



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

Onzekerheden bij **metingen** van radioactiviteit in vaten met specifiek ziekenhuisafval

Onzekerheden bij metingen van radioactiviteit in vaten met specifiek ziekenhuisafval

RIVM-rapport 2023-0403

Colofon

© RIVM 2024

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.

Het RIVM hecht veel waarde aan toegankelijkheid van zijn producten. Op dit moment is het echter nog niet mogelijk om dit document volledig toegankelijk aan te bieden. Als een onderdeel niet toegankelijk is, wordt dit vermeld. Zie ook www.rivm.nl/toegankelijkheid.

DOI 10.21945/RIVM-2023-0403

K.H. Cats (auteur), RIVM

Contact:

K.H. Cats

Centrum Veiligheid

korneel.cats@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) in het kader van radioactief afval en ontmanteling.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Onzekerheden bij metingen van radioactiviteit in vaten met specifiek ziekenhuisafval

In veel ziekenhuizen ontstaat afval dat gevaarlijke stoffen bevat; dat heet Specifiek Ziekenhuis Afval, SZA. Voorbeelden zijn spuiten of urine van mensen die een chemokuur krijgen. Dit afval mag niet op de normale manier worden afgevoerd om verbrand te worden. De verwerker van medisch afval Zavin moet dit apart verwerken. Zavin accepteert geen vaten die radioactief besmet zijn. Grote ziekenhuizen en Zavin controleren daarom of een vat met SZA radioactiviteit bevat.

Ondanks deze controles komt er heel soms een vat met te veel radioactief materiaal bij Zavin terecht. Wanneer Zavin dat ontdekt, wordt het RIVM gevraagd te bepalen hoeveel radioactiviteit er in het afvalvat zit, maar daar bestond geen algemeen geaccepteerde methode voor. Het RIVM heeft deze nu ontwikkeld, in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS).

Met de methode kunnen dit soort vaten worden gemeten zonder het vat te openen. Dat is belangrijk, omdat mensen niet aan gevaarlijk biologisch materiaal uit het afval mogen worden blootgesteld. Een belangrijk onderdeel van de methode is dat het vat tijdens de meting moet worden gedraaid. Ook moet het vat op ongeveer 1 meter afstand van de meetapparatuur staan. In dat geval is de foutmarge van de meting klein genoeg. Als het nodig is, kan het vat ook dichterbij de detector worden geplaatst, bijvoorbeeld als er maar weinig radioactiviteit in het afvalvat zit. Dan wordt de onzekerheid wel wat groter.

Het RIVM heeft de beschreven methode getest door een bron met een bekende activiteit in een afvalvat te plaatsen. Als het vat niet gedraaid wordt, wordt de activiteit niet correct bepaald. Pas bij het draaien van het vat vinden we de correcte activiteit terug. Dit geeft aan dat de methode goed werkt en geschikt is.

Kernwoorden: SZA, ziekenhuisafval, radioactief afval, in-situ gammaspectrometrie

Synopsis

Uncertainty factors with regard to measuring radioactivity inside barrels containing specific hospital waste

Many hospitals generate waste that contains hazardous substances. This is known as specific hospital waste, or SHW. Examples of SHW are syringes or the urine of people who receive chemotherapy. This type of waste may not be disposed of in the conventional way, through incineration. Zavin, the medical waste processor, must follow a separate procedure for this. Zavin does not accept barrels that are radioactive. That is why large hospitals and Zavin both check for radioactivity in barrels containing SHW.

In spite of these checks, barrels containing too much radioactive material end up with Zavin on exceptionally rare occasions. When Zavin intercepts such a barrel, it asks RIVM to determine how radioactive the barrel's contents are. Previously, there was no generally accepted process for this. On the instruction of the Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection (*Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming*, ANVS), RIVM has now developed such a process.

This makes it possible to measure radioactivity inside these barrels without the need to open them up. The reason why this matters is that people must not be exposed to hazardous biological material in SHW. An essential step in the process involves turning the barrel while the measurement is being taken. At the same time, the barrel must remain around 1 metre away from the measuring equipment. This is to ensure a sufficiently minor margin of error. When necessary, the barrel may be moved closer to the sensor, for example if the radioactivity level of the barrel's contents is low. This does, however, increase the level of uncertainty somewhat.

RIVM tested the process described above by placing a source with a known radioactivity level inside a barrel. When the barrel was not turned, the detector did not return the correct radioactivity level. The correct radioactivity level could only be measured by turning the barrel. This is proof that the process works as desired and is suitable.

Keywords: SHW, hospital waste, radioactive waste, in situ gamma spectrometry

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

Kwaliteitssysteem — 11

1 Inleiding — 13

2 Uitvoering — 15

- 2.1 Simulaties — 15
- 2.1.1 Homogeen besmet afvalvat — 17
- 2.1.2 Puntbron in het vat — 17
- 2.2 Metingen — 19

3 Resultaten en discussie — 21

- 3.1 Simulaties — 21
- 3.1.1 Homogeen besmet afvalva — 21
- 3.1.2 Puntbron in het vat — 26
- 3.1.3 Vat dichterbij de detector — 30
- 3.2 Metingen — 32

4 Conclusies — 35

5 Referenties — 37

Bijlage I beschrijving van de methode — 39

Samenvatting

In veel ziekenhuizen ontstaat biologisch afval dat radioactief besmet is. Incidenteel wordt een vat met radioactiviteit afgevoerd naar de speciale afvalverbrandingsinstallatie voor specifiek ziekenhuisafval (ZAVIN). Voor strafrechtelijk onderzoek is het dan van belang om de activiteitsconcentratie van radionucliden in het vat te bepalen. Momenteel is er geen algemeen geaccepteerde methode om deze bepaling te doen.

Het RIVM heeft onderzoek gedaan naar een methode om vaten met (mogelijk) radioactief ziekenhuisafval te meten, zonder het vat te openen. Bij deze methode worden in-situ-gammaspectrometriemetingen gedaan aan het vat, op verschillende afstanden vanaf de detector. In dit onderzoek is vooral gekeken naar de onzekerheid van de telefficiëntie tijdens de meting, omdat die meestal bepalend is voor de uiteindelijke onzekerheid in het resultaat. Meestal zijn de telfout en eventuele experimentele onzekerheden kleiner dan de onzekerheid van de telefficiëntie.

Er is in dit onderzoek gekeken naar twee scenario's. In het eerste scenario is de inhoud van het vat homogeen besmet. Dan is vooral de diepte van het vat en de afstand tussen het vat en de detector van invloed op de onzekerheid. De invloed van deze parameters op zich is echter vrij klein (minder dan 4% bij een lage gamma-energie van 100 keV, gekozen als representatieve gamma-energie). Daarom heeft de gecombineerde onzekerheid van alle parameters samen een verwaarloosbaar effect op de totale onzekerheid.

In het tweede scenario is in het vat een hotspot aanwezig. Dan heeft de locatie van de hotspot in het vat een grote invloed op de onzekerheid. Een willekeurig geplaatste hotspot in het vat zorgt voor een onzekerheid van ongeveer 35% bij 100 keV in de telefficiëntie, op een afstand van 1 m tussen het vat en de detector. Deze onzekerheid kan verlaagd worden tot ongeveer 4% door het vat te draaien tijdens de meting, op een afstand van 1 m. Bij een afstand van 50 cm tot de detector is de geometrische onzekerheid ongeveer 10%. Bij een afstand van 10 cm tot de detector wordt de geometrische onzekerheid groter (ongeveer 35% bij 100 keV).

De methode is gecontroleerd door een vat met afval met daarin een gecertificeerde Eu-152 bron op een afstand van 1 m tot de detector te meten aan de 4 afzonderlijke zijanten. Hierbij werd de gevonden activiteit onder- dan wel overschat. Als het vat werd gedraaid tijdens de meting, werd wel de gecertificeerde activiteit teruggevonden, binnen de onzekerheid van het broncertificaat.

Kwaliteitssysteem

Het Centrum Veiligheid van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM/VLH) is voor een aantal verrichtingen geaccrediteerd door de RvA volgens NEN-EN-ISO-17025 (registratienummer L153). Deze verrichtingen hebben betrekking op metingen die worden uitgevoerd in het kader van het toezicht op nucleaire installaties (ANVS), het Nationaal Meetnet Radioactiviteit en milieu-monitoring ter uitvoering van het EURATOM Verdrag.

De metingen en analyses zoals beschreven in dit rapport wijken af van deze standaard verrichtingen en vallen daarom niet onder deze accreditatie. Waar mogelijk is echter in overeenstemming met de standaardprocedures ter kwaliteitsborging gewerkt, in het bijzonder ten aanzien van validatie van de kwantitatieve aspecten.

1 Inleiding

In veel ziekenhuizen wordt met radioactieve stoffen gewerkt. Daarbij ontstaat onder andere biologisch afval dat radioactief besmet is. De meeste nucliden die in ziekenhuizen worden gebruikt, hebben een korte halveringstijd. Daarom wordt het afval met biologische en radiologische risico's meestal opgeslagen bij de ziekenhuizen tot de radioactiviteit vervallen is. Daarna wordt het afval afgevoerd naar een speciale afvalverbrandingsinstallatie voor specifiek ziekenhuisafval. Op dit moment bestaat hiervoor in Nederland maar één installatie: ZAVIN in Dordrecht. In de acceptatiecriteria van ZAVIN staat: "De vracht wordt ook op radioactiviteit gemeten. Het niveau van eventuele straling moet beneden de norm voor radioactief afval liggen. Het afval mag niet als radioactief onder de kernenergiewet vallen." [ZAVIN]

Incidenteel ontvangt ZAVIN een vat met dusdanig veel radioactiviteit dat het niet aan de acceptatiecriteria voldoet. Daarom voert ZAVIN sinds een aantal jaren radioactiviteitsmetingen uit aan het aangevoerde afval. Bij overschrijding van een vooraf afgesproken grenswaarde wordt de inspectie van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) ingeschakeld om de wettelijke status van het afval vast te stellen. De inspectie van de ANVS geeft meestal het RIVM de opdracht om de aanwezige radionucliden te identificeren en de activiteitsconcentratie te bepalen, zonder het vat te openen. Dit is nodig om deze te vergelijken met de grenswaarde voor vrijgave.

De resultaten moeten gebruikt kunnen worden in een strafrechtelijk onderzoek. Daarom is er behoefte aan een methode om de activiteitsconcentratie te bepalen met een goed gedefinieerde onzekerheid die zo laag mogelijk is, zonder het vat te openen (vanwege de hierboven genoemde biologische risico's). In de meeste gevallen van de afgelopen jaren lag de activiteitsconcentratie van door RIVM onderzochte vaten ver boven de grenswaarde voor vrijgave. Er zou echter discussie kunnen ontstaan over de resultaten in die gevallen waar de activiteitsconcentratie rond de grenswaarde ligt. Metingen aan een gesloten vat zijn namelijk onderhevig aan grotere onzekerheden dan reguliere laboratoriumbepalingen.

In 2017 is een ISO-norm gepubliceerd over gammaspectrometrische metingen aan radioactief afval [ISO19017]. Deze norm is echter niet specifiek voor ziekenhuisafval en bovendien niet rechtstreeks toepasbaar op de Nederlandse situatie. Daarom heeft het RIVM een methode opgesteld en de onzekerheden van deze methode in kaart gebracht. De resultaten van het onderzoek staan in dit rapport.

2 Uitvoering

De methode om de activiteitsconcentratie van radionucliden in een gesloten vat met ziekenhuisafval te bepalen, is gebaseerd op *in situ*-metingen aan het gesloten vat met een mobiele HPGe-gammadetector. Essentieel hierbij is het berekenen van de telefficiëntie van de detector door het modelleren van het vat in ISOCS (In Situ Object Counting System, een softwarepakket van Mirion) [ISOCS].

Bij het modelleren moeten parameters worden opgegeven als de afmetingen van het vat en de samenstelling, dichtheid en verdeling van de inhoud, inclusief die van de daadwerkelijke radioactieve bron. Met een gevoeligheidsanalyse in ISOCS wordt bepaald welke parameters een grote invloed hebben op de uitkomst van de metingen. Op basis hiervan wordt vervolgens een inschatting van de onzekerheden gedaan met de *Uncertainty Estimator*-functie van ISOCS [Mirion12a].

De methode wordt gecontroleerd door een gangbaar specifiek ziekenhuisafvalvat met een inhoud van 50 liter te vullen met niet-radioactief afval en een puntbron met bekende activiteit op een willekeurige, onbekende locatie. Dit creëert een inhomogene verdeling ('hotspot') van de radioactiviteit binnen het vat. Vervolgens wordt de gammastraling gemeten en de activiteit van de bron bepaald. Dit zou overeen moeten komen met de bekende activiteit van de bron, binnen de onzekerheid van het broncertificaat.

2.1 Simulaties

De telefficiëntie voor een meting kan berekend worden met ISOCS. Hiervoor moet een model worden gemaakt van de geometrie van de meting. De software berekent vervolgens wat de kans is dat gamma's uit het radioactieve monster gedetecteerd worden, rekening houdend met zelfabsorptie door het monster, absorptie door niet-radioactieve vulling van het vat en de wand van het vat, de ruimtehoek en de intrinsieke efficiëntie van de detector.

Zelfabsorptie en de intrinsieke efficiëntie zijn sterk energieafhankelijk, vooral bij lage gamma-energieën. Daarom wordt bovenstaande berekening uitgevoerd voor verschillende, door de gebruiker te kiezen energieën. In dit geval zijn 24 energieën gekozen tussen 15 en 2000 keV, omdat de energie van de gammastraling afkomstig van medische isotopen veelal binnen dit bereik ligt. De meeste van de gekozen energieën liggen in het lage energiegebied, omdat daar de energieafhankelijkheid het grootst is. De efficiëntie bij de overige energieën wordt berekend door lineair te interpoleren tussen de 24 berekende energiepunten.

De berekeningen van ISOCS verdisconteren de intrinsieke efficiëntie van de detector. De intrinsieke efficiëntie is gebaseerd op een model van de detector, die wordt gevalideerd door Mirion (de leverancier) tijdens de zogenoemde karakterisatie van de detector. Het model en de validatie zijn zelf ook niet perfect, wat resulteert in een energieafhankelijke

onzekerheid in de intrinsieke efficiëntie van de detector. De door Mirion aangeraden onzekerheden staan in Tabel 1 [Mirion12b]. De totale onzekerheid op één gedetecteerde energielijn kan nooit¹ lager worden dan de intrinsieke onzekerheid.

Tabel 1 Onzekerheid in de intrinsieke efficiëntie van een HPGe-detector, afhankelijk van de energie [Mirion12b]. De onzekerheden zijn 1 standaardonzekerheid.

Energiegebied (keV)	Intrinsieke onzekerheid (%)
15 – 25	20
45	15
60 – 150	10
200 – 300	8
500 – 700	6
1000 – 2000	4

Om de onzekerheid in de telefficiëntie te bepalen door onzekerheid in de individuele parameters in ISOCS zijn alle parameters (zie Tabel 2) gevarieerd met de *Uncertainty Estimator*-functie in ISOCS. Vervolgens is voor elke parameter afzonderlijk de efficiëntie bij de lage en bij de hoge waarde berekend. Deze functie heet 'Sensitivity Analysis' binnen de *Uncertainty Estimator* [Mirion12a].

De onzekerheid door alle parameters samen is bepaald door alle parameters tegelijkertijd stochastisch te variëren tussen de lage en hoge waarden, volgens een uniforme verdeling. Zo wordt een reeks van maximaal 100 ISOCS-modellen opgebouwd. Voor elk model wordt (één voor één) de telefficiëntie berekend. Dit gaat door totdat het gemiddelde van alle berekende efficiënties niet meer verandert (geconvergeerd is tot een vaste waarde, in dit geval 1%). De standaarddeviatie van de telefficiënties van de modellen is de totale toegevoegde onzekerheid door geometrische onzekerheden.

Tabel 2 Gevarieerde parameters

Parameter	Referentiewaarde	Lage waarde	Hoge waarde
Wanddikte vat ^a	0,1 cm	0,05 cm	0,15 cm
Breedte vat ^b	33,25 cm	29 cm	37,5 cm
Hoogte vat ^c	51,7 cm	-	-
Diepte vat ^b	26,7 cm	23 cm	30,4 cm
Dichtheid wand vat ^d	0,946 g/cm ³	0,851 g/cm ³	1,041 g/cm ³
Vulhoogte afval ^d	44,4 cm	39,96 cm	48,84 cm
Gewicht afval ^e	6,38 kg	6,37 kg	6,39 kg
Afstand detector – vat	100 cm	99 cm	101 cm

^a De hoge en lage waarden zijn (gebaseerd op) de nauwkeurigheid van de gebruikte schuifmaat of rolmaat.

^b De lage en hoge waarden zijn de onder- en bovenkant van het (taps toelopende) vat. De referentiewaarde is het gemiddelde van die twee.

^c De hoogte van het vat heeft geen invloed op de telefficiëntie, alleen de vulhoogte van het afval in het vat.

^d De hoge en lage waarden zijn de referentiewaarde plus en min 10%, respectievelijk.

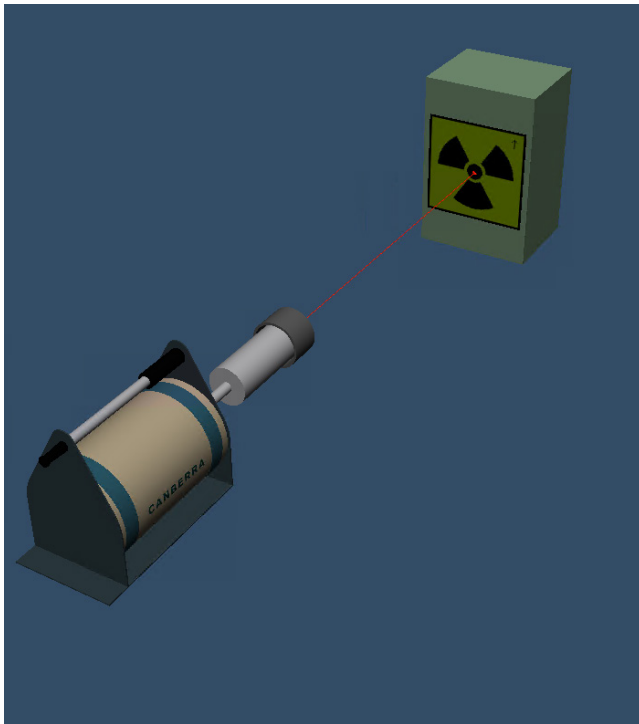
^e De hoge en lage waarden zijn gebaseerd op de nauwkeurigheid van de gebruikte balans. Het gewicht van het afval in combinatie met de vulhoogte bepaalt de gemiddelde dichtheid van het afval.

¹ Als een radionuclide meerdere lijnen in het uiteindelijke gammaspectrum heeft, wordt de gemiddelde activiteit van de afzonderlijke lijnen bepaald. In dat geval kan de onzekerheid in de gemiddelde activiteit wel lager worden dan de intrinsieke onzekerheid.

In de praktijk zal de radioactiviteit² niet homogeen over het afvalvat zijn verdeeld. Het is *a priori* niet bekend hoe de activiteit verdeeld is, en het is lastig te achterhalen zonder het vat te openen. Om de invloed hiervan op de onzekerheid in te schatten, zijn de twee uitersten gesimuleerd: een homogeen besmet vat en een puntbron in het vat.

2.1.1 Homogeen besmet afvalvat

Om een homogeen besmet afvalvat te simuleren, is een afvalvat volgens de parameters in Tabel 2 gemodelleerd in ISOCS. Hierbij is een homogene besmetting gekozen voor het materiaal in het afvalvat. Een schematische weergave van de situatie staat in Figuur 1. Vervolgens is met de *Uncertainty Estimator* een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd en is de onzekerheid berekend.



Figuur 1 Schematische weergave van een homogeen besmet vat.

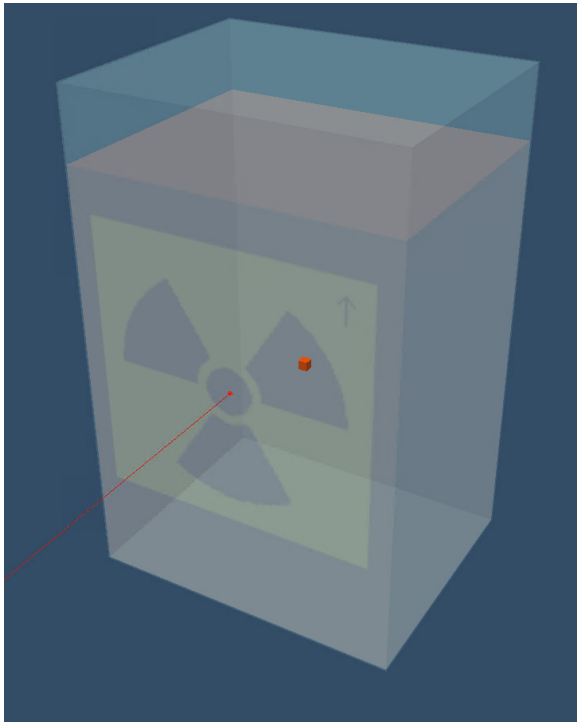
2.1.2 Puntbron in het vat

Er zal altijd een extra onzekerheid bovenop de geometrische onzekerheid uit sectie 2.1.1 zijn door de onbekende verdeling van de activiteit over het vat. Als extreme situatie (*worst case*) is een hotspot van 1 cm bij 1 cm bij 1 cm, waarin alle activiteit in is geconcentreerd, aan het afvalvat toegevoegd. Op de gebruikte afstand van 1 m is dit een goede benadering van een puntbron.

In de referentiesituatie is de hotspot gelokaliseerd in het midden van het vat, zoals schematisch weergegeven in Figuur 2. Om de extra onzekerheid in te schatten, is de hotspot verplaatst naar helemaal bovenin en onderin het vat, links en rechts en voor- en achterin. Dit

² Het niet-radioactieve deel van het afval is over het algemeen ook niet homogeen verdeeld. Het effect hiervan wordt in dit rapport verwaarloosd.

geeft een gevoeligheidsanalyse voor de onzekerheden in de afzonderlijke parameters van de positie van de hotspot.



Figuur 2 Schematische weergave van een hotspot in een afvalvat. Het niet-actieve afval en het vat zijn transparant weergegeven, zodat de hotspot in het midden van het vat zichtbaar is. De detector (niet weergegeven) staat op dezelfde afstand als in Figuur 1.

Daarnaast is de hotspot 100 keer op een willekeurige plek in het afvalvat geplaatst. De telefficiëntie van al deze modellen is één voor één berekend totdat het gemiddelde van alle afzonderlijke efficiënties geconvergeerd was tot 1%. De standaarddeviatie van de berekende telefficiënties van de afzonderlijke modellen geeft dan de toegevoegde onzekerheid.

De extra onzekerheid door de locatie van de hotspot kan worden verlaagd door het afvalvat te draaien tijdens de meting. Door te draaien middelt de inhomogeniteit uit over het vat. De *Uncertainty Estimator* van ISOCS kan continu draaien niet simuleren. In de *Uncertainty Estimator* kan wel gesimuleerd worden dat het vat gedurende de meting steeds een kwartslag (90°) gedraaid wordt over de verticale as. Hiertoe worden weer 100 ISOCS-modellen gedefinieerd met een willekeurig geplaatste hotspot, waarvoor nu voor ieder model vier keer de telefficiëntie berekend wordt (één keer voor elke kant van het afvalvat). Wederom wordt gesimuleerd totdat het gemiddelde van alle efficiënties samen geconvergeerd is tot 1%. Ook hier geldt dat de standaarddeviatie van alle telefficiënties de extra onzekerheid is.

In gevallen dat er maar weinig radioactiviteit in het afvalvat aanwezig is, kan het nodig zijn om het vat dicht bij de detector te plaatsen, omdat anders de metingen te lang duren. De absolute telefficiëntie is immers groter bij kleinere afstanden tussen detector en bron. Om de

onzekerheid bij een kleinere afstand te bepalen, zijn de stochastische berekeningen van een vat van 4 kanten gemeten herhaald bij afstanden van 50 cm en 10 cm. Hierbij is wederom de puntbron op een aantal willekeurige plekken in het afvalvat geplaatst en is het draaien van het vat tijdens de meting gesimuleerd.

2.2 Metingen

Ter controle van het ISOCS-model hebben we metingen uitgevoerd aan een puntbron van Eu-152 met een gecertificeerde activiteit van 28700 ± 400 Bq ten tijde van de meting. De puntbron is geplaatst in een afvalvat gevuld met niet-radioactief afval, zoals afgebeeld in Figuur 3.

Er zijn gammaspectra van de puntbron in het vat opgenomen met een draagbare germanium halfgeleiderdetector (High Purity Germanium, HPGe) van het type Falcon 5000 van Mirion, met geïntegreerde elektrische koeling en pulssorteerder van 8.192 kanalen. Hierbij is gebruikgemaakt van het softwarepakket Genie-2000 van Mirion. Dezelfde software is gebruikt voor het analyseren van de spectra.

Ten eerste zijn 4 afzonderlijke metingen aan de 4 zijden van het vat uitgevoerd van 3600 s elk (1 uur), met een constante afstand tussen detector en vat. De 4 spectra zijn geanalyseerd met de efficiëntiekalibratie die hoort bij een homogeen besmet vat.



Figuur 3 Foto's van het afvalvat met niet-radioactief afval. De puntbron met Eu-152 zit op de plek van de rode stip (links).

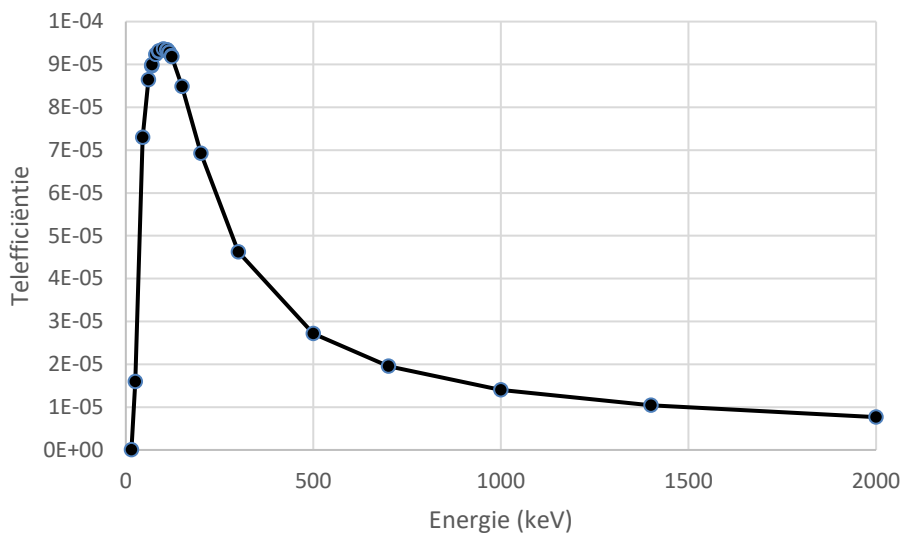
Ten tweede is een enkele meting uitgevoerd van 14 400 s (4 uur). Tijdens deze meting is het vat elk uur een kwartslag gedraaid (90°), op constante afstand van de detector. Hierbij is de afstand tussen de detector en het vat constant gehouden. Deze meting is geanalyseerd met de efficiëntiekalibratie die bij een puntbron op een willekeurige positie in het vat hoort. Er is dus geen informatie over de positie van puntbron gebruikt bij het analyseren van dit spectrum.

3 Resultaten en discussie

3.1 Simulaties

3.1.1 *Homogeen besmet afvalvat*

De totale telefficiëntie als functie van de energie van een homogeen besmet afvalvat staat afgebeeld in Figuur 4. Dit is de referentiesituatie voor een homogene besmetting. De vorm van de grafiek is typisch voor HPGe-detectors. Wat opvalt is dat de telefficiëntie in deze referentiesituatie veel kleiner is dan 100%. Dit komt doordat het afvalvat relatief ver van de detector af staat.

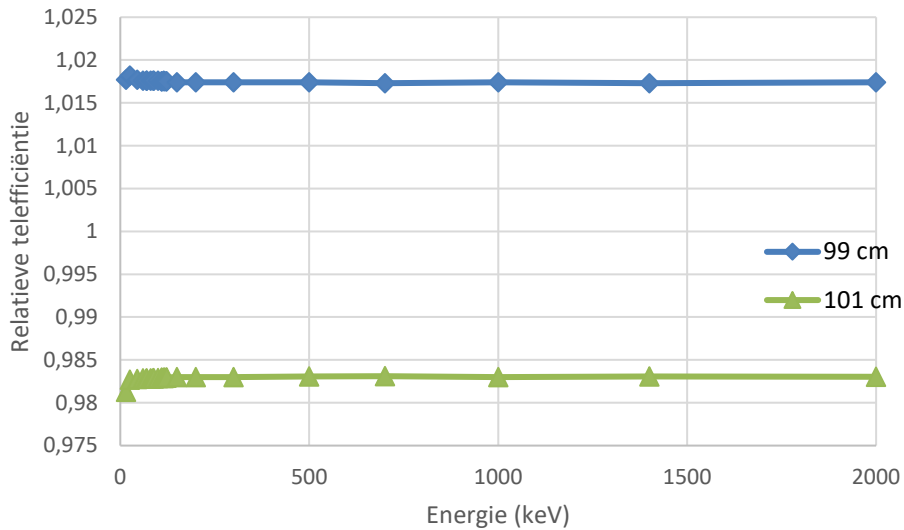


Figuur 4 Energieafhankelijke telefficiëntie van een homogeen besmet afvalvat tussen 15 en 2.000 keV. De telefficiëntie tussen de meetpunten is benaderd met een lineaire interpolatie.

Over het algemeen is het effect van de geometrische parameters op de telefficiëntie maar een paar procent. Daarom tonen we in de rest van dit rapport de resultaten als de *relatieve* afwijking ten opzichte van de referentiesituatie, zoals weergegeven in Figuur 4.

3.1.1.1 Afstand tussen detector en afvalvat

In Figuur 5 staat de gevoeligheid voor de afstand tussen de voorkant van het afvalvat en de detector afgebeeld, als functie van de energie. De blauwe en groene lijnen staan voor de lage en de hoge waarde, in dit geval 99 cm en 101 cm (de referentieafstand was 100 cm). Beide lijnen lopen vrijwel horizontaal. Dat komt doordat we hier het effect van de kwadratenwet zien en die is niet afhankelijk van de energie. Belangrijker is dat de relatieve afwijking ten opzichte van de referentieafstand slechts minder dan 2% bedraagt, fors minder dan de intrinsieke onzekerheid van een ISOCS-berekening die minimaal 4% is (zie Tabel 1). We concluderen dus dat de telefficiëntie niet erg gevoelig is voor de afstand tussen afvalvat en detector, zeker aangezien een nauwkeurigheid van ± 1 cm in de praktijk makkelijk is te halen.

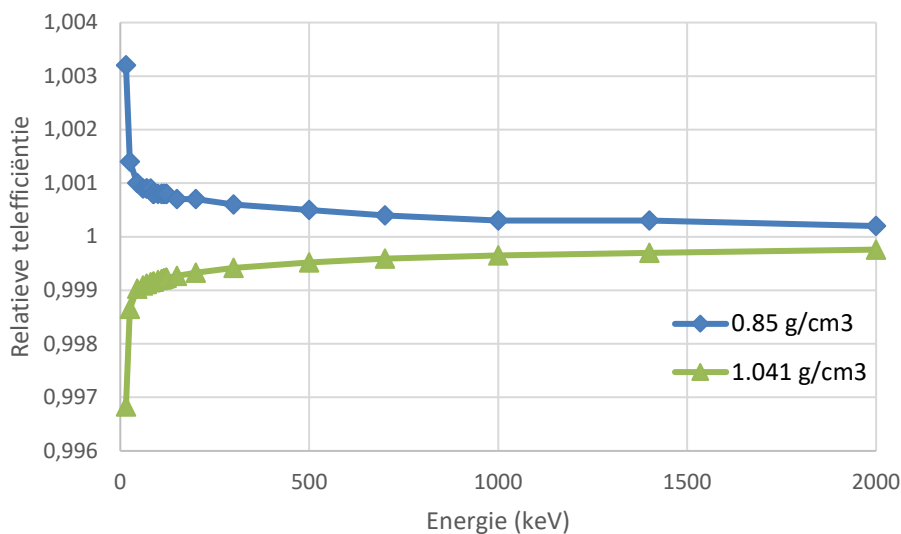


Figuur 5 Energieafhankelijke gevoeligheid van de telefficiëntie voor de afstand tussen afvalvat en detector. De referentieafstand is 100 cm.

3.1.1.2

Dichtheid van materiaal van afvalvat

Figuur 6 toont de gevoeligheid van de telefficiëntie voor de dichtheid van het materiaal van het afvalvat als functie van de energie. De gevoeligheid is het grootst bij lage energie, want laag-energetische fotonen worden meer geabsorbeerd door materie. Omdat het afvalvat vrij dun is (slechts 1 mm dikte), heeft de dichtheid maar weinig invloed op de telefficiëntie. Dat is terug te zien in de lage gevoeligheid van de efficiëntie voor variaties in de dichtheid, die maximaal 0,35% is, en daarmee veel lager dan de intrinsieke onzekerheid.

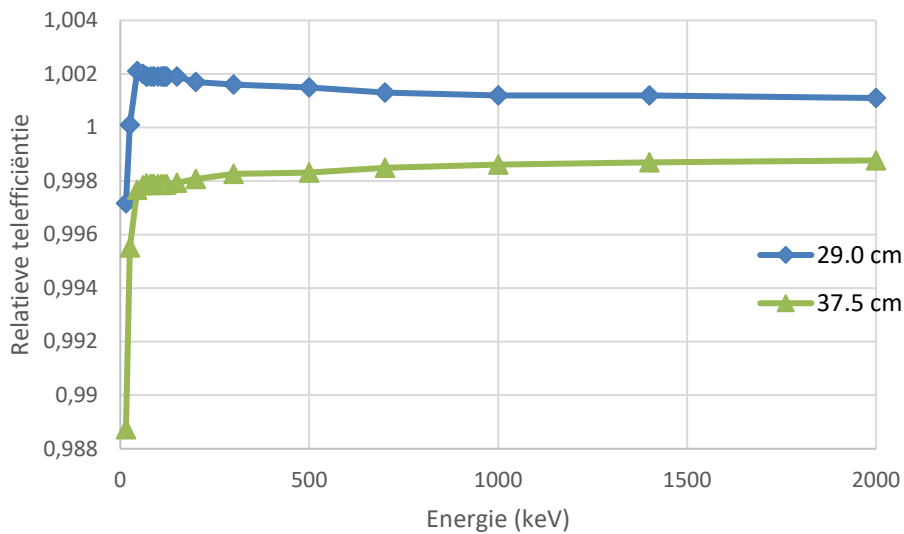


Figuur 6 Energieafhankelijke gevoeligheid van de telefficiëntie voor de dichtheid van het materiaal van het afvalvat. De referentiedichtheid is 0,95 g/cm³.

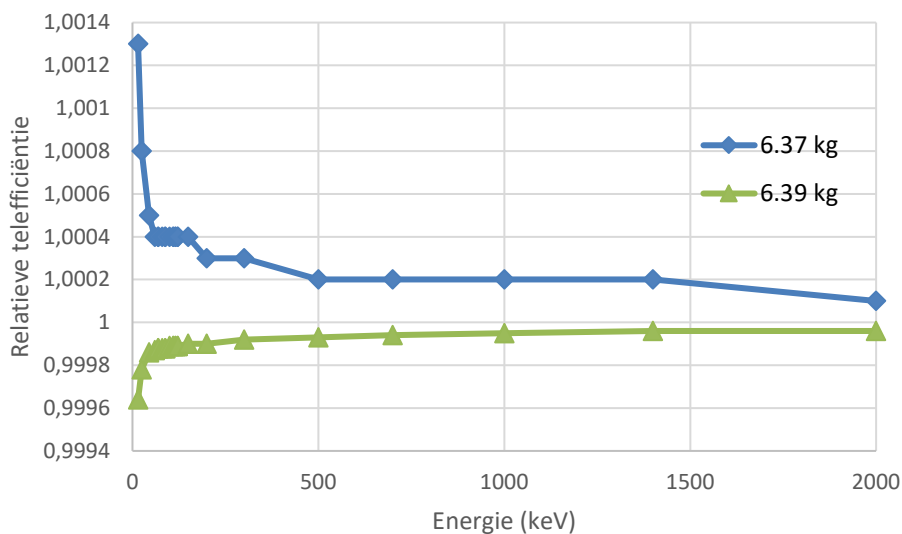
3.1.1.3

Breedte en vulhoogte van het afvalvat

Iets vergelijkbaars geldt voor de breedte van het afvalvat en de vulhoogte, zoals afgebeeld in respectievelijk Figuur 7 en Figuur 8. Voor de breedte van het vat zien we dat bij zeer lage energieën de telefficiëntie lager is dan bij hogere energieën. De verklaring daarvoor is onbekend. In beide gevallen is de gevoeligheid van de telefficiëntie minder dan 1% over bijna het hele energiegebied. Deze parameters hebben dus weinig invloed op de telefficiëntie en dragen weinig bij aan de totale onzekerheid.



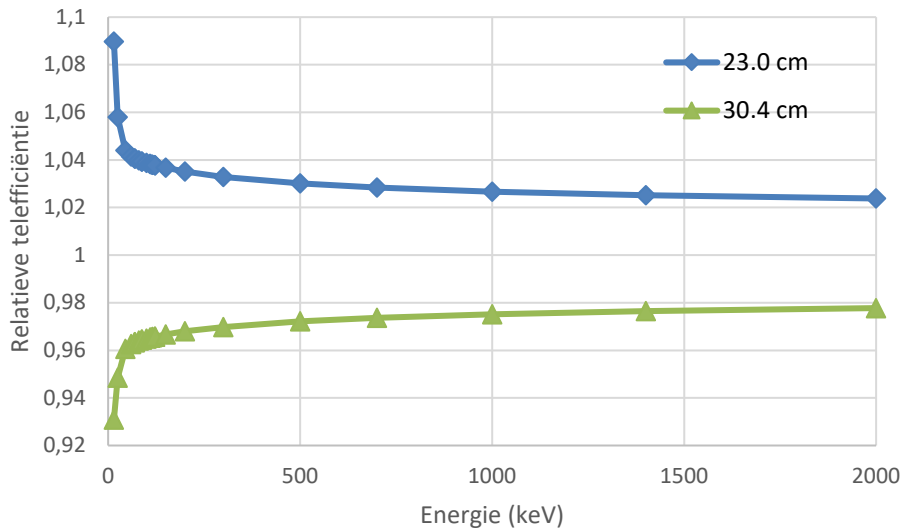
Figuur 7 Energieafhankelijke gevoeligheid van de telefficiëntie voor de breedte van het afvalvat. De referentiebreedte is 33,25 cm.



Figuur 8 Energieafhankelijke gevoeligheid van de telefficiëntie voor de massa van het afval in het vat. De referentiemassa is 6,38 kg.

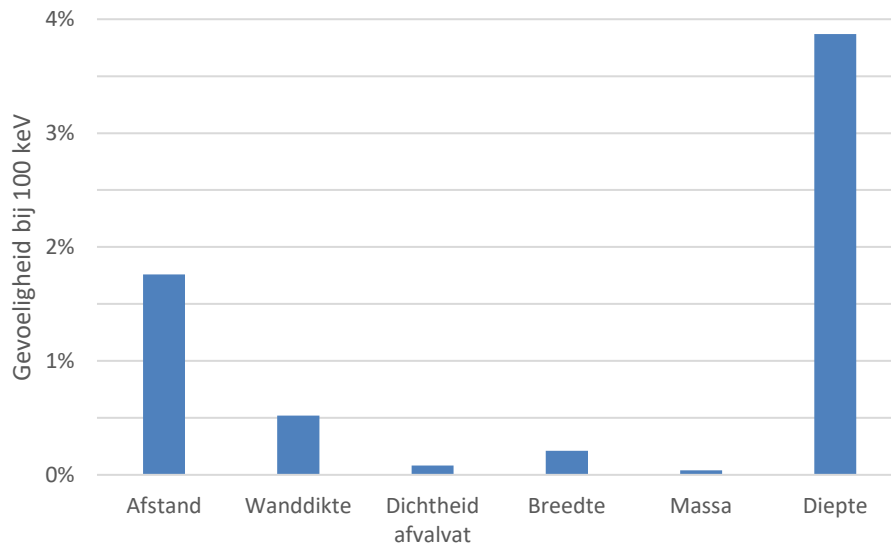
3.1.1.4 Diepte van het afvalvat

De gevoeligheid van de telefficiëntie voor de diepte van het afvalvat is echter wel belangrijk, zoals te zien is in Figuur 9. Bij lage energie is de afwijking 9%, en dat wordt rond de 2% à 3% bij hogere energie. We zien hier een gecombineerd effect van afstand én van zelfabsorptie in het monster.



Figuur 9 Energieafhankelijke gevoeligheid van de telefficiëntie voor de diepte van het afvalvat. De referentiediepte is 26,7 cm.

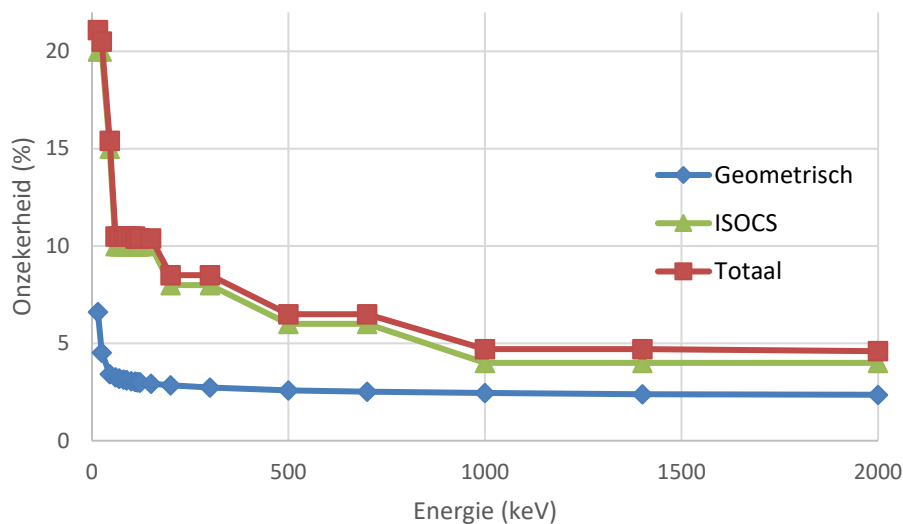
De energieafhankelijkheid van de gevoeligheid maakt het onderling vergelijken van de gevoeligheden voor de verschillende parameters lastig. Aangezien de meeste medische nucliden gamma's rond de 100 keV hebben, hebben we ervoor gekozen de gevoeligheid bij 100 keV te vergelijken. Het vergelijken van de gevoeligheden staat afgebeeld in Figuur 10. Als de afwijking naar boven of naar beneden niet gelijk zijn, is de grootste afwijking gekozen. Uit deze figuur blijkt dat twee parameters verreweg de meeste invloed hebben op de uiteindelijke onzekerheid, en dat zijn de diepte van het afvalvat en de afstand tussen het vat en de detector. De andere parameters hebben een veel kleinere gevoeligheid. In de praktijk is het dus aan te raden om vooral deze twee parameters nauwkeurig te bepalen.



Figuur 10 Vergelijking van de gevoeligheid van de teleefficiëntie voor de parameters.

3.1.1.5 Onzekerheid van alle parameters samen

Het stochastisch variëren van alle parameters, binnen de grenzen van Tabel 2, geeft inzicht in de totale toegevoegde onzekerheid door geometrische onzekerheden. De resultaten daarvan staan in Figuur 11; de blauwe lijn geeft de geometrische onzekerheid. De totale onzekerheid (rode lijn) wordt voor het grootste deel bepaald door de ISOCS-onzekerheid (groene lijn). We concluderen dan ook dat de geometrische onzekerheid slechts een verwaarloosbare invloed heeft op onzekerheid van de teleefficiëntie, zolang de geometrische parameters redelijkerwijs bekend zijn.



Figuur 11 Energieafhankelijke onzekerheid (geometrische onzekerheid, ISOCS-onzekerheid en totale onzekerheid) van een homogeen besmet vat.

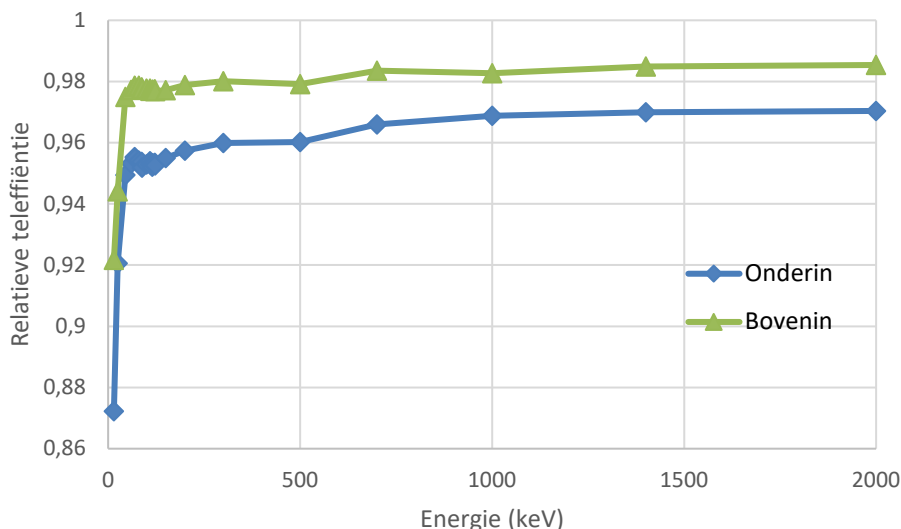
3.1.2 Puntbron in het vat

In de vorige sectie hebben we gezien dat de onzekerheden in de geometrische parameters maar weinig invloed hebben op de uiteindelijke totale onzekerheid, als de activiteit homogeen verdeeld is over het vat. In de praktijk zal dit zelden het geval zijn.

Het andere uiterste is dat alle activiteit in een puntbron geconcentreerd zit (hotspot). Ook deze situatie is gesimuleerd. Omdat we in sectie 3.1.1 al gezien hebben dat de geometrische parameters bij een homogeen besmet vat maar weinig invloed hebben, is alleen de locatie van de hotspot gewijzigd naar boven, beneden, links, rechts en voor en achter. Vervolgens is de relatieve afwijking bepaald door bij elke energie te delen door de referentiesituatie, waarbij de puntbron midden in het vat is geplaatst.

3.1.2.1 Hoogte van de puntbron

De invloed van de hoogte van de puntbron op de telefficiëntie is weergegeven in Figuur 12. Vooral bij zeer lage energie (< 45 keV) is de afwijking van de referentie aanzienlijk, tot 12%. Bij hogere energieën is de afwijking een stuk kleiner, ongeveer 3 à 4%. Het valt op dat beide lijnen onder de 1 liggen. Dat komt doordat de afstand én de zelfabsorptie groter worden naarmate de puntbron zich hoger of lager bevindt, ten opzichte van halverwege. Er is wel een zekere asymmetrie tussen de situaties waarin de puntbron boven- of onderin lag, omdat de detector iets onder het midden van het vat staat. Al met al kunnen we concluderen dat de hoogte van de puntbron in het vat maar een kleine invloed heeft op de telefficiëntie, ten opzichte van de ISOCS-onzekerheid (Tabel 1).

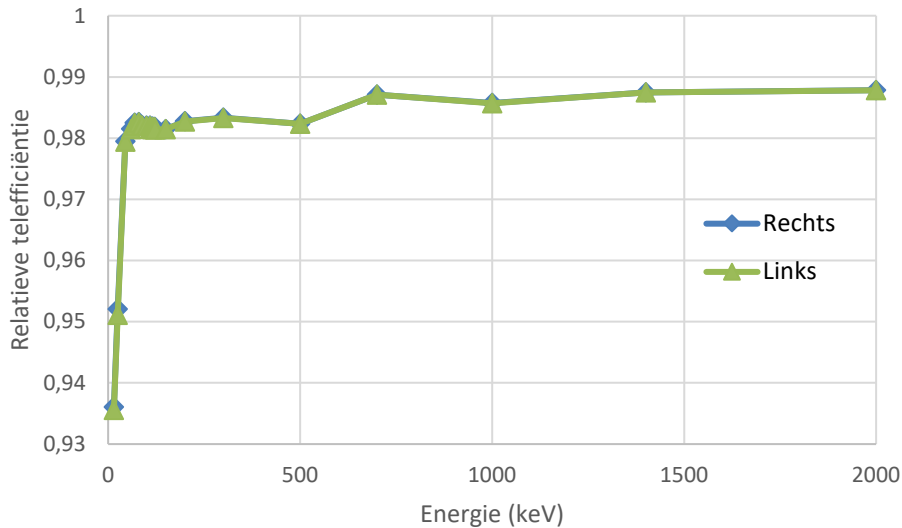


Figuur 12 Energieafhankelijke gevoeligheid van de telefficiëntie voor de hoogte van de puntbron. De referentiehoogte is halverwege.

3.1.2.2 Horizontale positie van de puntbron

De gevoeligheid voor de horizontale (links/rechts) positie van de puntbron staat weergegeven in Figuur 13. In dit geval is de afwijking ongeveer 6,5% bij lage energie, maar dit neemt al snel af tot ongeveer

1 à 2% bij hogere energieën (> 45 keV). In dit geval is de situatie volledig symmetrisch, dus de lijnen voor links en rechts liggen (uiteraard) precies op elkaar. Net als de hoogte van de puntbron heeft ook de links/rechts-positie minder invloed op de telefficiëntie dan de ISOCS-onzekerheid.

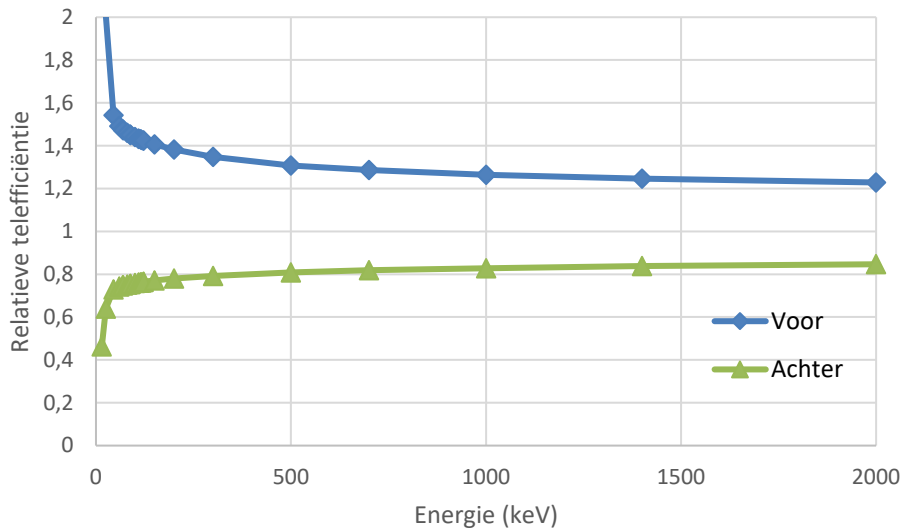


Figuur 13 Energieafhankelijke gevoeligheid van de telefficiëntie voor de horizontale positie (links/rechts) van de puntbron. De referentiepositie is halverwege.

3.1.2.3

Diepte van de puntbron

De gevoeligheid voor de horizontale (voor/achter) positie van de puntbron staat weergegeven in Figuur 14. In dit geval is de afwijking duidelijk groter dan de twee vorige gevallen. Bij zeer lage energieën zelfs 900% (helemaal voorin het vat) tot ongeveer 50% (achter in het vat), en bij iets hogere energieën 200% (voorin). Bij hogere energieën daalt de afwijking tot ongeveer 20%.

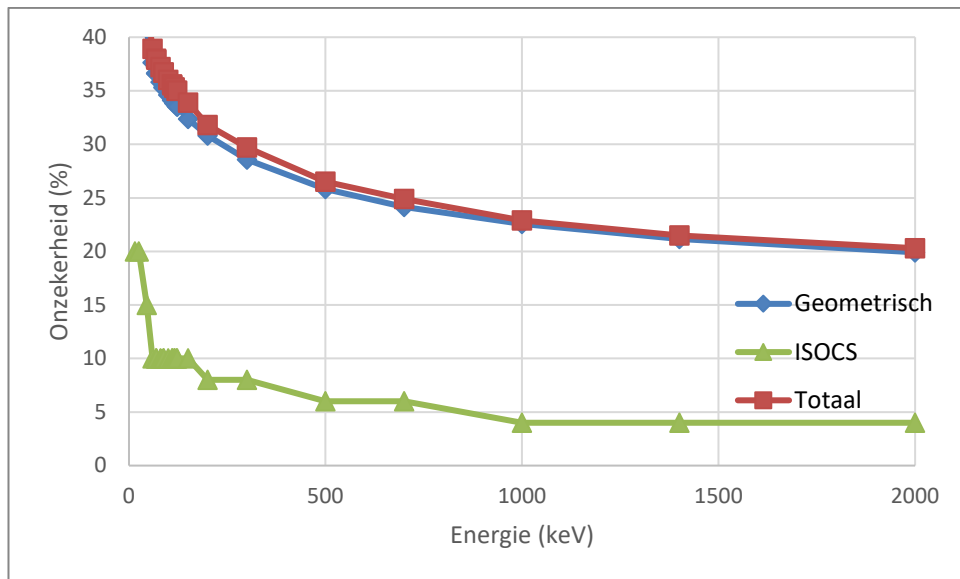


Figuur 14 Energieafhankelijke gevoeligheid van de teleefficiëntie voor de horizontale positie (voor/achter) van de puntbron. De verticale as is afgekapt om de leesbaarheid van de grafiek bij hoge energie te verbeteren; in de situatie met de bron voorin is bij 15 keV de relatieve teleefficiëntie 9,0 en bij 25 keV is de relatieve teleefficiëntie 2,0.

Uit de simulaties blijkt dus dat het veel uitmaakt voor de teleefficiëntie of de hotspot voor of achter in het vat zit. Dat is ook logisch, omdat de locatie zowel de afstand als de absorptie door het niet-actieve afval beïnvloedt.

3.1.2.4 Onzekerheid door positie van de puntbron

Het stochastisch variëren van de locatie van de hotspot in het vat resulteert in een onzekerheid, zoals afgebeeld in Figuur 15. De totale onzekerheid wordt vrijwel volledig bepaald door de geometrische component. Vooral bij lage energieën is de onzekerheid zo groot, dat experimentele data vrijwel onbruikbaar wordt om de activiteitsconcentratie met enige statistische betrouwbaarheid vast te stellen.

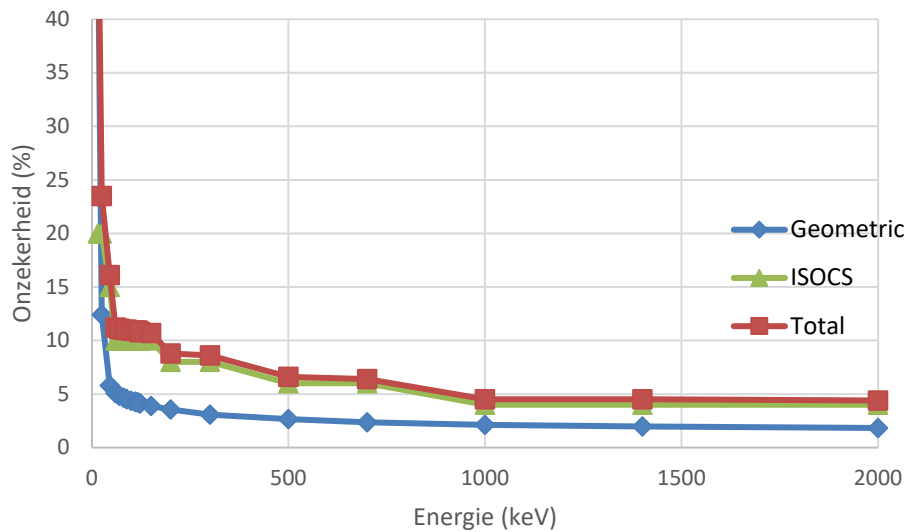


Figuur 15 Energieafhankelijke onzekerheid (geometrische onzekerheid, ISOCS-onzekerheid en totale onzekerheid) van een vat met een hotspot. De verticale as is afgekapt om de leesbaarheid van de grafiek bij hoge energie te verbeteren; bij 15 keV is de totale extra onzekerheid 146%.

Een bekende manier om de onzekerheid te verkleinen, is het draaien van het vat tijdens de meting. Op deze manier wordt de positie van de hotspot in het vat uitgemiddeld. Het draaien verkleint daardoor de invloed van de positie op de uiteindelijke telefficiëntie.

Figuur 16 toont de onzekerheid in de telefficiëntie van een vat met hotspot dat aan 4 kanten wordt gemeten. Het draaien van het vat verkleint de onzekerheid aanzienlijk. Alleen bij 15 keV is de geometrische bijdrage aan de onzekerheid nog dominant. Bij hogere energieën wordt de totale onzekerheid bepaald door de intrinsieke onzekerheid. Een grotere hotspot in het vat zorgt voor een lagere onzekerheid, omdat een grotere hotspot de homogene situatie meer benadert. Hetzelfde geldt voor de situatie waarbij er meerdere hotspots in het vat zitten. Ook dan zal de totale onzekerheid kleiner worden.

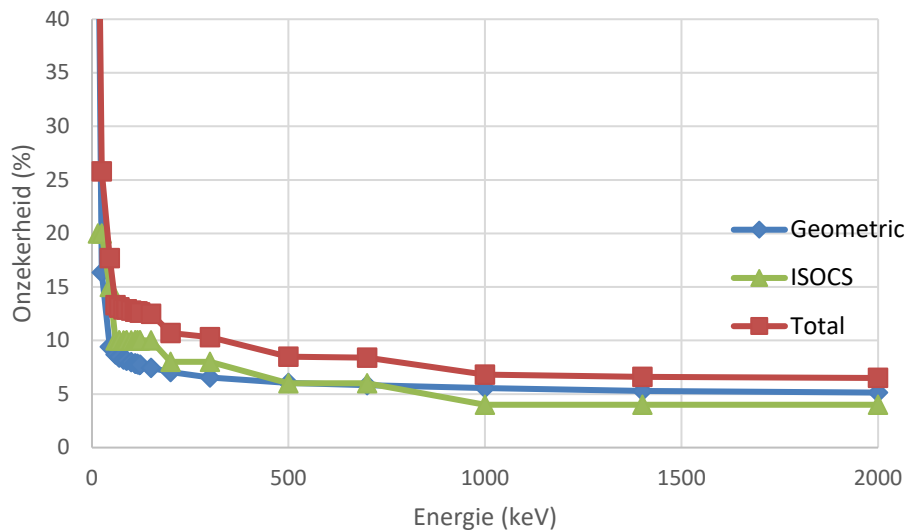
Aangezien de totale onzekerheid bij het draaien van het vat gedomineerd wordt door de intrinsieke onzekerheid, is het niet noodzakelijk om de inhoud van het vat te bepalen. Extra informatie over de inhoud maakt het model echter wel realistischer en kan een klein effect hebben op onzekerheid van de uiteindelijke resultaten. Deze uiteindelijke methode staat beschreven in Bijlage I.



Figuur 16 Energieafhankelijke onzekerheid (geometrische onzekerheid, ISOCS-onzekerheid en totale onzekerheid) van een vat met een hotspot dat van 4 kanten wordt gemeten. De verticale as is afgekapt om de leesbaarheid van de grafiek bij hoge energie te verbeteren; bij 15 keV is de totale extra onzekerheid 53%.

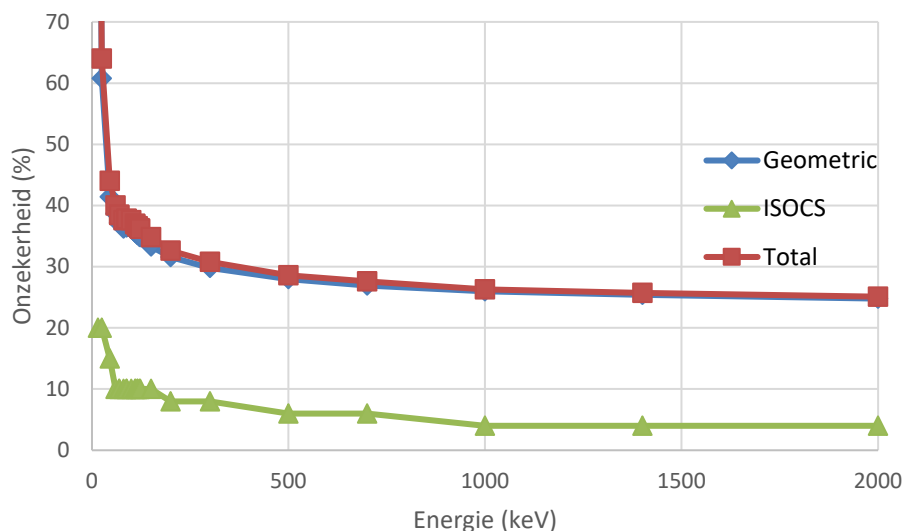
3.1.3 Vat dicht bij de detector

In sommige gevallen kan het nodig zijn om het vat dicht bij de detector te plaatsen, bijvoorbeeld als er weinig activiteit in het vat aanwezig is. De extra onzekerheid bij een afstand van 50 cm staat afgebeeld in Figuur 17 voor een meting, waarbij het vat gedraaid wordt. De geometrische component is nu ongeveer even groot als de intrinsieke onzekerheid over het hele energiebereik. De totale onzekerheid is daardoor merkbaar groter dan op een afstand van 1 m (Figuur 16). Dit is ook te verwachten, want de positie van de hotspot maakt meer uit op kleinere dan op grotere afstanden.



Figuur 17 Energieafhankelijke onzekerheid (geometrische onzekerheid, ISOCS-onzekerheid en totale onzekerheid) van een vat met een hotspot bij een afstand van 50 cm. De verticale as is afgekapt om de leesbaarheid van de grafiek bij hoge energie te verbeteren; bij 15 keV is de totale extra onzekerheid 57%.

Figuur 18 geeft de extra onzekerheid bij een afstand van 10 cm weer. Bij een afstand van 10 cm wordt de totale onzekerheid volledig gedomineerd door de geometrische component. Daardoor is de extra onzekerheid nu veel groter dan bij een afstand van 50 cm. Zelfs bij hoge energieën is de extra onzekerheid 25% tot 30%.



Figuur 18 Energieafhankelijke onzekerheid (geometrische onzekerheid, ISOCS-onzekerheid en totale onzekerheid) van een vat met een hotspot bij een afstand van 10 cm. De verticale as is afgekapt om de leesbaarheid van de grafiek bij hoge energie te verbeteren; bij 15 keV is de totale extra onzekerheid 153%.

Het is dus mogelijk om de afstand tussen vat en detector kleiner te maken, maar er moet een afweging worden gemaakt tussen hogere

onzekerheid en langere meettijden. Deze extra onzekerheid kan verkleind worden als er meer informatie voorhanden is over de locatie en grootte van de radioactieve bron in het vat. Hiervoor kunnen bijvoorbeeld dosistempometingen worden gebruikt, of röntgenbeelden.

Het is niet in te schatten bij welke activiteitsconcentraties het nuttig is om de afstand tot de detector te verkleinen. Dat hangt namelijk af van een aantal experimentele details, zoals nuclide, meettijd en niveau van achtergrondstraling (en eventuele afscherming daarvan).

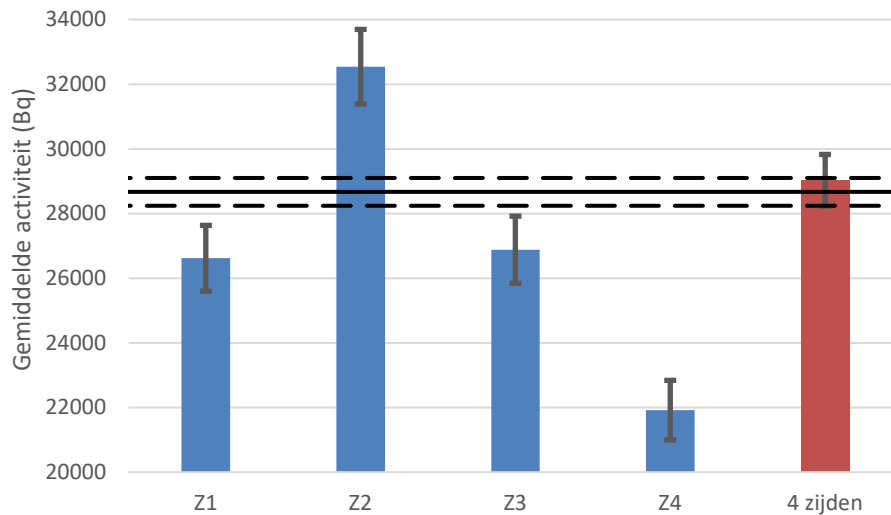
3.2 Metingen

Ter controle van het ISOCS-model hebben we metingen uitgevoerd aan een gecertificeerde Eu-152-puntbron in een vat met niet-radioactief afval. Eu-152 heeft gammalijnen bij verschillende energieën. Deze sectie toont niet de afzonderlijke gammalijnen, maar het variantie-gewogen gemiddelde van alle lijnen. De onzekerheden zijn de onzekerheden in dit gemiddelde. De afzonderlijke lijnen geven hetzelfde beeld.

De blauwe balken in Figuur 19 tonen de resultaten van de eerste vier afzonderlijke metingen. De teruggevonden activiteit verschilt per zijde, omdat de puntbron niet in het midden van het vat zit. Maar geen enkele van de metingen vindt de gecertificeerde activiteit terug. Zijde 1, 3 en 4 onderschatten de activiteit van de bron en zijde 2 overschat de activiteit.

De gevonden activiteit van de puntbron bij de meting waarbij het vat gedraaid wordt, is in Figuur 19 afgebeeld als rode balk. In dit geval wordt de gecertificeerde activiteit teruggevonden binnen de statistische onzekerheid.

Deze resultaten laten zien dat het inderdaad zinvol is om het vat te draaien tijdens de meting, omdat de activiteit dan correct wordt teruggevonden. Bovendien blijkt de onzekerheid in de telefficiëntie juist te zijn ingeschat, want de gecertificeerde waarde valt binnen de onzekerheid van de meting.



Figuur 19 Vergelijking van de gevonden activiteit bij het meten van het vat met hotspot aan vier zijden afzonderlijk ('Z1' tot 'Z4' in blauw) en tijdens het draaien van het vat ('4 zijden' in rood). De foutenbalken geven 1 standaardonzekerheid aan. De horizontale lijn is de gecertificeerde activiteit en de stippellijnen zijn de onzekerheid daarin (1 standaardonzekerheid).

4 Conclusies

Er is een methode onderzocht om vaten met (mogelijk) radioactief ziekenhuisafval te meten om zodoende de activiteitsconcentratie van aanwezige radionucliden vast te stellen, zonder het vat te openen. Hierbij is vooral gekeken naar de onzekerheid van de telefficiëntie tijdens de meting, omdat die bepalend is voor de uiteindelijke onzekerheid van de meting. Meestal zijn de telfout en eventuele experimentele onzekerheden kleiner dan de onzekerheid van de telefficiëntie.

In het eerste scenario is bepaald welke parameters de grootste invloed hebben op de onzekerheid van de telefficiëntie bij een homogeen besmet vat. Dit bleek vooral de diepte van het vat en de afstand tussen de detector te zijn. De invloed van deze parameters is echter vrij klein, minder dan 4% bij 100 keV (dat is een lage, maar redelijke energie waar medische nucliden gamma's uitzenden). Daarom heeft de onzekerheid van alle geometrische parameters samen een klein effect op de totale onzekerheid ten opzichte van de intrinsieke onzekerheid van de kalibratie.

De situatie verandert wanneer de activiteit geconcentreerd is in een hotspot, het tweede scenario. In dat geval heeft de locatie van de hotspot in het vat (en dan vooral de afstand tot detector) een grote invloed op de onzekerheid. Een willekeurig geplaatste hotspot in het vat zorgt voor een extra onzekerheid van ongeveer 35% bij 100 keV, op een afstand van 1 m tussen het vat en de detector. Deze onzekerheid kan verlaagd worden door het vat te draaien tijdens de meting. In dat geval wordt de extra onzekerheid kleiner dan de intrinsieke onzekerheid voor bijna het hele energiebereik. Deze methode staat beschreven in Bijlage I. Gezien de kleine onzekerheid van deze methode is het niet noodzakelijk maar wel aan te raden om meer informatie over de bron in het vat te achterhalen, bijvoorbeeld de grootte en samenstelling van de bron.

Als de afstand tussen het vat en de detector wordt verkleind tot een afstand van 50 cm is de geometrische onzekerheid ongeveer even groot als de intrinsieke onzekerheid. Pas bij een afstand van 10 cm tot de detector wordt de geometrische onzekerheid groter dan de intrinsieke onzekerheid (ongeveer 35% bij 100 keV). Meten op kortere afstand kan nodig zijn als er maar weinig activiteit in het vat aanwezig is.

De methode is gecontroleerd door de 4 afzonderlijke kanten van een vat met afval met daarin een gecertificeerde Eu-152-bron op een afstand van 1 m tot de detector te meten. Hierbij werd de gevonden activiteit per zijde onder- dan wel overschat. Als het vat tijdens de meting werd gedraaid, werd echter wel de gecertificeerde activiteit teruggevonden, binnen de onzekerheid. Dit geeft aan dat de methode geschikt is voor het beoogde doel.

5 Referenties

- [ISO19017] NEN-EN-ISO 19017:2017, "Guidance for gamma spectrometry measurement of radioactive waste".
- [ISOCS] In Situ Object Counting System, Mirion, <https://www.mirion.com/products/s573-isocs-calibration-software>.
- [Mirion12a] Mirion, "Geometry Composer User's Manual", 2012.
- [Mirion12b] Mirion, "Model S573 ISOCS Calibration Software Technical Reference Manual", 2012.
- [ZAVIN] ZAVIN, <https://www.zavin.nl/>.

Bijlage I beschrijving van de methode

1. Verzamel zoveel mogelijk (achtergrond)informatie over het vat. Waar komt het vandaan? Welke nucliden kunnen er aanwezig zijn in het vat? Hoe is de activiteit verdeeld in het vat?
2. Bepaal het gewicht van het vat.
3. Gebruik de informatie uit stap 1 en stap 2 om een zo realistisch mogelijk model te maken in ISOCS. Bepaal de telefficiëntie. Als er geen informatie over de locatie van de bron is, kan de telefficiëntie van een puntbron gebruikt worden.
4. Optioneel: Bereken de onzekerheid van de telefficiëntie met de *Uncertainty Estimator* in ISOCS.
5. Meet een achtergrondspectrum.
6. Plaats het afvalvat op een afstand van 1 m van de detector.
7. Start een meting. Draai het vat vier keer 90° tijdens de meting, steeds op een kwart van de totale meettijd.
8. Corrigeer het gemeten spectrum met het achtergrondspectrum uit stap 5.
9. Gebruik de telefficiëntie uit stap 3 en de onzekerheid uit stap 4 om de activiteit in het vat te berekenen.
10. Deel de activiteit door het gewicht van het vat uit stap 2 om de activiteitsconcentratie te bepalen.
11. Bereken de minimaal detecteerbare activiteit (MDA) van niet-gedetecteerde gammastralers en vergelijk deze met de (specifieke) vrijgavegrenzen. Als één van de MDA's hoger is dan de vrijgavegrens moet de meting herhaald worden dichterbij de detector of met een langere meettijd. Alternatief kan de onzekerheid van de telefficiëntie verlaagd worden door beter in te schatten waar de bron in het vat zit.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

februari 2024

De zorg voor morgen
begint vandaag