Th-231	Pa-231, Ac-227, Th-227, Ra-223, Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207, Po-211, Fr-223
U-238	Th-234, Pa-234m	U-234, Th-230, Ra-226, Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, Po-210, Tl-210, At-218, Pa-234
Np-237	Pa-233	U-233, Th-229, Ra-225, Ac-225, Fr-221, At-217, Bi-213, Po-213, Pb-209, Bi-209, Tl-209, Rn-217, Ra-221

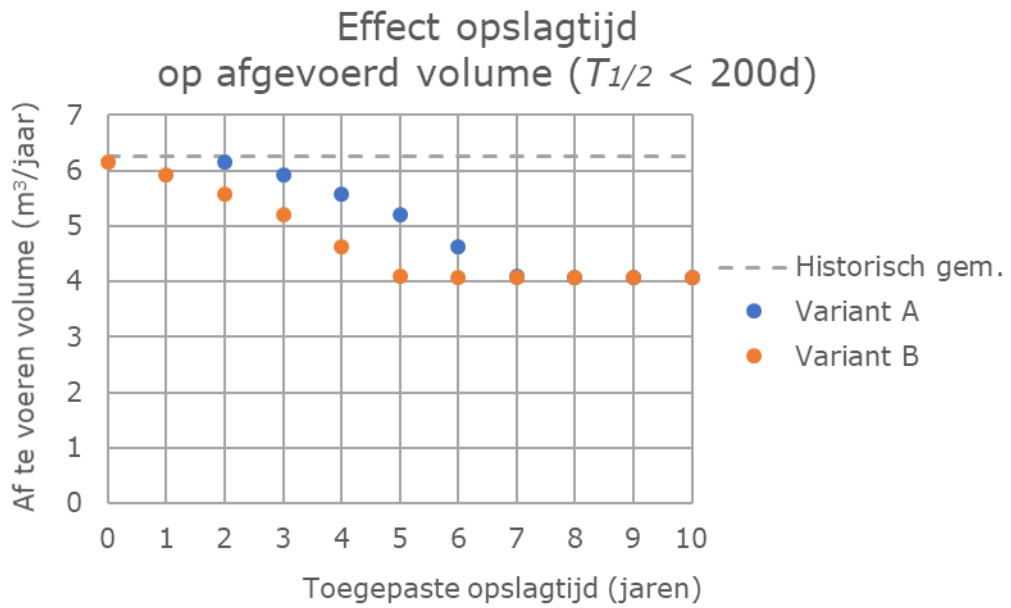
C Bijlage: Gevolg verruimen eisen aan vervalopslag op af te voeren volumes

In Hoofdstuk 4.1.1 is de methode beschreven waarmee het gevolg is bepaald van het verlengen van de opslagtermijn en het verruimen van de eis de maximum halveringstijd op de af te voeren volumes radioactief afval.

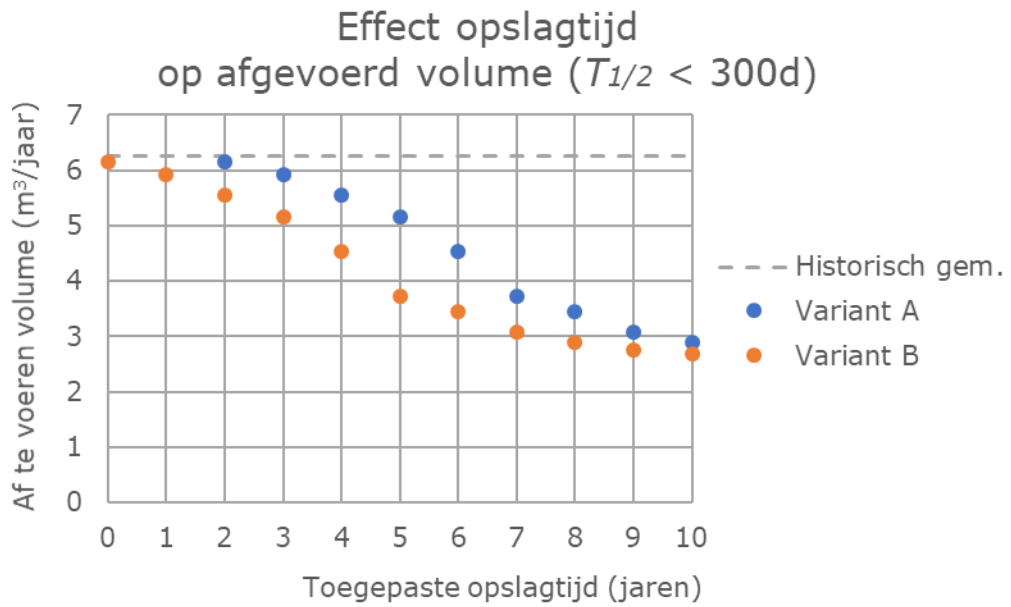
Figuren 7-11 zijn aanvullingen op de resultaten uit Hoofdstuk 4.1.2. Zij geven het minimaal te verwachten effect van een verlengde opslagtermijn op de hoeveelheid af te voeren radioactief afval. Variant A neemt aan dat het afval pas na 2 jaar vervalopslag naar COVRA werd afgevoerd. Variant B neemt aan dat het afval dat de afgelopen jaren daadwerkelijk naar de COVRA is afgevoerd, steeds direct na productie werd afgevoerd. Twee jaar extra verval zou er in deze variant toe geleid hebben dat een deel van het afval niet als radioactief afval afgevoerd had hoeven worden. Bij het verlengen van de opslagtijd is aangenomen dat alleen vaten met radionucliden met halveringstijden kleiner dan een bepaald aantal dagen (150, 200, 300, 400 of 500) in aanmerking kwamen voor vervalopslag.



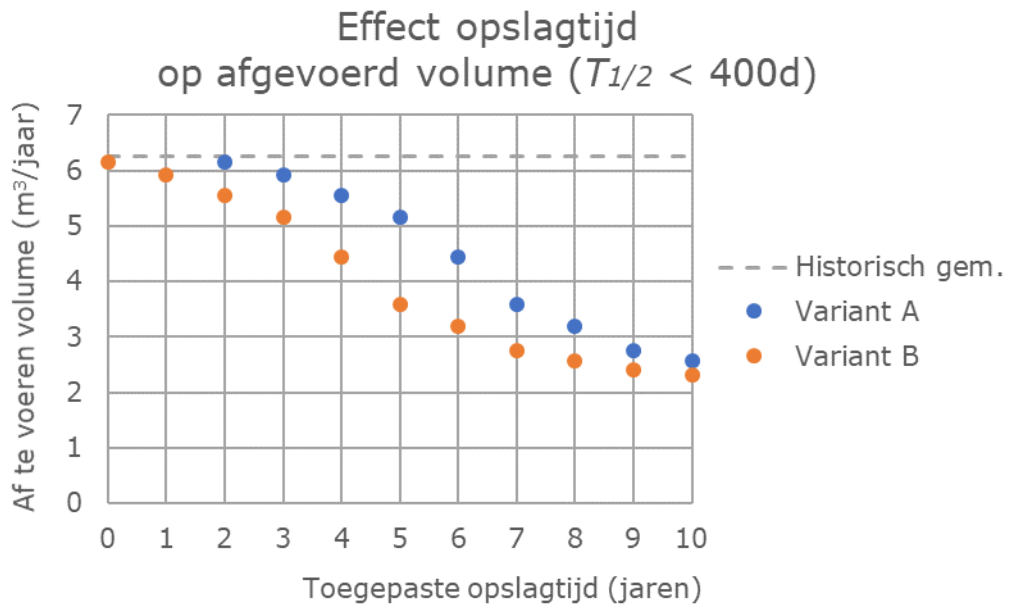
Figuur 7: zie bovenstaande beschrijving voor de toelichting op deze figuur.



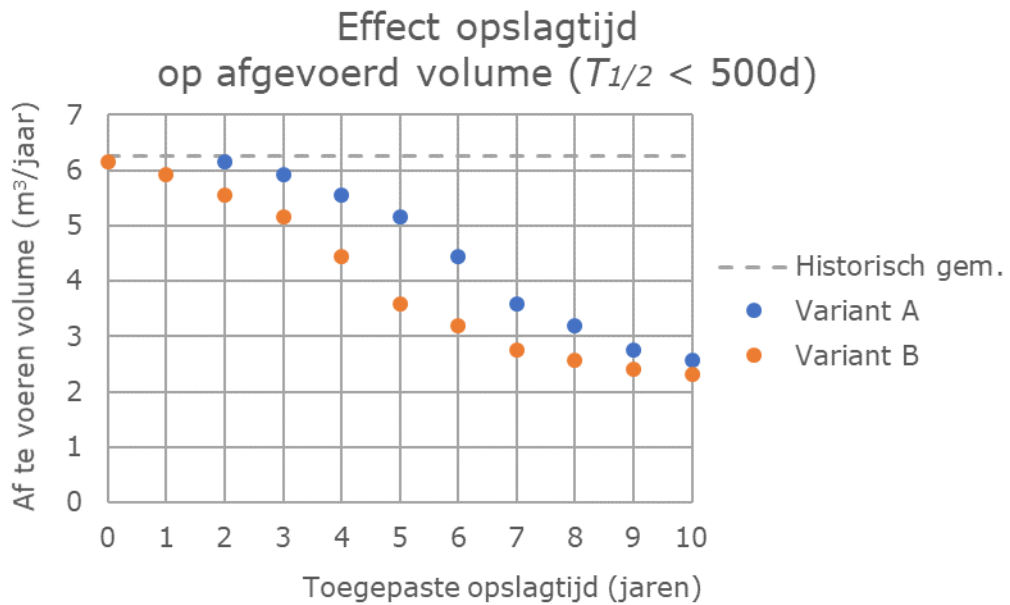
Figuur 8: zie bovenstaande beschrijving voor de toelichting op deze figuur.



Figuur 9: zie bovenstaande beschrijving voor de toelichting op deze figuur.



Figuur 10: zie bovenstaande beschrijving voor de toelichting op deze figuur.



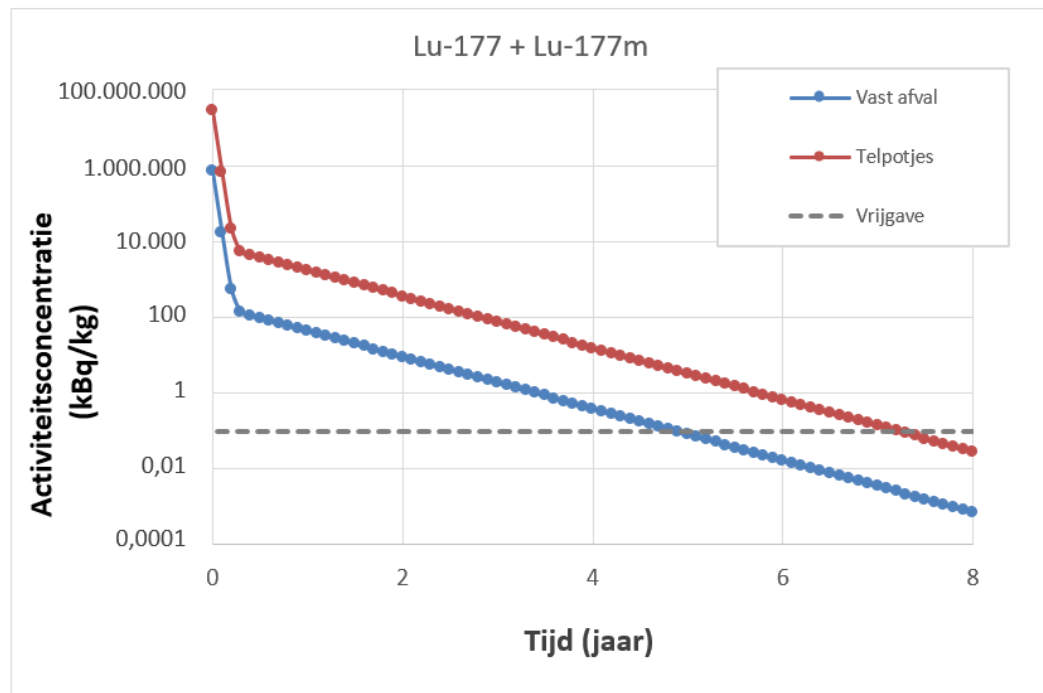
Figuur 11: zie bovenstaande beschrijving voor de toelichting op deze figuur.

D Bijlage: Verval van lutetium-177 in een typisch afvalvat

Alle gegevens voor de berekeningen in dit hoofdstuk zijn aangeleverd door de stralingsbeschermingsdeskundige van een specialistisch ziekenhuis [26]. Het meest voorkomende type afval is vast afval (9 van de 10 vaten). Daarnaast produceert het ziekenhuis ook telpotjesafval (1 van de 10 vaten), wat een hogere activiteit heeft. De typische activiteit voor ieder type vat, en het gewicht van de vaten, is bepaald door het ziekenhuis.

Het lutetium-177 ($T_{1/2} = 6,71$ d) dat gebruikt wordt bevat een kleine hoeveelheid (0,024%) langlevend lutetium-177m ($T_{1/2} = 160,9$ d). Lutetium-177m vervalst met een *branching ratio* van 0,21 naar lutetium-177, wat vervolgens vervalst naar stabiel hafnium-177. De totale berekende activiteit als functie van tijd is gegeven in Figuur 12. De snelle afname in activiteit in het eerste jaar wordt veroorzaakt door het verval van het oorspronkelijk aanwezige lutetium-177. Daarna is de activiteit de som van de activiteiten van lutetium-177m en de door verval geproduceerde dochter lutetium-177.

Uit Figuur 12 blijkt dat het vaste afval na 5 jaar vervallen is tot de vrijgavewaarde. Het actievare telpotjesafval kan na ongeveer 7 jaar worden vrijgegeven.



Figuur 12: Berekende activiteitsconcentratie (som van lutetium-177 en lutetium-177m) van een vat vast afval en een vat telpotjesafval. De vrijgavewaarde is bepaald door de gewogen som van de vrijgavewaarden van lutetium-177 en lutetium-177m te nemen. Na de eerste periode van snel verval, is de verhouding van lutetium-177:lutetium-177m gelijk aan 0,21:1.

E Literatuur

1. Min IenM. *Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming*. 2018. Geraadpleegd op 19 december 2019 van: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0040179/2018-07-01>.
2. Min IenM, *Het nationale programma voor het beheer van radioactief afval en verbruikte splijtstoffen*. 2016, ANVS.
3. Min VROM, *Radioactief Afval*. 1984.
4. COVRA N.V., *Data ziekenhuisafval*, persoonlijke mededeling aan L.H.A. Boudewijns, M.v.d. Linden, en D. Siegersma. 1 april 2020
5. Min EZ. *Kernenergiewet*. 2018. Geraadpleegd op 7 februari 2020 van: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0002402/2018-10-16>.
6. Min IenW. *Regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming*. 2019. Geraadpleegd op 7 februari 2020 van: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0040509/2019-02-15>.
7. ANVS. *ANVS-verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming*. 2020. Geraadpleegd op 21 februari 2020 van: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0040581/2020-01-01#Hoofdstuk3>.
8. Min IenM. *Nota van toelichting Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming, algemeen deel*. 2017. Geraadpleegd op 20 december 2019 van: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/besluiten/2017/03/21/bijlage-2-nota-van-toelichting-besluit-basisveiligheidsnormen-stralingsbescherming>.
9. Min SZW. *Besluit van 16 juli 2001, houdende vaststelling van het Besluit stralingsbescherming*. 2001. Geraadpleegd op 20 december 2019 van: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0012702/2017-08-01>
10. Min EZ. *Complexvergunning Stichting VU-VUmc (2014/0850-08)*. 2014. Geraadpleegd op 13 februari 2020 van: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2014/11/20140850-08.pdf>.
11. ANVS. *Vergunning Kernenergiewet Erasmus Medisch Centrum (2016/0791-14)*. 2017. Geraadpleegd op 13 februari 2020 van: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2017/01/20160791-14.pdf>.
12. ANVS. *Vergunning Kernenergiewet Stichting het Nederlands Kanker Instituut - Antoni van Leeuwenhoek Ziekenhuis (2016/0360-13)*. 2016. Geraadpleegd op 13 februari 2020 van: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2016/07/20160360-13.pdf>.
13. ANVS. *Vergunning Kernenergiewet Stichting Tergooi (2017/0759-10)*. 2017. Geraadpleegd op 13 februari 2020 van: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2017/11/20170759-10.pdf>.
14. Min EZ. *2013/0859-04 (Mallinckrodt Medical B.V.)*. 2013. Geraadpleegd op 19 februari 2020 van: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2014/06/20130859-04.pdf>.
15. IAEA, *Classification of Radioactive Waste*. 2009: Wenen.
16. IAEA, *Management of discharge of low level liquid radioactive waste generated in medical, educational, research and industrial facilities*. 2013: Wenen.
17. IAEA, *Management of small quantities of radioactive waste*. 1998: Wenen.

18. IAEA, *Management of radioactive waste from the use of radionuclides in medicine*. 2000: Wenen.
19. IAEA, *Predisposal Management of Radioactive Waste from the Use of Radioactive Material in Medicine, Industry, Agriculture, Research and Education*. 2019: Wenen.
20. Werkbezoek (algemeen ziekenhuis), 2020.
21. Academisch ziekenhuis 6, *Stralingshygiënisch jaarverslag over 2018*.
22. Academisch ziekenhuis 4, *Stralingshygiënisch jaarverslag over 2018*. 2018.
23. Academisch ziekenhuis 2, *Stralingshygiënisch jaarverslag over 2018*. 2019.
24. Min IenW, *Landelijk Afvalbeheerplan 3: Sectorplan 19 Afval van gezondheidszorg bij mens of dier*. 2019.
25. Werkbezoek (academisch ziekenhuis), 2020.
26. Werkbezoek (specialistisch ziekenhuis), 2020.
27. Academisch ziekenhuis 1, *Stralingshygiënisch jaarverslag over 2018*. 2019.
28. Academisch ziekenhuis 8, *Stralingshygiënisch jaarverslag over 2018*.
29. Academisch ziekenhuis 5, *Stralingshygiënisch jaarverslag over 2018*.
30. COVRA, *Onderzoek naar vervalopslag ziekenhuizen*, persoonlijke mededeling aan D. Siegersma, L.H.A. Boudewijns, en M.v.d. Linden. 1 april 2020
31. Vianen, S.W., *Inventarisatie naar de consequenties van veranderende wetgeving op het gebied van vrijgave van kunstmatige radionucliden*. 2017, NVS.
32. Boudewijns, L.H.A. en I.R. de Waard, *Recente ontwikkelingen in medische stralingstoepassingen, update ioniserende straling 2018/2019 (RIVM Rapport 2019-0129)*. 2019, RIVM.
33. J. Gay, et al. *A sensitive analytical method for the determination of the long-lived impurity ²²⁷Ac in production batches of Xofigo® has been developed in order to allow for unconditional release of clinical waste after decay-in-storage in EANM*. 2019. Barcelona.
34. Goethals, P.E. en R. Zimmermann, *Nuclear Medicine, Report & Directory (Part 1: marketed radiopharmaceuticals)*. MEDraysintell, 2019. **Edition 2019**.
35. Min. Infrastructuur en Milieu. *Uitvoeringsregeling stralingsbescherming*. 2017. Geraadpleegd op 2 juni 2020 van: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0034213/2017-08-01>.
36. Vianen, B., *Ontmantelings- en cyclotronafval*, persoonlijke mededeling aan D. Siegersma. 25 mei 2020
37. COVRA. *Tarieven Ophaaldienst*. 2020. Geraadpleegd op 25 mei 2020 van: <https://www.covra.nl/app/uploads/2020/01/Tarieven-Ophaaldienst-2020.pdf>.
38. ANVS. *Standaardwaarden en standaardrelaties*. 2018. Geraadpleegd op 10 april 2020 van: <https://www.autoriteitnvs.nl/onderwerpen/straling/documenten/publicatie/2018/02/14/standaardwaarden-en--relaties>.
39. IAEA. *Live Chart of Nuclides*. Geraadpleegd op 25 mei 2020 van: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.
40. COVRA N.V., *Jaarrapport 2019*. 2019.

41. *Medische Stralingstoepassingen (2017)*. Geraadpleegd op 30 april 2020 van: <https://www.rivm.nl/medische-stralingstoepassingen>.
42. Academisch ziekenhuis 2, *Stralingshygiënisch jaarverslag over 2014*. 2015.
43. Academisch ziekenhuis 2, *Stralingshygiënisch jaarverslag over 2016*. 2017.
44. Academisch ziekenhuis 3, *Stralingshygiënisch jaarverslag over 2018*. 2019.
45. Academisch ziekenhuis 3, *Stralingshygiënisch jaarverslag over 2017*. 2018.
46. Academisch ziekenhuis 7, *Stralingshygiënisch jaarverslag over 2018*.
47. ANVS, *Eisen voor een radionucliden-laboratorium: Bijlage radionucliden-laboratorium*. 2018.
48. COVRA, *Interview*, persoonlijke mededeling aan M. van der Linden en L. Boudewijns. 24 februari
49. Otto, T., *Personal dose-equivalent conversion coefficients for 1252 radionuclides*. Radiation Protection Dosimetry, 2014. **168**(1): p. 1-10.
50. Dash, A., M.R.A. Pillai, en F.F. Knapp, Jr., *Production of (177)Lu for Targeted Radionuclide Therapy: Available Options*. Nuclear medicine and molecular imaging, 2015. **49**(2): p. 85-107.
51. Henriksen, G., et al., *²²³Ra for endoradiotherapeutic applications prepared from an immobilized ²²⁷Ac/²²⁷Th source*. Radiochimica Acta, 2001. **89**(10): p. 661.
52. Loebe, T., B. Hettwig, en H.W. Fischer, *Detection of long-lived europium-152 in samarium-153-lexidronam*. Applied Radiation and Isotopes, 2014. **94**: p. 40-43.
53. Moro, L.F., D.; Frigerio, F.; Shamhan, G.; Angelovski, G., *Europium-154 contamination levels in Samarium-153-EDTMP for radionuclide therapy*. Journal of Physics: Conference Series, 2006. **41**: p. 063.
54. Nucleonica GmbH., *Nucleonica Nuclear Science Portal (www.nucleonica.com)*, version 3.0.65. 2017, Nucleonica GmbH: Karlsruhe, Germany.

RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag