

2015•2016  
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN  
*master in de industriële wetenschappen: nucleaire  
technologie*

## Masterproef

Toepassing van de ISOCS methode voor vrijgavemetingen van lokalen bij de  
ontmanteling van nucleaire installaties

Promotor :  
De heer Luc LIEVENS  
Dhr. MICHEL GAELENS

Tom Haeldermans

*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële  
wetenschappen: nucleaire technologie*

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2015•2016

Faculteit Industriële  
ingenieurswetenschappen

*master in de industriële wetenschappen: nucleaire  
technologie*

## Masterproef

Toepassing van de ISOCS methode voor vrijgavemetingen  
van lokalen bij de ontmanteling van nucleaire  
installaties

Promotor :  
De heer Luc LIEVENS  
Dhr. MICHEL GAELENS

Tom Haeldermans

*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële  
wetenschappen: nucleaire technologie*

## Voorwoord

Nucleaire technologieën en milieuwetenschappen zijn de studierichtingen die mijn voorkeur genoten. Daarom is het dan ook belangrijk om mijn master thesis te wijten aan een onderwerp dat deze richtingen combineert. Vrijgavemetingen zijn hiervoor geschikt omdat het meten met nucleaire apparatuur gecombineerd wordt met het uitsparen van grondstoffen door het hergebruik van de bestaande installaties. Ik ben dan ook dankbaar voor de kans die AV Controlatom mij gegeven heeft zodat ik mij in dit onderwerp kon verdiepen op de voormalige site van Best Medical Belgium in Fleurus.

Omdat er in België geen wetgeving of richtlijn bestaat over vrijgavemetingen waarbij de activiteit is uitgedrukt in  $\text{Bq/cm}^2$ , was dit voor mij een kans om onderzoek uit te voeren in een veld waarbinnen nog weinig informatie beschikbaar is.

Het werk dat ik in deze thesis heb mogen uitvoeren gaf me de kans om de theorie toe te passen in de praktijk en nieuwe methodes te leren kennen voor het vrijgeven van nucleaire installaties. Verder was het een ideale gelegenheid om kennis te maken met de werkzaamheden van zowel Controlatom als NIRAS/ONDRAF op de site in Fleurus.

Ik zou graag het personeel van NIRAS/ONDRAF en Controlatom dat werkzaam is op de site in Fleurus bedanken voor hun hulp bij mijn master thesis. In het bijzonder ben ik dankbaar voor de hulp van mijn promotoren dr. Michel Gaelens en Luc Lievens voor hun advies en behulpzaamheid.

Uiteindelijk zou ik nog mijn ouders willen bedanken omdat ze me de mogelijkheid geven om deze thesis tot een goed einde te brengen.

Tom Haeldermans



# Inhoudstafel

<b>1. Inleiding .....</b>	<b>15</b>
1.1. Situering .....	15
1.2. Probleemstelling.....	15
1.3. Doelstellingen.....	16
1.4. Materiaal en methode.....	16
<b>2. AIB Vinçotte Controlatom .....</b>	<b>19</b>
<b>3. Productie van Fludeoxyglucose(<sup>18</sup>FDG).....</b>	<b>21</b>
3.1. Fluor-18 .....	21
3.2. Fludeoxyglucose ( <sup>18</sup> FDG) .....	21
<b>4. Situering en geschiedenis .....</b>	<b>25</b>
4.1. Geschiedenis .....	25
4.2. Gebouw B20 .....	26
4.3. Productie in gebouw B20 .....	28
4.4. Aanwezige radionucliden in gebouw B20 – nuclidenvector .....	30
<b>5. Germaniumdetectoren.....</b>	<b>33</b>
5.1. Halfgeleiderdetectoren .....	33
5.2. Basisinteracties in de germaniumdetectoren .....	35
5.3. Falcon 5000® HPGe Detector .....	37
5.3.1. Pulsbuiskoeling.....	39
<b>6. Scintillatiedetectoren.....</b>	<b>41</b>
6.1. Berthold LB 124 SCINT detector.....	42
<b>7. Vrijgaveniveaus en richtlijnen voor vrijgavemetingen .....</b>	<b>43</b>
7.1. Internationaal- en Europees bepaalde vrijgaveniveaus .....	43
7.2. Vrijgaveniveaus in België.....	44
7.3. Richtlijnen voor meetprocedures en meettechnieken in België.....	44
<b>8. Methode .....</b>	<b>47</b>
8.1. Gebruikte bronnen.....	47

8.2.	Gebruikte collimators.....	48
8.3.	Gebruikte meetgeometrieën.....	51
8.4.	Bepaling van de activiteit .....	53
8.5.	Bepaling van minimale detecteerbare activiteit bij gebruik Falcon 5000® Detector.....	55
8.5.1.	Kritische limiet ( $L_c$ ).....	55
8.5.2.	Detectielimiet ( $L_D$ ) .....	56
8.5.3.	Minimale Detecteerbare Activiteit (MDA) .....	57
8.6.	Bepaling van minimale detecteerbare activiteit en detectietijd bij gebruik van Berthold LB124 SCINT Detector .....	59
<b>9.</b>	<b>Resultaten en bespreking .....</b>	<b>61</b>
9.1.	Bepaling van het gemeten oppervlak, collimator en bijhorende afstand tot detector voor de cirkelvormige meetgeometrie.....	61
9.2.	Bepaling van het gemeten oppervlak, collimator en bijhorende afstand tot detector voor de vierkante meetgeometrie .....	65
9.2.1.	Experimenten met Ba-133 puntbron .....	65
9.2.2.	Experimenten met Cs-137 bron .....	67
9.2.3.	Experimenten met Co-57 bron.....	69
9.3.	Bepaling van het soort meetgeometrie .....	69
9.4.	Bepaling van de minimale detecteerbare activiteit en bijhorende meettijd voor verschillende geometrieën.....	70
9.4.1.	Definiëring van verschillende meetgeometrieën.....	70
9.4.2.	Bepaling van de meettijd.....	75
9.5.	Bepaling van de meettijd voor de Berthold 124 SCINT handdetector .....	79
9.6.	Beschrijving van de uitgewerkte procedure en toepassing op lokaal 20.0.11.....	80
9.6.1.	Procedure .....	80
9.6.2.	Meting in lokaal 20.0.11 .....	80
<b>10.</b>	<b>Conclusie en toekomstig werk .....</b>	<b>85</b>
10.1.	Conclusie .....	85
10.2.	Toekomstig werk .....	85

## Tabellenlijst

Tabel 1: Aanwezige radionucliden in B20 .....	31
Tabel 2: Gamma energie van Co-57 en Mn-54.....	35
Tabel 3: specificaties BEGe detector .....	38
Tabel 4: Gegevens van de gebruikte bronnen .....	47
Tabel 5: Gamma energieën en hun voorkomen van Ba-133.....	61
Tabel 6: Meetresultaten bij gebruik van collimator met 6 ringen .....	62
Tabel 7: Meetresultaten bij gebruik van collimator met 4 ringen .....	63
Tabel 8: Meetresultaten bij gebruik van collimator met 2 ringen .....	63
Tabel 9: Resultaten van de definiëring van de vierkante geometrie met Ba-133 bron.....	66
Tabel 10: Resultaten van de definiëring van de vierkante geometrie met Cs-137 bron .....	68
Tabel 11: Resultaten van de definiëring van de vierkante geometrie met Co-57 bron.....	69
Tabel 12: Resultaten voor geometrie 2 .....	73
Tabel 13: Resultaten voor geometrie 3 .....	74
Tabel 14: Resultaten voor geometrie 4 .....	74
Tabel 15: MDA van Co-57 voor de verschillende geometrieën bij de verschillende meettijden.....	76
Tabel 16: Nucliden aanwezig in de spectra gemeten in lokaal 20.0.11 .....	82





## Figurenlijst

Figuur 1: Falcon 5000 <sup>®</sup> detector.....	17
Figuur 2: Logo AIB Vinçotte en AV Controlatom .....	19
Figuur 3: Moleculaire structuur van glucose (links) en FDG (rechts) .....	22
Figuur 4: Schematische voorstelling van glycolyse in een cel .....	22
Figuur 5: Voorstelling van de reacties in de Krebs cyclus .....	23
Figuur 6: Schematische voorstelling van de omzetting van pyruvaat naar melkzuur.....	24
Figuur 7: Plattegrond NIRAS site Fleurus .....	26
Figuur 8: Plattegrond gecontroleerde zone B20 .....	27
Figuur 9: Plattegrond gecontroleerde zone B20 met illustraties van de aanwezige installaties .....	27
Figuur 10: Verpakkingszone .....	28
Figuur 11: Productiecellen .....	29
Figuur 12: Synthese van 18F-FDG door nucleofiele substitutie .....	29
Figuur 13: Voorstelling van het verschil tussen de bandkloof van een isolator en een halfgeleider ...	33
Figuur 14: Voorstelling pn-junctie .....	34
Figuur 15: Voorstelling van de interacties binnen een reële detector en de voorstelling van een reël gammaspectrum .....	36
Figuur 16: Interacties van gammastraling met de materialen in de omgeving van de detector .....	37
Figuur 17: Energiebereik van HPGe detectoren.....	38
Figuur 18: Efficiëntie i.f.v. de energie.....	38
Figuur 19: Schematische voorstelling van een pulsbuskoeler.....	39
Figuur 20: Structuur van de energiebanden van een geactiveerde scintillator .....	41
Figuur 21: Berthold LB124 SCINT detector.....	42
Figuur 22: Cs-137 Bron .....	48
Figuur 23: Co-57 oppervlaktebron .....	48
Figuur 24: Balkvormige collimator (links) en cilindervormige collimator (rechts).....	49
Figuur 25: Template in Genie 2000 voor de balkvormige collimator.....	49
Figuur 26: Voorstelling van de afmetingen van de gebruikte, balkvormige collimator .....	50
Figuur 27: Template in Genie 2000 voor de cilindervormige collimator .....	50
Figuur 28: Voorstelling van de afmetingen van de gebruikte, cilindervormige collimator.....	51
Figuur 29: Template in Genie 2000 voor de cirkelvormige meetgeometrie .....	51
Figuur 30: Voorstelling van de afmetingen van de cirkelvormige meetgeometrie .....	52
Figuur 31: Template in Genie 2000 voor de vierkante meetgeometrie.....	52
Figuur 32: Voorstelling van de afmetingen van de vierkante meetgeometrie .....	53
Figuur 33: Voorstelling van de methode voor de bepaling van het aantal tellen in de piek .....	54
Figuur 34: Visualisatie van het verschil tussen $L_c$ en $L_D$ .....	55
Figuur 35: definitie van het kritische limiet.....	56
Figuur 36: Definitie van detectielimiet.....	57
Figuur 37: Visualisatie van de parameters gebruikt in de methode van Currie.....	58
Figuur 38: Voorstelling van de plaatsing van de bron.....	62
Figuur 39: Meetresultaten bij gebruik van collimator met 6 ringen .....	63
Figuur 40: Meetresultaten bij gebruik van collimator met 4 ringen .....	63
Figuur 41: Meetresultaten bij gebruik van collimator met 2 ringen .....	64
Figuur 42: visualisatie van de plaats van de bron .....	64
Figuur 43: Visualisatie van de posities van de Ba-133 puntbron .....	66
Figuur 44: Resultaten van de definiëring van de vierkante geometrie met Ba-133 bron.....	66

Figuur 45: Resultaten van de definiëring van de vierkante geometrie waarbij: 1 is het resultaat wanneer de bron in het centrum geplaatst is; 2 is bron op 25 cm van het centrum; 3 is bron op 37,5 cm van het centrum; 4 is bron op 45 cm van het centrum en 5 is bron in de rechterbovenhoek .....	67
Figuur 46: Visualisatie van de posities van de Cs-137 bron .....	68
Figuur 47: Resultaten van de definiëring van de vierkante geometrie waarbij: 1 is het resultaat wanneer de bron in het centrum geplaatst is; 2 is bron op 25 cm van het centrum; 3 is bron op 31,5 cm van het centrum en 4 is bron in de rechterbovenhoek van de geometrie .....	68
Figuur 48: Voorstelling van het aantal metingen bij het gebruik van een cirkelvormige meetgeometrie .....	70
Figuur 49: Visualisatie van het zichtbare veld voor de detector .....	71
Figuur 50: Visualisatie van de posities van de Ba-133 bron bij geometrie 2 .....	72
Figuur 51: Visualisatie van de posities van Ba-133 bron bij geometrie 3 .....	72
Figuur 52: Visualisatie van de posities van Ba-133 bron bij geometrie 4 .....	73
Figuur 53: Resultaten voor geometrie 2 .....	73
Figuur 54: Resultaten voor geometrie 3 .....	74
Figuur 55: Resultaten voor geometrie 4 .....	74
Figuur 56: MDA report voor Co-57 .....	75
Figuur 57: MDA van Co-57 voor de verschillende geometrieën bij de verschillende meettijden .....	76
Figuur 58: MDA (in Bq/cm <sup>2</sup> ) van Co-57 voor de verschillende geometrieën bij de verschillende meettijden .....	77
Figuur 59: Weergave van het verschil in piekhoogte bij de Ba-133 bron van 14153 Bq (links) en 1199 Bq (rechts) .....	78
Figuur 60: Aangetroffen piek van Pb-214 (links) en I-131 (rechts) .....	83
Figuur 61: Systeem voor het verplaatsen van de detector en collimator .....	85

## Afkortingenlijst

ADR: Europese overeenkomst betreffende het internationale vervoer van gevaarlijke goederen over de weg

ATP: Adenosinetrifosfaat

BEGe: Broad Energy, high purity Germanium Detector

HPGe: High Purity Germanium Detector

FANC: Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle

<sup>18</sup>FDG: <sup>18</sup>Fludeoxyglucose

FWHM: Full Width Half Maximum

IAEA: International Atomic Energy Agency

ISOCS: In-Situ Object Counting System

IRE: Nationaal Instituut voor Radio Elementen

NAD+: Nicotinamideadeninedinucleotide

NADH: gereduceerd nicotinamideadeninedinucleotide

NIRAS: Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte splijtstoffen

OSL: optisch gestimuleerde luminescentie

PET: Positronemissietomografie

PM-buis: Photo-multiplier buis

RID: Reglement betreffende het internationale spoorwegvervoer van gevaarlijke goederen

ROI: Region of interest

TLD: thermo luminescente dosimeter



## Abstract

In België is er geen duidelijke wetgeving of richtlijn betreffende vrijgavemetingen van materialen en gebouwen waarbij de activiteit is uitgedrukt in Bq/cm<sup>2</sup>. Daarom wordt er in deze thesis een techniek ontwikkeld voor dit soort metingen gebruik makend van een BEGe detector (FALCON 5000) in combinatie met de ISOCS kalibratie software.

Deze apparatuur laat toe om grote oppervlakten tegelijk te meten met een detectielimiet kleiner dan 1 Bq/cm<sup>2</sup> voor de meeste radionucliden. Om bij een gegeven nuclidenvector, detectielimiet en uitmiddelingsoppervlak een optimalisatie van de meettijd te bekomen wordt een meetgeometrie bepaald. Verder wordt bekeken hoe een tweede meting de aanwezigheid van hotspots kan detecteren.

De ontwikkelde techniek werd vervolgens toegepast op lokaal 20.0.11 in het gebouw B20 op de voormalige site van Best Medical Belgium in Fleurus waar er <sup>18</sup>fludeoxyglucose geproduceerd werd. De nuclidenvector voor dit lokaal bestaat uit Co-57 en Mn-54. De gevraagde detectielimiet is 1 Bq/cm<sup>2</sup> uitgemiddeld over 1 m<sup>2</sup>. Er werd gekozen voor een balkvormige collimator met een vierkante meetgeometrie met een oppervlakte van 1 m<sup>2</sup> waarbij de detector zich op een afstand van 170 cm van het te meten oppervlak bevindt en er gemeten wordt gedurende 500 s. De tweede meting werd uitgevoerd met een handmonitor (Berthold LB124 SCINT) met een detectieoppervlak van 170 cm<sup>2</sup> met een meettijd van 1 s. De bijhorende hotspot detectielimiet is dan 2,77 Bq/cm<sup>2</sup>. Met de bekomen resultaten kan dit lokaal in principe vrijgegeven worden.



## Abstract – English

In Belgium there is no clear law or directive on release measurements of materials and buildings where the activity is expressed in Bq/cm<sup>2</sup>. Therefore, a technique is developed in this thesis for these kind of measurements using the Falcon 5000 detector of Canberra in combination with ISOCS calibration software.

This equipment makes it possible to measure large surface areas at the same time with a detection limit of less than 1 Bq/cm<sup>2</sup> for the majority of radionuclides. In order to obtain an optimization of the measurement time at a given nuclide vector, detection limit and measuring surface, a measuring geometry is defined. Furthermore, it is examined how a second measurement can detect the presence of hotspots.

The developed technique was then applied to local 20.0.11 in the B20 building on the former site of Best Medical Belgium Fleurus where <sup>18</sup>fludeoxyglucose was produced. The nuclide vector for this building consists of Co-57 and Mn-54. The required detection limit is 1 Bq/cm<sup>2</sup> averaged over 1m<sup>2</sup>. A beam-shaped collimator was chosen together with a square measuring geometry with a surface area of 1 m<sup>2</sup>. The detector is located at a distance of 170 cm from the measured surface and the measuring time is 500 s. The second measurement was carried out with the Berthold LB124 SCINT detector with a detection surface of 170 cm<sup>2</sup> and a measurement time of 1s. the accompanying hotspot detection limit is 2,77 Bq/cm<sup>2</sup>. With the results obtained, the section of this room can, in principle, be released.





# 1. Inleiding

## 1.1. Situering

Als masterstudent van de opleiding industrieel ingenieur met als afstudeerrichting nucleaire technologieën focus milieu, radiochemie kreeg ik de kans om mijn masterproef uit te voeren in samenwerking met AIB Vinçotte – Controlatom. Dit bedrijf is gevestigd in Vilvoorde en is gespecialiseerd in fysische controle ter bescherming van de werknemers en bevolking tegen ioniserende straling, dosimetrie, medische stralingsfysica en het opleiden van veiligheidsadviseurs klasse 7 voor het transport van radionucliden [1].

Deze masterproef werd uitgevoerd op de voormalige site van Best Medical Belgium in Fleurus. Dit bedrijf werd in 2012 failliet verklaard en er werd geen overnemer gevonden. Dit betekent, volgens de wet van 8 augustus 1980, dat NIRAS sanerings- en ontmantelingsoperaties dient uit te voeren aangezien de nucleaire exploitant in gebreke bleef [2]. Deze sanerings- en ontmantelingsoperaties zullen gebeuren in samenwerking met o.a. AIB Vinçotte – Controlatom. Het gebouw waarin de metingen zullen uitgevoerd worden is het gebouw B20. De volledige historie van het gebruik van dit gebouw is goed gekend. Het heeft immers gediend voor de productie van 2-deoxy-2-(<sup>18</sup>F)fluor-D-glucose of kortweg fludeoxyglucose (<sup>18</sup>FDG) vanaf zijn ingebruikname in 2009 tot het einde van de productie in 2012 [3].

<sup>18</sup>FDG is een molecule die zeer gelijkaardig is aan glucose. Het enige verschil is de substitutie van de hydroxylgroep op de 2' positie van het glucose molecule door een <sup>18</sup>F radionuclide. FDG wordt gebruikt met positron emissie tomografie (PET) om een beeld te vormen van regio's met een abnormaal hoge glycolytische activiteit. PET is immers een toepassing van beeldvorming in de medische diagnostiek. Deze techniek steunt op het feit dat tumoren een verhoogd vermogen hebben tot het opnemen en verteren van glucose in vergelijking met normale cellen [4].

## 1.2. Probleemstelling

Bij het ontmantelen van nucleaire installaties moet het genereren van radioactief afval geminimaliseerd worden. Dit afval zendt immers radioactieve straling uit en kan bijgevolg schade toebrengen aan mens en milieu. Het afval dient gecontroleerd te worden totdat de activiteit gedaald is tot een aanvaardbaar niveau. Zo zal categorie A radioactief afval reeds voor 300 jaar van mens en milieu geïsoleerd moeten worden [5]. Het beheer, de opvolging en de verwerking van dit afval is bijgevolg dan ook een stuk complexer en duurder dan de procedure voor gewoon afval. De kosten van de verwerking van het radioactief afval worden gedragen door de exploitant van een nucleaire installatie en kunnen zeer hoog oplopen.

Daarom moet geprobeerd worden om zoveel mogelijk materiaal, apparatuur en gebouwen vrij te geven, dit is het onttrekken aan verdere nucleaire opvolging. Op deze manier kan het vrijgegeven materiaal gebruikt worden voor andere doeleinden of kan het afgevoerd worden als conventioneel afval. Opdat materiaal vrijgegeven kan worden dient er met goedgekeurde methodes aangetoond te worden dat de eventueel resterende activiteit onder bepaalde limieten valt. Deze limieten zijn echter niet gedefinieerd voor metingen waarbij de activiteit is uitgedrukt in Bq/cm<sup>2</sup>.

De voorwaarden om afval vrij te geven via massa-activiteit metingen zijn in reglementeringen vastgelegd. Voor oppervlaktebesmettingen in gebouwen en voor materiaal of apparatuur dat hergebruikt kan worden is dit veel minder het geval.

Aangezien er in het gebouw B20 met vloeibare, radioactieve bronnen is gewerkt is de kans op het voorkomen van dergelijke oppervlaktebesmetting reëel. Het materiaal dat zich in gebouw B20 bevindt zou deels hergebruikt kunnen worden en bevindt zich niet in een toestand om correcte massa-activiteit metingen uit te voeren. Om dergelijke metingen uit te voeren zou het materiaal immers eerst gehomogeniseerd en verkleind dienen te worden en zou het gebouw dus afgebroken dienen te worden. Daarom zullen er oppervlaktemetingen uitgevoerd worden [3]. De huidig toegepaste techniek voor dergelijke metingen is zeer tijdrovend. Deze techniek bestaat immers uit het handmatig meten van het oppervlak met handmonitoren met een klein detectieoppervlak. Hierdoor is een groot aantal intensieve metingen steeds noodzakelijk.

### 1.3. Doelstellingen

Het hoofddoel van deze studie is om een meettechniek te ontwikkelen die kan worden toegepast om te bewijzen dat lokalen of gebouwen kunnen worden vrijgegeven onder de huidige wetgeving of bestaande richtlijnen.

Een eerste doelstelling is om na te gaan welke meetgeometrie het meest geschikt is voor dergelijke metingen en welke collimator het best bij deze geometrie aansluit. Dit doel wordt bereikt wanneer de door de detector en software bepaalde activiteit overeenkomt met de werkelijke activiteit en er gemeten kan worden tot onder de opgelegde vrijgaveniveaus over het volledige oppervlak van de ingestelde meetgeometrie. Ten tweede zal er worden nagegaan wat de ideale afstand is van de detector tot het gemeten materiaal of oppervlak en wat bijhorend de optimale meettijd is bij deze afstand. Er zal getracht worden een afstand te kiezen die toelaat om de metingen uit te voeren binnen een zo kort mogelijke meettijd. Een derde doelstelling was om reeds een lokaal van het besproken gebouw te meten met de ontwikkelde techniek. Indien de uitgewerkte techniek goedgekeurd wordt door de fysische controle, kan deze toegepast worden op materialen of gebouwen met een gelijkaardige contaminatie.

### 1.4. Materiaal en methode

Zoals hierboven reeds aangehaald zal er tijdens de masterproef nagegaan worden welke technieken er mogelijk zijn voor het meten van oppervlaktebesmettingen tot op vrijgaveniveau. Een techniek die door AIB Vinçotte – Controlatom momenteel onderzocht wordt omvat het gebruik van de Falcon 5000® HPGe Detector in combinatie met Genie 2000 en ISOCS software. Deze software maakt het mogelijk om de aanwezige radionucliden te identificeren en mits een correcte kalibratie de activiteit van deze nucliden te bepalen.

De detector is uiterst geschikt voor oppervlaktemetingen omwille van de ISOCS kalibratiesoftware van Canberra. Deze software zorgt ervoor dat er geen traditionele kalibratiebronnen nodig zijn voor het bepalen van de detectie-efficiëntie in functie van de gammaenergie. In plaats daarvan worden complexe geometrieën gesimuleerd op basis van de Monte Carlo berekeningen, wiskundige geometriesjablonen en enkele ingestelde fysische parameters [6]. De belangrijkste eigenschappen van

deze apparatuur voor dit onderzoek zijn echter dat het mogelijk is om grote oppervlakten tegelijkertijd te meten en dat er lage activiteit-niveaus gemeten kunnen worden. Er zal nagegaan worden of deze eigenschappen in de praktijk gebruikt kunnen worden om snel en eenvoudig materialen en oppervlakten te meten.



**Figuur 1: Falcon 5000<sup>®</sup> detector [7]**

De Falcon 5000<sup>®</sup> detector bestaat uit een Broad Energy ,high purity Germanium detector (BEGe) die elektrisch gekoeld wordt m.b.v. pulsbuskoeling. De BEGe detector heeft een hogere efficiëntie, een hogere resolutie en een lagere kostprijs dan de conventionele, coaxiale HPGe detectors. Verder is de Falcon 5000<sup>®</sup> detector ook nog uitgerust met een GM-buis voor een continue bepaling van het dosistempo en een <sup>3</sup>He-buis voor de detectie van neutronen. Deze worden echter niet gebruikt voor deze thesis [7].

Bovenop de meting met de besproken detector zal het oppervlak nog een tweede keer gemeten worden met een Berthold LB124 scintillatiedetector met een meet oppervlak van 170 cm<sup>2</sup> om ervoor te zorgen dat hotspots van radioactiviteit (zeer lokaal verhoogde activiteitsconcentratie) gedetecteerd kunnen worden.

In het eerste hoofdstuk van deze thesis zal er een korte beschrijving gegeven worden van AV Controlatom en de werkzaamheden van dit bedrijf. Daarna zal er in hoofdstuk 3 toegelicht worden wat de functie is van <sup>18</sup>FDG en hoe dit geproduceerd werd. Aangezien alle metingen werden uitgevoerd in gebouw B20 zal er in hoofdstuk 4 een beschrijving gegeven worden van dit gebouw en haar geschiedenis. In hoofdstuk 5 en 6 wordt de werking van germaniumdetectoren en scintillatiedetectoren verduidelijkt en worden de specifieke detectoren besproken die gebruikt zijn voor de uitgevoerde metingen. Hoofdstuk 7 beschrijft de vrijgaveniveaus voor oppervlaktemetingen die toegepast worden in Europa en België en de richtlijnen die bestaan voor vrijgavemetingen waarbij de activiteit is uitgedrukt per eenheid van massa. Vervolgens zal de methode van het onderzoek en de materialen die hierbij gebruikt werden verduidelijkt worden in hoofdstuk 8. De resultaten van het onderzoek zijn beschreven in hoofdstuk 9. Dit hoofdstuk verduidelijkt de keuze van de collimator, meetgeometrie, meettijd en afstand van de detector tot het te meten oppervlak. Verder worden ook de resultaten van het gemeten lokaal hier besproken. Uiteindelijk wordt er in hoofdstuk 10 een samenvattende conclusie gevormd en worden de aanbeveling voor toekomstige studies hier besproken.



## 2. AIB Vinçotte Controlatom

Vinçotte is een geaccrediteerd bedrijf dat voor zijn klanten oplossingen ontwikkelt die de veiligheid, kwaliteit en duurzaamheid binnen hun onderneming waarborgen en verbeteren. Daarenboven dragen deze diensten ook bij tot de kwaliteit, veiligheid en leefbaarheid van de maatschappij. Er wordt gezorgd voor een versterking van de reputatie van de klanten van Vinçotte door o.a. het uitvoeren van testen, metingen, inspecties, het opstellen van certificaten en risicoanalyses en het opleiden van het juiste personeel. Vinçotte is een internationale onderneming met 17 filialen en meer dan 2500 werknemers [8].

AIB Vinçotte Controlatom is opgericht in 1965 en is een erkende klasse I inspectie-instelling. Dit wil zeggen dat het Federale Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC) adviezen kan inwinnen bij bijvoorbeeld de toekenning van een oprichtings- en exploitatievergunning van een klasse 1 nucleaire installatie [9]. Het hoofddoel van deze onderneming is om zowel werknemers, het publiek als het milieu te beschermen tegen de negatieve gevolgen van alle bronnen van ioniserende straling [8].

Om dit doel te bereiken worden er tal van wettelijke opdrachten uitgevoerd bij verschillende exploitanten en installaties. Voorbeelden hiervan zijn radiologie, nucleaire geneeskunde, niveaumetingen met bronnen van ioniserende straling in de industrie en het afvoeren van radioactief afval [1]. Op deze manier wordt zowel de publieke-, medische- als beroepsmatige blootstellingen van de geplande situaties gecontroleerd [10].



Figuur 2: Logo AIB Vinçotte en AV Controlatom

Verder is AV Controlatom verantwoordelijk voor de externe dosimetrische opvolging van werknemers in de nucleaire industrie. AV Controlatom maakt hiervoor gebruik van verschillende soorten dosimeters. Een eerste soort is de OSL (optisch gestimuleerde luminescentie) dosimeter, waarbij een voor ioniserende straling gevoelig keramisch materiaal (BeO) een hoeveelheid energie opslaat die evenredig is met de dosis van de straling. Wanneer het materiaal daarna optisch gestimuleerd wordt, wordt er een deel van deze energie opnieuw vrijgegeven in de vorm van licht. De intensiteit van dit licht wordt gemeten en is evenredig met de opgelopen dosis [11].

Een tweede soort dosimeter die gebruikt wordt door Controlatom is de TLD (thermo luminescente dosimeter) extremiteiten dosimeter. Hierbij wordt er in een materiaal dat gevoelig is voor ioniserende straling (LiF) een hoeveelheid energie opgeslagen die proportioneel is met de dosis. Deze energie wordt opnieuw vrijgesteld wanneer het materiaal opgewarmd wordt. Deze dosimeters

worden vooral gebruikt waar de stralingsbelasting zeer hoog is en het nuttig is om de dosimeter in de vorm van bijvoorbeeld een ring te dragen, dicht bij de plaats van blootstelling van het lichaam, met name de handen [12].

Een laatste type dosimeter is de neutronen dosimeter die gebruikt wordt wanneer er een kans bestaat op een blootstelling aan neutronen. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van twee isotopen van lithium waarvan er een gevoelig is voor zowel neutronen als fotonen en de andere enkel voor fotonen. Op die manier kan er een inschatting gemaakt worden van de neutronendosis [13].

Daarnaast beschikt AV Controlatom over de deskundigheid van erkende veiligheidsadviseurs klasse 7 (VA7) die eveneens erkend zijn voor het uitvoeren van fysische controles. De kennis van deze adviseurs zorgt voor de nodige controles en advies bij het laden, lossen, verpakken en het vervoer van radioactieve stoffen over de weg (ADR) en per spoor (RID) [14].

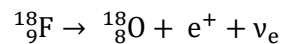
Uiteindelijk is AV Controlatom ook nog in het bezit van een laboratorium waar onderwerpen als gammaspectrometrie en analyse van radioactief materiaal onderzocht worden en worden er binnen de onderneming opleidingen aangeboden over o.a. ADR en stralingsbescherming [15] [16].

### 3. Productie van Fludeoxyglucose(<sup>18</sup>FDG)

Dit hoofdstuk beschrijft de nuttige functies van <sup>18</sup>FDG als aanloop op hoofdstuk 4 dat de productie van dit molecuul beschrijft. <sup>18</sup>FDG werd geproduceerd in het gebouw waarin alle metingen, die beschreven zijn in deze thesis, uitgevoerd werden. Daarom is het van belang om de eigenschappen van dit molecuul te begrijpen.

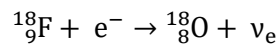
#### 3.1. Fluor-18

Fluor-18 is een radioactieve isotoop van het halogeen fluor met een halveringstijd van 109,8 minuten. Dit radionuclide verval enerzijds, voor 97%, via β<sup>+</sup>-verval tot het stabiele zuurstof-18. Hierbij wordt er een positron en een neutrino uitgezonden naar aanleiding van de omzetting van een proton tot een neutron in de kern [17]. De maximale energie die vrijkomt bij dit verval bedraagt 633,9 keV [18].



Het uitgezonden positron zal annihileren met een elektron met als gevolg het uitzenden van 2 fotonen in tegengestelde richtingen met elk een energie van 511keV.

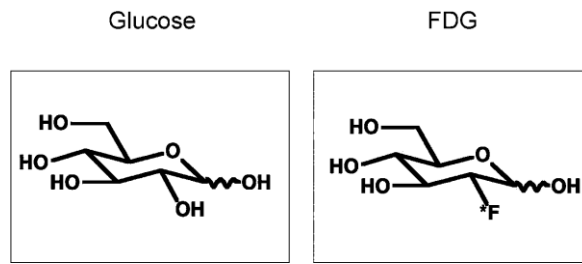
Anderzijds verval <sup>18</sup>F via elektronenvangst eveneens tot zuurstof-18. Hierbij wordt er een atomair elektron van de binnenste K- of L- schillen opgenomen in de kern met als gevolg dat een proton wordt omgezet in een neutron. De gevormde kern zal onstabiel zijn en vervallen door het uitzenden van een neutrino [17]. De energie die vrijkomt bij dit verval bedraagt 1,65 MeV [18].



Er zal ook een X-straal worden uitgezonden wanneer de vacature op de K- of L-schil wordt opgevuld met een elektron uit een verder gelegen schil. Uiteindelijk worden er ook nog Augerelektronen uitgezonden.

#### 3.2. Fludeoxyglucose (<sup>18</sup>FDG)

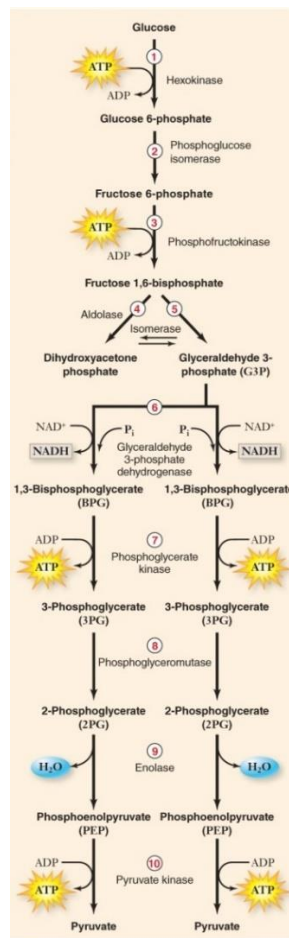
2-deoxy-2-(<sup>18</sup>F)fluor-D-glucose of kortweg fludeoxyglucose is een molecuul dat zeer gelijkaardig is aan glucose. Het enige verschil is de substitutie van het <sup>18</sup>F radionuclide in plaats van de hydroxylgroep op de 2' positie van het glucosemolecuul zoals te zien is in de volgende figuur. FDG wordt gebruikt met positron emissie tomografie (PET) om een beeld te vormen van regio's met een abnormaal hoge glycolytische activiteit. Deze techniek steunt op het feit dat tumoren een verhoogd vermogen hebben tot het opnemen en verteren van glucose in vergelijking met normale cellen [4].



**Figuur 3: Moleculaire structuur van glucose (links) en FDG (rechts) [19]**

Omwille van zijn analoge structuur zal FDG op dezelfde manier als glucose getransporteerd worden van het bloed naar het weefsel. In de cel gebeurt glycolyse in het cytoplasma waarbij er 2 pyruvaatmoleculen gevormd worden die uiteindelijk aanleiding geven tot de productie van energie voor de cel [20].

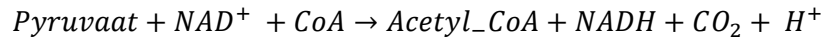
Om een beeld te vormen van de toepassing van FDG, zal eerst de glycolyse in een tumorcel besproken worden. In de eerste stap van het proces wordt glucose omgezet tot fructose 1,6-difosfaat onder invloed van 2 ATP moleculen (endo-energetisch). Fructose 1,6-difosfaat zal dan splitsen in 2 fosfaten met elk 3 koolstofatomen. Deze moleculen zullen dan via een reeks van reacties, die te zien zijn in onderstaande figuur, reageren tot de vorming van 2 pyruvaatmoleculen en 4 ATP moleculen (exo-energetisch) [20].



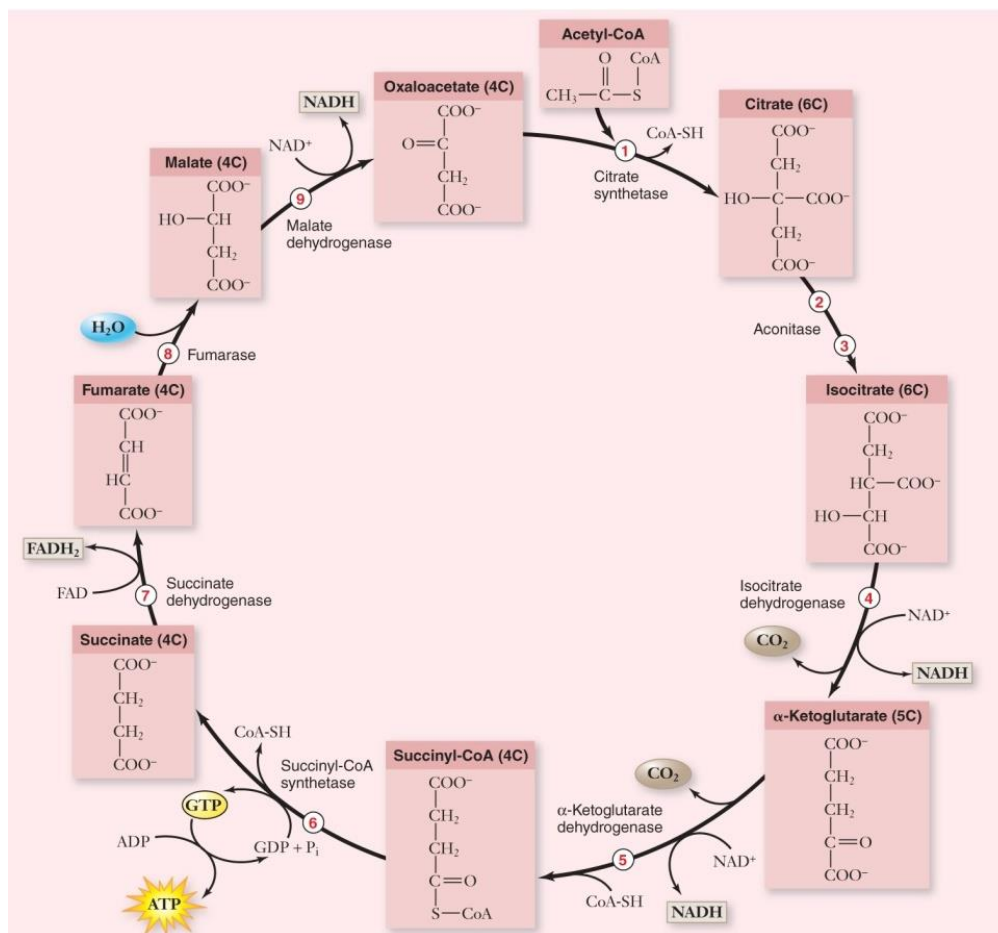
**Figuur 4: Schematische voorstelling van glycolyse in een cel [20]**



De geproduceerde pyruvaatmoleculen zijn een bron van energie. Wat er met deze moleculen gebeurt is afhankelijk van de aanwezige zuurstofconcentratie. In een gewone cel is er als gevolg van een voldoende bloed- en dus ook zuurstoftoevoer sprake van een aerobe conditie. In deze omstandigheden zal pyruvaat geoxideerd worden in een decarboxylatie reactie tot acetyl-co-enzyme A en CO<sub>2</sub> met behulp van co-enzyme A en NAD<sup>+</sup> als elektronacceptor [20]. Dit proces kan beschreven worden volgens onderstaande reactie:



Het geproduceerde NADH molecule wordt samen met Acetyl-co-enzyme A gebruikt in de Krebs cyclus voor de productie van 36 ATP moleculen [4]. Deze cyclus wordt voorgesteld in onderstaande figuur. In een tumor is de bloedtoevoer verschillend van deze van een normale cel en zullen deze reacties ook anders verlopen.

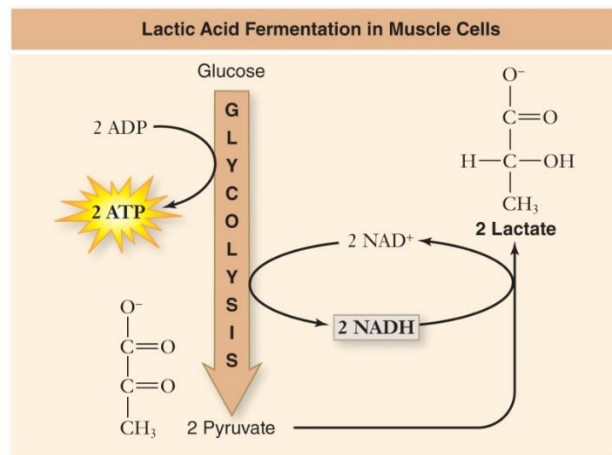


Figuur 5: Voorstelling van de reacties in de Krebs cyclus [20]

In een normale cel wordt de groei van de cel geremd door o.a. de omliggende cellen, de aanwezige nutriënten, het zuurstofgehalte en het metabolisme van de cel. Deze factoren zijn grotendeels afhankelijk van de bloedtoevoer. Bij een beginnende tumor zijn er slechts weinig bloedvaten aanwezig en zijn ze door mutaties bovendien immuun voor groeiremmende factoren. Door het gebrek aan bloedvaten zullen glucose- en zuurstofmoleculen de tumor slechts door diffusie doorheen de tumorcellen kunnen bereiken [4].

Logischerwijs zou er verondersteld worden dat er hierdoor hypoxie en een tekort aan glucose is in de tumor. Het tegendeel is echter waar. Tumoren hebben een grotere glycolytische activiteit dan gewone

cellen o.w.v. hun snelle groei, maar sturen de geproduceerde pyruvaatmoleculen niet doorheen de Krebs cyclus. In plaats daarvan worden deze omgezet tot melkzuur m.b.v. melkzuurdehydrogenase. Normaal komt deze vorm van glycolyse enkel voor in anaerobe condities omdat de productie van ATP lager ligt dan bij aerobe omstandigheden, maar in tumoren kan dit, wegens de aanpassingen in de beginnende hypoxiefase ook optreden in de aanwezigheid van zuurstof. Dit is het Warburg effect. Hierdoor zullen tumoren deze vorm van glycolyse blijven toepassen, zelfs bij hogere zuurstofconcentraties [4]. In onderstaande figuur wordt het proces van de omzetting van pyruvaat naar melkzuur schematisch weergegeven.



Figuur 6: Schematische voorstelling van de omzetting van pyruvaat naar melkzuur [20]

Aangezien  $^{18}\text{F}$ FDG dezelfde chemische structuur heeft als glucose wordt het ook op dezelfde manier getransporteerd van het bloed naar het weefsel als glucose. In het weefsel of tumor zullen beide stoffen met elkaar concurreren in het glycolyseproces. Beide stoffen worden onder invloed van hexokinase omgezet tot  $^{18}\text{F}$ FDG-6-fosfaat en glucose-6-fosfaat zoals te zien in de eerste stap van Figuur 4. FDG-6-fosfaat zal echter niet verder gemetaboliseerd worden tot pyruvaat en heeft daarenboven een zeer lage membraanpermeabiliteit. Hierdoor zal FDG-6-fosfaat opgestapeld worden in het weefsel of tumor en is het dus een goede indicatie voor het glucosegebruik van het weefsel. Aangezien tumoren een hoge glucoseconsumptie hebben, zal de concentratie aan  $^{18}\text{F}$ FDG-6-fosfaat eveneens hoog zijn [21].

## 4. Situering en geschiedenis

Dit hoofdstuk handelt over de geschiedenis van gebouw B20. Dit betekent dat er beschreven wordt hoe  $^{18}\text{F}$ FDG, dat in het vorige hoofdstuk behandeld werd, geproduceerd werd en welke besmettingen er ten gevolge van deze productie aanwezig kunnen zijn.

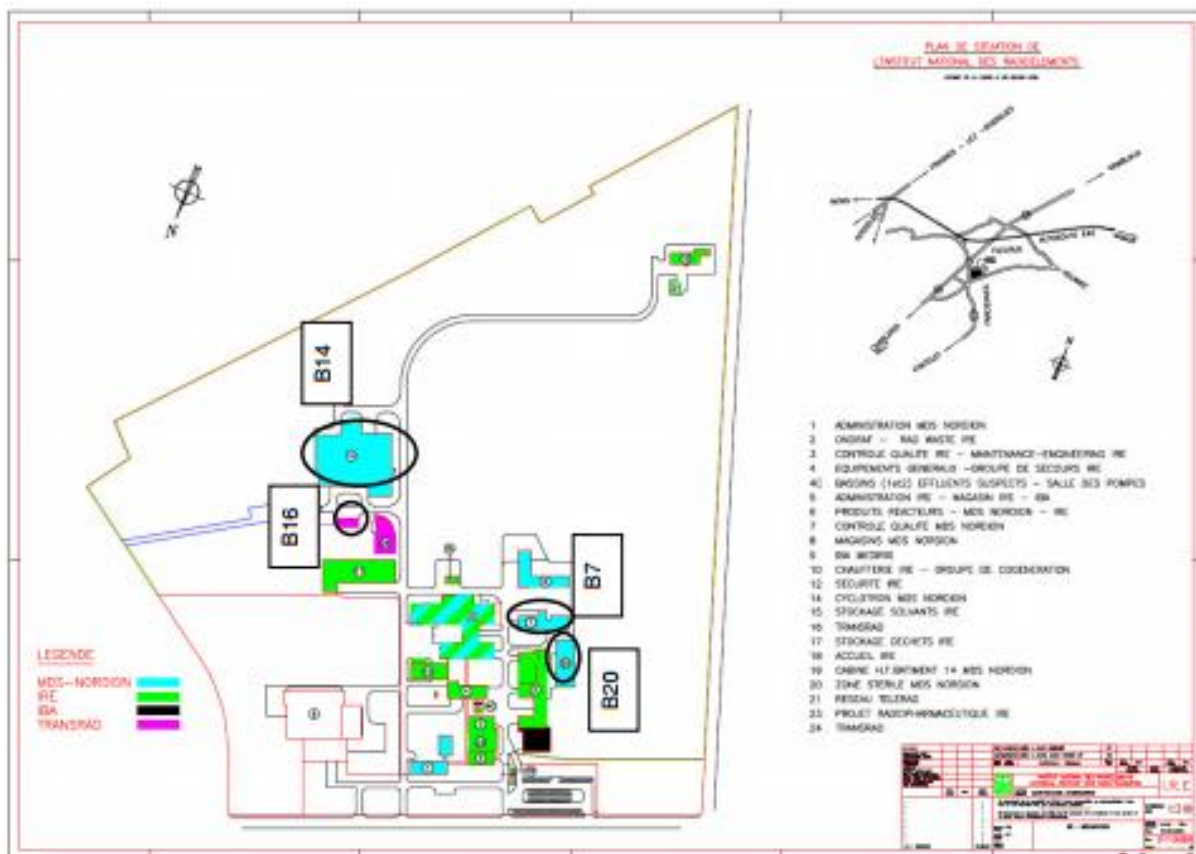
### 4.1. Geschiedenis

Nordion international is een Canadese onderneming die reeds bestaat sinds 1946. Nordion international is een producent en leverancier van verschillende radionucliden en bijhorende apparatuur. Vanaf 1990 besloot Nordion een deel van de activiteiten van het IRE (nationaal Instituut voor Radio Elementen), dat gevestigd was in Fleurus, over te nemen en dus radionucliden te produceren voor zowel medische- industriële- en wetenschappelijke doeleinden. Vanaf 1996 werd Nordion in de MDS groep geïntegreerd. In 2002 bestond er een samenwerking tussen de Universiteit van Luik, die beschikt over een cyclotron, en MDS Nordion om  $^{18}\text{F}$ FDG onder de naam glucotrace te produceren en te verkopen in België, Frankrijk en Nederland [22].

De focus van de faciliteit in Luik lag echter bij onderzoek en was dus niet voorzien op de productie van industriële hoeveelheden  $^{18}\text{F}$ FDG. Om deze reden besloot MDS Nordion om zijn productie te verplaatsen naar Fleurus. De herstructurering van deze site vond plaats in 2004-2005. Voor het gebouw B-20, dat voordien gebruikt werd voor werkzaamheden met niet-radioactieve producten in een steriele zone, betekende dit dat het zonder vrijgaveprocedure gebruikt kon worden voor de productie van  $^{18}\text{F}$ FDG [22]. In 2011 werden de faciliteiten van MDS Nordion overgenomen door de Amerikaanse groep Team Best en op 19 mei van dat jaar werd de exploitatievergunning van een inrichting van klasse IIA door het FANC toegekend aan Best Medical Belgium. Begin 2012 werd Best Medical Belgium failliet verklaard. Wegens gebrek aan financiële middelen werd NIRAS aangesteld voor de ontmanteling en sanering van de site [23].

Het  $^{18}\text{F}$  werd geproduceerd door het reeds aanwezige IBA 30 MeV cyclotron in gebouw B-14 op een trefschijf bestaande uit een niobium (Nb) of zilver (Ag) caviteit met daarin verrijkt water met 95-98 % zuurstof-18 ( $^{18}\text{O}$ ). De reactie die hierbij plaatsvindt, is  $^{18}\text{O} (p,n) ^{18}\text{F}$ . Hiervoor werd een gebruiksvergunning van klasse 2 toegekend door het FANC voor het bezit en de productie van F-18 tot een maximale activiteit van 592 GBq per productie (2 uur per productie) [22]. Er werden 3 producties per dag voorzien gedurende 5 dagen per week. Het geproduceerde F-18 werd daarna getransporteerd in een gesloten container naar gebouw B-20 voor de synthese van FDG [22]. De dosislimieten voor dit transport zijn max. 2 mSv/h bij contact en 100  $\mu\text{Sv/h}$  op een afstand van 1m, maar overschreden echter nooit 2 $\mu\text{Sv}$  per transfer. Dergelijke transfer duurde maximaal 30 minuten [22], [24].

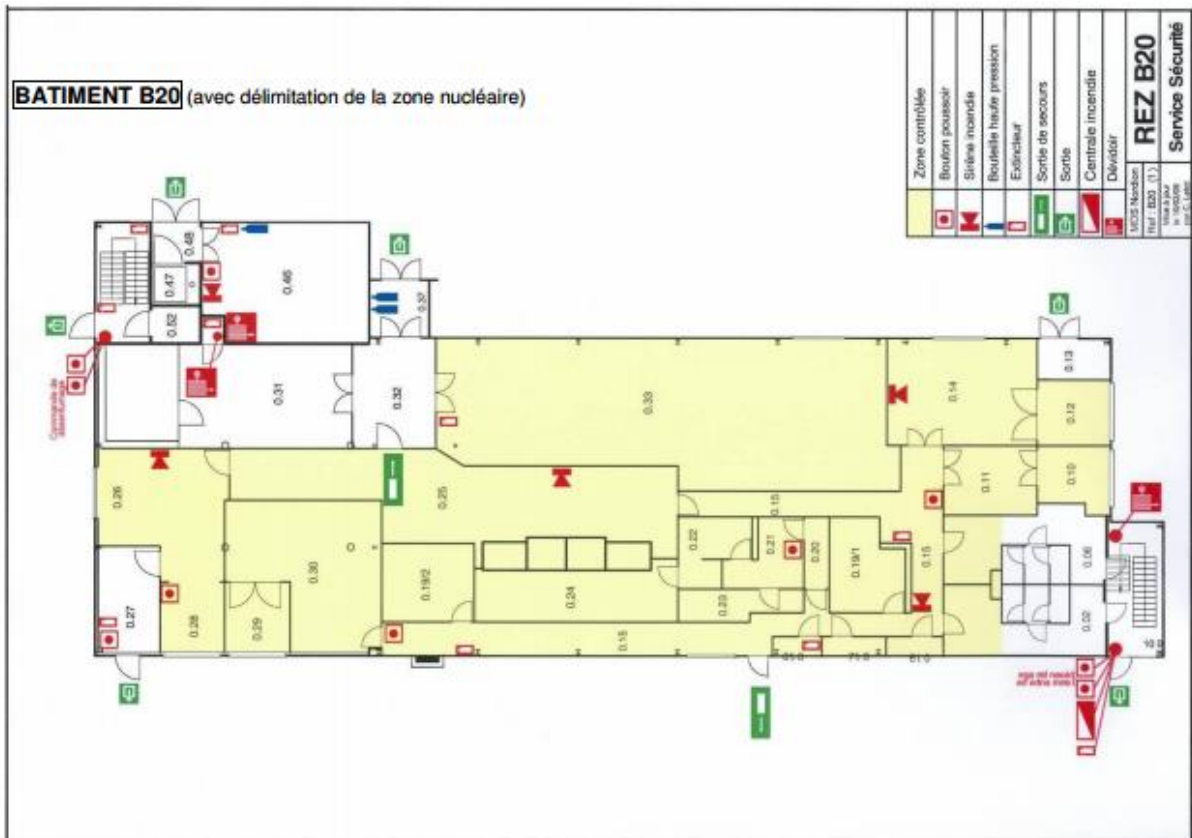
In gebouw B7 werd de kwaliteitscontrole van de productiestandaard uitgevoerd en in gebouw B16 werden de transportcontainers die terugkwamen van de gebruikers behandeld na een voorafgaande radiologische controle. Dankzij de korte halveringstijd van F-18 werd het radioactief afval geproduceerd tijdens de synthese van  $^{18}\text{F}$ FDG opgeslagen voor vervalstockage [22]. De locatie van deze gebouwen is gevisualiseerd in de plattegrond op de volgende pagina.



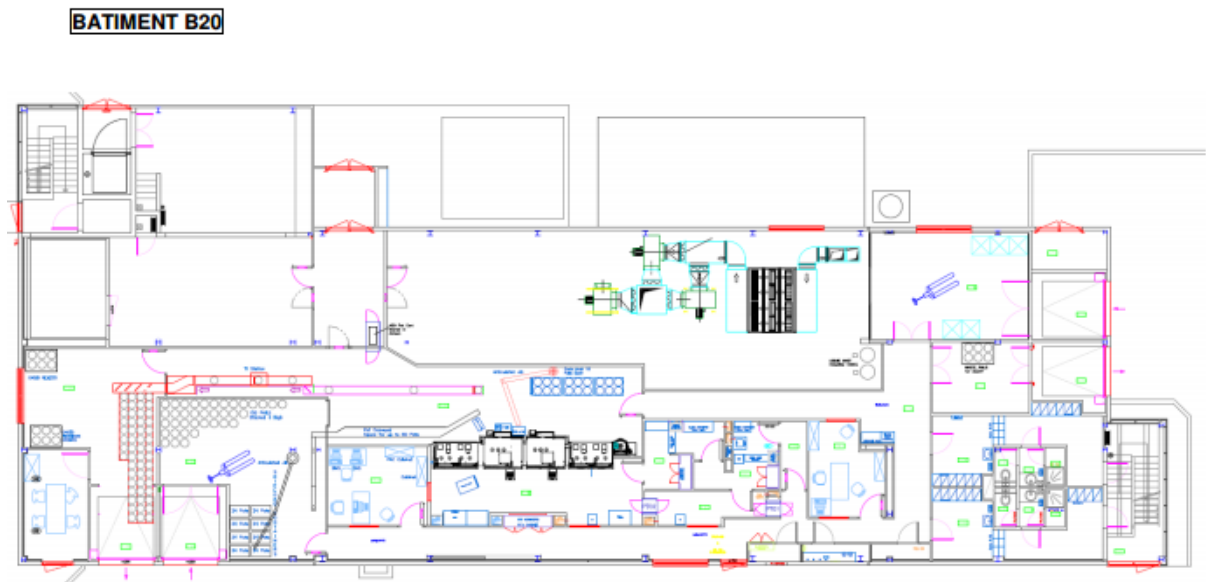
Figuur 7: Plattegrond NIRAS site Fleurus [22]

#### 4.2. Gebouw B20

Het gebouw waarin de synthese van  $^{18}\text{FDG}$  plaatsvond bestaat uit verschillende materialen. De buitenmuren zijn bekleed met metaal en de binnenmuren bestaan uit baksteen, beton of gipsplaat. De muren en de vloer zijn afwasbaar en decontamineerbaar. De plattegrond van de gecontroleerde zone van gebouw B20 is te zien in volgende figuren.



Figuur 8: Plattegrond gecontroleerde zone B20 [22]



Figuur 9: Plattegrond gecontroleerde zone B20 met illustraties van de aanwezige installaties [22]

Naast het gebouw zelf kan ook het nog aanwezige materiaal hergebruikt worden. Het is dus nuttig om ook te proberen om deze materialen vrij te geven. De algemene voorzieningen in gebouw B20 zijn: een ventilatiesysteem, een filtratiesysteem, een verwarmings- en bevochtigingssysteem, een aanvoer van warm- en koud water en gecomprimeerde lucht, meubels voor het laboratorium en de bureaus, een branddetectie- en brandblussysteem, telefoons en een goederenlift. Het ventilatiesysteem bestaat uit 2 delen, een eerste deel voor het behandelen van de lucht van de gecontroleerde zone waar nucleaire

activiteiten plaatsvonden en een tweede deel voor het behandelen van de lucht die niet in aanraking is geweest met radioactieve bestanddelen. Het doel van het ventilatiesysteem is om de gecontroleerde zone op een lagere druk te houden in vergelijking met de niet-gecontroleerde zone (zodat er een constante luchtstroom ontstaat naar de gecontroleerde zone), de lucht in de lokalen te verversen en de lucht m.b.v. filters te zuiveren alvorens deze terug in het milieu te brengen [22].

Het verzamelen van de kleine hoeveelheid vloeibaar, radioactief afval gebeurde in een gesloten circuit aangedreven door een pomp. Het afval werd opgeslagen in twee tanks die in de gecontroleerde zone geplaatst zijn. Wanneer de tanks vol waren, werd de fysische controle verwittigd en werd het afval geanalyseerd. Merk op dat F-18 een zeer kleine halveringstijd heeft en dat vervalstockage dus mogelijk is [22]. Er zijn echter wel onzuiverheden aanwezig in het afval wat er voor zorgt dat een vrijgaveprocedure vier jaar na de laatste productie noodzakelijk is.

Het lokaal dat werd gemeten met de in deze thesis beschreven techniek is lokaal 20.0.11 en wordt met 0.11 aangegeven op Figuur 8. Dit lokaal deed dienst als opslagplaats voor het afval van de productie en er bestaat dus een reële kans op besmettingen [22]. De muren van dit lokaal zijn vlak waardoor het mogelijk is om het onderzoek voorlopig te beperken tot een eenvoudige geometrie. De nuclidenvector van dit lokaal wordt later in deze thesis besproken. Deze factoren zorgen ervoor dat dit lokaal zeer geschikt is om te meten met de ontwikkelde techniek.

### 4.3. Productie in gebouw B20

De productie van FDG werd uitgevoerd door een operator in een van de drie synthescellen. Het eindproduct dient een activiteit te bezitten van 7,4 GBq per recipiënt. Het verpakken van het eindproduct werd eveneens gedaan door een operator in een van de twee verpakkingscellen. De ruimtes waarin deze taken werden uitgevoerd zijn te zien in onderstaande afbeeldingen.



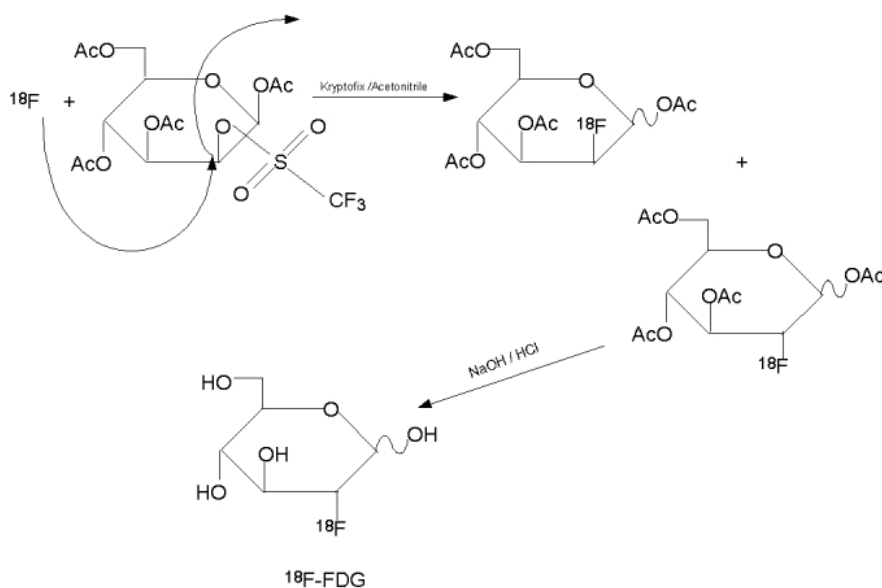
Figuur 10: Verpakkingszone





**Figuur 11: Productiecellen**

Het proces dat werd uitgevoerd is een nucleofiele substitutie met Kryptofix 222 als katalysator. Een nucleofiele substitutie is een reactie met een nucleofiel molecule (negatief geladen) en een leaving groep (elektronenzuigende groep die gebonden is met een zwakke binding aan een partieel positieve kern). Het resultaat van deze reactie is dat het nucleofiel molecule de leaving groep vervangt met als gevolg een verandering van de initiële stereochemie [25]. In dit proces is het  $^{18}\text{F}$  ion de nucleofiele groep en 1,3,4,6-tetra-O-acetyl-2-O-trifluormethaansulfonyl-beta-D-mannopyranose (of kortweg mannosetriflaat) het initiële molecule [26]. Op dit molecule zijn de koolstoffen op de 1,3,4 en 6 posities afgeschermd met een acetyl groep waardoor de trifluormethaansulfonaat (triflaat) op positie 2 kan optreden als leaving groep. De reactie is te zien in onderstaande figuur.



**Figuur 12: Synthese van  $^{18}\text{F}$ -FDG door nucleofiele substitutie [25]**

Een eerste stap in dit proces is het concentreren van de  $^{18}\text{F}$  door het te isoleren van het verrijkte  $^{18}\text{O}$ -water. Dit wordt gedaan d.m.v. een ionenwisselaar. Het  $^{18}\text{F}$ -ion wordt tegengehouden door de ionenwisselaar, terwijl het  $^{18}\text{O}$ -water door de kolom kan stromen en opgevangen wordt voor hergebruik.  $^{18}\text{F}$  wordt dan uitgewassen met een oplossing van acetonitril, Kryptofix-222 en kaliumcarbonaat. De functie van Kryptofix-222 in combinatie met kaliumcarbonaat is om te fungeren als tegen ion voor  $^{18}\text{F}$  zonder te reageren en dus te interfereren met de synthese. Dit is nodig opdat  $^{18}\text{F}$  zijn reactiviteit behoud in een waterig milieu [22], [25].

De tweede stap bestaat uit het verdampen van het resterende  $^{18}\text{O}$ -water. Het voordeel van de elutie met acetonitril in de vorige stap is dat het een azeotropisch mengsel vormt met water en de samenstelling dus gelijk blijft na verdamping. De verdamping gebeurt bij  $95^\circ\text{C}$  en een relatieve druk van  $-0.8$  bar. Tijdens het proces is er een stroom van stikstof zodat het verdampte water samen met acetonitril verwijderd wordt [22], [25].

Na verdamping zal de nucleofiele substitutie plaatsvinden zoals aangegeven in Figuur 12. Het  $^{18}\text{F}$ -ion wordt toegevoegd aan de precursor (mannose triflaat). De acetylgroepen beschermen de hydroxylgroepen waardoor de substitutie optreed bij de triflaatgroep op de koolstof op positie 2. Na de substitutie is er nog een hydrolyse over een chromatografiekolom met een klein volume van  $2\text{M}$   $\text{NaOH}$  gedurende 2 minuten ter verwijdering van de acetylgroepen en vorming van  $^{18}\text{F}$ -FDG. Uiteindelijk wordt er geëluëerd met water om het eindproduct uit de kolom te verkrijgen [22], [25].

Wanneer het eindproduct verkregen is, wordt het verdund tot de gewenste activiteit concentratie en via een stroom van stikstof naar de distributie cel in lokaal 20.0.30 verplaatst. Hier wordt er een tweede meting van de activiteit concentratie uitgevoerd en worden de zowel de flesjes als de containers geëtiketteert, waarna het flesje in een container van lood wordt geplaatst [22].

#### 4.4. Aanwezige radionucliden in gebouw B20 – nuclidenvector

De aanwezige radionucliden als gevolg van de productie van  $^{18}\text{F}$ FDG werden zowel theoretisch als experimenteel verschillende keren onderzocht. Er werden telkens enkel oppervlaktecontaminaties gevonden, nooit is er sprake van activatie. Er is geen activatie in gebouw B20 omwille van het feit dat er geen cyclotron aanwezig is in dit gebouw. De productie was immers gescheiden tussen gebouw B14 en B20. De volgende methoden werden gebruikt voor de bepaling van de aanwezige radionucliden: [3]

- Theoretische bepaling a.d.h.v. het veiligheidsrapport van 21/09/2012;
- Theoretische bepaling rekening houdend met het radioactief verval o.b.v. het Bel V rapport: R-cl2-PI-085-0-f van 05/09/2012;
- Experimentele bepaling in maart 2009 op aanvraag van de producenten van glucotracers met een activiteit die groter is dan  $370 \text{ MBq/ml}$ ;
- Spectroscopische analyse van stalen van de productiecellen in mei 2013.

De resultaten van bovenstaande onderzoeken zijn weergegeven in de volgende tabel. De markering X duidt aan dat het radionuclide aanwezig is.



Tabel 1: Aanwezige radionucliden in B20 [3]

Radionuclide	T <sub>1/2</sub> (dagen)	Veiligheidsrapport	Rapport Bel V	Metingen 03/2009	Metingen 05/2013
Co-57	271,79	X	X	X	X
Cu-67	2,58			X	
Re-181	0,83	X		X	
Mo-93m	0,29	X		X	
Co-58	70,86		X	X	X
Mn-54	312,20		X	X	X
Co-56	77,26	X	X	X	X
Co-55	0,73			X	
V-48	15,97	X		X	
Ni-57	1,48			X	
Mn-52	5,59			X	
Re-182	0,53	X			
Nb-92	10,15	X			
Be-7	53,55	X			
Co-60	1934,00		X		

De laatste productie van FDG in gebouw B20 vond plaats in mei 2012. Dit verklaart het verschil tussen de aanwezige nucliden in 2009 toen de productie nog op gang was en de metingen in mei 2013 toen de productie reeds een jaar gestopt was. De nucliden met een lage halveringstijd waren na een jaar immers reeds vervallen en bijgevolg niet meer aanwezig. Het rapport van Bel V en de metingen die in 2013 zijn uitgevoerd, komen overeen met als uitzondering de aanwezigheid van Co-60. Co-60 werd echter nooit experimenteel aangetoond en dus kan er vanuit gegaan worden dat dit nuclide niet aanwezig is [3].

In 2014 werden er stalen gemeten die tijdens de metingen van mei 2013 genomen werden in de productiecellen en bewaard werden om later te meten. Hieruit bleek dat Co-57 en Mn-54 telkens aanwezig waren. Ook waren Co-56 en Co-58 aantoonbaar, maar in concentraties die veel kleiner zijn dan Co-57, respectievelijk 0,7 en 0,8 Bq voor 100 Bq Co-57. Daarom worden deze nucliden dus niet in rekening gebracht bij de uit te voeren metingen. Verder werd er ook Re-184m en Zn-65 teruggevonden, maar deze werden eveneens niet in rekening gebracht omdat enerzijds de activiteit hiervan slechts 1/100 van de activiteit van Co-57 en Mn-54 bedroeg en anderzijds de halveringstijd van deze nucliden zeer klein is. Uiteindelijk werd er ook nog Na-22 gevonden. Maar deze nuclide wordt eveneens genegeerd omwille van zijn zeer lage activiteit (veel lager dan Co-57) [3].

Uiteindelijk kan er dus gesteld worden dat de enige radionucliden die aanwezig zijn en waarmee rekening gehouden dient te worden bij vrijgavemetingen in gebouw B20, Co-57 en Mn-54 zijn. Dit komt omdat er momenteel slechts 1 vrijgavewaarde bestaat voor alle isotopen. Aangezien Co-57 de hoogste resterende activiteit bezit zullen de activiteiten van de overige aanwezige nucliden eveneens onder het vrijgavelimiet vallen wanneer Co-57 hieronder valt. Verder is het ook geen probleem dat de activiteit van een bepaald nuclide groter wordt dan Co-57 wanneer het gebouw vrijgegeven wordt in 2016 of 2017.



## 5. Germaniumdetectoren

Bij het uitvoeren van de metingen die noodzakelijk zijn voor het definiëren van de ontwikkelde techniek werd er gewerkt met verschillende detectoren. Het werkingsprincipe en een duidelijke beschrijving van deze detectoren worden in hoofdstuk 5 en 6 beschreven.

### 5.1. Halfgeleiderdetectoren

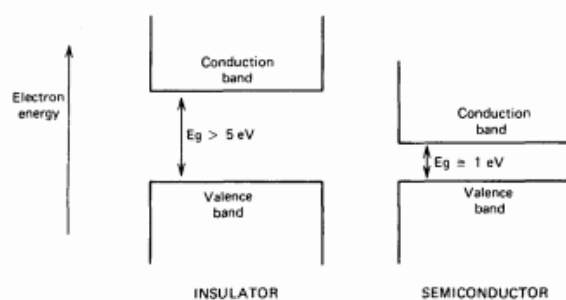
De materialen die gebruikt worden voor de detectie van ioniserende straling moeten aan bepaalde vereisten voldoen.

- Het materiaal mag niet van nature geleidend zijn.
- De ladingsdragers moeten een voldoende hoge mobiliteit hebben zodat er bij de aanwezigheid van een puls veel vrije elektronen zijn die makkelijk kunnen bewegen doorheen het materiaal. Bij afwezigheid van een puls dienen er echter zo weinig mogelijk vrije elektronen aanwezig te zijn in het materiaal. Dit is te beperken door koeling.
- Het materiaal moet een groot elektrisch veld kunnen weerstaan opdat er een snelle collectie kan gebeuren van de ladingsdragers.
- Er moeten voldoende ladingsdragers gecreëerd worden bij het invallen van ioniserende straling.

Materialen die aan deze vereisten voldoen zijn o.a. halfgeleiders. Voorbeelden hiervan zijn silicium en germanium. De elektronen die in deze materialen voorkomen zullen zich verdelen over vaste energiebanden die gescheiden zijn door energiekloven [27].

De energiebanden die interessant zijn voor gammaspectrometrie zijn enerzijds de valentieband en anderzijds de conductieband. De valentieband komt overeen met elektronen die zich in de buitenste schil van het atoom bevinden. In silicium en germanium zorgen deze elektronen voor de interatomaire krachten door covalente bindingen. De hoger gelegen energieband, de conductieband, bevat elektronen die zich vrij doorheen het kristal kunnen bewegen en dus voor geleiding zorgen. Afhankelijk van het type materiaal wijzigt de afstand tussen deze energiebanden [27].

Voor isolatoren is deze afstand groot, waardoor er dus geen elektronen in de conductieband zitten en er dus slechts zeer weinig geleiding is. Voor halfgeleiders is deze kloof kleiner waardoor er bij een kleine puls van energie reeds elektronen in de conductieband terecht komen. Bij geleiders kunnen elektronen reeds overgaan naar de geleidingsband wanneer er een zeer lage thermische energie wordt toegevoegd. Een voorstelling van deze energiebanden is te zien in onderstaande figuur [27].



Figuur 13: Voorstelling van het verschil tussen de bandkloof van een isolator en een halfgeleider [27]

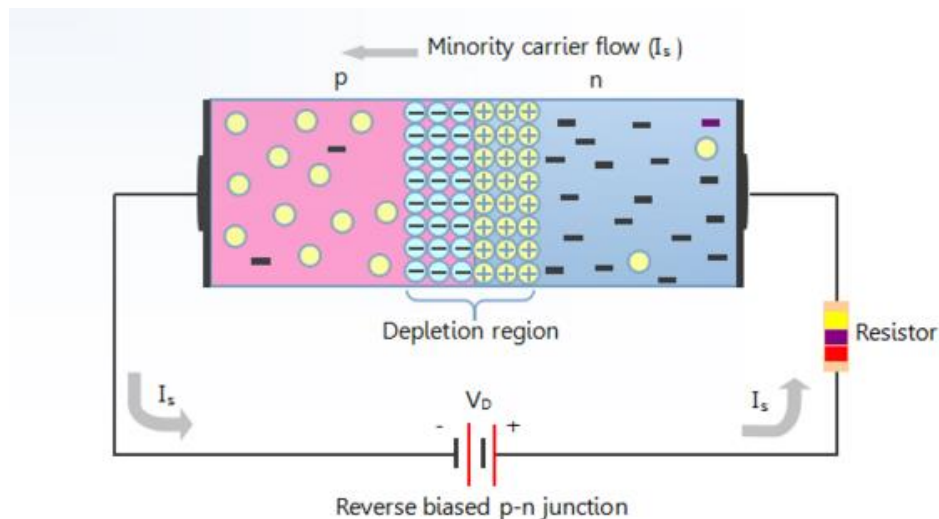
In hun grondtoestand is de buitenste valentieband van de halfgeleiders volledig gevuld met elektronen en zijn er zo weinig mogelijk elektronen aanwezig in de conductieband. De energiekloof tussen de valentie- en conductieband is voldoende groot zodat elektronen slechts in zeer beperkte mate kunnen exciteren naar de conductieband. Bij silicium bedraagt deze kloof 1,2 eV, bij germanium is dit slechts 0,665 eV.

Bij elke temperatuur verschillend van 0 K beschikken de elektronen echter over een hoeveelheid thermische energie en kunnen ze overgaan naar de conductieband. Op deze manier wordt er een elektron-holte paar gevormd en ontstaat er een thermische lekstroom [27].

Uiteraard is het ook niet mogelijk om een perfect zuiver kristal te ontwikkelen en draagt bijgevolg ook het aantal onzuiverheden dat aanwezig is in het kristal bij tot een kleiner aantal elektron-holteparen dat gevormd wordt bij het invallen van straling [27]. Dit probleem kan verholpen worden door het ontwikkelen van de halfgeleiders met een pn-junctie. Dit wil zeggen dat een zijde van de halfgeleider bestaat uit een zogenaamde n-type halfgeleider met een elektronenoverschot en de andere zijde bestaat uit een p-type halfgeleider met een grotere hoeveelheid gaten dan elektronen.

In Figuur 14 is er te zien dat de n-zone positief wordt geladen door de migratie van elektronen van de n-zone naar de p-zone omdat de n-zone veel meer elektronen bevat dan de p-zone. De p-zone van de halfgeleider wordt dus negatief geladen door deze diffusie van elektronen. Wanneer er op dit materiaal een elektrisch veld in sper wordt aangelegd, ontstaat er een verarmingsgebied zonder elektron-holteparen. Dit is het actieve deel van de detector [27].

Bij HPGe detectoren kan er bij een spanning van 3000 tot 5000 V reeds een groot verarmingsgebied bekomen worden. De gebruikte detector voor deze thesis werkt met een werkspanning van 3000 V.



Figuur 14: Voorstelling pn-junctie [28]

Wanneer er straling invalt op het actieve gebied van de detector worden er ladingsdragers gevormd in de vorm van elektron-holte paren. Deze worden door de aanwezigheid van het elektrisch veld versnelt naar de p- en n- elektrodes. De puls die op deze manier ontstaat is evenredig met de energie van de invallende gammastraling [29].

## 5.2. Basisinteracties in de germaniumdetectoren

Zoals besproken in hoofdstuk 4 blijkt uit voorgaand onderzoek dat er in gebouw B20 slechts 2 nucliden aanwezig zijn met een halveringstijd die lang genoeg is om nog gedetecteerd te kunnen worden. Dit zijn Co-57 en Mn-54 en bij het verval van deze nucliden komen telkens gammastralen vrij. De energieën van de gammastralen die vrijkomen bij dit verval zijn terug te vinden in onderstaande tabel.

Tabel 2: Gamma energie van Co-57 en Mn-54

Co-57		Mn-54	
Energie (keV)	Voorkomen (%)	Energie (keV)	Voorkomen (%)
14,41	9,1600	834,85	100
122,06	85,6000		
136,47	10,6800		
230,29	0,0004		
339,54	0,0139		
352,36	0,0132		
366,75	0,0013		
569,92	0,0170		
692,03	0,1570		
706,40	0,0253		

Er werd gekozen om de metingen uit te voeren met verschillende bronnen. Deze bronnen zijn Ba-133, Cs-137 en Co-57. Deze bronnen werden enerzijds gekozen omdat de geëmitteerde gamma energieën in dezelfde grootteorde liggen als deze van Co-57 en Mn-54 en anderzijds omdat deze bronnen makkelijk beschikbaar waren op de site.

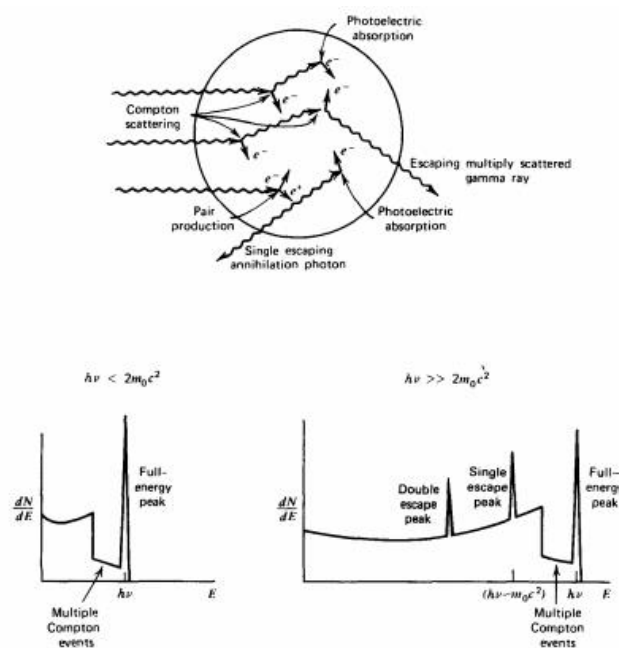
De bronnen werden steeds gemeten met de detector, maar waarbij er telkens een van de volgende factoren wijzigden: meetgeometrie, meettijd, collimator, bronpositie en afstand detector tot bron. Er werd telkens een gammaspectrum bekomen met hierin de aanwezige radionucliden. De amplitudes van de gevonden pieken zijn een maat voor de activiteit van de aanwezige nucliden en de positie op de horizontale as bepaalt de energie van de gedetecteerde fotonen. Deze informatie is noodzakelijk voor de identificatie en kwantificatie van de radionucliden die bij hun verval fotonen uitzenden met discrete energieën.

Er zijn verschillende manieren waarop fotonen met materie kunnen reageren. Afhankelijk van de samenstelling van de materie en de energie van de gammastralen zal een van de volgende fenomenen optreden in het germaniumkristal: [27]

- Foto-elektrische absorptie
- Comptonstrooiing
- Paarvorming

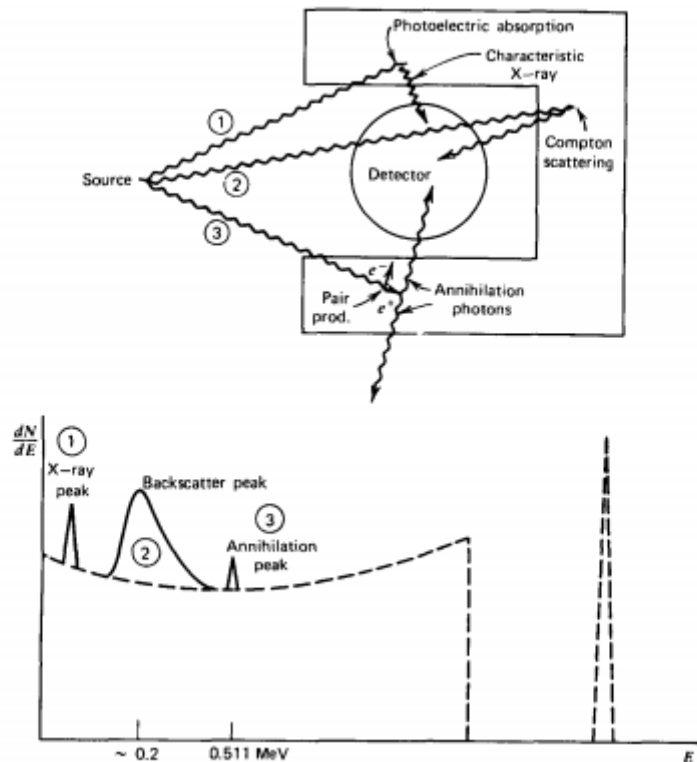
Foto-elektrische absorptie treedt op bij gammaenergieën tot enkele honderden keV en zal dus dominant zijn bij de detectie van de gebruikte bronnen. Bij dit proces zal het foton zijn volledige energie afgeven aan een elektron in het kristal. Dit is terug te zien als de fotopiek in het gammaspectrum. De gevormde holte die het elektron achterlaat kan dan opgevuld worden met het uitzenden van karakteristieke X-straling of Auger elektronen. Wanneer de X-straling ook nog gestopt wordt in het kristal zal dit ook terug te zien zijn in het spectrum. Bij het proces van Comptonstrooiing zal het foton slechts een deel van zijn energie aan een elektron afgeven met als gevolg dat er een

verdeling van de energie over het elektron en het overgebleven foton optreedt. Het foton zal onder een bepaalde hoek verstrooid worden na de botsing met een elektron. In het gammaspectrum is dit terug te zien als een Compton continuüm waarbij de maximale energie steeds lager is dan de fotopiek. Het laatste proces, paarvorming, komt slechts voor vanaf energieën die groter zijn dan 1,02 MeV en zijn dus van minder belang voor de bekomen spectra van dit onderzoek. Tijdens dit proces wordt er een elektron-positron paar gevormd uit het foton in het intense elektrische veld bij de protonen in de kern. Het gevormde positron zal snel annihileren met de vorming van 2 fotonen met elk een energie van 511 keV. Wanneer de detector groot genoeg is kunnen deze fotonen ook nog gestopt worden in de detector. Wanneer een van deze fotonen gestopt wordt is dit te zien in een enkele ontsnappingspiek. Wanneer beide annihilatiefotonen de detector verlaten is dit te zien in een dubbele ontsnappingspiek. Indien de detector groot genoeg zou zijn om de volledige fotonenergie op te vangen zou er enkel een fotopiek te zien zijn in het spectrum. In praktijk is dit echter moeilijk te bereiken, waardoor een spectrum er meestal uitziet zoals in de onderstaande figuur [27].



Figuur 15: Voorstelling van de interacties binnen een reële detector en de voorstelling van een reëel gammaspectrum [27]

Naast interacties met de detector zelf zullen de gammastralen ook interageren met het materiaal rondom de detector. Dit zal zeker een groot effect hebben wanneer er gebruik gemaakt wordt van een collimator aangezien deze zeer groot en robuust zijn en bestaan uit lood. Verder wordt de detector ook nog omringd door andere materialen zoals een bescherming tegen vocht en licht of een afscherming op de achterkant van de detector. Een eerste belangrijk effect is Comptonstrooiing met een materiaal rond de detector. Hierdoor ontstaat er een terugstrooiingspiek in de regio van 200-250 keV. Verder treden er ook nog andere fenomenen op zoals foto-elektrische absorptie dat kan leiden tot het uitzenden van X-stralen die gedetecteerd kunnen worden of annihilatiefotonen bij gammastraling met hoge energieën waardoor er een piek kan ontstaan bij 511 keV [27]. Het belangrijkste effect dat zal optreden bij de proeven die uitgevoerd werden in deze thesis is de detectie de karakteristieke X-stralen door de bescherming rond de detector en de collimator die bestaan uit lood. In de volgende figuur worden de interacties met de materialen rond de detector schematisch weergegeven.



Figuur 16: Interacties van gammastraling met de materialen in de omgeving van de detector [27]

Een ander effect dat kan optreden is het voorkomen van sompieken. Dit verschijnsel komt voor wanneer er 2 of meer gammastralen tegelijk in de detector aankomen. Het kan dan gebeuren dat de detector deze fotonen interpreteert als een enkel foton waardoor de energieën van beide fotonen worden opgeteld. De piek die dan voorkomt in het spectrum komt dan niet overeen met een karakteristieke gamma straal van een radionuclide, maar is de som van de energieën van 2 of meer fotonen.

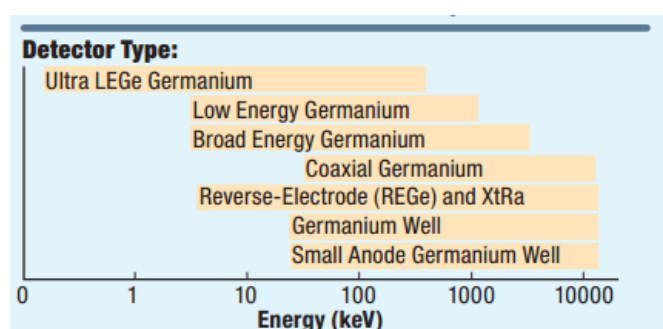
### 5.3. Falcon 5000® HPGe Detector

De Falcon 5000® detector, die gebruikt werd voor het ontwikkelen van deze techniek, is een draagbaar toestel om in situ radionucliden te detecteren en te identificeren. Het toestel bestaat uit een BEGe detector die elektrisch gekoeld wordt m.b.v. pulsbuskoeling. De BEGe detector heeft een hogere efficiëntie, een hogere resolutie en een lagere kostprijs dan de conventionele, coaxiale HPGe detectors. BEGe detectors kunnen fotonen detecteren binnen een energiebereik van 3 keV tot 3 MeV. De hoge resolutie bij lage energieën is te verklaren door het feit dat het kristal een korte en dikke vorm heeft wat er voor zorgt dat de efficiëntie van de detector voor energieën beneden 1 MeV zeer goed is. De BEGe detector detecteert ook een lagere hoeveelheid achtergrondstraling dan conventionele HPGe detectoren omdat het door zijn kort kristal meer hoog energetische, kosmische straling doorlaat zonder interactie. Verder is het ook minder gevoelig voor natuurlijk voorkomende radionucliden die hoog energetische straling uitzenden zoals  $^{40}\text{K}$  en  $^{208}\text{Th}$  [30]. De specificaties van de detector zijn terug te vinden in de volgende tabel [7].

Tabel 3: specificaties BEGe detector [7]

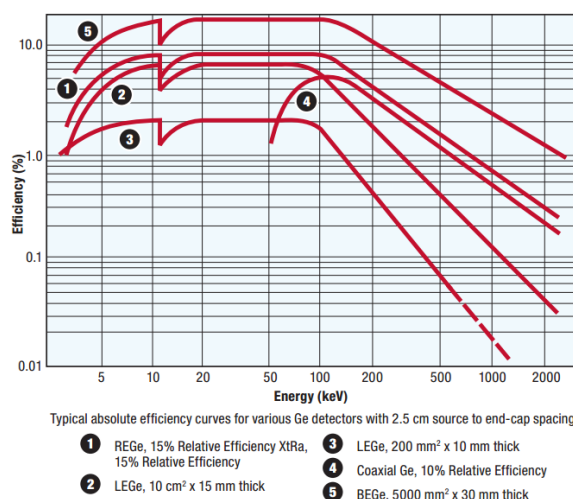
Type	BEGe BE2830
Grootte kristal	Ø60 x 30 mm
Relatieve efficiëntie	18%
Energiebereik	3 keV tot 3,0 MeV
FWHM	≤ 2,0 keV bij 1332 keV ≤ 1,0 keV bij 122 keV
Aantal kanalen MCA	256 - 8192

In Figuur 17: Energiebereik van HPGe detectoren wordt het energiebereik van de verschillende germanium detectoren weergegeven. De waarde van de BEGe detector komt overeen met deze in Tabel 3. Er is duidelijk te zien dat de BEGe detector een groter bereik heeft dan een standaard coaxiale HPGe detector.



Figuur 17: Energiebereik van HPGe detectoren [29]

In Figuur 18 is te zien dat de BEGe detector reeds een hoge efficiëntie haalt bij energieën vanaf 3 keV. Verder heeft de BEGe detector ook de hoogste efficiëntie van de afgebeelde detectoren over het getoonde energiebereik.



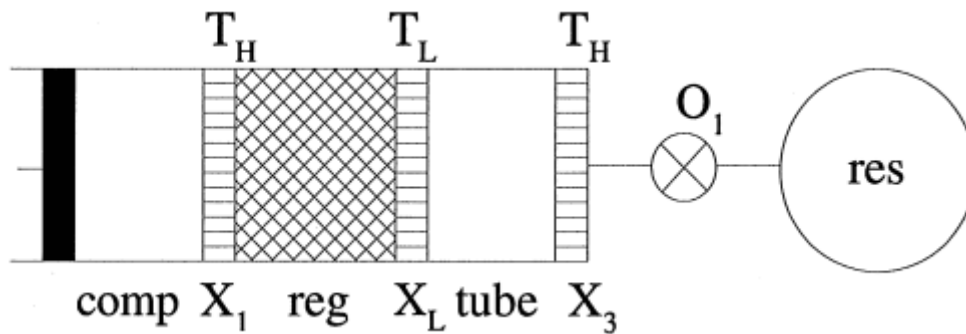
Figuur 18: Efficiëntie i.f.v. de energie [29]

Uiteindelijk is de Falcon 5000<sup>®</sup> detector ook nog uitgerust met een GM-buis voor een continue bepaling van het dosistempo en een <sup>3</sup>He-buis voor de detectie van neutronen. Deze worden echter niet gebruikt in deze thesis [7].



### 5.3.1. Pulsbuiskoeling

Het gebruik van pulsbuskoeling heeft vele voordelen, zo kan het kristal binnen de 3 uur gekoeld worden tot werkingstemperatuur ( $-170\text{ °C}$ ) en dient er geen grote, vaak fragile koelinstallatie met een bepaalde koelvloeistof aangesloten te worden op de detector [7]. Het principe van pulsbuskoeling kan schematisch voorgesteld worden door onderstaande figuur.



Figuur 19: Schematische voorstelling van een pulsbuskoeler [31]

Van links naar rechts bestaat een pulsbuskoeler uit de volgende onderdelen: een compressor, een warmtewisselaar ( $X_1$ ) op hoge temperatuur, een regenerator, een warmtewisselaar ( $X_L$ ) op lage temperatuur, een pulsbus, een warmtewisselaar ( $X_3$ ) op hoge temperatuur, een weerstand en een bufferreservoir voor het gebruikte gas (meestal helium) [31].

De compressor zal periodiek van links naar rechts en terug bewegen. Door deze beweging zal eveneens het gas in dezelfde richting bewegen. Wanneer het gas naar rechts beweegt, komt het in de regenerator terecht op kamertemperatuur ( $T_H$ ) en zal het de regenerator weer verlaten op een lagere temperatuur ( $T_L$ ) als gevolg van het feit dat het gas zijn warmte afgeeft aan de regenerator. Deze bestaat immers uit een poreus materiaal met een grote specifiek oppervlak zoals bijvoorbeeld een gewoven oppervlak van koperdraad. Wanneer de compressor terug naar links beweegt zal het gas deze warmte opnieuw opnemen wanneer het terug door de regenerator beweegt [31].

Verder zal, wanneer de compressor naar links beweegt, een deel van het gas uit het reservoir onttrokken worden als gevolg van een lagere druk en op kamertemperatuur terecht komen aan de warme zijde van de pulsbus. Wanneer de compressor terug naar rechts beweegt zal hetzelfde volume gas onder een hogere druk komen te staan en bijgevolg een hogere temperatuur bezitten dan wanneer het gas de pulsbus binnenkwam. Het gas zal de pulsbus opnieuw verlaten bij een temperatuur die hoger ligt dan de kamertemperatuur [31].

Aan de koude zijde van de pulsbus vindt het omgekeerde effect plaats. Hier komt het gas de pulsbus binnen op hoge druk als gevolg van het naar rechts bewegen van de compressor en verlaat het de pulsbus onder een lagere druk en dus een lagere temperatuur (lager dan  $T_L$ ) omdat de compressor naar links beweegt. Dit zorgt voor het gewenste koelingseffect [31]



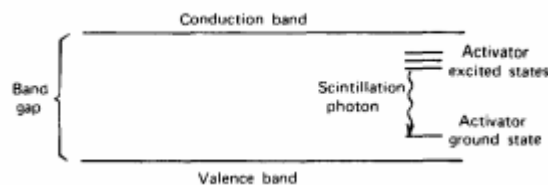
## 6. Scintillatiedetectoren

De detector die gebruikt wordt voor het detecteren van hotspots van radioactiviteit is een anorganische zinksulfide scintillator die met zilver geactiveerd is (ZnS(Ag)) [32]. Het principe van detectie van scintillatiedetectoren is gebaseerd op de detectie van licht dat uitgezonden wordt door een materiaal wanneer er straling op dit materiaal invalt. Er wordt gekozen voor een anorganische detector omdat deze detectoren een hoge Z waarde hebben en dus geschikt zijn voor de detectie van gammastraling. Het materiaal dient aan verschillende eisen te voldoen [27]:

- Het moet kinetische energie van de invallende straling omzetten in detecteerbaar licht met een goede efficiëntie;
- Deze omzetting moet lineair zijn;
- Het materiaal dient transparant te zijn voor de uitgezonden golflengte;
- De vervaltijd van de geïnduceerde luminescentie dient kort te zijn zodat er een snelle puls gegenereerd kan worden;
- Het materiaal moet in praktisch bruikbare afmetingen geproduceerd kunnen worden;
- Het materiaal moet makkelijk gekoppeld kunnen worden aan een lichtsensor.

Wanneer er ioniserende straling invalt op het scintillatiemateriaal worden er elektron-holteparen gevormd. Hierbij gaat het elektron over naar de conductieband en blijft er een gat over in de valentieband. Wanneer deze paren recombineren zal dit gepaard gaan met het uitzenden van licht. In zuivere materialen is de emissie van fotonen echter een inefficiënt proces en is het energieverval tussen deze banden te groot en zal bijgevolg de golflengte van het uitgezonden licht te laag zijn om in het spectrum te liggen van het zichtbare licht [27].

Daarom worden er kleine hoeveelheden van onzuiverheden of activators ingebracht in het kristal of poeder. Op Figuur 20 is de energiebandenstructuur van dergelijke scintillator weergegeven [27].



Figuur 20: Structuur van de energiebanden van een geactiveerde scintillator [27]

Deze activators zorgen ervoor dat er energieniveaus gecreëerd worden binnen de verboden zone tussen de conductie- en valentieband waarop elektronen kunnen deëxciteren. Omdat de energiekloof nu kleiner is, zal het uitgezonden licht een grotere golflengte hebben. Wanneer er ioniserende straling invalt op het materiaal zullen er vele elektron-holteparen gevormd worden. De positieve gaten zullen migreren naar plaatsen waar activators aanwezig zijn en deze ioniseren omdat de ionisatie-energie van de onzuiverheden kleiner is dan deze van het zuivere materiaal. Ondertussen zal het elektron vrij bewegen in de conductieband totdat het een geïoniseerde activator site tegenkomt en zal dit elektron terugvallen naar het lagere energieniveau met het uitzenden van licht als compensatie voor de verloren energie [27]. De golflengte van het uitgezonden foton is groter dan de golflengte van fotonen die uitgezonden of geabsorbeerd zouden worden door het zuivere materiaal. Dit zorgt ervoor dat het materiaal transparant is voor de uitgezonden fotonen. Wanneer de scintillator gekoppeld is aan een lichtsensor kunnen deze fotonen gedetecteerd worden [27].

Er zijn echter processen die het beschreven proces verhinderen. Zo kan het voorkomen dat de overgang van de activator site naar de grondtoestand verboden is. Dan zal er bijkomende energie nodig zijn om het elektron over te brengen naar een toestand waar deëxcitatie wel mogelijk is en is er sprake van fosforescentie. Verder zijn er ook nog stralingsloze overgangen van een geëxciteerde toestand naar een lager energetische toestand mogelijk die er voor zorgen dat er minder straling wordt gedetecteerd.

## 6.1. Berthold LB 124 SCINT detector

De Berthold LB 124 SCINT detector is een ZnS(Ag) scintillatie detector gekoppeld aan een PM-buis voor de detectie van het licht. Dit materiaal is enkel in poedervorm te verkrijgen en kan dus niet in een dik kristal geproduceerd worden. Dit zorgt ervoor dat de detectie van gammastraling moeilijk is en de efficiëntie bijgevolg laag is [27]. Voor de detectie van bètastraling is de detector wel zeer efficiënt. De gebruikte detector kan gekalibreerd worden voor eender welk radionuclide en heeft een gevoelig oppervlak van  $170 \text{ cm}^2$  [32]. De gebruikte detector wordt voorgesteld in de onderstaande figuur.



**Figuur 21: Berthold LB124 SCINT detector [33]**

## 7. Vrijgaveniveaus en richtlijnen voor vrijgavemetingen

Wanneer het gebruik van een nieuwe techniek onderzocht wordt is het belangrijk dat deze techniek voldoet aan de vooropgestelde richtlijnen. Verder moet er met de in de vorige hoofdstukken beschreven detectoren gemeten kunnen worden tot beneden de gegeven vrijgaveniveaus. In dit hoofdstuk wordt er beschreven wat deze richtlijnen en vrijgaveniveaus inhouden.

### 7.1. Internationaal- en Europees bepaalde vrijgaveniveaus

Internationaal zijn er door het IAEA en de Europese Commissie grenswaardes opgelegd voor de activiteit per oppervlak van een nuclide in een voorwerp opdat dit voorwerp vrijgegeven mag worden. Wanneer een materiaal wordt vrijgegeven valt het niet meer onder de nucleaire controle en dient het dus niet meer opgevolgd te worden. Het vrijgeven van deze materialen is zeer nuttig omdat er op die manier kostbare, natuurlijke grondstoffen uitgespaard kunnen worden.

Er dient rekening gehouden te worden met 4 verschillende blootstellingswijzen aan de radioactieve stoffen in het vrij te geven materiaal: externe blootstelling aan gamma straling, inhalatie van radioactief stof, ingestie van radionucliden en  $\beta$ - dosis op de huid. De dosissen die door deze blootstellingen veroorzaakt worden, worden berekend in zowel Bq/g voor puin als Bq/cm<sup>2</sup> voor het bestaande oppervlak, wanneer het materiaal dus niet gehomogeniseerd wordt en in zijn bestaande toestand gemeten wordt. De maximale dosis die een persoon mag oplopen als gevolg van een vrijgegeven materiaal werd door het IAEA bepaald op 10  $\mu$ Sv/j (0,5% van de gemiddelde dosis van natuurlijke achtergrondstraling). Op basis van dit cijfer werden de vrijgaveniveaus per radionuclide bepaald. Deze zijn terug te vinden in bijlage 1 [34].

Door oppervlaktemetingen uit te voeren op het bestaande gebouw is het mogelijk om direct te meten waar de activiteit zich bevindt, namelijk op het oppervlak van het voorwerp. Dit zorgt voor een goede efficiëntie bij het lokaliseren en verwijderen van een contaminatie. Wanneer het gebouw echter eerst gesloopt wordt alvorens er metingen uitgevoerd worden is het niet langer eenvoudig om deze delen met een verhoogde concentratie aan radionucliden terug te vinden omdat het vermengd is met puin dat niet besmet is. Verder dient een gebouw dat afgebroken wordt vooraleer het vrijgegeven is afgebroken te worden onder nucleaire controle omdat er bijvoorbeeld radioactief stof in de atmosfeer terecht kan komen. Om deze redenen is het dus best om gebouwen in hun oorspronkelijke staat vrij te geven, ongeacht wat de toekomstige plannen voor het gebouw zijn [34]. Omdat enerzijds het hergebruik van de gebouwen en anderzijds het afbreken van de gebouwen met elkaar verbonden zijn werden de vrijgaveniveaus voor deze situaties wel parallel aan elkaar bepaald.

Bij het meten van de oppervlaktesbesmettingen is het Europees vastgelegd dat de grootte van het oppervlak waarbinnen de totale activiteit uitgemiddeld mag worden een oppervlak van 1 m<sup>2</sup> niet mag overschrijden. De totale activiteit is de som van de activiteit op het oppervlak en de activiteit van de radionucliden die gepenetreerd zijn in het te meten oppervlak [35]. Deze activiteit mag voor dit onderzoek het limiet van 1 Bq/cm<sup>2</sup> niet overschrijden. Deze limiet werd specifiek voor de site bepaald door het FANC.

## 7.2. Vrijgaveniveaus in België

In België is er geen procedure of wetgeving voor het vrijgeven van voorwerpen d.m.v. oppervlaktemetingen. Toch is doorgaans slechts 10 % van het besmette materiaal in nucleaire installaties geactiveerd. Hierbij bevindt de activiteit zich in de massa en zijn oppervlaktemetingen niet onmiddellijk van toepassing. Dit wil zeggen dat het in de overige 90% van de gevallen gaat over oppervlaktecontaminaties en het dus van groot belang is dat er richtlijnen bestaan rond het vrijgeven van materiaal m.b.v. oppervlaktemetingen. Wanneer het vrijgaveniveau van 1 Bq/g wordt gehanteerd voor het vrijgeven van voorwerpen met enkel een oppervlaktecontaminatie kunnen er grote fouten optreden naargelang de dikte en de dichtheid van het voorwerp. Hoe dikker en dichter het materiaal, hoe groter de oppervlaktecontaminatie zou mogen zijn wanneer dergelijke niveaus worden toegepast [36].

In België worden vaak de niveaus voor het hergebruik van containers en tanks voor het transport van radioactieve stoffen gebruikt voor het vrijgeven van voorwerpen. Deze niveaus bedragen 0,4 Bq/cm<sup>2</sup> voor bèta- en gammastralers en 0,04 Bq/cm<sup>2</sup> voor alfastralers [37]. Om duidelijkheid te scheppen zal het FANC daarom per site een vrijgaveniveau bepalen waaronder de materialen op die site hergebruikt of gerecycleerd mogen worden. Op de site in Fleurus is dit vrijgaveniveau bepaald op 1 Bq/cm<sup>2</sup>. Het vrijgaveniveau dat voor de metingen in deze thesis gebruikt zal worden is dus 1 Bq/cm<sup>2</sup>.

Het oppervlak waarover de activiteit uitgemiddeld mag worden werd in eerste instantie verondersteld kleiner te moeten zijn dan 1 m<sup>2</sup> omdat dit een verstrenging zou zijn van de waarde die is terug te vinden in RP122 van de Europese Commissie. Er werd echter bevestigd door het FANC dat deze oppervlakte 1 m<sup>2</sup> mag bedragen, waardoor de uiteindelijke meetgeometrie ook een oppervlak heeft van 1 m<sup>2</sup>.

## 7.3. Richtlijnen voor meetprocedures en meettechnieken in België

Opdat een lokaal vrijgegeven kan worden moet de meetprocedure en de meettechniek aan bepaalde voorwaarden voldoen. Deze voorwaarden zijn voor vrijgavemetingen, uitgedrukt per eenheid van massa, vastgelegd in een koninklijk besluit door het FANC en zijn hieronder kort samengevat [38]. Voor vrijgavemetingen, uitgedrukt per eenheid van oppervlak, bestaan dergelijke richtlijnen niet. Hierdoor zullen onderstaande richtlijnen gevolgd worden voor het uitwerken van de meetprocedure.

Eerst dient er een meetschema opgesteld te worden dat in detail de uit te voeren metingen beschrijft. Daarnaast dient de meting uitgevoerd te worden op een locatie waar de achtergrondstraling stabiel en voldoende laag is. De achtergrondstraling dient ook minimaal dagelijks bepaald te worden [38].

De personen die de metingen uitvoeren dienen een geschikte vorming te hebben en de meettoestellen die gebruikt worden voor de vrijgavemetingen dienen specifiek voor dit doel te zijn uitgerust. De nuclidenvector van het te meten materiaal wordt gebruikt om het referentienuclide te selecteren voor de kalibratie van het toestel [38].

Een lokaal kan slechts vrijgegeven worden indien er 2 onafhankelijke metingen zijn gebeurd en de activiteitsconcentratie bij elke meting lager ligt dan het vrijgaveniveau. Deze metingen gebeuren ofwel opeenvolgend met dezelfde methode, maar uitgevoerd door verschillende personen of met een verschillende methode en al dan niet uitgevoerd door verschillende personen zoals toegepast in deze thesis [38]. Er valt wel op te merken dat er in dit onderzoek slechts 1 meting wordt uitgevoerd tot beneden het vrijgaveniveau. De tweede meting is enkel voor de detectie van hotspots in het reeds gemeten oppervlak.

Bij elke meting dienen de volgende zaken vermeld te worden: [38]

- Controleren van de geometrie, dichtheid en afwezigheid van vrij stof van de vaste afvalstoffen
- Registreren van de datum, plaats van staalname, achtergrondstraling en operatoridentificatienummer toestel;
- De werkelijke meting;
- De analyse van het meetresultaat;
- Het registreren van het meetresultaat.





## 8. Methode

Aangezien er nagegaan dient te worden of er met de gebruikte meetgeometrie een correcte activiteitsbepaling kan bekomen worden op het volledige gemeten oppervlak en er eveneens gemeten kan worden tot beneden het vrijgaveniveau van 1 Bq/cm<sup>2</sup>, wordt er gewerkt met bronnen met een gekende activiteit. Deze bronnen worden bevestigd tegen de muur m.b.v. klevende tape op verschillende afstanden van de detector.

### 8.1. Gebruikte bronnen

Er werden met de Falcon 5000 detector verschillende bronnen gemeten om de verschillende parameters van de detector in te kunnen stellen op een manier waarop de metingen van grote oppervlaktes in een zo kort mogelijke tijd kunnen gebeuren. Een lijst van de gebruikte bronnen is terug te vinden in onderstaande tabel. De resterende activiteit van de bronnen op de datum van gebruik werd berekend m.b.v. de algemene vervalwet. Voor de eerste Ba-133 bron met een beginactiviteit van 37 000 Bq werd deze berekening uitgevoerd op 19 februari 2016, de rest van de berekeningen zijn analoog. Merk op dat de activiteit voor elke bron berekend werd op het moment waarop deze gebruikt werd.

$$A = A_0 \times 2^{-\frac{T}{T_{1/2}}}$$

Met:

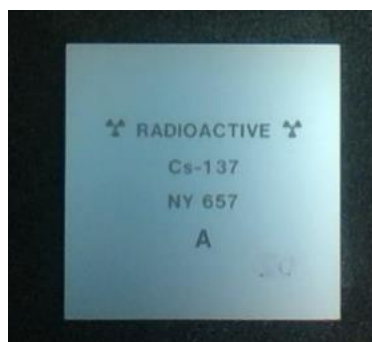
- A = de resterende activiteit
- A<sub>0</sub> = de beginactiviteit
- T = de tijd die verstreken is van het moment van productie tot aan de meting
- T<sub>1/2</sub> = de halveringstijd van het nuclide

$$A = 37000 \text{ Bq} \times 2^{-\frac{453\,340\,800 \text{ s}}{331\,663\,292 \text{ s}}} = 14346 \text{ Bq}$$

Tabel 4: Gegevens van de gebruikte bronnen

Bron	Productiedatum	Halveringstijd	Beginactiviteit (Bq)
Ba-133	08/10/2001	10,5 jaar	37 000
Ba-133	11/01/1993	10,5 jaar	37 000
Ba-133	01/02/1972	10,5 jaar	22 200
Cs-137	07/02/2006	30,17 jaar	1000
Co-57	01/07/2003	271,80 dagen	370 000

De drie Ba-133 bronnen zijn bronnen waarbij de activiteit verdeeld is over een zeer klein oppervlak en kunnen dus beschouwd worden als puntbronnen. De Cs-137 bron is een oppervlaktebron waarbij de activiteit van 1000 Bq verdeeld is over 144 cm<sup>2</sup>. Dit betekent dat de activiteit van deze bron 5,5 Bq/cm<sup>2</sup> bedraagt. De cesiumbron is weergegeven in de volgende figuur.



Figuur 22: Cs-137 Bron

De Co-57 bron is eveneens een oppervlaktebron waarbij de activiteit verdeeld is over  $2520 \text{ cm}^2$ . De activiteit van deze bron bedraagt dus  $1,07 \text{ Bq/cm}^2$ . Hierdoor is deze bron uitermate geschikt om na te gaan of de detector een dergelijk lage activiteit, verspreid over een groot oppervlak, correct kan bepalen. Ook is Co-57 het belangrijkste nuclide uit de isotopische vector van het gebouw B-20. De Co-57 bron is weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 23: Co-57 oppervlaktebron

## 8.2. Gebruikte collimators

Een collimator rond het germaniumkristal zorgt voor een fysieke afscherming van gammastraling afkomstig van bronnen van straling die buiten de ingestelde meetgeometrie liggen. Op die manier is het mogelijk voor de detector om enkel bronnen te detecteren die zich binnen de ingestelde meetgeometrie bevinden. Tijdens de metingen die uitgevoerd werden, werd er zowel gewerkt met een cilinder- als balkvormige collimator voor respectievelijk een ronde en vierkante meetgeometrie die ingesteld werd. De cilindervormige collimator bestaat uit loden ringen met een dikte van 2,15 cm die op elkaar gezet kunnen worden en over de beschermkap van het kristal gemonteerd kunnen worden. Deze collimator wordt op zijn plaats gehouden door loden staven naast de collimator. Er kunnen dus collimators met verschillende afmetingen gecreëerd worden door ringen toe te voegen of te verwijderen.

De balkvormige collimator bestaat uit 4 loden platen met een dikte van 3 cm die aan elkaar bevestigd zijn m.b.v. schroeven. Beide collimators zijn weergegeven in volgende figuren.



Figuur 24: Balkvormige collimator (links) en cilindervormige collimator (rechts)

De collimators dienen samen met de meetgeometrie gedefinieerd te worden in de geometry composer van het softwarepakket Genie 2000. De collimators en meetgeometrieën dienen gedefinieerd te worden omdat op basis van deze gegevens de efficiëntie bepaald kan worden m.b.v. de ISOCS kalibratie software. In onderstaande figuren zijn de templates weergegeven waarin de afmetingen van de collimator ingesteld worden op basis van een gegeven tekening.

Edit Collimator

Name:  Type:  Cylindrical  Rectangular

Comment:

Units:  mm  cm  m  in  ft

d.1	d.2	d.3	d.4	d.5	d.6	d.7	d.8	d.9
20	0	0	0	11.5	3	25	0	0
		d.10	d.11	d.12	d.13			d.14
		0	0	11.5	3			0

Material	Density	CRPN
lead	11.35	4

OK

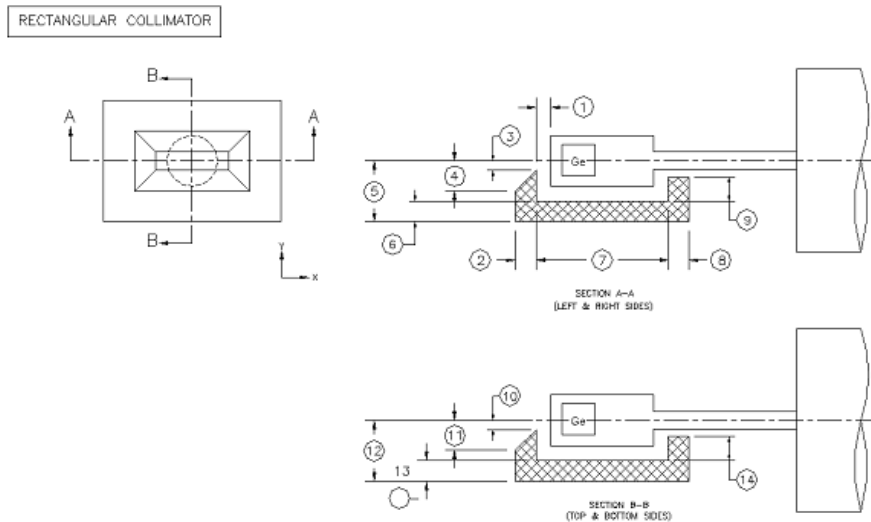
Cancel

Materials Editor

Help

View Drawing...

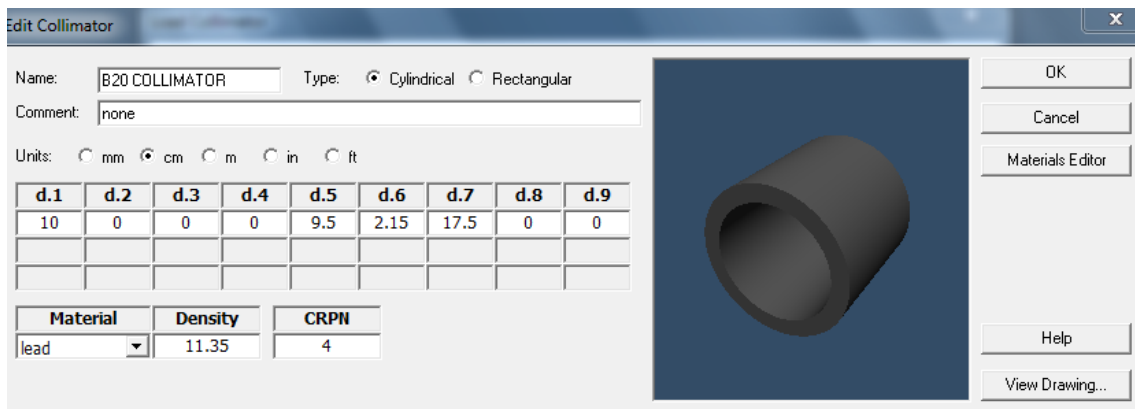
Figuur 25: Template in Genie 2000 voor de balkvormige collimator



**Figuur 26: Voorstelling van de afmetingen van de gebruikte, balkvormige collimator**

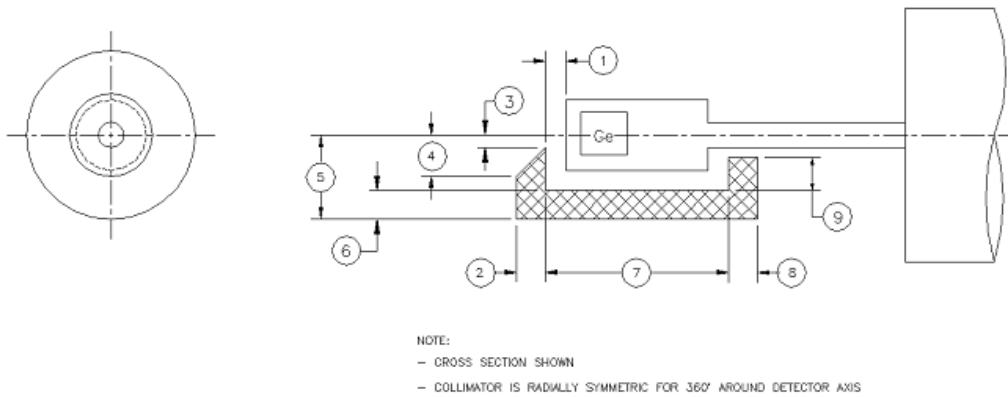
De afmetingen van de balkvormige collimator zijn als volgt: d.1 is de afstand van het uiteinde van de collimator tot het kristal en bedraagt 20 cm. d.5 is de helft van de buitenkant van de verticale zijde van de balk en bedraagt 11,5 cm. d.6 en d.13 zijn de diktes van de wanden van de collimator. Deze bedragen zowel voor de horizontale als verticale zijdes 3 cm. d.12 is de helft van de buitenkant van de horizontale zijde van de balk en bedraagt eveneens 11,5 cm. d.7 is totale lengte van de collimator en bedraagt 25 cm. Het materiaal waaruit de collimator bestaat is zoals eerder vermeld lood en heeft een dichtheid van  $11,35 \text{ g/cm}^3$ . CRPN (Collimator Reference Point Number) is een materiaalafhankelijke parameter die tussen de 2 en 10 mag liggen [39]. Canberra stelt echter voor deze parameter in te stellen op 4 omdat deze het beste compromis geeft tussen nauwkeurigheid en tijdsbesparing voor de bepaling van de efficiëntie m.b.v. Monte Carlo berekeningen.

Wanneer er gebruik gemaakt werd van de cilindervormige collimator, werden er metingen uitgevoerd met collimators die bestaan uit verschillende ringen en dus verschillende lengtes. De afmetingen van een van deze cirkelvormige collimators zijn te zien in onderstaande figuren.



**Figuur 27: Template in Genie 2000 voor de cilindervormige collimator**

CYLINDRICAL COLLIMATOR



Figuur 28: Voorstelling van de afmetingen van de gebruikte, cilindervormige collimator

d.1. is de afstand van het kristal tot het uiteinde van de collimator. d.5. is de straal van de collimator en bedraagt 9,5 cm. De dikte van de wanden van de cilinder begraagt 2,15 cm en wordt bepaald door d.3. d.7. is de totale lengte van de collimator. Enkel de lengte en de afstand van het kristal tot het uiteinde van de collimator zijn verschillend wanneer er meer of minder loden ringen worden toegevoegd aan de collimator.

### 8.3. Gebruikte meetgeometrieën

De gebruikte meetgeometrieën in combinatie met de cilindervormige en balkvormige collimators zijn respectievelijk een “circular plane geometry” en een “rectangular plane geometry”. Deze geometrieën zijn het meest geschikt voor het uitmeten van vlakke structuren zoals bijvoorbeeld muren. In onderstaande figuren zijn deze geometrieën en hun templates weergegeven.

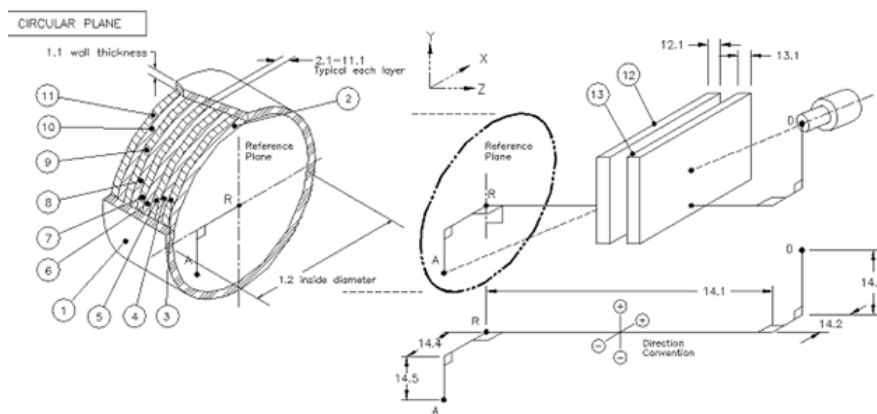
Description:

Comment:

Units:  mm  cm  m  in  ft

No.	Description	d.1	d.2	d.3	d.4	d.5	Material	Density	Rel.
1	Side Walls	0.1	125				concrete	2.35	
2	Layer 1	0.5					concrete	2.35	1.00
3	Layer 2	0					(none)	0	0.00
4	Layer 3	0					(none)	0	0.00
5	Layer 4	0					(none)	0	0.00
6	Layer 5	0					(none)	0	0.00
7	Layer 6	0					(none)	0	0.00
8	Layer 7	0					(none)	0	0.00
9	Layer 8	0					(none)	0	0.00
10	Layer 9	0					(none)	0	0.00
11	Layer 10	0					(none)	0	0.00
12	Absorber 1	0					(none)	0	
13	Absorber 2	0					(none)	0	
14	Source - Detector	125	0	0	0	0			

Figuur 29: Template in Genie 2000 voor de cirkelvormige meetgeometrie



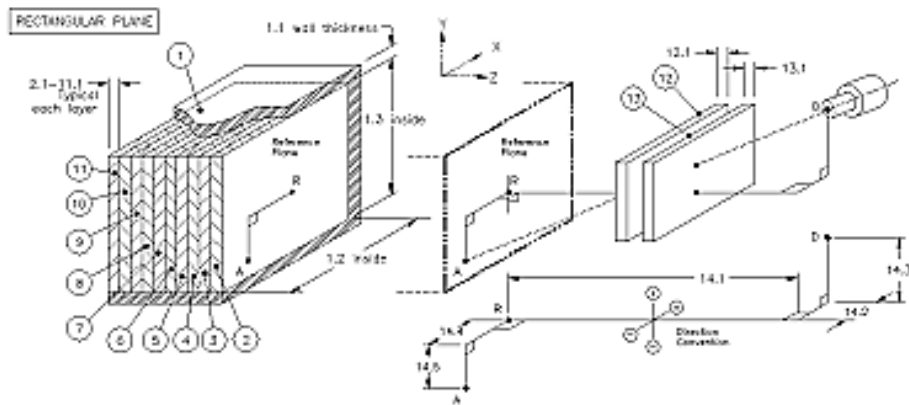
Figuur 30: Voorstelling van de afmetingen van de cirkelvormige meetgeometrie

Aangezien de metingen gebruikt worden voor het detecteren van oppervlaktebesmettingen, zal er verondersteld worden dat de volledige contaminatie zich binnen 1 laag bevindt. Deze laag wordt verondersteld 0,5 cm dik te zijn. Uit voorgaande metingen is gebleken dat de dikte van deze laag niet bepalend is voor de uitkomst van de bepaalde activiteit [40]. Verder is een dikte van 0,5 cm een veelgebruikte waarde in de literatuur [41]. De diameter van de gemeten cirkel wordt ingesteld bij d.2 en bedraagt op de figuur 125 cm. Deze parameter werd tijdens de metingen echter gevarieerd om de ideale diameter van de geometrie te bepalen. De afstand van het gemeten oppervlak tot de detector bedraagt 125 cm, maar deze werd eveneens gewijzigd afhankelijk van de uitgevoerde meting. Aangezien er betonnen muren worden gemeten is het materiaal waarin de mogelijke besmetting zich bevindt beton met een dichtheid van  $2,35 \text{ g/cm}^3$ .

Wanneer er gebruik gemaakt wordt van een vierkante meetgeometrie in combinatie met de balkvormige collimator, dient onderstaand template ingevuld te worden.

No.	Description	d.1	d.2	d.3	d.4	d.5	Material	Density	Rel.
1	Side Walls	0.1	75	75			concrete	2.35	
2	Layer 1	0.5					concrete	2.35	1.00
3	Layer 2	0					(none)	0	0.00
4	Layer 3	0					(none)	0	0.00
5	Layer 4	0					(none)	0	0.00
6	Layer 5	0					(none)	0	0.00
7	Layer 6	0					(none)	0	0.00
8	Layer 7	0					(none)	0	0.00
9	Layer 8	0					(none)	0	0.00
10	Layer 9	0					(none)	0	0.00
11	Layer 10	0					(none)	0	0.00
12	Absorber 1	0					(none)	0	
13	Absorber 2	0					(none)	0	
14	Source - Detector	125	0	0	0	0			

Figuur 31: Template in Genie 2000 voor de vierkante meetgeometrie



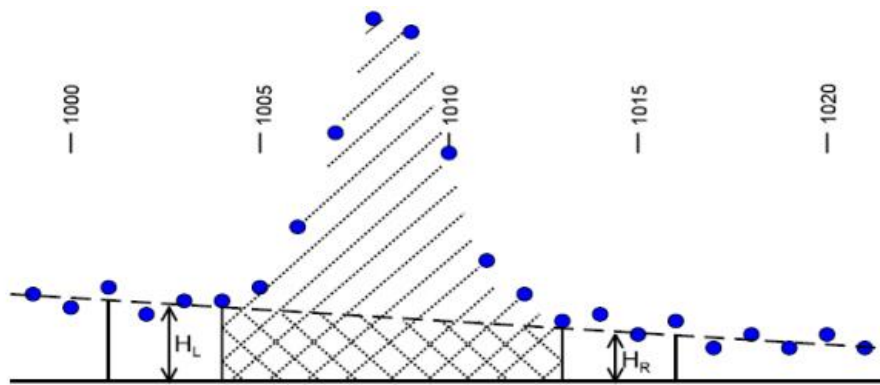
Figuur 32: Voorstelling van de afmetingen van de vierkante meetgeometrie

De zijdes van het gemeten vierkant zijn in dit geval 75 cm lang en de afstand van het gemeten oppervlak tot de detector bedraagt 125 cm. Net zoals bij de cirkelvormige geometrie zijn deze waarden afhankelijk van de uitgevoerde meting aangepast. De proeven werden steeds op dezelfde plaats uitgevoerd om representatieve resultaten te verkrijgen. Hierdoor is het gemeten materiaal eveneens beton met een dichtheid van  $2,35 \text{ g/cm}^3$ . De dikte van de laag van de besmetting is dezelfde als deze van de cirkelvormige meetgeometrie. Wanneer de meetgeometrie en de collimator zijn ingesteld in de geometry composer, wordt er hiervan een rapport opgesteld. Een voorbeeld van dergelijk rapport is terug te vinden in bijlage 2.

#### 8.4. Bepaling van de activiteit

De bepaling van de activiteit gebeurt volgens een algoritme in Genie 2000. De activiteit is terug te vinden in het bekomen spectrum en in een rapport dat bekomen wordt door de verschillende stappen van het algoritme te doorlopen. Een voorbeeld van dergelijk rapport is terug te vinden in bijlage 3. Een voorbeeld van een spectrum dat bekomen wordt na een meting is terug te vinden in bijlage 4.

De activiteit wordt bepaald volgens een stappenplan. Eerst worden de pieken gelokaliseerd m.b.v. een nuclidenbibliotheek. Voor elke piek wordt het kanaalnummer en de overeenkomstige energie weergegeven in het rapport. Daarna wordt het aantal tellingen binnen deze pieken bepaald. Dit wordt gedaan door een rechte te bepalen tussen de begin en eindpunten van de Region Of Interest (ROI) van de piek. De ROI bepaalt de grenzen van de kanalen waarin het aantal tellingen afkomstig is van het te onderzoeken nuclide. Het aantal tellen onder deze rechte wordt gezien als achtergrond en de tellen boven deze rechte worden verondersteld afkomstig te zijn van het in verhoogde concentratie aanwezige radionuclide [42]. Deze methode wordt voorgesteld in onderstaande figuur.



Figuur 33: Voorstelling van de methode voor de bepaling van het aantal tellen in de piek [42]

In het bekomen rapport wordt er voor elke gevonden piek de begin- en het eindwaarde van de ROI gegeven samen met de oppervlakte van de piek en de onzekerheid op deze oppervlakte. Verder is ook nog de Full With Half Maximum (FWHM) gegeven voor elke piek. Deze wordt bepaald uit de energiekalibratie van de detector. De FWHM is een maat voor de energieresolutie van de detector. Zoveel te kleiner deze waarde, zoveel te beter de detector een onderscheid kan maken tussen verschillende pulsen met een energie die dicht bij elkaar ligt [27].

In de volgende stap wordt de efficiëntie van de detector bij elke energie bepaald m.b.v. de ISOCS methode. Deze methode maakt gebruik van Monte Carlo berekeningen om de efficiëntie te bepalen op basis van de ingestelde meetgeometrie en gebruikte collimator. Er is dus geen nood aan een externe kalibratiebron.

Wanneer de efficiëntie bepaald is, kunnen de aanwezige radionucliden geïdentificeerd worden. Voor een bepaald radionuclide moeten er aan verschillende voorwaarden voldaan worden opdat het als aanwezig wordt beschouwd. Zo moet er ten minste één gammapijk aanwezig zijn met een energie die binnen de ingestelde energietolerantie van 1 keV ligt. Indien het nuclide nog vervalt met het uitzenden van andere gamma energieën, dient er een deel van deze pieken eveneens aanwezig te zijn in het spectrum. Het aantal pieken dat aanwezig dient te zijn is afhankelijk van het vertakkingsratio van het betreffende nuclide. Uiteindelijk dient de meettijd klein te zijn in vergelijking met de halveringstijd van het bepaalde radionuclide. Nucliden die aan deze voorwaarden voldoen met een vertrouwensgraad die hoger is dan 10 % zullen geïdentificeerd worden [39].

Met deze gegevens kan de activiteit van de gevonden radionucliden bepaald worden. De berekende activiteit (in Bq/cm<sup>2</sup>) is afhankelijk van de gevonden aantal netto tellen in de piek, de teltijd, de efficiëntie van de detector, de ingestelde meetgeometrie, de achtergrond, het vertakkingsratio van het radionuclide en een correctiefactor voor het verval van het nuclide [39].

De onzekerheid op deze activiteit, eveneens bepaald in Bq/cm<sup>2</sup>, wordt bepaald door rekening te houden met verschillende factoren: [39]

- De onzekerheid op de piekoppervlakte;
- De onzekerheid op de efficiëntie;
- De onzekerheid op het vertakkingsratio;
- De onzekerheid op de halveringstijd;
- De door de gebruiker veroorzaakte random onzekerheid
- De onzekerheid op de grootte van het gemeten oppervlak.

De uiteindelijke, totale onzekerheid op de activiteit C wordt dan bepaald door: [39]



$$\sigma_{C(totaal)} = \sigma_C + \frac{\sigma_{SYS} * C}{100}$$

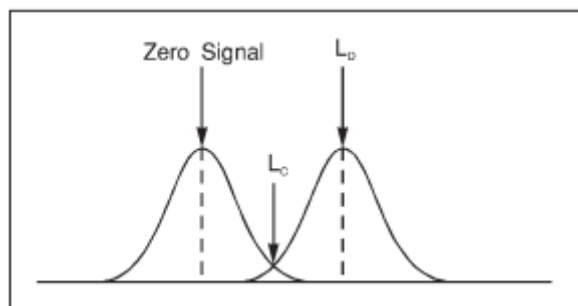
Met  $\sigma_C$  is de random onzekerheid op de activiteit die rekening houdt met bovenstaande factoren,  $\sigma_{SYS}$  is de door de gebruiker veroorzaakte systematische onzekerheid en C is de activiteit [39].

Uiteindelijk wordt er in het rapport ook nog de Minimale Detecteerbare Activiteit (MDA) van de radionucliden van belang weergegeven. Deze parameter wordt besproken in volgende paragraaf.

## 8.5. Bepaling van minimale detecteerbare activiteit bij gebruik Falcon 5000® Detector

De minimale detecteerbare activiteit (MDA) wordt berekend binnen het softwareprogramma Genie 2000, maar kan ter controle ook handmatig uitgerekend worden m.b.v. de Currie methode [43]. Deze methode is geschikt voor het bepalen van de MDA wanneer er geen bijkomende meting van de achtergrond uitgevoerd wordt. De MDA kan bepaald worden voor zowel radionucliden die in het spectrum terug te vinden zijn, als voor radionucliden die niet aanwezig zijn in het gammaspectrum. De MDA is een belangrijke parameter omdat deze aangeeft wat de laagste activiteit is die in 95% van de gevallen gedetecteerd kan worden.

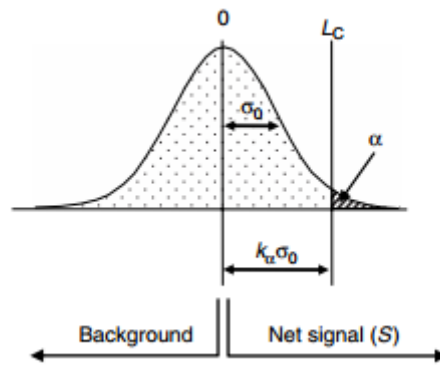
De Currie methode is gebaseerd op twee parameters: het kritische limiet ( $L_c$ ) en het detectielimiet ( $L_D$ ). Waarbij  $L_c$  het niveau is waaronder een signaal niet op een betrouwbare manier gedetecteerd kan worden of met andere woorden: 'is de telling significant?'.  $L_D$  is het kleinste signaal (in aantal tellingen) dat betrouwbaar gekwantificeerd kan worden met een bepaald betrouwbaarheidsniveau (hier 95%). In onderstaande figuur wordt het verschil tussen  $L_c$  en  $L_D$  duidelijk gemaakt [44].



Figuur 34: Visualisatie van het verschil tussen  $L_c$  en  $L_D$  [44]

### 8.5.1. Kritische limiet ( $L_c$ )

Nadat een piek is opgemeten, is het belangrijk om te bepalen of deze al dan niet significant is. Een gemeten piek wordt enkel niet significant wanneer deze verloren gaat in de achtergrond. Dit betekent dat er alleen sprake kan zijn van enige verhoogde radioactiviteit als de tellen beduidend hoger zijn dan de achtergrond. Om dit te bepalen dient er niet alleen rekening gehouden te worden met piekoppervlakte, maar ook met de onzekerheden op de achtergrond. De waarde van de achtergrondstraling varieert volgens een normale verdeling en kan voorgesteld worden in een Gauss-curve met standaarddeviatie  $\sigma_0$  [44].



Figuur 35: definitie van het kritische limiet [44]

Stel een meting,  $A$ , dan is deze meting slechts geldig wanneer deze groter is dan een aantal standaardonzekerheden op de distributie van tellingen [44]. Het aantal standaardonzekerheden bepaald dan het betrouwbaarheidsniveau.

- Als  $A \geq k_\alpha \times \sigma_0$  of  $A \geq L_c$  is de telling statistisch significant
- Als  $A \leq k_\alpha \times \sigma_0$  of  $A \leq L_c$  is de telling niet statistisch significant

$k_\alpha$  is de factor die de graad van betrouwbaarheid bepaalt. Voor een betrouwbaarheidsniveau van 95% zekerheid, of in statistische termen:  $\alpha = 0,05$ , is deze waarde 1,645 [45].

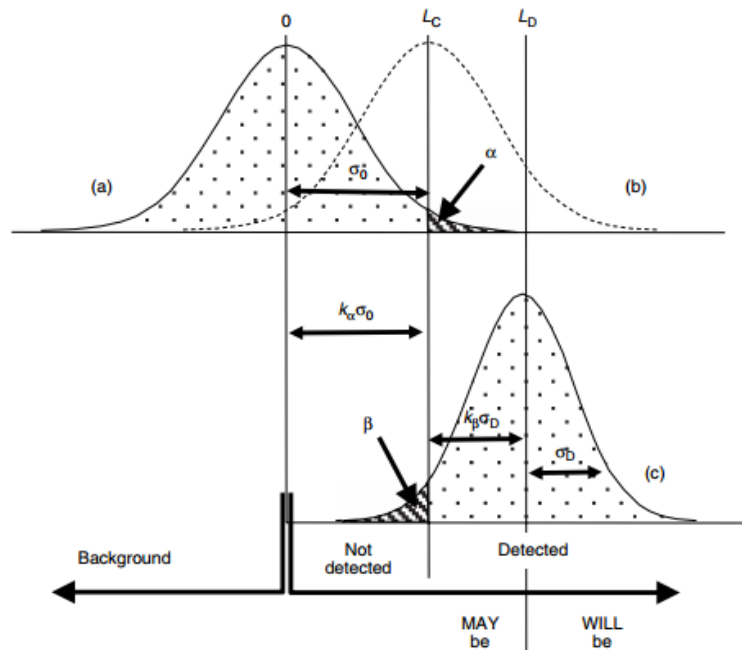
In praktijk is het niet mogelijk om  $\sigma_0$  te kennen, de enige parameters voor handen zijn de tellingen van de achtergrond en van het gemeten monster.

### 8.5.2. Detectielimiet ( $L_D$ )

De detectielimiet geeft een antwoord op de vraag: 'Wat is het kleinste aantal tellen dat betrouwbaar gedetecteerd kan worden?', of: 'Hoeveel tellen dienen er minimaal te zijn voor detectie met een bepaald betrouwbaarheidsniveau?' [45].

In sectie (b) op onderstaande figuur wordt aangegeven dat wanneer de activiteit van het monster exact overeenkomt met  $L_c$ , er slechts een zekerheid is van detectie in 50% van de gevallen aangezien de tellen symmetrisch verdeeld zijn rond het kritische limiet [44].

In sectie (c) op de volgende figuur wordt een telling van een monster met een activiteit die overeenkomt met  $L_D$  weergegeven.



Figuur 36: Definitie van detectielimiet [44]

Wanneer de meting voldoende keren herhaald wordt, is er een standaarddeviatie  $\sigma_D$ . De kans om een meting te verwerpen wanneer deze er toch is, is  $\beta$  met een betrouwbaarheidsgraad van  $k_\beta$ . Het detectielimiet is dan gelijk aan de som van het kritische limiet en  $k_\beta \sigma_D$  [44].

$$L_D = L_C + k_\beta \sigma_D = k_\alpha \sigma_0 + k_\beta \sigma_D$$

Het detectielimiet kan in dit geval echter vereenvoudigd worden tot  $L_D = k_\alpha^2 + 2L_C$  omdat de standaarddeviaties niet bepaald kunnen worden aangezien er maar één meting wordt uitgevoerd [45].

### 8.5.3. Minimale Detecteerbare Activiteit (MDA)

De MDA voor een bepaald opgemeten spectrum is de minimale hoeveelheid aan activiteit die met een bepaalde zekerheid (95%) gedetecteerd kan worden. Of met andere woorden, de maximale hoeveelheid activiteit van een bepaald nuclide dat aanwezig kan zijn, maar niet gedetecteerd wordt in het spectrum [46]. Dit is dus een zeer belangrijke parameter aangezien deze kleiner dient te zijn dan het vrijgaveniveau opdat de techniek als toepasbaar gezien kan worden.

In tegenstelling tot de vorige limieten wordt MDA uitgedrukt in een eenheid van activiteit en niet in een aantal tellen. Het wordt dan ook vaak gezien als de activiteit equivalent van het detectielimiet. Zoals reeds gezegd is het detectielimiet het aantal tellen dat gedetecteerd kan worden in 95% van de gevallen (als  $\alpha = 0,05$ ). Hieruit kan de MDA berekend worden als de activiteit die gedetecteerd kan worden in 95% van de gevallen.

De minimale detecteerbare activiteit kan berekend worden op basis van het detectielimiet a.d.h.v. de volgende formule [45] [47].

$$MDA = \frac{L_D}{T_1 \varepsilon y}$$

Waarbij:

- $T_1$  is de collectietijd in seconden;
- $y$  is het vertakkingsratio van de behandelde radionuclide;
- $\varepsilon$  is de absolute efficiëntie van de detector bij de besproken energie.

Om de MDA te berekenen is het dus noodzakelijk dat het detectielimiet gekend is. Het detectielimiet kan berekend worden uit het kritische limiet volgens onderstaande formule [45].

$$L_D = k_\alpha^2 + 2L_c$$

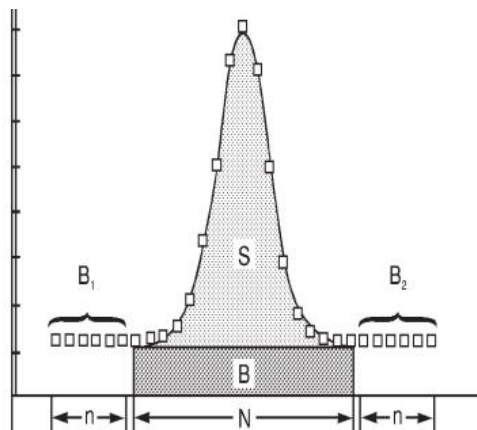
Volgens de methode van Currie kan het kritische limiet bepaald worden d.m.v. een continuüm (B) dat berekend wordt op basis van het aantal tellen in de achtergrond in de omgeving van de piek [45] [47]. Dit achtergrond continuüm is o.a. het gevolg van Comptonstrooiing en natuurlijke achtergrondstraling.

$$B = \left(\frac{N}{2n}\right)(B_1 + B_2)$$

Met

- $N$  is het aantal kanalen van de multi-channel analyser dat gebruikt wordt voor de piek;
- $n$  is het aantal kanalen aan elke zijde van de piek die gebruikt worden voor het bepalen van het continuüm;
- $B_1$  is de som van de tellen in de  $n$  kanalen aan de linkerzijde van de piek;
- $B_2$  is de som van de tellen in de  $n$  kanalen aan de rechterzijde van de piek.

Deze parameters worden in Figuur 37 visueel duidelijk gemaakt.



Figuur 37: Visualisatie van de parameters gebruikt in de methode van Currie [47]

Op basis van dit continuüm kan het kritische limiet bepaald worden met onderstaande formule [45] [47].

$$L_c = k_\alpha \sqrt{B + I_b + \left(\frac{N}{2n}\right)^2 (B_1 + B_2) + \sigma_{I_b}^2}$$

Waarbij

- $k_\alpha$  is de factor die de graad van betrouwbaarheid bepaald en teruggevonden kan worden in tabellen;
- $l_b$  is het netto aantal tellen van de achtergrond bepaald in de meting van de achtergrond;
- $\sigma_b$  is de onzekerheid op de achtergrond bepaald in de meting van de achtergrond.

Omdat de MDA door de software berekend wordt door gebruik te maken van slechts één meting en er dus geen afzonderlijke meting is van de achtergrond, kan de formule voor het kritische limiet vereenvoudigd worden tot:

$$L_c = k_\alpha \sqrt{B + \left(\frac{N}{2n}\right)^2 (B_1 + B_2)}$$

Wanneer er verondersteld wordt dat het aantal tellen links en rechts van de piek in de achtergrond gelijk zijn aan het aantal tellen in het continuüm van de ROI van de piek (B) wordt deze formule nog verder vereenvoudigd tot: [39]

$$L_c = k_\alpha \sqrt{(2 * B)}$$

Wanneer deze formules samengevoegd worden, kan de MDA berekend worden en kan deze vergeleken worden met de MDA die gegeven wordt door het softwareprogramma Genie 2000. Voorbeelden hiervan worden later in deze thesis uitgewerkt.

## 8.6. Bepaling van minimale detecteerbare activiteit en detectietijd bij gebruik van Berthold LB124 SCINT Detector

Wanneer er gebruik gemaakt wordt van de Berthold LB124 SCINT Detector, wordt de MDA bepaald door het meten van de achtergrond. Eerst wordt er een detectielimiet bepaald m.b.v. onderstaande formule: [48]

$$\text{Detectielimiet} = (k_1 + k_2) \sqrt{R \left( \frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_b} \right) + \frac{1}{4} (k_1 + k_2)^2 \left( \frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_b} \right)}$$

Waarbij:

- $k_1$  en  $k_2$  is een factor voor de eliminatie van de positieve en negatieve fouten
- $R$  is het aantal tellen per seconde (cps) in de achtergrond
- $T_0$  is de teltijd van de achtergrondmeting
- $T_b$  is de teltijd van de meting voor het te meten oppervlak

Uit het detectielimiet wordt de MDA bepaald. Hierbij wordt er rekening gehouden met een nuclide afhankelijke efficiëntie en het detectieoppervlak van 170 cm<sup>2</sup>. De efficiëntie kan eveneens bepaald worden voor een mengsel van nucliden om verschillende nucliden tegelijk te meten door een gewogen gemiddelde te nemen van deze efficiënties. De nuclide afhankelijke efficiënties voor deze detector zijn terug te vinden in bijlage 5.



## 9. Resultaten en bespreking

### 9.1. Bepaling van het gemeten oppervlak, collimator en bijhorende afstand tot detector voor de cirkelvormige meetgeometrie

De diameter van de cirkelvormige geometrie, dit is het oppervlak waarbinnen de detector de activiteit correct bepaald, bij een bepaalde afstand van de detector tot het gemeten oppervlak wordt in deze paragraaf bepaald. Hiervoor werd er met de cilindervormige collimator gewerkt in combinatie met een cirkelvormig gemeten oppervlak. Afhankelijk van het aantal loden ringen die op elkaar geplaatst werden, wijzigde de lengte van de collimator en bijgevolg de grootte van de fysieke afscherming. Er werd gebruik gemaakt van collimators die bestaan uit 2-, 4- en 6 loden ringen. De totale lengte van de collimators zijn respectievelijk 8 cm, 17,5 cm en 23,5 cm.

Er werd gebruik gemaakt van een Ba-133 bron met een resterende activiteit van 14581 Bq die tegen de muur bevestigd werd m.b.v. tape. Ba-133 is een bron die gammastralen uitzendt met verschillende energieën. De verschillende gamma-energieën, samen met hun vertakkingsratio wordt weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 5: Gamma energieën en hun voorkomen van Ba-133 [49]

Ba-133	
Energie (keV)	Vertakkingsratio (%)
53,162	2,140
79,614	2,630
80,998	33,310
160,612	0,638
223,237	0,450
276,399	7,130
302,851	18,310
356,013	62,050
383,845	8,940

Voor elke gevonden gamma-energie wordt er een andere activiteit gegeven in het bekomen rapport van de meting. Het gewogen gemiddelde van de activiteit kan dan bepaald worden met onderstaande formule [39]:

$$C_{AV} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\sigma_{C_i}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{C_i}^2}}$$

Waarbij:

$C_{AV}$  = het gewogen gemiddelde van de activiteit;

$N$  = het aantal verschillende gamma energieën dat werd teruggevonden in het rapport;

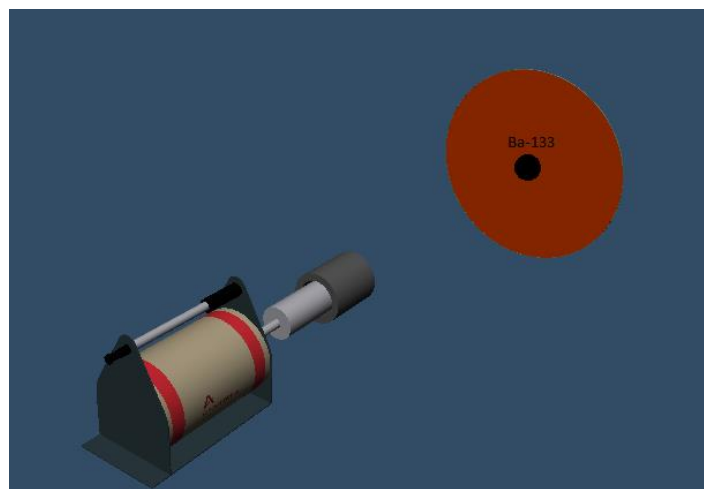
$C_i$  = de activiteit van de  $i^{\text{de}}$  gamma energie;

$\sigma_{C_i}$  = de standaard deviatie van  $C_i$ .

De onzekerheid op deze gemiddelde activiteit kan bepaald worden met de volgende formule [39]:

$$\sigma_{C_{AV}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{C_i}^2}}}$$

De diameter van de cirkelvormige geometrie bij een bepaalde afstand van de detector tot het gemeten oppervlak werd bepaald door de detector op 125 cm van het te meten oppervlak te plaatsen en de bron in het centrum van het gemeten oppervlak vast te maken. Daarna werd de juiste collimator ingesteld in het softwarepakket en werd de diameter van de cirkel van de geometrie softwarematig gewijzigd bij elke meting. De collimator, de positie van de bron en de afstand van de detector tot het gemeten oppervlak blijven dus gedurende een reeks metingen ongewijzigd. Enkel de diameter van de meetgeometrie werd softwarematig aangepast. Er werd telkens gedurende 900 s gemeten. Op onderstaande figuur is voorgesteld op welke positie de bariumbron zich bevond t.o.v. de detector.



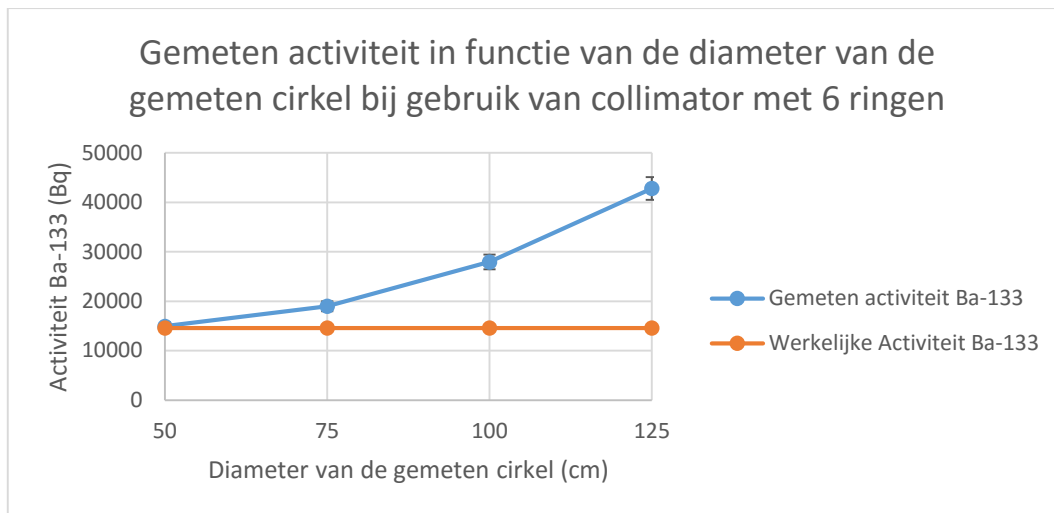
Figuur 38: Voorstelling van de plaatsing van de bron

In onderstaande tabellen en bijhorende figuren zijn de resultaten weergegeven van deze metingen.

Tabel 6: Meetresultaten bij gebruik van collimator met 6 ringen

diameter cirkel (cm)	gemeten A Ba-133 (Bq)	onzekerheid A Ba-133 (Bq)	werkelijke A Ba-133 (Bq)	% afwijking
50	14 944	800	14 581	2
75	18 976	1 015	14 581	30
100	27 940	1 495	14 581	92
125	42 794	2 289	14 581	193

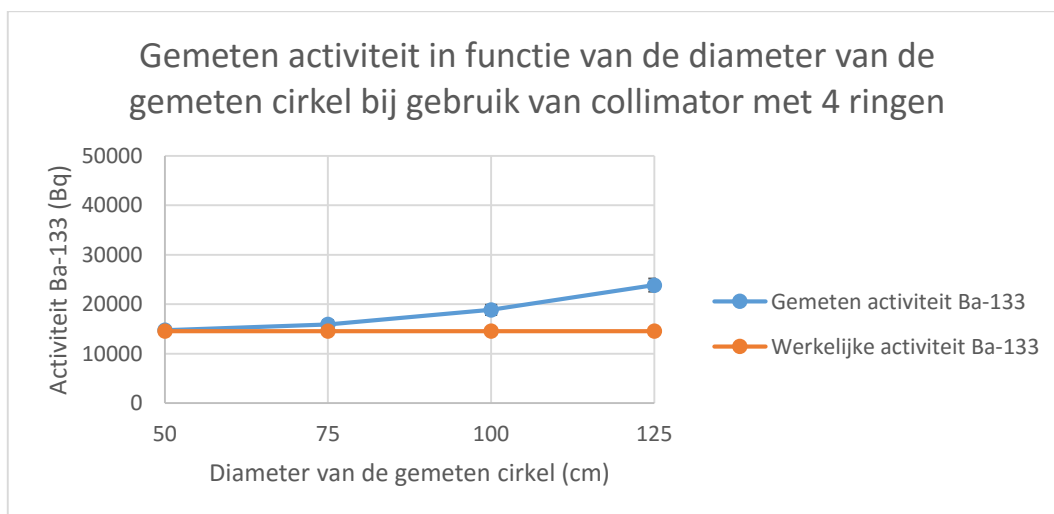




**Figuur 39: Meetresultaten bij gebruik van collimator met 6 ringen**

**Tabel 7: Meetresultaten bij gebruik van collimator met 4 ringen**

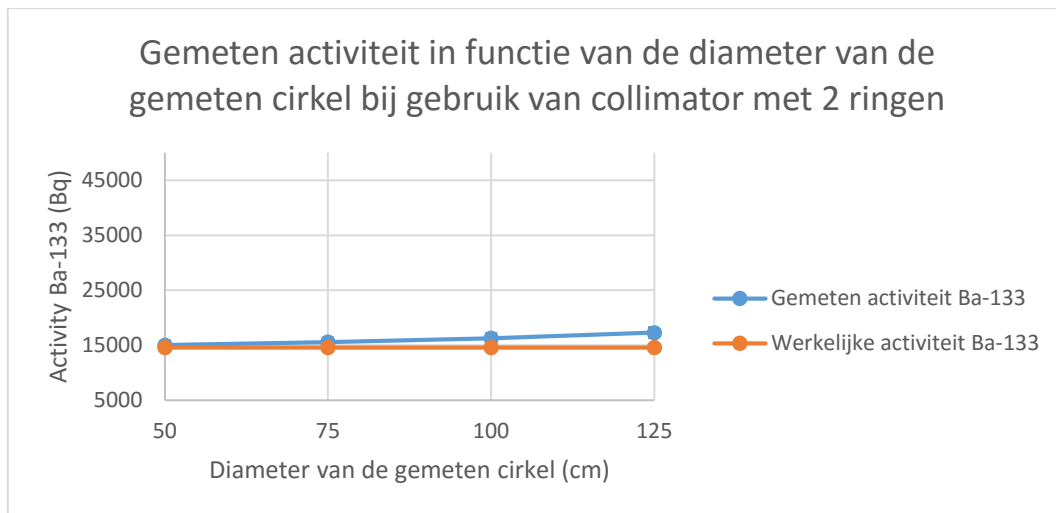
diameter cirkel (cm)	gemeten A Ba-133 (Bq)	onzekerheid A Ba-133 (Bq)	werkelijke A Ba-133 (Bq)	% afwijking
50	14 772	812	14 581	1
75	15 919	875	14 581	9
100	18 869	1 038	14 581	29
125	23 862	1 312	14 581	64



**Figuur 40: Meetresultaten bij gebruik van collimator met 4 ringen**

**Tabel 8: Meetresultaten bij gebruik van collimator met 2 ringen**

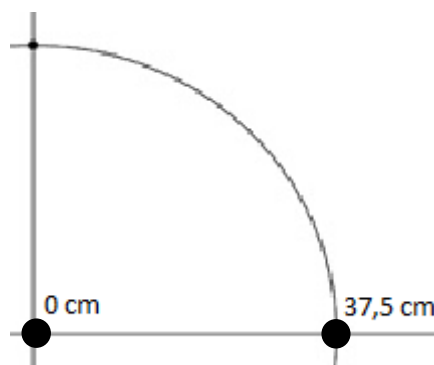
diameter cirkel (cm)	gemeten A Ba-133 (Bq)	onzekerheid A Ba-133 (Bq)	werkelijke A Ba-133 (Bq)	% afwijking
50	15 022	826	14 581	3
75	15 564	856	14 581	7
100	16 266	894	14 581	12
125	17 285	950	14 581	19



**Figuur 41: Meetresultaten bij gebruik van collimator met 2 ringen**

Uit bovenstaande resultaten kan er afgeleid worden dat wanneer de collimator met 6 ringen gebruikt wordt de activiteit van de bron slechts goed benaderd kan worden binnen een cirkel met een diameter van 50 cm. Deze oppervlakte is klein en praktisch niet bruikbaar. Wanneer de collimator met 2 ringen gebruikt wordt, kan de activiteit benaderd worden binnen een cirkel met een diameter van 1 m. Dit is een goed resultaat, maar de fysieke afscherming van deze collimator is zeer klein. Hierdoor zouden er andere bronnen uit de omgeving gedetecteerd kunnen worden indien deze aanwezig zijn, wat kan leiden tot foutieve resultaten. Daarom werd er gekozen voor de collimator met 4 loden ringen. Hierbij kan de activiteit goed benaderd worden binnen een cirkel met een diameter van 75 cm. De reden voor de overschatting van de activiteit bij grotere ingestelde geometrieën is dat wanneer de geometrie vergroot wordt, de efficiëntie die berekend wordt door de software daalt. Het aantal tellingen dat de detector waarneemt blijft echter constant omdat de positie van de bron en de detector niet wijzigen. Er wordt dus een constant aantal tellingen gedeeld door een steeds lagere efficiëntie, waardoor de activiteit stijgt met de grootte van de ingestelde diameter van de cirkel.

De activiteit dient niet alleen correct bepaald te worden wanneer de bron zich in het midden van de te meten geometrie bevindt, maar ook wanneer deze zich bevindt op het uiteinde van de te meten geometrie. Daarom werd er een meting uitgevoerd waarbij de bron wordt bevestigd op het uiteinde van de meetgeometrie. In de volgende figuur is voorgesteld waar de bron werd bevestigd.



**Figuur 42: visualisatie van de plaats van de bron**

De meetresultaten van dit experiment zijn terug te zien in onderstaande tabel. De meettijd bedroeg 600 s en de diameter van de gemeten cirkel bedroeg 75 cm.

Afstand tot centrum (cm)	gemeten A Ba-133 (Bq)	onzekerheid A Ba-133 (Bq)	werkelijke A Ba-133 (Bq)	% afwijking
0	15 197	961	14 581	4,2
37,5	13 312	856	14 581	8,7

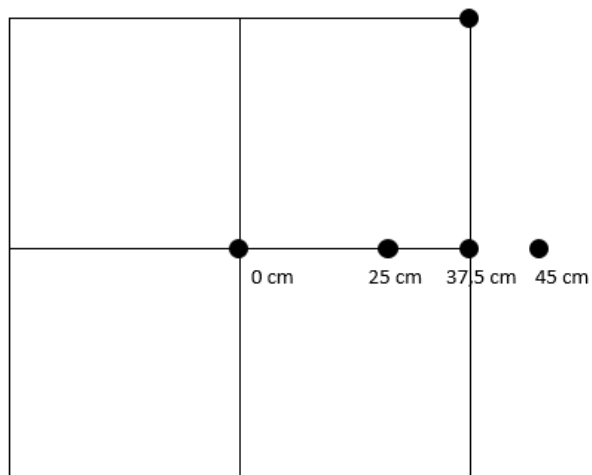
Uit bovenstaande resultaten kan besloten worden dat de activiteit van de bron ook correct bepaald wordt wanneer de bron zich op het uiteinde van de gemeten geometrie bevindt. Wanneer er gewerkt wordt met een cilindervormige collimator met een lengte van 17,5 cm en de detector zich op een afstand van 125 cm van het te meten oppervlak bevindt, wordt de activiteit van de bron correct bepaald binnen een cirkelvormige geometrie met een doorsnede van 75 cm.

## 9.2. Bepaling van het gemeten oppervlak, collimator en bijhorende afstand tot detector voor de vierkante meetgeometrie

Uit de resultaten van de experimenten die werden uitgevoerd met de cirkelvormige meetgeometrie bleek dat de optimale diameter van het gemeten oppervlak 75 cm is bij een afstand van 125 cm tussen de detector en het oppervlak. Een bijkomende voorwaarde is dat het oppervlak van de meetgeometrie kleiner dient te zijn dan  $1 \text{ m}^2$ . Daarom werd er beslist om de zijdes van het gemeten vierkant eveneens in te stellen op 75 cm. Later werden er nog andere geometrieën gedefinieerd. Om na te gaan of deze geometrie correct is, werd de bron op verschillende plaatsen binnen het te meten oppervlak geplaatst en werd de activiteit van de Ba-133 bron bepaald. Verder werd de correctheid van deze geometrie in combinatie met de balkvormige collimator ook nog getoetst m.b.v. 2 oppervlaktebronnen. De proeven met de oppervlaktebronnen geven ook een uitsluitsel of het al dan niet uitmaakt hoe de besmetting over het gemeten oppervlak verdeeld is.

### 9.2.1. Experimenten met Ba-133 puntbron

De posities van de Ba-133 puntbron op het gemeten oppervlak zijn weergegeven in de volgende figuur.

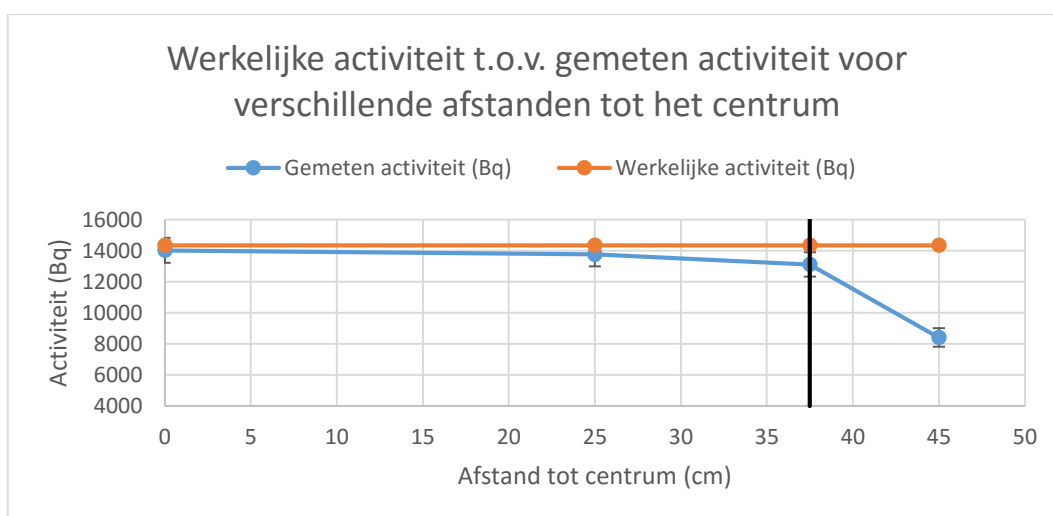


Figuur 43: Visualisatie van de posities van de Ba-133 puntbron

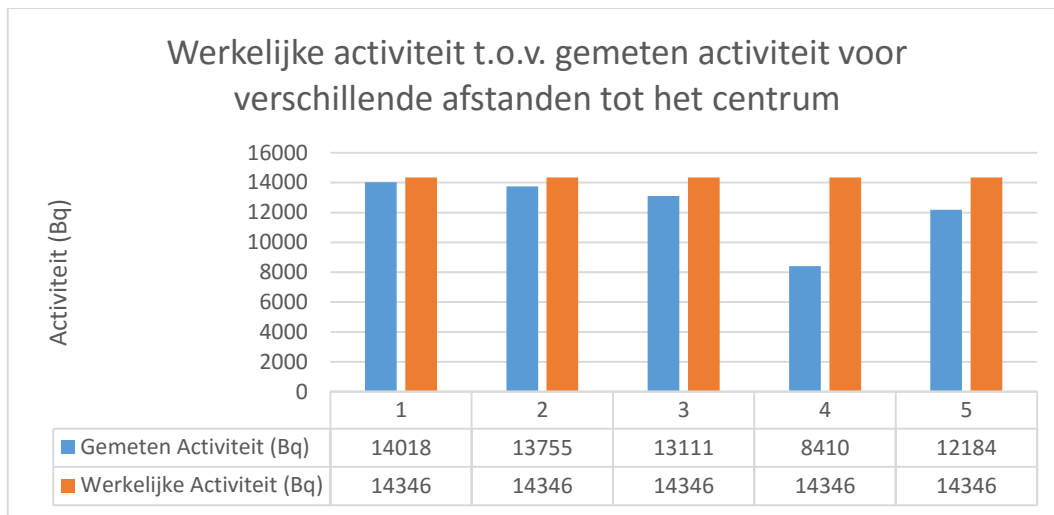
De Ba-133 bron werd telkens gedurende 900 s gemeten ter bepaling van de activiteit in een ingestelde vierkante meetgeometrie met zijdes van 75 cm. De bekomen resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel en gevisualiseerd in bijhorende grafieken. De zwarte lijn op Figuur 44 is een voorstelling van de grens van de geometrie.

Tabel 9: Resultaten van de definiëring van de vierkante geometrie met Ba-133 bron

positie bron	werkelijke A (Bq)	gemeten A (Bq)	onzekerheid A (Bq)	% afwijking
centrum	14 346	14 018	798	2
25 cm rechts	14 346	13 755	771	4
37,5 cm rechts	14 346	13 111	791	9
45 cm rechts	14 346	8 410	597	41
rechterbovenhoek	14 346	12 184	721	15



Figuur 44: Resultaten van de definiëring van de vierkante geometrie met Ba-133 bron



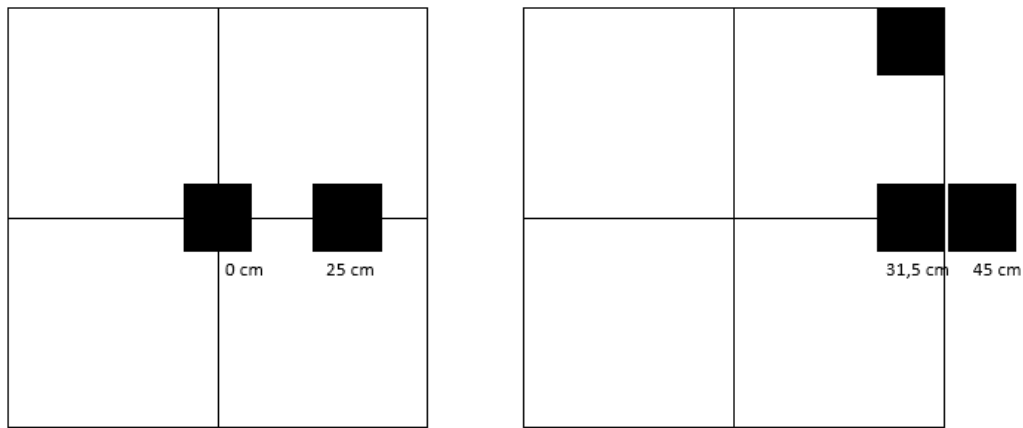
**Figuur 45: Resultaten van de definiëring van de vierkante geometrie waarbij: 1 is het resultaat wanneer de bron in het centrum geplaatst is; 2 is bron op 25 cm van het centrum; 3 is bron op 37,5 cm van het centrum; 4 is bron op 45 cm van het centrum en 5 is bron in de rechterbovenhoek**

Er is te zien dat de activiteit van de bron correct bepaald wordt wanneer de bron binnen de geometrie geplaatst wordt en foutief bepaald wordt wanneer de bron buiten de geometrie geplaatst wordt.

Om na te gaan in hoeverre de collimator een fysieke afscherming biedt tegen de straling afkomstig van een bron buiten de ingestelde meetgeometrie werd er een test gedaan waarbij er een Ba-133 bron binnen de geometrie werd geplaatst en een Ba-133 bron buiten de geometrie geplaatst. De bronnen hebben respectievelijk een resterende activiteit van 14 346 Bq en 8053 Bq wat overeenkomt met een cumulatieve activiteit van 22 399 Bq. Wanneer de bron van 14 346 Bq geplaatst wordt in het centrum van de geometrie en de bron van 8053 Bq geplaatst wordt op een afstand van 75 cm van het centrum en er gemeten wordt gedurende 900 s zonder collimator, wordt er  $21\,526 \pm 1198$  Bq gedetecteerd. Dit komt overeen met de cumulatieve activiteit. Wanneer er 900 s gemeten wordt met collimator, wordt er  $16\,055 \pm 883$  Bq gedetecteerd. Dit komt overeen met de activiteit van de bron in het centrum van de geometrie. Verder wordt de bron van 14 346 Bq niet meer gedetecteerd wanneer ze op een afstand van 50 cm van het centrum van de meetgeometrie geplaatst wordt. Er kan besloten worden dat de collimator een goede afscherming biedt tegen andere bronnen uit de omgeving buiten de meetgeometrie. Let wel dat dit enkel geldig is voor bronnen met een energie die vergelijkbaar is met deze van Ba-133 (zoals Co-57). Hoog energetische gammastraling zou wel een bijdrage kunnen leveren aan de gemeten activiteit.

### 9.2.2. Experimenten met Cs-137 bron

De posities van de Cs-137 bron op de gemeten geometrie zijn weergegeven op de volgende figuur.

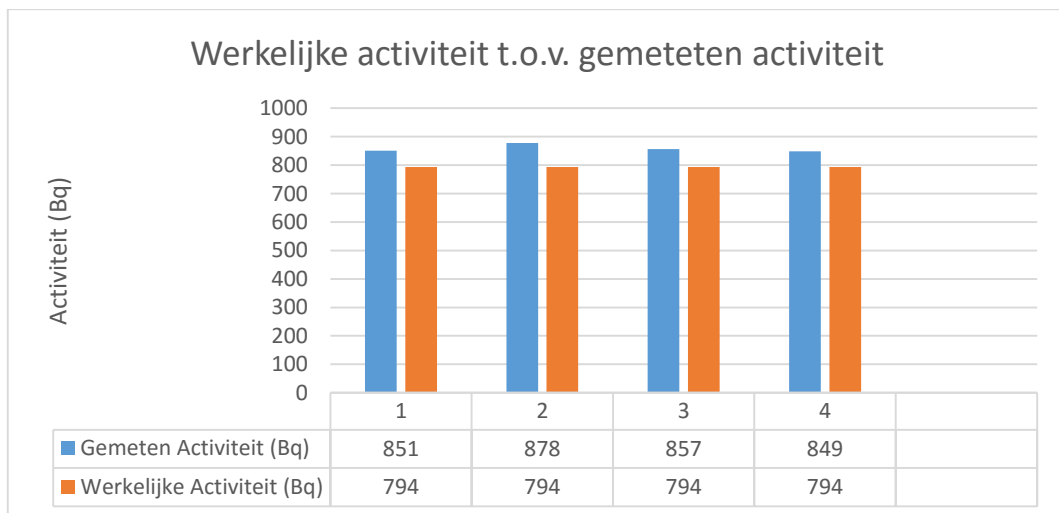


Figuur 46: Visualisatie van de posities van de Cs-137 bron

Omwille van de lage activiteit van de Cs-137 bron werd er voor elke positie gedurende 1800 s gemeten. De resultaten van deze metingen zijn terug te vinden in de volgende tabel en bijhorende grafieken.

Tabel 10: Resultaten van de definiëring van de vierkante geometrie met Cs-137 bron

positie bron	werkelijke A (Bq)	gemeten A (Bq)	onzekerheid A (Bq)	% afwijking
centrum	794	851	260	7
25 cm rechts	794	878	250	10
31,5 cm rechts	794	857	261	8
rechterbovenhoek	794	849	255	7
45 cm rechts	794	Niet gedetecteerd	/	/



Figuur 47: Resultaten van de definiëring van de vierkante geometrie waarbij: 1 is het resultaat wanneer de bron in het centrum geplaatst is; 2 is bron op 25 cm van het centrum; 3 is bron op 31,5 cm van het centrum en 4 is bron in de rechterbovenhoek van de geometrie

De experimenten met de Cs-137 bron bevestigen opnieuw dat de activiteit van de bron correct benaderd wordt wanneer deze geplaatst wordt binnen de gemeten geometrie en niet gedetecteerd kan worden na een meettijd van 1800 s wanneer deze zich niet binnen de ingestelde geometrie bevindt.

### 9.2.3. Experimenten met Co-57 bron

Een laatste test op de juistheid van de geometrie te bepalen werd uitgevoerd met een Co-57 oppervlaktebron. Deze bron is groot en heeft een lage activiteit en is dus uitermate geschikt voor het testen van de geometrie. De bron werd eenmaal binnen de geometrie geplaatst en eenmaal voor de helft binnen de geometrie geplaatst. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 11: Resultaten van de definiëring van de vierkante geometrie met Co-57 bron

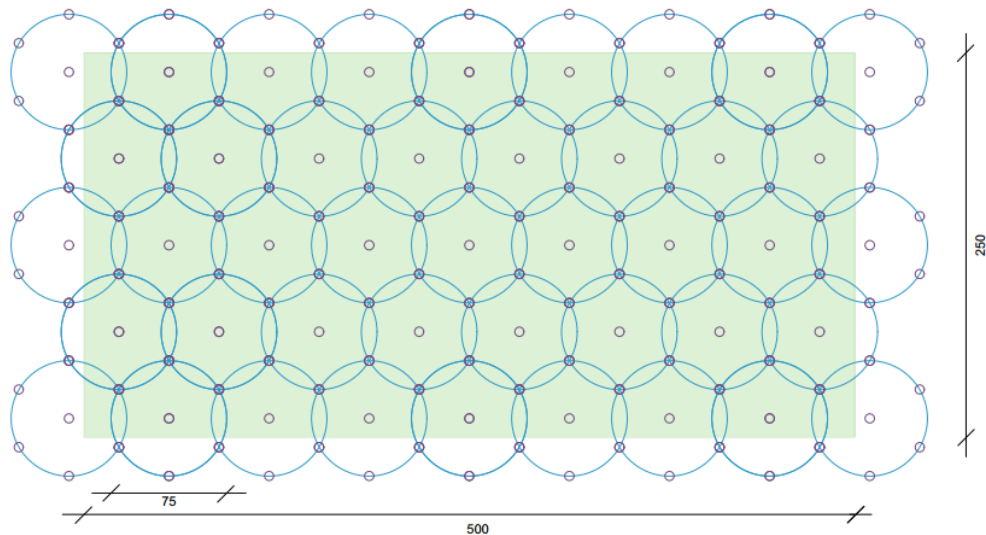
positie bron	werkelijke A (Bq)	gemeten A (Bq)	onzekerheid A (Bq)
Binnen de geometrie	2 707	2 865	249
Voor de helft binnen de geometrie	2 707	2 019	279

Er kan dus besloten worden dat met de gebruikte collimator de vierkante meetgeometrie met zijdes van 75 cm en een afstand van de detector tot het te meten oppervlak van 125 cm correct is. Verder kan er ook besloten worden dat de activiteit correct bepaald wordt door de software binnen deze geometrie, ongeacht de verdeling van de activiteit over het gemeten oppervlak.

### 9.3. Bepaling van het soort meetgeometrie

Om te beslissen of er het best gewerkt wordt met een cirkelvormige of vierkante meetgeometrie moet er een vergelijking gemaakt worden tussen het aantal metingen die uitgevoerd dienen te worden voor het uitmeten van een bepaald oppervlak. De optimale afmetingen zijn respectievelijk een diameter van 75 cm voor de cirkelvormige meetgeometrie en zijdes van 75 cm voor de vierkante meetgeometrie wanneer de detector op 125 cm van het te meten oppervlak geplaatst wordt. Deze afmetingen kunnen worden vergroot of verkleind, maar de verhoudingen zullen hetzelfde blijven waardoor er niets veranderd aan het percentuele verschil in het aantal metingen.

Er zijn reeds veel onderzoeken uitgevoerd voor het bepalen van het minimale aantal cirkels met een bepaalde straal dat nodig is voor het volledig opvullen van een bepaald oppervlak [50]. Deze studies maken gebruik van complexe algoritmes en zijn omwille van de tijd die dit in beslag zal nemen niet geschikt voor het bepalen van de correcte positie van de detector. Er zal dan ook gekozen worden voor het schikken van de cirkels in een hexagonaal patroon omdat dit het ideale scenario voldoende benadert en er zo minder tijd nodig is voor het positioneren van de detector. Een voorstel voor dergelijk patroon is weergegeven in de volgende figuur. Hierbij werden er m.b.v. het tekenprogramma "Vectorworks" 43 cirkels getekend op een rechthoekig oppervlak van 12,5 m<sup>2</sup>.



**Figuur 48: Voorstelling van het aantal metingen bij het gebruik van een cirkelvormige meetgeometrie**

Wanneer 2 cirkels elkaar snijden, zal telkens de overlappende oppervlakte dubbel gemeten worden. Dit is niet het geval wanneer er gekozen wordt voor een vierkante meetgeometrie. In totaal dienen er dus 43 metingen uitgevoerd te worden met een cirkelvormige meetgeometrie om het volledige oppervlak te omvatten. Wanneer er echter gekozen wordt voor een vierkante meetgeometrie, kan het aantal metingen beperkt worden tot 28 metingen omdat hier geen overlapping voorkomt. Dit betekent dat er door de keuze van de juiste meetgeometrie een tijdsbesparing van meer dan 50 % kan gehaald worden voor het uitmeten van een muur met een oppervlak van  $12,5 \text{ m}^2$  mits dezelfde nauwkeurigheid gehaald wordt met dergelijke meetgeometrie. Aangezien de resultaten voor de vierkante geometrie voldoende nauwkeurig zijn, zal er gewerkt worden met de balkvormige collimator en vierkante geometrie.

## 9.4. Bepaling van de minimale detecteerbare activiteit en bijhorende meettijd voor verschillende geometrieën.

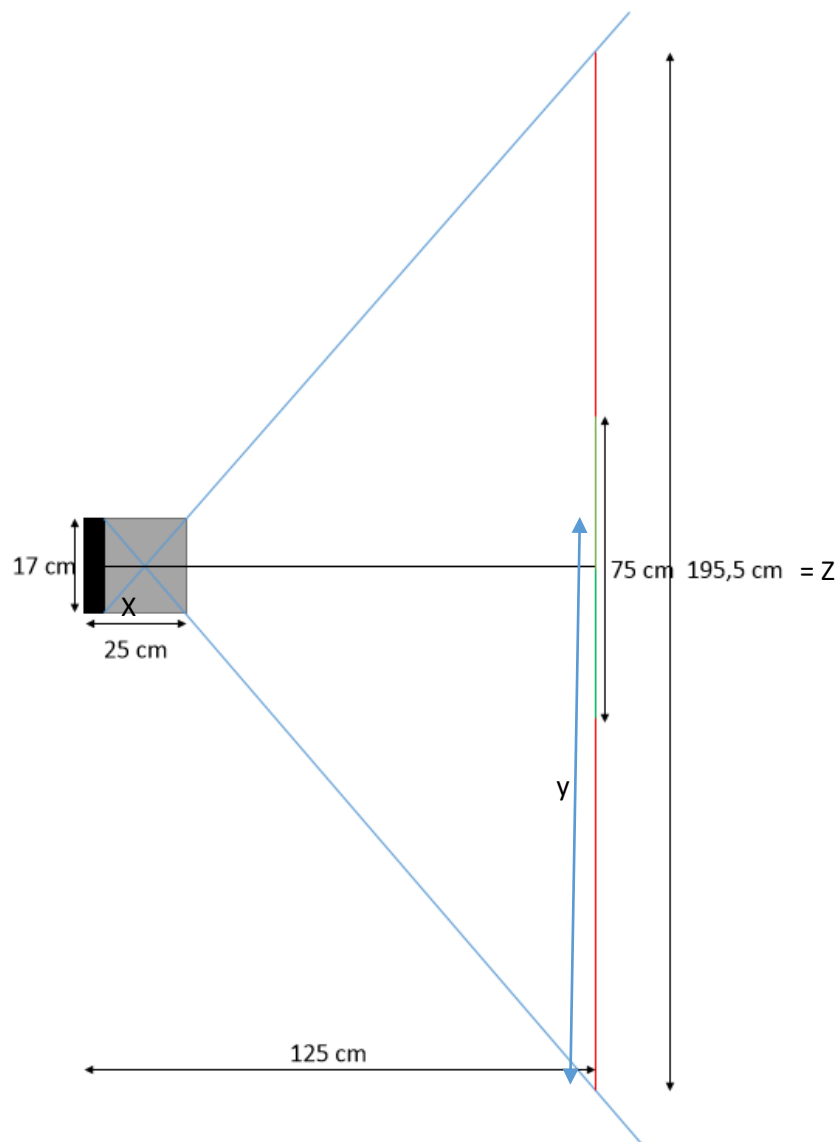
### 9.4.1. Definiëring van verschillende meetgeometrieën

Na het bepalen van de geometrie is het belangrijk om de meettijd te bepalen waarbij er een MDA bereikt kan worden die voldoende laag is. De MDA is afhankelijk van de achtergrond, de teltijd en de efficiëntie van de detector voor een bepaalde energie van een bepaald nuclide. Wanneer de detector dichter bij het te meten oppervlak geplaatst wordt en de grootte van het gemeten oppervlak bijgevolg daalt, zal de MDA kleiner zijn bij dezelfde teltijd omdat de efficiëntie bepaald wordt m.b.v. de ISOCS methode en deze afhankelijk is van de ingestelde geometrie. Verder is de MDA ook afhankelijk van de achtergrond en zal deze waarde dus nooit kunnen dalen beneden de achtergrond, zelfs niet wanneer er oneindig lang geteld wordt.

Daarom is het interessant om naast de reeds besproken meetgeometrie nog andere geometrieën te definiëren waarvoor de MDA hoger of lager zal liggen voor dezelfde meettijd. Hiervoor werd er onderzocht of er een overeenkomst bestaat tussen het totale zichtbare oppervlak van de detector en



het oppervlak van de detector waarbinnen de activiteit correct bepaald wordt. Onderstaande figuur toont de afmetingen van de zijdes van deze oppervlakten voor de besproken meetgeometrie.



Figuur 49: Visualisatie van het zichtbare veld voor de detector

De zijdes van het gemeten oppervlakte van de geometrie (geometrie 1) zijn ingesteld op 75 cm en het totale zichtbare veld van de detector kan eenvoudig uitgerekend worden met de volgende berekening:

$$\tan x = \frac{17}{20} \Leftrightarrow x = 40^{\circ}21'52''$$

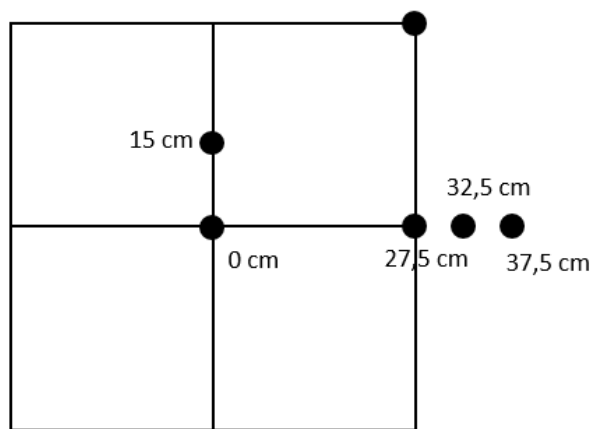
$$\tan 40^{\circ}21'52'' = \frac{y}{125} \Leftrightarrow y = 106,25 \text{ cm}$$

$$Z = 2 * (y-8,5) \Leftrightarrow Z = 195,5 \text{ cm}$$

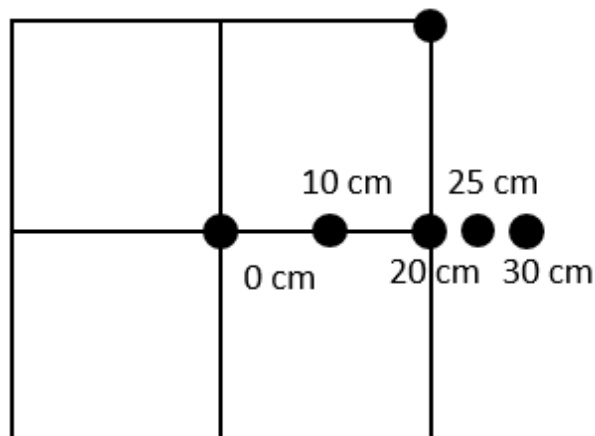
Dit betekent dat de detector de activiteit van de bron correct bepaalt in een vierkant waarvan de zijdes ongeveer 38% bedragen van het totale zichtbare vierkant. Met deze verhouding kan dan bepaald worden wat de grootte is van de zijdes van het vierkant van de meetgeometrie wanneer de detector dichterbij of verder van het te meten oppervlak geplaatst wordt. Er werden 3 bijkomende geometrieën

bepaald en getest. Een eerste geometrie waarbij de detector op 100 cm van het te meten oppervlak werd geplaatst (geometrie 2) een tweede geometrie waarbij de detector op 75 cm van het te meten oppervlak werd geplaatst (geometrie 3) en een laatste waarbij de detector op 170 cm van het te meten oppervlak werd geplaatst (geometrie 4). De 4<sup>e</sup> geometrie werd gekozen omdat dit de geometrie is waarbij het uitmiddelingsoppervlak 1 m<sup>2</sup> bedraagt en deze geometrie er in de praktijk dus voor zorgt dat er zo weinig mogelijk metingen uitgevoerd dienen te worden waarbij er nog steeds voldaan wordt aan de limieten die opgelegd zijn door het FANC.

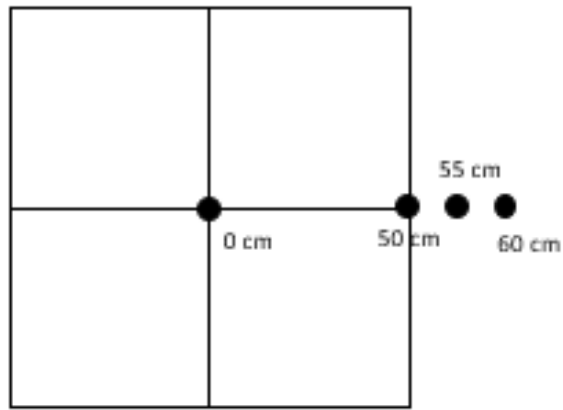
Rekening houdend met bovenstaande ratio werden de zijdes van het vierkant van de te meten geometrie bepaald op respectievelijk 55 cm, 40 cm en 1 m. De correctheid van de geometrie werd op dezelfde manier gecontroleerd als de eerste geometrie en er werd gedurende 900 s geteld voor geometrie 2 en 3 en 1500 s voor geometrie 4. De posities van de bron zijn weergegeven in de volgende figuren.



Figuur 50: Visualisatie van de posities van de Ba-133 bron bij geometrie 2



Figuur 51: Visualisatie van de posities van Ba-133 bron bij geometrie 3

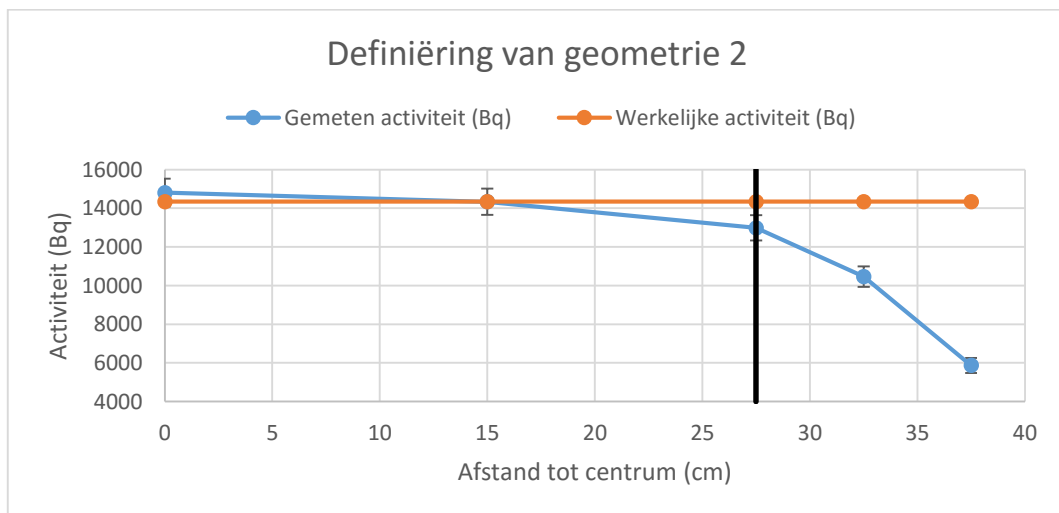


Figuur 52: Visualisatie van de posities van Ba-133 bron bij geometrie 4

De resultaten van de metingen die uitgevoerd werden met de bron geplaatst op bovenstaande posities zijn voor de verschillende geometrieën weergegeven in onderstaande tabellen met bijhorende figuren.

Tabel 12: Resultaten voor geometrie 2

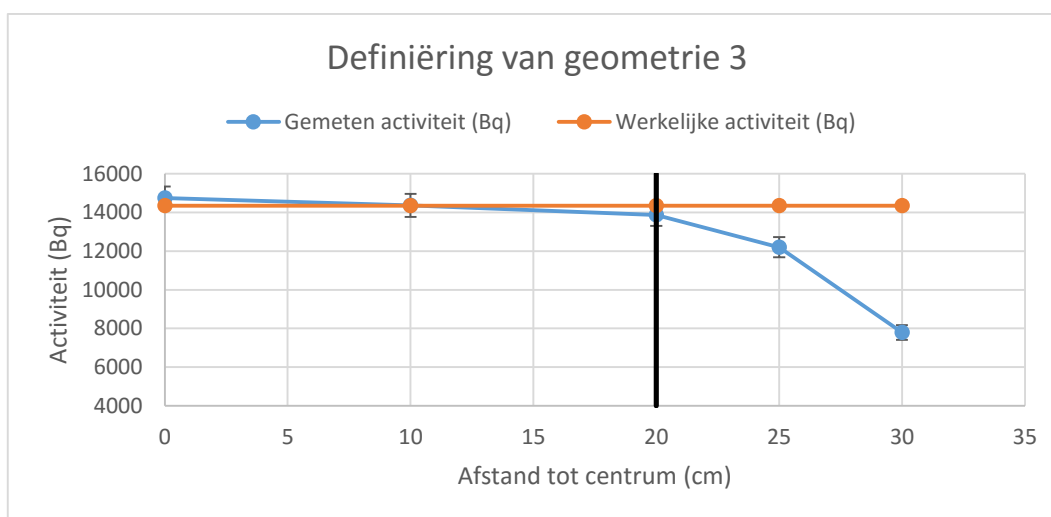
positie bron	werkelijke A (Bq)	gemeten A (Bq)	onzekerheid A (Bq)	% afwijking
centrum	14 346	14 806	723	3
15 cm boven	14 346	14 339	683	0
27,5 cm rechts	14 346	12 984	657	9
32,5 cm rechts	14 346	10 467	533	27
37,5 cm rechts	14 346	5 868	392	59
rechterbovenhoek	14 346	13 538	684	6



Figuur 53: Resultaten voor geometrie 2

Tabel 13: Resultaten voor geometrie 3

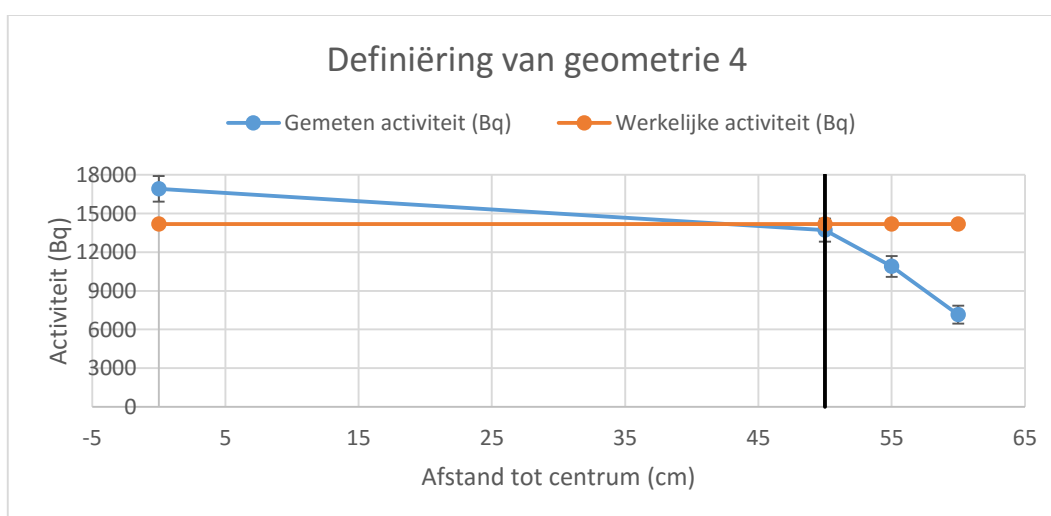
positie bron	werkelijke A (Bq)	gemeten A (Bq)	onzekerheid A (Bq)	% afwijking
centrum	14 346	14 749	596	3
10 cm rechts	14 346	14 361	595	0
20 cm rechts	14 346	13 872	573	3
25 cm rechts	14 346	12 198	522	15
30 cm rechts	14 346	7 787	379	46
rechterbovenhoek	14 346	14 800	606	3



Figuur 54: Resultaten voor geometrie 3

Tabel 14: Resultaten voor geometrie 4

positie bron	werkelijke A (Bq)	gemeten A (Bq)	onzekerheid A (Bq)	% afwijking
centrum	14 184	16 913	992	16
50 cm rechts	14 184	13 722	896	3
55 cm rechts	14 184	10 892	808	30
60 cm rechts	14 184	7 156	690	98



Figuur 55: Resultaten voor geometrie 4

Uit bovenstaande tabellen en figuren is af te leiden dat er pas een grote afwijking van de bepaalde activiteit optreedt vanaf het moment wanneer de bron respectievelijk buiten 27,5 cm van het centrum geplaatst wordt voor geometrie 2, buiten 20 cm van het centrum voor geometrie 3 en buiten 50 cm van het centrum voor geometrie 4. Voor geometrie 4 is er wel een beduidende positieve fout wanneer de bron zich in het centrum bevindt. Aangezien het echter over een overschatting van de activiteit gaat is dit geen probleem omdat er op die manier zeker geen besmettingen over het hoofd gezien kunnen worden.

Er kan dus besloten worden dat het ratio van 38 % voor het totale zichtbare oppervlak van de detector t.o.v. het oppervlak van de detector waarbinnen de activiteit correct bepaald wordt bij benadering juist is en de 3 bijkomende geometrieën correct bepaald zijn.

### 9.4.2. Bepaling van de meettijd

Met de 4 geometrieën die nu bepaald zijn kan er door het meten van de achtergrond bepaald worden wat de MDA is voor een bepaalde geometrie en bij een bepaalde meettijd.

Om duidelijk te maken hoe de MDA berekend wordt, wordt de MDA uitgerekend voor een voorbeeld. De MDA die bepaald wordt is deze van de meting van de Co-57 bron gedurende 1800 s met geometrie 1. De MDA van deze meting die door de software bepaald werd bedraagt 799 Bq zoals te zien in onderstaande figuur.

```

*****
*****          N U C L I D E  M D A  R E P O R T          *****
*****
Detector Name:      13000208
Sample Geometry:
Sample Title:       RASO20151201_BG
Nuclide Library Used: C:\GENIE2K\COMMONFILES\STDLIB.NLB

```

Nuclide	Energy	Yield	Line MDA	Nuclide MDA	Activity
Name	(keV)	(%)	(Bq /Unit)	(Bq /Unit)	(Bq /Unit)
K-40	1460.81	10.67	5.2691E+004	5.27E+004	2.3965E+005
SC-46	889.25	99.98	1.6059E+003	1.61E+003	9.0430E+002
	1120.51	99.99	2.5183E+003		2.9037E+003
Mn-54	834.83	100.00	1.6383E+003	1.64E+003	-8.3245E+002
+ Co-57	122.06*	85.51	7.9904E+002	7.99E+002	2.8652E+003
	136.48	10.60	1.0224E+004		-1.6739E+003

Figuur 56: MDA report voor Co-57

$$B = \left(\frac{N}{2n}\right)(B_1 + B_2) = \left(\frac{9}{18}\right)(626 + 626) = 626 \text{ counts}$$

$$L_c = k_\alpha \sqrt{2 * 626} = 58,2 \text{ cps}$$

$$L_D = k_\alpha^2 + 2L_c = 1,645^2 + 2 * 58,2 = 119 \text{ cps}$$

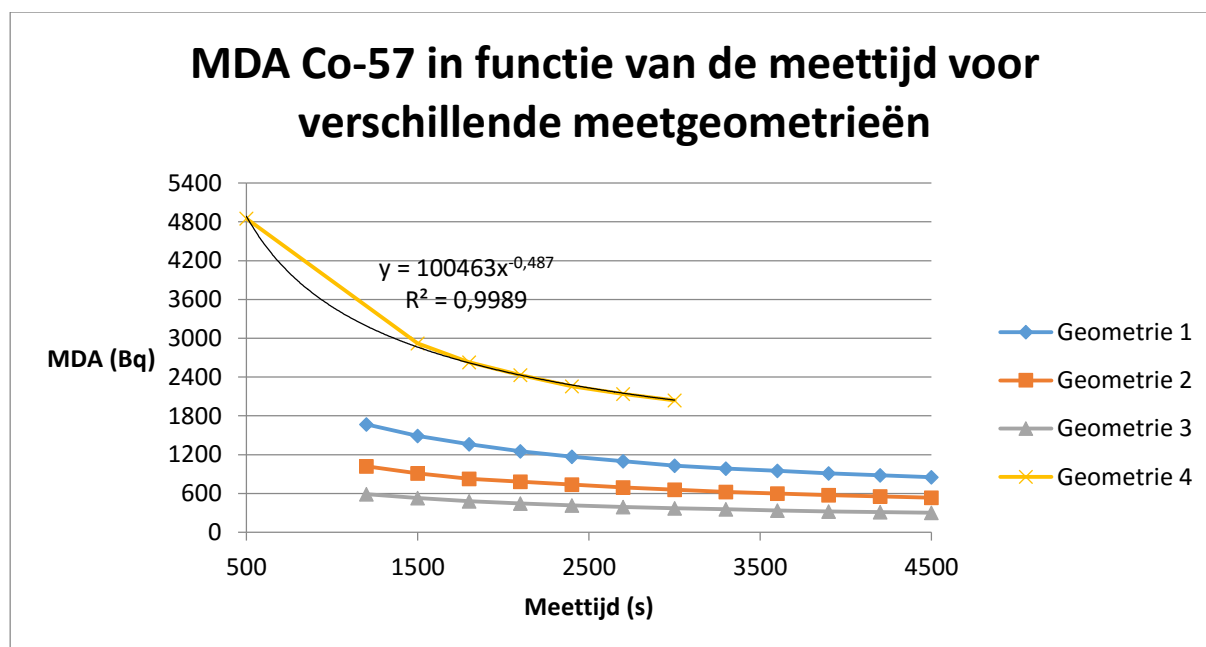
$$MDA = \frac{L_D}{T_1 \epsilon \gamma} = \frac{119}{1800 * 9,68 * 10^{-5} * 0,8551} = 799 \text{ Bq}$$

De MDA die zelf berekend werd bedraagt 799 Bq en komt dus overeen met deze die bekomen werd door het softwareprogramma.

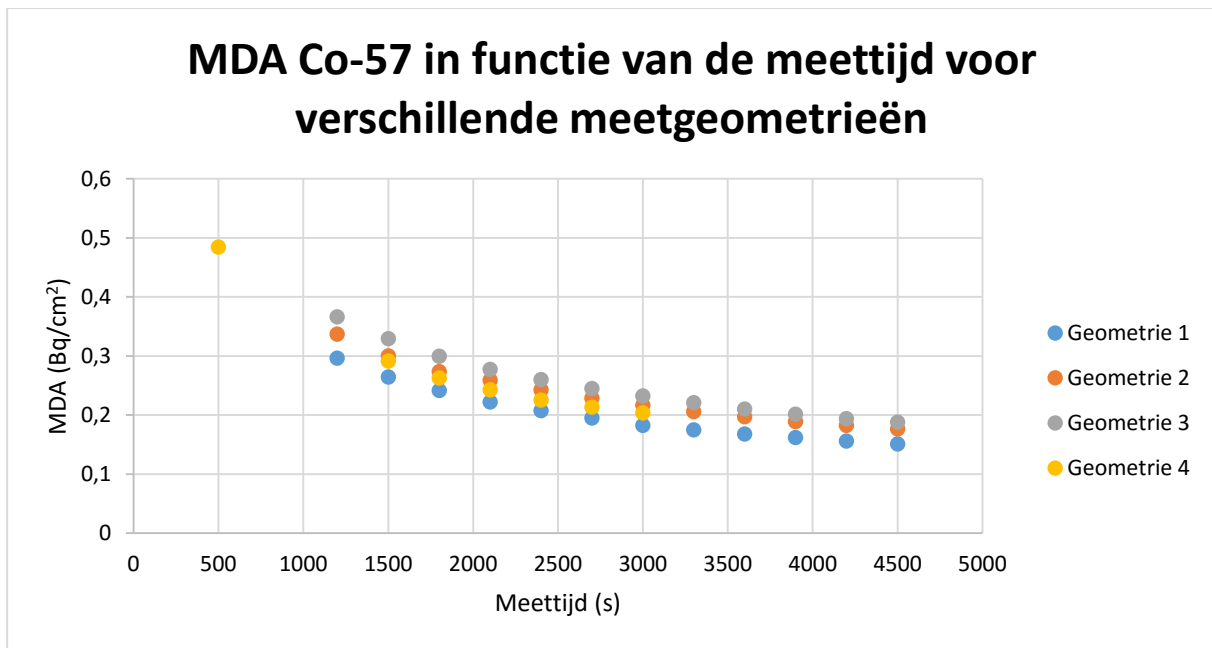
Ter bepaling van de MDA bij een bepaalde meettijd werd de achtergrond gemeten en werd de MDA voor Co-57 bepaald voor de verschillende geometrieën. De meting van de achtergrond werd gedaan voor de 3 eerste geometrieën gedurende 4500 s en waarbij er bij intervallen van 300 s de MDA van Co-57 berekend werd. Er werd voor Co-57 gekozen omdat dit het meest voorkomende isotoop is in de nuclidenvector van gebouw B20. Voor geometrie 4 werd er maar gemeten tot 3000 s. De resultaten van deze metingen zijn terug te vinden in onderstaande tabel en bijhorende figuren.

Tabel 15: MDA van Co-57 voor de verschillende geometrieën bij de verschillende meettijden

Meettijd (s)	MDA geometrie 1 (Bq)	MDA geometrie 2 (Bq)	MDA geometrie 3 (Bq)	MDA geometrie 4 (Bq)
500	/	/	/	4 850
1200	1 670	1 020	587	/
1500	1 490	909	528	2 920
1800	1 360	828	480	2 630
2100	1 250	784	444	2 430
2400	1 170	736	417	2 255
2700	1 100	693	392	2 140
3000	1 030	656	372	2 040
3300	986	624	354	/
3600	948	597	337	/
3900	912	573	323	/
4200	880	553	311	/
4500	851	536	301	/



Figuur 57: MDA van Co-57 voor de verschillende geometrieën bij de verschillende meettijden



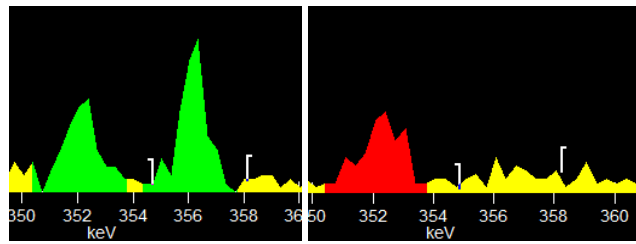
**Figuur 58: MDA (in Bq/cm<sup>2</sup>) van Co-57 voor de verschillende geometrieën bij de verschillende meettijden**

Bovenstaande tabel met bijhorende grafieken kan als volgt geïnterpreteerd worden: wanneer er voor geometrie 4, 3000 s geteld wordt, kan er over de volledige oppervlakte van 10 000 cm<sup>2</sup> 2040 Bq aan Co-57 aanwezig zijn dat niet gedetecteerd wordt. De MDA per oppervlak bedraagt dus over het volledige oppervlak 0,20 Bq/cm<sup>2</sup>, maar hierbinnen kunnen hotspots aanwezig zijn tot 2040 Bq. Verder kan er ook besloten worden dat de MDA (in Bq/cm<sup>2</sup>) niet veel verschilt voor de verschillende geometrieën bij dezelfde meettijd.

Om deze lokale hotspots te vermijden die niet gedetecteerd kunnen worden met de Falcon 5000 detector zal er eerst een scan van het oppervlak uitgevoerd worden met een handmonitor. Deze scan zorgt er voor dat er een bovenlimiet ontstaat binnen het oppervlak waar de activiteit het vrijgaveniveau kan overschrijden. Dit wordt later in deze thesis besproken.

De kleinere geometrieën zijn interessant om toe te passen in gangen of lokalen waarin de detector niet op een grote afstand van het te meten oppervlak geplaatst kan worden, maar voor de meeste toepassingen en ook op de site in Fleurus zal er gekozen worden voor geometrie 4.

Praktisch werd er vastgesteld dat een bepaling van de activiteit, en dus ook de MDA, niet mogelijk is bij een meettijd die kleiner is dan 500 s. De verklaring hiervoor werd gevonden in het feit dat het algoritme waarmee de activiteit bepaald wordt afhankelijk is van het aantal tellen in de achtergrond. Deze veronderstelling werd onderzocht door enerzijds een Ba-133 bron met een activiteit van 14 153 Bq te meten en anderzijds een Ba-133 bron met een activiteit van 1199 Bq te meten. De activiteit van beide bronnen kon pas bepaald worden na een meettijd van 500 s, ondanks het grotere aantal tellen in de piek van de meest actieve bron (139 t.o.v. 64). Onderstaande figuur toont het verschil in piekhoogte van de 356 keV piek van Ba-133.



Figuur 59: Weergave van het verschil in piekhoogte bij de Ba-133 bron van 14 153 Bq (links) en 1199 Bq (rechts)

Wanneer de meest actieve bron gemeten wordt en er hetzelfde aantal tellen aanwezig zijn in de piek, maar er zijn nog niet genoeg tellen in de achtergrond is het niet mogelijk om de activiteit van het radionuclide te bepalen. Praktisch zal er dus voor een meettijd gekozen worden van 500 s omdat het bij deze meettijd mogelijk is om de activiteit van de nucliden die aanwezig zijn in de achtergrond en hun bijhorende MDA te bepalen. Op die manier zal er gemeten worden tot een MDA van 0,29 Bq/cm<sup>2</sup>, wat lager is dan het opgelegde limiet van 1 Bq/cm<sup>2</sup>.

Met bovenstaande grafiek kan er echter wel theoretisch bepaald worden wat de meettijd is wanneer de MDA 10 000 Bq zou bedragen in een gemeten oppervlak van 10 000 cm<sup>2</sup>. Op die manier wordt het gevraagde limiet van 1 Bq/cm<sup>2</sup> bereikt binnen het oppervlak van 1 m<sup>2</sup> waarbinnen de activiteit uitgemiddeld mag worden. Door een trendlijn te fitten doorheen de uitgezette punten van geometrie 4 wordt er de volgende vergelijking gevonden voor de relatie tussen de meettijd en de MDA:

$$\text{MDA (Bq)} = 100\,463 * \text{Meettijd (s)}^{-0.487} = 10\,000$$

Bij een MDA van 10 kBq bedraagt de theoretische meettijd die bepaald werd m.b.v. extrapolatie van de opgestelde grafiek dus 115 s.

De meettijd die nodig is om een MDA van 10 kBq te bekomen kan ook bepaald worden d.m.v. de formules die gebruikt worden om de MDA te berekenen. In een achtergrondspectrum waar er geen piek aanwezig is van het te bepalen nuclide dient eerst de ROI bepaald te worden a.d.h.v. de FWHM bij de te bepalen gamma-energie. De linkerlimiet van de ROI wordt bepaald door 4 keer de FWHM (in kanalen) af te trekken van het kanaal van de te bepalen gamma energie en hierbij dan 2 kanalen op te tellen. Het rechterlimiet van de ROI wordt bepaald door 4 keer de FWHM (in kanalen) op te tellen bij het kanaal van de te bepalen gamma-energie en hiervan 2 kanalen af te trekken. Verder dient de efficiëntie bepaald te worden a.d.h.v. de verhouding tussen efficiëntie en energie die bekomen werd uit de energiekalibratie [39].

De volgende vergelijkingen zijn bekomen uit de energiekalibratie:

- Energie =  $-7,227 * 10^{-2} + 3,332 * 10^{-1} * \text{channel}$
- FWHM =  $5,767 * 10^{-1} + 3,340 * 10^{-2} * \sqrt{\text{energie}}$
- $\text{Log}(\text{efficiëntie}) = -1,481 * 10^{-4} * \text{energie} - 5,206 + \frac{3,117 * 10^2}{\text{energie}} - \frac{3,778 * 10^4}{\text{energie}^2} + \frac{2,024 * 10^6}{\text{energie}^3} - \frac{4,122 * 10^7}{\text{energie}^4}$

Bepaling van de ROI:

- FWHM (in keV) =  $5,767 * 10^{-1} + 3,340 * 10^{-2} * \sqrt{122,06} = 0,95 \text{ keV}$
- FWHM (in kanalen) =  $\frac{0,95 \text{ keV} + 7,227 * 10^{-2}}{3,332 * 10^{-1}} = 3 \text{ kanalen}$
- ROI centraal =  $\frac{122,06 \text{ keV} + 7,227 * 10^{-2}}{3,332 * 10^{-1}} = \text{kanaal } 366$
- ROI links =  $366 - 12 + 2 = \text{kanaal } 356$
- ROI rechts =  $366 + 12 - 2 = \text{kanaal } 376$



Bepaling van de efficiëntie bij 122,06 keV (efficiëntiecurve bekomen uit ISOCS):

- $\text{Log}(\text{Efficiëntie}) = -1,481 \cdot 10^{-4} \cdot 122,06 - 5,206 + 3,117 \cdot 10^2 / 122,06 - 3,778 \cdot 10^4 / 122,06^2 + 2,024 \cdot 10^6 / 122,06^3 - 4,122 \cdot 10^7 / 122,06^4 = -4,28$
- $\text{Efficiëntie} = 10^{-4,28} = 5,26 \cdot 10^{-5}$

Bepaling van de teltijd bij een MDA van 10 000 Bq:

$$B = \text{het aantal kanalen in de achtergrond van de ROI} = 509$$

$$L_c = k_\alpha \sqrt{2 * 509} = 52,5 \text{ cps}$$

$$L_D = k_\alpha^2 + 2L_c = 1,645^2 + 2 * 52,5 = 107,7 \text{ cps}$$

$$MDA = \frac{L_D}{T_1 \epsilon y} = \frac{107,7}{T_1 * 5,26 * 10^{-5} * 0,8551} = 10\,000 \text{ Bq}$$

$$T_1 = 239 \text{ s}$$

Wanneer de teltijd die nodig is om een MDA van 10 000 Bq te bekomen wordt uitgerekend gebruik makend van de formules, wordt er een teltijd van 239 s bekomen. Het verschil in theoretische teltijd is te verklaren door het feit dat er te weinig punten gekozen kunnen worden bij lage teltijden in de bovenstaande grafiek, waardoor de werkelijke functie van de trendlijn kan afwijken.

## 9.5. Bepaling van de meettijd voor de Berthold 124 SCINT handdetector

Om te voorkomen dat er zich nog hotspots zouden bevinden in het oppervlak dat werd gemeten met de Falcon 5000 detector, werd er gekozen om een scan uit te voeren met een handdetector alvorens de metingen van start gaan. Aangezien er slechts hotspots gedetecteerd dienen te worden kan er relatief snel gemeten worden. De meettijd ( $t_0$ ) die nodig is per 170 cm<sup>2</sup> kan als volgt bepaald worden wanneer de achtergrond 10 cps bedraagt, de achtergrond gedurende 30 s gemeten wordt en de constanten voor het bepalen van de positieve en negatieve fout als 2 gekozen worden:

$$\text{detectielimiet} = (2 + 2) \sqrt{10 \left( \frac{1}{t_0} + \frac{1}{30} \right) + \frac{1}{4} (2 + 2)^2 \left( \frac{1}{t_0} + \frac{1}{30} \right)}$$

De detectielimiet is de MDA vermenigvuldigt met het oppervlakte van de detector en de efficiëntie voor het detecteren van het radionuclide. Als er 1 seconde gemeten wordt met de detector kan er reeds een detectielimiet van 16,99 cps gehaald worden voor Co-57. Dit komt overeen met een MDA van 2,77 Bq/cm<sup>2</sup>.

## 9.6. Beschrijving van de uitgewerkte procedure en toepassing op lokaal 20.0.11

### 9.6.1. Procedure

Een eerste stap is het verwijderen van al het materiaal dat kan interfereren met de metingen zoals radiatoren, leidingen stoelen en tafels. Deze materialen dienen, afhankelijk van hun grootte, gemeten te worden met de Berthold LB124 SCINT detector tot een MDA die kleiner is dan  $1 \text{ Bq/cm}^2$  of met de combinatie van de Falcon 5000 detector en de Berthold LB124 SCINT detector alvorens deze vrijgegeven kunnen worden.

De volgende stap is het scannen van de muren voor hotspots. Dit wordt gedaan m.b.v. de Berthold LB124 SCINT gedurende 1 s per detectoroppervlak van  $170 \text{ cm}^2$ . Op die manier ontstaat er een bovenlimiet van  $2,77 \text{ Bq/cm}^2$  over het hele gemeten oppervlak. Nadat de scan is uitgevoerd worden er metingen uitgevoerd met de Falcon 5000 detector. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van de vierkante meetgeometrie met zijdes van 1 m in combinatie met de hierboven beschreven balkvormige collimator en waarbij de detector op een afstand van 170 cm van het te meten oppervlak wordt geplaatst. Er werd voor deze geometrie gekozen omdat een uitmiddeling van de activiteit over een oppervlak van  $1 \text{ m}^2$  door het FANC werd goedgekeurd voor dit soort metingen. De meettijd per detectieoppervlak bedraagt 500 s.

Indien er oneffenheden aanwezig zijn in het te meten oppervlak zoals vensterbanken of deuropeningen wordt er geopteerd om gebruik te maken van de Berthold LB124 SCINT detector en te meten tot een MDA die kleiner is dan  $1 \text{ Bq/cm}^2$ . Dit wordt gedaan omdat deze oppervlakten klein zijn in vergelijking met de muren en omdat het meer tijd kost om deze geometrieën te definiëren met de software dan de tijd die nodig is om een MDA van  $1 \text{ Bq/cm}^2$  te verkrijgen met de Berthold LB124 SCINT detector (7 seconden per  $170 \text{ cm}^2$  bij een achtergrond van 10 cps).

Wanneer er zowel met de Berthold LB124 SCINT als met de Falcon 5000 detector geen besmettingen gevonden worden boven de besproken MDA kan het gemeten materiaal vrijgegeven worden. Merk op dat de gegevens zoals de bepaling van de achtergrond en vermelding van de datum van de meting, zoals beschreven in paragraaf 7.3 steeds vermeld dienen te worden. Verder valt er op te merken dat er met de handmonitor niet gemeten wordt tot aan het vrijgavelimiet van  $1 \text{ Bq/cm}^2$ . Indien er verwacht wordt dat er een tweede meting tot op het vrijgaveniveau gebeurd kan er opnieuw gemeten worden met de Falcon 5000 detector of langer gemeten worden met de handmonitor.

### 9.6.2. Meting in lokaal 20.0.11

Aangezien er geen systeem aanwezig is voor het makkelijk verplaatsen van de detector en de collimator in zowel de horizontale- en verticale richting dient er gebruik gemaakt te worden van de tafels die aanwezig zijn in gebouw B20. Er werd gekozen om geen nieuw materiaal in de gecontroleerde zone te brengen omdat dit materiaal dan op zijn beurt onderhevig zou zijn aan een vrijgaveprocedure. Deze beperking zorgt ervoor dat de hogere delen van de muren, evenals het plafond en de vloer niet gemeten kunnen worden omdat dergelijk materiaal niet aanwezig was in gebouw B20. Dit probleem is eenvoudig op te lossen door gebruik te maken van een systeem waarbij de collimator en de detector verplaatst kunnen worden. Dergelijke systemen kunnen zelf vervaardigd of aangekocht worden, maar het gebruik van dergelijk systeem valt buiten het kader van deze thesis. Wel zouden de metingen efficiënter en sneller uitgevoerd kunnen worden indien dergelijk systeem aanwezig was.

De metingen werden uitgevoerd op 6 en 22 april 2016 en voordat de metingen gebeurden werd de achtergrond bepaald met de Berthold LB124 SCINT detector. De achtergrondstraling bedroeg respectievelijk 8,4 en 8,6 cps. Er is geen vrij stof aanwezig op de betonnen muren die een dichtheid hebben van  $2,35 \text{ g/cm}^3$ .

De detector werd op de grond geplaatst en op een tafel met een hoogte van 75 cm. Op die manier konden er 2 stroken van de muren uitgemeten worden tussen 0 cm en 124 cm. De energiekalibratie van de detector werd gecontroleerd voor de metingen van het lokaal werden uitgevoerd m.b.v. een Ba-133 bron. Om na te gaan of de detector een juiste activiteit kan meten wanneer deze op de grond is geplaatst is en er dus maar een deel van de ingestelde geometrie werkelijk zichtbaar is, werd er een Ba-133 bron tegen de muur bevestigd in de te meten geometrie. De werkelijke, residuele activiteit van deze bron bedroeg  $14\,184 \text{ Bq}$  en er werd  $14\,475 \pm 833 \text{ Bq}$  gemeten. Uit dit resultaat is dus af te leiden dat de detector ook gebruikt kan worden wanneer de ingestelde geometrie niet volledig zichtbaar is voor de detector. Dit is ook het verwachte resultaat aangezien de efficiëntie van de detector berekend wordt a.d.h.v. de ingestelde geometrie in de software en niet de geometrie die werkelijk zichtbaar is.

De volledige oppervlakte van de muren werd gemeten met de Berthold LB124 SCINT detector met een snelheid van 1 s per detectoroppervlak van  $170 \text{ cm}^2$ . Enkel de zijwanden van het uitstekende vlak op de linkerzijmuur werden gedurende 7 s gemeten met deze detector om een MDA van  $1 \text{ Bq/cm}^2$  te bekomen. Daarna werd elk vlak van  $5625 \text{ cm}^2$  gemeten met de Falcon 5000 detector gedurende minimaal 900 s. Er werd dus gemeten met de vierkante geometrie met zijdes van 75 cm en niet met de optimale geometrie met zijdes van 1 m. Verder werd er ook langer gemeten dan nodig. Dit werd gedaan omdat er op het moment van de metingen nog geen bevestiging was van het FANC dat metingen met dergelijke geometrie aanvaardbaar zijn. Dit vormt echter geen probleem omdat de uitgevoerde metingen aan strengere criteria voldoen dan wanneer deze werden uitgevoerd met de meetgeometrie van  $1 \text{ m}^2$  en er slechts 500 s gemeten zou worden.

De nucliden in de volgende tabel werden teruggevonden in de gemeten spectra met de Falcon 5000 detector. Omdat er geen besmetting aanwezig zou mogen zijn in het lokaal werd er een verklaring gezocht voor de reden waarom deze nucliden terug te vinden zijn in de spectra. Merk op dat gamma spectroscopie bij dergelijk lage activiteitsconcentraties en vooral bij lage energieën heel wat moeilijkheden met zich mee brengt. Zo kunnen de gevonden nucliden ook het gevolg zijn van X-stralen die geproduceerd worden door interactie van straling met de collimator of de afscherming in de detector.

Tabel 16: Nucliden aanwezig in de spectra gemeten in lokaal 20.0.11

Nuclide	Energie (keV)	Verklaring voor het aanwezig zijn van het nuclide
Sc-46	1120,51	Zelfde gamma energie als Bi-214
Y-92	934,00	Zelfde gamma energie als Bi-214
Mo-99	140,51	Atmosferische lozing van het IRE in de vorm van $\beta$ - $\gamma$ -aërosolen
Tc-99m	140,51	
Cd-109	88,03	Aanwezig in collimator en afscherming van de detector of X-straling door interactie met de collimator of afscherming van de detector
I-126	388,63	Atmosferische lozing van het IRE
I-131	364,48	
Xe-133	81,00	Atmosferische lozing van edelgassen van het IRE
Xe-135	249,79	
Xe-135m	526,56	
Bi-211	72,87	Aanwezig door verval van radon in de atmosfeer of natuurlijk voorkomen in het gemeten beton
	351,10	
Bi-212	727,17	Aanwezig door verval van radon in de atmosfeer of natuurlijk voorkomen in het gemeten beton
Pb-212	74,81	Aanwezig door verval van radon in de atmosfeer of natuurlijk voorkomen in het gemeten beton
	77,11	
	87,20	
	238,63	
Bi-214	609,31	Aanwezig door verval van radon in de atmosfeer of natuurlijk voorkomen in het gemeten beton
	768,36	
	1120,29	
	1238,11	
Pb-214	74,81	Aanwezig door verval van radon in de atmosfeer of natuurlijk voorkomen in het gemeten beton
	77,11	
	87,20	
	241,98	
	295,21	
	351,92	
Ra-226	186,21	Natuurlijk voorkomend radionuclide van de U-238 vervalketen
Ac-228	93,32	Natuurlijk voorkomend radionuclide van de Th-232 vervalketen
	209,28	
	338,32	
	463,00	
	911,60	
	969,11	

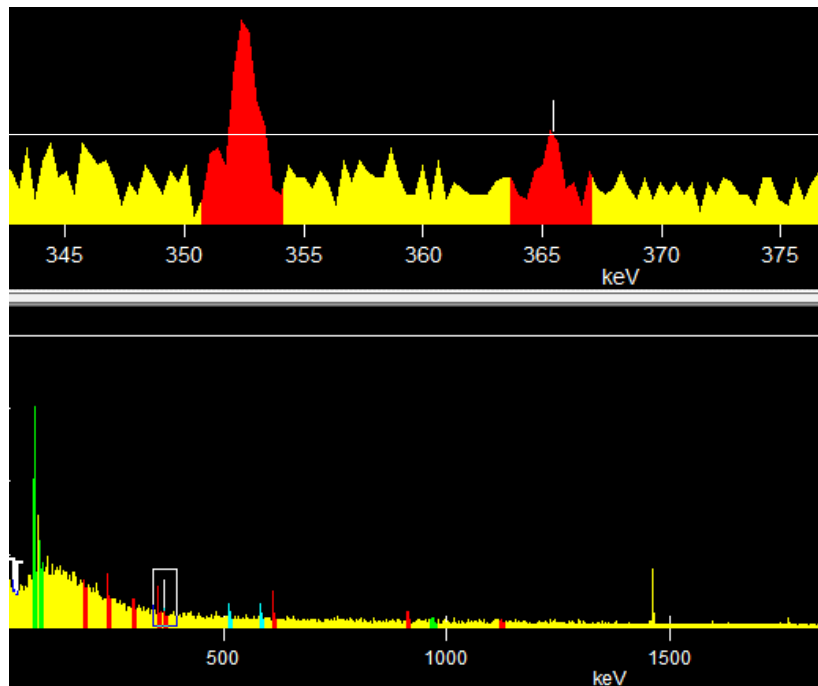
Bij de metingen met de Berthold detector werd er nooit een besmetting gevonden. Een MDA van 2,77 Bq/cm<sup>2</sup> wordt bereikt na een meettijd van 1 s en komt overeen met een detectielimiet van 17 cps. Er werd op geen enkele plaats een aantal tellingen per seconde gevonden die groter is dan 17 cps.

Bij de metingen met de Falcon 5000 detector werden de volgende nucliden teruggevonden omdat deze ontstaan door het verval van radon in de atmosfeer of door de aanwezigheid van de natuurlijk voorkomende nucliden uit de vervalketens van bijvoorbeeld U-238 of Th-232 in het gemeten beton:

Pb-212, Pb-214, Bi-211, Bi-212 en Bi-214, Ra-226, Ac-228. Deze nucliden worden constant aangemaakt en de activiteitsconcentratie varieert met de concentratie aan radon in de atmosfeer (behalve Ra-226 en Ac-228).

Cadmium is een bijproduct bij de productie van lood en is dus aanwezig in de collimator [51]. Cd-109 heeft echter een vrij lage halveringstijd en daarom wordt er verondersteld dat de aanwezigheid van Cd-109 veroorzaakt wordt door de productie van X-stralen in de collimator met dezelfde energie als Cd-109. Er werd nooit Cd-109 aangetroffen wanneer er gemeten werd zonder collimator.

Omdat het gebouw waarin er gemeten werd op dezelfde site gelegen is als het IRE kunnen de gasvormige, radioactieve effluenten van deze nucleaire installatie aangetroffen worden. Het IRE is immers een nucleaire inrichting van klasse 1 die vergund is om op gecontroleerde wijze een bepaalde hoeveelheid radioactiviteit te lozen in de atmosfeer of in het oppervlaktewater [52]. De volgende nucliden werden aangetroffen als gevolg van dergelijke lozingen: Mo-99, Tc-99m, I-126, I-131, Xe-133, Xe-135 en Xe-135m. Er valt op te merken dat de activiteit van deze nucliden steeds lager is dan de vrijgavenorm van 1 Bq/cm<sup>2</sup>. Om duidelijk te maken dat de activiteit van deze nucliden zeer laag is, wordt de aangetroffen piek van I-131 bij 364 keV weergegeven in onderstaande figuur. De piek bij 351 keV is afkomstig van Pb-214.



Figuur 60: Aangetroffen piek van Pb-214 (links) en I-131 (rechts)

Verder is een foute interpretatie door de software ook mogelijk. Zo zijn er verschillende radionucliden die gamma straling uitzenden met dezelfde energie. Een voorbeeld hiervan is Bi-214 dat geïnterpreteerd wordt als Sc-46 en Y-92.

De metingen met de handmonitor werden uitgevoerd met een snelheid van 1 s per detectieoppervlak van 170 cm<sup>2</sup>. Voor de metingen met de Falcon 5000 detector werd er gekozen voor een balkvormige collimator, een vierkante meetgeometrie van 5625 cm<sup>2</sup> en een meettijd van 900 s. De activiteit van respectievelijk Co-57 en Mn-54 over een oppervlak van 5625 cm<sup>2</sup> was bij deze metingen steeds kleiner dan 0,28 Bq/cm<sup>2</sup> en 0,36 Bq/cm<sup>2</sup> en er komen er geen hotspots voor groter dan 2,77 Bq/cm<sup>2</sup>. Hierdoor zou het gedeelte van dit lokaal dat gemeten werd vrijgegeven kunnen worden.



## 10. Conclusie en toekomstig werk

### 10.1. Conclusie

In deze thesis werd een techniek ontwikkeld voor oppervlaktemetingen gebruik makend van een BEGe detector en ISOCS software om lokalen van nucleaire installaties vrij te geven. Met de beschikbare detector werd er gekozen om te werken met een balkvormige collimator, een vierkante meetgeometrie met een oppervlakte van  $1 \text{ m}^2$  en een meettijd van 500 s. Op die manier wordt er voor Co-57 een MDA van  $0,29 \text{ Bq/cm}^2$  bekomen gemiddeld over het oppervlak van  $1 \text{ m}^2$ .

Om hotspots van radioactiviteit te detecteren die niet gevonden kunnen worden door deze methode, wordt het volledige oppervlak gedurende 1 s gemeten met een handmonitor (Berthold LB124 SCINT scintillatiedetector). Hierdoor ontstaat er een bovenlimiet van  $2,77 \text{ Bq/cm}^2$  voor Co-57 over het volledige oppervlak van  $170 \text{ cm}^2$ .

Wanneer de nuclidenvector, het oppervlak waarover de activiteit mag uitgemiddeld worden en het vrijgavelimiet gegeven is, kunnen de parameters (collimator, geometrie, meettijd, MDA's) die nodig zijn voor de uitvoering van deze meettechniek bepaald worden. Op die manier is het mogelijk om grote oppervlaktes te meten tot beneden het vrijgaveniveau en kunnen tevens hotspots gedetecteerd worden. Hierdoor kan de hoeveelheid radioactief afval verminderd worden en is er geen nood tot de afbraak van de gemeten lokalen indien deze vrijgegeven zijn.

De ontwikkelde techniek werd toegepast op lokaal 20.0.11 in het gebouw B20 op de voormalige site van Best Medical Belgium in Fleurus waar er  $^{18}\text{F}$ FDG geproduceerd werd. De nuclidenvector van dit lokaal bestaat uit Mn-54 en Co-57. Met de bekomen resultaten kan het gemeten gedeelte van het lokaal in principe vrijgegeven worden aangezien er geen besmettingen gevonden werden.

### 10.2. Toekomstig werk

Tijdens de uitgevoerde metingen van lokaal 20.0.11 werd er vastgesteld dat er nood is aan een systeem dat toelaat om enerzijds de detector en collimator eenvoudig te verplaatsen en er anderzijds voor zorgt dat de vloer en het plafond ook gemeten kunnen worden. Dergelijke systemen zijn commercieel beschikbaar zoals te zien op onderstaande figuur of kunnen zelf vervaardigd worden.



Figuur 61: Systeem voor het verplaatsen van de detector en collimator [53]

Een tweede punt waaraan gewerkt kan worden is het verlagen van de praktische teltijd naar de theoretisch teltijd door het verbeteren van het algoritme waarmee de nucliden geïdentificeerd worden.

Verder kan de uitgewerkte techniek ook toegepast worden op materialen zoals stoelen en tafels die aan een vrijgaveprocedure onderhevig zijn. Hiervoor dient er nagegaan te worden of er andere geometrieën bepaald moeten worden voor dit soort metingen en besmettingen consistent gedetecteerd kunnen worden. Ook kan er gecontroleerd worden of deze techniek toegepast kan worden voor het meten van de productiecellen die aanwezig zijn in het gebouw.

Uiteindelijk is het de bedoeling dat de volledige gecontroleerde zone van gebouw B20 vrijgegeven zal worden. Hiervoor zullen er metingen uitgevoerd moeten worden in alle lokalen van het gebouw op dezelfde manier als lokaal 20.0.11 gemeten is. Wanneer al deze metingen een positief resultaat geven, kan het gebouw vrijgegeven worden.



## Literatuurlijst

- [1] AIB Vinçotte - Controlatom, „Keeping the dosis low by setting the standards high,” AIB Vinçotte - Controlatom, [Online]. Available: [http://www.controlatom.be/template.asp?f=index\\_nl.htm&lang=nl](http://www.controlatom.be/template.asp?f=index_nl.htm&lang=nl). [Geopend 15 Oktober 2015].
- [2] NIRAS, „NIRAS heeft de exploitatie van de vroegere nucleaire site van Best Medical Belgium S.A. overgenomen,” NIRAS, [Online]. Available: <http://www.niras.be/content/niras-heeft-de-exploitatie-van-de-vroegere-nucleaire-site-van-best-medical-belgium-sa>. [Geopend 15 Oktober 2015].
- [3] M. Gaelens en A. Gerday, „Protocole de sortie de materiel des sondes contrôlés du B20,” Fleurus, 2014.
- [4] A. Annibaldi en C. Widmann, „Glucose metabolism in cancer cells,” 2010. [Online]. Available: <http://supersaturated.com/papers/glucose.pdf>. [Geopend 10 September 2015].
- [5] NIRAS, „De classificatie van radioactief afval voor het beheer op lange termijn,” NIRAS, [Online]. Available: <http://www.niras.be/content/de-classificatie-van-radioactief-afval-voor-het-beheer-op-lange-termijn>. [Geopend 27 Oktober 2015].
- [6] Canberra, „Model S573 ISOCS\* Calibration Software”.
- [7] CANBERRA, „Falcon 5000® Portable HPGe-Based Radionuclide Identifier,” [Online]. Available: [http://www.canberra.com/products/hp\\_radioprotection/falcon-5000.asp](http://www.canberra.com/products/hp_radioprotection/falcon-5000.asp). [Geopend 8 Oktober 2015].
- [8] Vinçotte, „Welkom bij Vinçotte,” Vinçotte, [Online]. Available: [https://www.vincotte.be/nl\\_be/over-vincotte](https://www.vincotte.be/nl_be/over-vincotte). [Geopend 22 Februari 2016].
- [9] FANC, „Organisatie van de controle en het toezicht op de nucleaire veiligheid in de grote belgische nucleaire installaties,” FANC, [Online]. Available: <http://www.fanc.fgov.be/nl/page/organisatie-van-de-controle-en-het-toezicht-op-de-nucleaire-veiligheid-in-de-grote-belgische-nucleaire-installaties/192.aspx>. [Geopend 22 Februari 2016].
- [10] IAEA, „IAEA Safety Standards for protecting people and the environment”.
- [11] AV Controlatom, „Infobrochure 3: Dosimetrie,” 2014.
- [12] AV Controlatom, „Klantenbrochure ringdosimeters,” 2014.
- [13] AV Controlatom, „Dosimetrie,” AV Controlatom, [Online]. Available: [http://www.controlatom.be/template.asp?f=dosimetrie\\_nl.htm](http://www.controlatom.be/template.asp?f=dosimetrie_nl.htm). [Geopend 22 Februari 2016].
- [14] AV Controlatom, „VA7,” AV Controlatom, [Online]. Available: [http://www.controlatom.be/template.asp?f=va7\\_nl.htm](http://www.controlatom.be/template.asp?f=va7_nl.htm). [Geopend 22 februari 2016].

- [15] AV Controlatom, „Laboratorium,” AV Controlatom, [Online]. Available: [http://www.controlatom.be/template.asp?f=laboratorium\\_nl.htm](http://www.controlatom.be/template.asp?f=laboratorium_nl.htm). [Geopend 22 februari 2016].
- [16] AV Controlatom, „Opleidingen,” AV Controlatom, [Online]. Available: [http://www.controlatom.be/template.asp?f=opleidingen\\_nl.htm](http://www.controlatom.be/template.asp?f=opleidingen_nl.htm). [Geopend 22 februari 2016].
- [17] J. Magill, G. Pfenning, R. Dreher en Z. Sòti, Karlsruhe Nuklidkarte, Lage: Nucleonica, 2012.
- [18] Laboratoire National Henri Becquerel, „18F,” 22 Oktober 2002. [Online]. Available: [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/F-18\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/F-18_tables.pdf). [Geopend 10 September 2015].
- [19] M. Ernest U. Conrad III, M. Hannah D. Morgan, B. Cheryl Vernon, M. Scott M. Schuetze en M. Janet F. Eary, „Fluorodeoxyglucose Positron Emission Tomography Scanning: Basic Principles and Imaging of Adult Soft-Tissue Sarcomas,” *The Journal of Bone & Joint Surgery*, pp. 94-104, 2004.
- [20] R. e. al., Biology 10th edition, Mc Graw Hill, 2014.
- [21] Huntsman Cancer Institute University of Utah, „Center for Quantitative Cancer Imaging,” [Online]. Available: <https://healthcare.utah.edu/huntsmancancerinstitute/research/cqci/radiochemistry/current-radiopharmaceutical-availability.php>. [Geopend 10 September 2015].
- [22] M. Hotat, „Rapport de surête - Production de Fluor-18 & FDG à Fleurus,” Fleurus, 2009.
- [23] FANC, „Informatiedossier Best Medical Belgium,” FANC, [Online]. Available: <http://www.fanc.fgov.be/nl/page/informatiedossier-best-medical-belgium/1474.aspx>. [Geopend 3 maart 2016].
- [24] Association of university radiation protection officers, „Transport of radioactive materials by road,” Sheffield, 2010.
- [25] S. Yu, „Review of 18F-FDG synthesis and quality control,” Biomedical Imaging and Intervention Journal, Singapore, 2006.
- [26] Crump Institute of Molecular Imaging and LA Tech Center, Department of Molecular and Medical Pharmacology, David Geffen School of Medicine at University of California, „Practical and reliable synthesis of 1,3,4,6-tetra-O-acetyl-2-O-trifluoromethanesulfonyl-beta-D-mannopyranose, a precursor of 2-deoxy-2-[18F]fluoro-D-glucose (FDG).,” PubMed, 2004.
- [27] G. F. Knoll, Radiation detection and measurement, New York: John Wiley & Sons.
- [28] Electronics tutorials, „PN Junction theory,” [Online]. Available: [http://wanda.fiu.edu/teaching/courses/Modern\\_lab\\_manual/pn\\_junction.html](http://wanda.fiu.edu/teaching/courses/Modern_lab_manual/pn_junction.html). [Geopend 23 Februari 2016].
- [29] CANBERRA, „Germanium Detectors,” [Online]. Available: <http://www.canberra.com/products/detectors/pdf/Germanium-Det-SS-C39606.pdf>. [Geopend 8 Oktober 2015].
- [30] Canberra, „Broad Energy Germanium Detectors,” 2013.

- [31] A. d. Waele, „Pulse-tube refrigerators: principle, recent developments, and prospects,” *Physica B*, pp. 479-482, 2000.
- [32] Berthold Technologies, „Contamination Monitor LB 124 SCINT for alpha- and beta-gamma-Measurement,” Wildbad Duitsland.
- [33] BERTHOLD TECHNOLOGIES GmbH & Co. KG, „LB 124 SCINT contamination monitor for  $\alpha$ - and  $\beta$ - $\gamma$ -Measurement,” Berthold Technologies, 2016. [Online]. Available: <https://www.berthold.com/en/rp/lb-124-scint-contamination-monitor>. [Geopend 10 Mei 2016].
- [34] Europese Commissie, „RP 114: Definition of Clearance Levels for the Release of Radioactively Contaminated Buildings and Building Rubble,” Aachen, 1999.
- [35] European commission, „RP 122 - Practical use of the concepts of clearance and exemption - Part 1 - Guidance on general clearance levels on practices,” 2000.
- [36] European commission, „RP101: Basis for the definition of surface contamination clearance levels for the recycling or reuse of metals arising from the dismantling of nuclear installations,” Luxembourg, 1999.
- [37] „ADR 2013 Deel 5 procedures voor de verzending,” [Online]. Available: [http://www.gevaarlijkestoffen.net/images/handboeken\\_2013/ADR2013/ADR-2013-DEEL-5.pdf](http://www.gevaarlijkestoffen.net/images/handboeken_2013/ADR2013/ADR-2013-DEEL-5.pdf). [Geopend 25 februari 2016].
- [38] FANC, „Vrijgavemetingen,” FANC, 2010 April 2010. [Online]. Available: <http://www.jurion.fanc.fgov.be/jurdb-consult/plainWettekstServlet?wettekstId=10557&lang=nl>. [Geopend 10 Mei 2016].
- [39] Canberra, „Genie 2000 spectroscopy software customization tools,” 2006.
- [40] G. Berger; M. Gaelens, „Méthodologie de mesures surfaciques au moyen d'un système ISOCS en vue de la libération du bâtiment B20,” Fleurus, 2015.
- [41] United States Environmental Protection Agency, „ISOCS [IN SITU OBJECT COUNTING SYSTEM] PORTABLE GAMMA SPECTROSCOPY INSTRUMENT,” 1999. [Online]. Available: [http://www.lm.doe.gov/cercla/documents/rockyflats\\_docs/SW/SW-A-004863.pdf](http://www.lm.doe.gov/cercla/documents/rockyflats_docs/SW/SW-A-004863.pdf). [Geopend 1 April 2016].
- [42] N. Reguigui, „Gamma Ray Spectrometry - practical information,” 2006.
- [43] L. Currie, Limits for qualitative detection and quantification determination. *Analytical Chemistry*, 1968.
- [44] G. R. Gilmore, „Practical Gamma-ray Spectrometry - 2nd Edition,” John Wiley & Sons, 2008.
- [45] G. Berger en M. Gaelens, „Méthodologie de mesures surfaciques au moyen d'un système ISOCS en vue de libération du bâtiment B20,” 2015.
- [46] J. Uyttenhove, „Capabilities and limitations of high resolution gamma spectrometry in environmental research,” Gent.
- [47] Canberra Industries, Inc., „Genie 2000 Spectroscopy Software,” Meriden.

- [48] IBA s.a., „Procédure de mesure des pièces à la sortie de la zone contrôlée avant libération,” Fleurus, 2012.
- [49] V. Chechnev en N. Kuzemko, „nucleide,” 28 april 2015. [Online]. Available: [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/Ba-133\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Ba-133_tables.pdf). [Geopend 28 maart 2016].
- [50] K. J. Nurmela en P. R. J. Östergard, „Covering a square with up to 30 equal cirkels,” Helsinki, 2000.
- [51] U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, „TOXICOLOGICAL PROFILE FOR CADMIUM,” Georgia, 2012.
- [52] FANC, „Radioactieve lozingen van de nucleaire inrichtingen van klasse I in 2011,” Brussel, 2012.
- [53] Canberra, „In Situ Gamma Spectroscopy with ISOCS, an In Situ Object Counting System,” 2008.
- [54] Europese Commissie, „RP89: Recommended radiological protection criteria for the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations,” 1998.
- [55] M.L.Smith, L.Bignell, D.Alexiev, L.Mo en J.Harrison, „Evaluation of lead shielding for a gamma-spectroscopy system,” *Nuclear instruments & methods in physics research*, 2008.

## Lijst van bijlagen

Bijlage 1: Vrijgaveniveaus per radionuclide .....	93
Bijlage 2: Geometry composer report.....	95
Bijlage 3: Rapport van een meting met Ba-133 bron .....	97
Bijlage 4: Spectrum van een meting met Co-57 bron .....	103
Bijlage 5: Efficiëntie per nuclide van de Berthold LB124 SCINT detector .....	105



## Bijlage 1: Vrijgaveniveaus per radionuclide [34]

Radio-nuclide	Surface specific clearance levels for buildings		Clearance levels for rubble Mass specific Bq/g
	Reuse or Demolition Bq/cm <sup>2</sup>	Direct Demolition Bq/cm <sup>2</sup>	
H 3	3.8E+3	3.8E+3	6.2E+1
C 14	2.8E+3	5.8E+3	1.0E+1
Na 22	4.4E-1	3.5E+0	1.0E-1
S 35	2.6E+3	2.0E+5	1.0E+3
Cl 36	3.2E+1	3.2E+1	1.1E+0
K 40	5.6E+0	2.4E+1	7.9E-1
Ca 45	1.1E+3	6.4E+4	4.2E+2
Sc 46	1.3E+0	1.1E+1	1.1E-1
Mn 53	2.3E+4	2.3E+4	1.5E+3
Mn 54	1.5E+0	1.2E+1	2.6E-1
Fe 55	1.0E+4	2.4E+4	6.1E+2
Co 56	8.2E-1	6.1E+0	6.2E-2
Co 57	1.2E+1	1.3E+2	2.7E+0
Co 58	3.2E+0	2.6E+1	2.3E-1
Co 60	3.6E-1	2.9E+0	8.9E-2
Ni 59	4.2E+4	8.9E+4	2.9E+3
Ni 63	1.8E+4	3.7E+4	1.2E+3
Zn 65	2.3E+0	1.9E+1	3.8E-1
As 73	4.0E+2	2.1E+4	2.1E+2
Se 75	5.2E+0	4.9E+1	6.7E-1
Sr 85	6.2E+0	5.2E+1	4.4E-1
Sr 90	3.4E+1	3.4E+1	1.5E+0
Y 91	4.1E+2	5.4E+4	1.6E+2
Zr 93	3.1E+2	2.5E+3	8.2E+1
Zr 95	1.8E+0	1.5E+1	1.2E-1
Nb 93m	5.0E+2	3.8E+4	1.2E+3
Nb 94	5.3E-1	4.3E+0	1.4E-1
Mo 93	7.5E+1	2.3E+3	3.8E+1
Tc 97	8.0E+1	6.9E+2	1.4E+1
Tc 97m	2.9E+2	5.2E+2	8.6E+0
Tc 99	7.0E+1	7.0E+1	1.4E+0
Ru 106	5.6E+0	4.5E+1	1.1E+0
Ag 108m	5.1E-1	4.2E+0	1.4E-1
Ag 110m	4.8E-1	3.9E+0	8.1E-2
Cd 109	4.0E+1	4.1E+3	1.0E+2
Sn 113	7.2E+0	6.7E+1	8.9E-1
Sb 124	1.9E+0	1.5E+1	2.0E+2
Sb 125	2.1E+0	1.8E+1	5.4E-1
Te 123m	1.4E+1	1.6E+2	2.1E+0
Te 127m	1.3E+2	3.3E+3	4.3E+1
I 125	7.5E+1	1.4E+4	1.1E+2

Radio-nuclide	Surface specific clearance levels for buildings		Clearance levels for rubble Mass specific Bq/g
	Reuse or Demolition Bq/cm <sup>2</sup>	Direct Demolition Bq/cm <sup>2</sup>	
I 129	7.5E+0	7.5E+0	1.2E-1
Cs 134	6.3E-1	5.1E+0	1.4E-1
Cs 135	1.8E+3	8.8E+3	4.3E+2
Cs 137	1.5E+0	1.2E+1	4.0E-1
Ce 139	1.2E+1	1.4E+2	2.1E+0
Ce 144	2.6E+1	2.4E+2	5.2E+0
Pm 147	1.5E+3	2.4E+4	6.0E+2
Sm 151	3.6E+3	2.9E+4	9.5E+2
Eu 152	7.7E-1	6.2E+0	2.0E-1
Eu 154	6.9E-1	5.7E+0	1.8E-1
Eu 155	1.5E+1	2.6E+2	8.1E+0
Gd 153	1.2E+1	2.9E+2	6.0E+0
Tb 160	2.9E+0	2.3E+1	2.1E-1
Tm 170	3.7E+2	9.0E+3	1.3E+2
Tm 171	1.5E+3	5.8E+4	1.5E+3
Ta 182	1.7E+0	1.4E+1	1.8E-1
W 181	5.1E+1	1.7E+3	2.4E+1
W 185	8.1E+2	3.9E+5	3.2E+2
Os 185	3.3E+0	2.9E+1	3.3E-1
Ir 192	3.7E+0	3.1E+1	2.9E-1
Tl 204	4.8E+2	2.5E+3	8.1E+1
Pb 210	1.4E+0	1.4E+0	8.7E-2
Bi 207	5.4E-1	4.5E+0	1.5E-1
Po 210	4.2E+0	7.4E+1	1.1E+0
Ra 226	4.9E-1	9.4E-1	8.3E-2
Ra 228	4.4E-1	3.8E+0	1.2E-1
Th 228	2.7E-1	2.6E+0	7.3E-2
Th 229	1.2E-1	9.4E-1	3.1E-2
Th 230	3.3E-1	2.7E+0	8.8E-2
Th 232	1.4E-1	1.2E+0	3.8E-2
Pa 231	1.3E-2	1.1E-1	3.5E-3
U 232	1.7E-1	1.4E+0	4.5E-2
U 233	1.2E+0	9.7E+0	3.2E-1
U 234	1.4E+0	1.1E+1	3.6E-1
U 235	1.3E+0	1.0E+1	3.4E-1
U 236	1.5E+0	1.2E+1	3.9E-1
U 238	1.6E+0	1.3E+1	4.3E-1
Np 237	6.2E-1	5.0E+0	1.6E-1
Pu 236	7.1E-1	6.5E+0	1.9E-1
Pu 238	3.1E-1	2.5E+0	8.2E-2
Pu 239	2.9E-1	2.3E+0	7.7E-2

Radio-nuclide	Surface specific clearance levels for buildings		Clearance levels for rubble Mass specific Bq/g
	Reuse or Demolition Bq/cm <sup>2</sup>	Direct Demolition Bq/cm <sup>2</sup>	
Pu 240	2.9E-1	2.3E+0	7.7E-2
Pu 241	1.1E+1	9.2E+1	3.0E+0
Pu 242	3.0E-1	2.4E+0	8.0E-2
Pu 244	3.1E-1	2.5E+0	8.2E-2
Am 241	3.4E-1	2.8E+0	9.1E-2
Am 242m	3.2E-1	2.6E+0	8.5E-2
Am 243	3.4E-1	2.8E+0	9.1E-2
Cm 242	2.5E+0	4.0E+1	6.7E-1
Cm 243	4.6E-1	3.8E+0	1.2E-1
Cm 244	5.5E-1	4.5E+0	1.5E-1
Cm 245	3.0E-1	2.4E+0	8.0E-2
Cm 246	3.4E-1	2.8E+0	9.1E-2
Cm 247	3.7E-1	3.0E+0	9.9E-2
Cm 248	9.8E-2	7.9E-1	2.6E-2
Bk 249	8.4E+1	9.8E+2	2.2E+1
Cf 248	1.5E+0	1.7E+1	4.0E-1
Cf 249	2.1E-1	1.7E+0	5.5E-2
Cf 250	4.2E-1	3.5E+0	1.1E-1
Cf 251	2.0E-1	1.6E+0	5.4E-2
Cf 252	7.1E-1	6.6E+0	1.9E-1
Cf 254	4.2E-1	1.4E+1	1.1E-1
Es 254	1.4E+0	1.2E+1	2.5E-1



## Bijlage 2: Geometry composer report

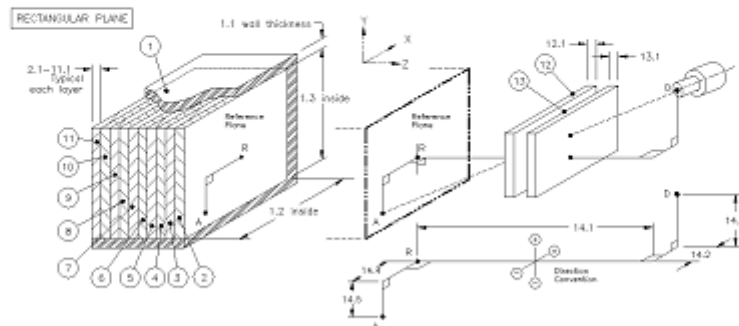
### Geometry Composer Report



**Date:** Thursday, February 25, 2016 - 14:20:05  
**Description:**  
**Comment:**  
**File Name:** C:\GENIE2K\isocs\data\GEOMETRY\In-Situ\RECTANGULAR\_PLANE\RECT\_PLANE\_75\_75\_15.geo  
**Software:** ISOCS  
**Template:** RECTANGULAR\_PLANE, Version: (default)  
**Detector:** 13000208  
**Collimator:** VIERKANT B20 (none)  
**Environment:** Temperature = 22 °C, Pressure = 760 mm Hg, Relative Humidity = 30%  
**Integration:** Convergence = 1.00%, MDRPN = 2<sup>4</sup> (16), CRPN = 2<sup>4</sup> (16)

Dimensions (cm)										
No.	Description	d.1	d.2	d.3	d.4	d.5	d.6	Material	Density	Rel. Conc.
1	Side Walls	0.1	75	75				concrete	2.3	
2	Layer 1	0.3						concrete	2.3	1.00
3	Layer 2	0						none		
4	Layer 3	0						none		
5	Layer 4	0						none		
6	Layer 5	0						none		
7	Layer 6	0						none		
8	Layer 7	0						none		
9	Layer 8	0						none		
10	Layer 9	0						none		
11	Layer 10	0						none		
12	Absorber 1							none		
13	Absorber 2							none		
14	Source - Detector	125	0	0	0	0	0			

List of energies for efficiency curve generation							
45.0	60.0	73.1	75.0	80.0	81.1	85.1	87.8
100.0	122.6	150.0	200.0	227.8	239.1	276.9	300.0
303.2	352.4	356.5	384.3	500.0	511.4	546.9	584.0
610.1	661.7	700.0	768.4	834.8	871.8	912.4	934.1
970.4	1000.0	1121.7	1281.0	1400.0	1435.9	1460.8	1509.2
1661.3	1729.6	1764.5	2000.0	2118.5			

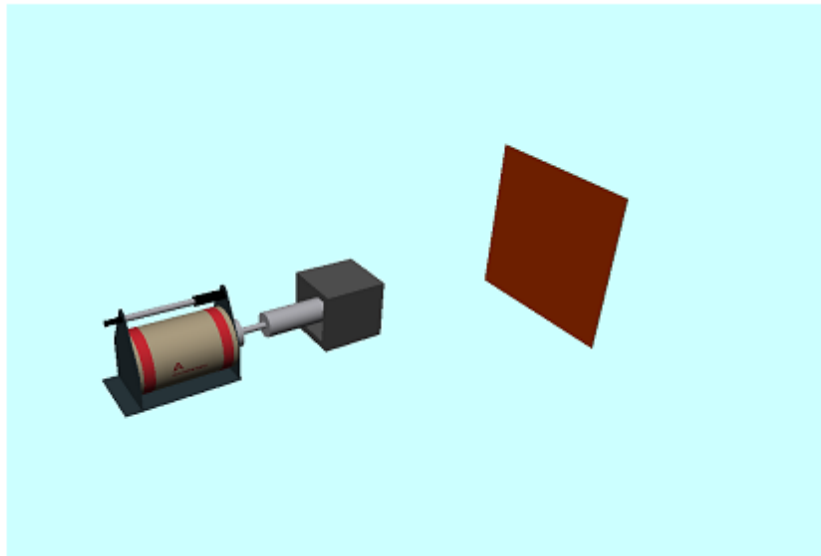


Page 1 of 2

## Geometry Composer Report



**Date:** Thursday, February 25, 2016 - 14:20:05  
**Description:**  
**Comment:**  
**File Name:** C:\GENE2K\isocs\data\GEMETRY\In-Situ\RECTANGULAR\_PLANE\RECT\_PLANE\_75\_75\_15.geo  
**Software:** ISOCS  
**Template:** RECTANGULAR\_PLANE, Version: (default)



### Bijlage 3: Rapport van een meting met Ba-133 bron

Peak Locate Analysis Report 26/02/2016 11:56:40 Page 1

\*\*\*\*\* P E A K L O C A T E R E P O R T \*\*\*\*\*

Detector Name: 13000208  
 Sample Title: RASO20151201\_BG  
 Peak Locate Performed on: 26/02/2016 11:56:39  
 Peak Locate From Channel: 1  
 Peak Locate To Channel: 4096  
 Peak Search Sensitivity: 2.50

Peak No.	Centroid Channel	Centroid Uncertainty	Energy (keV)	Peak Significance
1	14.00	<NA>	4.59	<NA>
2	94.00	<NA>	31.25	<NA>
3	106.00	<NA>	35.25	<NA>
4	218.93	<NA>	72.87	<NA>
5	224.75	<NA>	74.81	<NA>
6	243.32	<NA>	81.00	<NA>
7	252.96	<NA>	84.21	<NA>
8	256.65	<NA>	85.44	<NA>
9	264.43	<NA>	88.03	<NA>
10	716.41	<NA>	238.63	<NA>
11	772.58	<NA>	257.34	<NA>
12	829.78	<NA>	276.40	<NA>
13	886.25	<NA>	295.21	<NA>
14	908.64	<NA>	302.67	<NA>
15	1056.46	<NA>	351.92	<NA>
16	1068.70	<NA>	356.00	<NA>
17	1152.29	<NA>	383.85	<NA>
18	1537.00	<NA>	512.03	<NA>
19	1752.00	<NA>	583.66	<NA>
20	1832.03	<NA>	610.33	<NA>
21	2736.25	<NA>	911.60	<NA>
22	2908.86	<NA>	969.11	<NA>
23	3362.59	<NA>	1120.29	<NA>

? - Adjacent peak noted

Errors quoted at 1.000 sigma 26/02/2016 11:56:44 Page 1  
 Peak Analysis Report

\*\*\*\*\* P E A K A N A L Y S I S R E P O R T \*\*\*\*\*

Detector Name: 13000208  
 Sample Title: RASO20151201\_BG  
 Peak Analysis Performed on: 26/02/2016 11:56:44  
 Peak Analysis From Channel: 1  
 Peak Analysis To Channel: 8192

Peak No.	ROI start	ROI end	Peak centroid	Energy (keV)	FWHM (keV)	Net Peak Area	Net Area Uncert.	Continuum Counts
1	14-	19	17.21	5.66	0.66	1.58E+002	80.85	2.98E+001
2	89-	95	92.89	30.88	0.76	5.31E+002	45.87	1.53E+002
3	102-	108	105.56	35.10	0.77	1.44E+002	17.17	1.49E+002

4	216-	223	219.82	73.17	0.86	1.60E+002	28.07	2.36E+002
5	222-	229	225.62	75.10	0.87	4.03E+002	37.25	2.43E+002
6	240-	247	243.79	81.15	0.88	3.73E+002	24.58	2.60E+002
7	251-	258	255.24	84.97	0.88	1.40E+002	19.60	2.69E+002
8	712-	721	717.02	238.83	1.09	8.52E+001	14.76	1.30E+002
9	826-	835	831.05	276.82	1.13	5.08E+001	11.77	1.03E+002
10	882-	891	886.76	295.38	1.15	3.53E+001	10.64	8.41E+001
11	905-	914	910.14	303.17	1.16	1.03E+002	14.22	7.31E+001
12	1053-	1063	1058.24	352.52	1.20	7.44E+001	11.99	6.61E+001
13	1065-	1075	1069.99	356.43	1.21	3.41E+002	20.29	6.15E+001
14	1148-	1158	1153.13	384.13	1.23	5.30E+001	10.27	3.65E+001
15	1530-	1541	1536.00	511.70	1.33	5.27E+001	9.25	3.47E+001
16	1746-	1757	1752.23	583.74	1.38	5.07E+001	8.90	1.73E+001
17	1824-	1836	1830.45	609.80	1.40	1.06E+002	11.52	2.08E+001
18	2731-	2744	2738.09	912.21	1.59	5.00E+001	8.44	6.48E+000
19	3358-	3372	3365.47	1121.24	1.70	3.30E+001	7.27	6.88E+000

M = First peak in a multiplet region  
m = Other peak in a multiplet region  
F = Fitted singlet

Errors quoted at 1.000 sigma  
Efficiency Calibration Report

26/02/2016 11:57:24 Page 1

\*\*\*\*\* EFFICIENCY CALIBRATION REPORT \*\*\*\*\*

Detector Name: 13000208  
Sample Title: RASO20151201\_BG

Geometry Description:  
Efficiency Calibration Performed on: 26/02/2016 11:57:24  
by:  
Geometry Type Used: INTERPOL

Efficiency Triplets

Energy	Efficiency	Error
45.00	7.00E-005	1.05E-005
60.00	8.87E-005	8.87E-006
73.17	9.55E-005	3.82E-006
75.10	9.61E-005	3.84E-006
80.00	9.75E-005	9.75E-006
81.15	9.75E-005	3.90E-006
84.97	9.79E-005	3.92E-006
100.00	9.85E-005	9.85E-006
150.00	9.03E-005	9.03E-006
176.55	8.24E-005	3.30E-006
200.00	7.45E-005	5.96E-006
227.76	6.59E-005	2.63E-006
238.83	6.29E-005	2.52E-006
276.82	5.45E-005	2.18E-006
295.38	5.11E-005	2.05E-006
300.00	5.05E-005	4.04E-006
303.17	4.98E-005	1.99E-006
352.52	4.24E-005	1.70E-006
356.43	4.19E-005	1.68E-006
384.13	3.88E-005	1.55E-006
462.79	3.20E-005	1.28E-006
500.00	2.97E-005	1.78E-006
511.70	2.90E-005	1.16E-006
546.94	2.72E-005	1.09E-006
583.74	2.55E-005	1.02E-006
609.80	2.45E-005	9.79E-007
661.65	2.27E-005	9.06E-007
700.00	2.14E-005	1.28E-006
768.36	1.95E-005	7.82E-007
834.83	1.80E-005	7.22E-007
871.80	1.73E-005	6.93E-007
912.21	1.66E-005	6.66E-007
934.06	1.63E-005	6.51E-007
1000.00	1.53E-005	6.13E-007
1121.24	1.38E-005	5.53E-007
1280.96	1.22E-005	4.88E-007
1400.00	1.13E-005	4.50E-007
1435.86	1.10E-005	4.41E-007
1460.81	1.08E-005	4.34E-007
1509.19	1.05E-005	4.21E-007

Efficiency Calibration Report

26/02/2016 11:57:24

Page 2

1661.28	9.63E-006	3.85E-007
1729.60	9.28E-006	3.71E-007
1764.49	9.12E-006	3.65E-007
2000.00	8.13E-006	3.25E-007
2118.54	7.70E-006	3.08E-007

DUAL Efficiency Calibration Equation

Single Equation Terms ->	Offset:	19.892
	Slope:	-38.464
	Quadratic:	17.448
	Cubic:	-3.594
	4th Order:	0.345
	5th Order:	-0.013
	6th Order:	0.000
	7th Order:	0.000
	8th Order:	0.000
	9th Order:	0.000

## EMPIRICAL Efficiency Calibration Equation

```

Empirical Equation Terms -> Scaling: 1081.770
                           Offset: -11.162
                           Slope: 0.883
                           Quadratic: 0.060
                           Cubic: 0.122
                           4th Order: -0.097
                           5th Order: 0.013

```

## LINEAR Efficiency Calibration Equation

```

Linear Equation Terms -> Offset: -0.000
                        Slope: -4.921
                        Quadratic: 295.672
                        Cubic: -33528.320
                        4th Order: 1622137.375
                        5th Order: -28893258.0
                        6th Order: 0.000
                        7th Order: 0.000
                        8th Order: 0.000
                        9th Order: 0.000

```

Nuclide MDA Report

26/02/2016 11:57:30

Page 1

No MDA analysis results available for reporting purposes

Nuclide Identification Report

26/02/2016 11:57:37

Page 1

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* N U C L I D E I D E N T I F I C A T I O N R E P O R T \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

Sample Title: RASO20151201\_BG  
 Nuclide Library Used: C:\GENIE2K\CANFILES\STDLIB.NLB

## IDENTIFIED NUCLIDES

Nuclide Name	Id Confidence	Energy (keV)	Yield (%)	Activity (Bq /Unit)	Activity Uncertainty
SC-46	0.116	889.25	99.98		
		1120.51*	99.99	2.655E+003	5.942E+002
BA-133	0.939	79.62	2.55		
		81.00*	33.00	1.286E+004	1.312E+003
		276.40*	6.90	1.498E+004	3.630E+003
		302.83*	17.80	1.294E+004	1.966E+003
		356.00*	60.00	1.507E+004	1.317E+003
		383.85*	8.70	1.743E+004	3.541E+003
XE-133	0.996	81.00*	36.72	1.157E+004	9.194E+002
		74.81*	9.60	4.847E+004	4.883E+003
PB-212	0.377	77.11	17.50		
		87.20	6.30		
		89.80	1.75		
		115.19	0.60		
		238.63*	44.60	3.369E+003	5.990E+002
		300.09	3.41		
BI-214	0.347	609.31*	46.30	1.041E+004	1.202E+003
		768.36	5.04		
		806.17	1.23		
		934.06	3.21		
		1120.29*	15.10	1.758E+004	3.934E+003
		1155.19	1.69		
		1238.11	5.94		
		1280.96	1.47		
		1377.67	4.11		
		1385.31	0.78		
		1401.50	1.39		
		1407.98	2.48		
		1509.19	2.19		
		1661.28	1.15		
		1729.60	3.05		
1764.49	15.80				
1847.44	2.12				
2118.54	1.21				
PB-214	0.449	74.81*	6.33	7.351E+004	7.406E+003
		77.11	10.70		
		87.20	3.70		
		89.80	1.03		
		241.98	7.49		
		295.21*	19.20	3.994E+003	1.213E+003
		351.92*	37.20	5.235E+003	8.698E+002
		785.91	1.10		

Nuclide Name	Id Confidence	Energy (keV)	Yield (%)	Activity (Bq /Unit)	Activity Uncertainty
--------------	---------------	--------------	-----------	---------------------	----------------------

\* = Energy line found in the spectrum.  
 Energy Tolerance : 1.000 keV  
 Nuclide confidence index threshold = 0.10  
 Errors quoted at 1.000 sigma

\*\*\*\*\* UNIDENTIFIED PEAKS \*\*\*\*\*

Peak Locate Performed on: 26/02/2016 11:56:39  
 Peak Locate From Channel: 1  
 Peak Locate To Channel: 4096

Peak No.	Energy (keV)	Peak Size in Counts per Second	Peak CPS % Uncertainty	Peak Type	Tol. Nuclide
1	5.66	1.7502E-001	51.28		
2	30.88	5.8916E-001	8.64		
3	35.10	1.5978E-001	11.93		
4	73.17	1.7768E-001	17.54	Tol.	BI-211
7	84.97	1.5570E-001	13.98	Tol.	TH-227 TH-231
15	511.70	5.8455E-002	17.57		
16	583.74	5.6309E-002	17.55		
18	912.21	5.5564E-002	16.87	Sum	

M = First peak in a multiplet region  
 m = Other peak in a multiplet region  
 F = Fitted singlet

Errors quoted at 1.000 sigma

\*\*\*\*\* N U C L I D E M D A R E P O R T \*\*\*\*\*

Detector Name: 13000208  
 Sample Geometry:  
 Sample Title: RASO20151201\_BG  
 Nuclide Library Used: C:\GENIE2K\CANFILES\STDLIB.NLB

Nuclide Name	Energy (keV)	Yield (%)	Line MDA (Bq /Unit)	Nuclide MDA (Bq /Unit)	Activity (Bq /Unit)	
+	K-40	1460.81	10.67	7.5691E+004	7.57E+004	2.3756E+005
	SC-46	889.25	99.98	2.3224E+003	1.20E+003	-8.4375E+002
		1120.51*	99.99	1.1980E+003		2.6547E+003
	MN-54	834.83	100.00	2.1294E+003	2.13E+003	-7.5259E+002
	CO-57	122.06	85.51	1.7926E+003	1.79E+003	-1.3658E+003
		136.48	10.60	1.4201E+004		6.8604E+003
	CO-60	1173.22	100.00	3.0656E+003	2.40E+003	9.2190E+002
		1332.49	100.00	2.4041E+003		-3.9754E+002
	SE-75	96.73	3.41	4.0634E+004	2.55E+003	1.9928E+004
		121.11	16.70	9.3057E+003		2.9669E+003
		136.00	59.20	2.5500E+003		1.8814E+003
		198.60	1.45	1.0305E+005		-2.2763E+004
		264.65	59.80	2.8391E+003		8.5669E+002
		279.53	25.20	7.1065E+003		-1.8120E+003
		303.91	1.32	1.5252E+005		2.1259E+005
		400.65	11.40	1.5600E+004		-1.3417E+002
	KR-85	513.99	0.43	5.7905E+005	5.79E+005	2.9497E+005
	KR-85M	151.18	75.30	2.1126E+003	2.11E+003	2.7961E+002
		304.87	14.00	1.4238E+004		1.1393E+004
	SR-85	513.99	99.27	2.5084E+003	2.51E+003	1.2778E+003
	Y-88	898.02	93.40	2.3144E+003	2.21E+003	-4.8633E+001
		1836.01	99.38	2.2139E+003		1.0062E+003
	CD-109	88.03	3.72	4.0715E+004	4.07E+004	-4.0718E+004
	SN-113	255.12	1.93	8.2602E+004	2.78E+003	1.7050E+004
		391.69	64.90	2.7782E+003		-3.9358E+002
+	BA-133	79.62	2.55	6.8304E+004	1.73E+003	-4.3229E+003
		81.00*	33.00	2.6824E+003		1.2863E+004
		276.40*	6.90	1.4703E+004		1.4983E+004
		302.83*	17.80	5.3176E+003		1.2939E+004
		356.00*	60.00	1.7310E+003		1.5074E+004
		383.85*	8.70	1.0135E+004		1.7426E+004
	CS-134	475.35	1.46	1.1993E+005	2.48E+003	3.8050E+004
		563.23	8.38	2.3359E+004		-2.5627E+003
		569.32	15.43	1.2546E+004		-4.0190E+003
		604.70	97.60	2.4834E+003		-8.6397E+002
		795.84	85.40	2.9770E+003		1.3772E+003
		801.93	8.73	2.5652E+004		-2.2939E+004
		1038.57	1.00	2.3817E+005		1.3455E+005
		1167.94	1.80	1.6509E+005		7.1180E+004
		1365.15	3.04	6.7581E+004		-2.5758E+003
	CS-136	66.91	12.50	1.1150E+004	2.22E+003	2.2280E+003
		86.29	6.30	2.4464E+004		-4.0636E+003

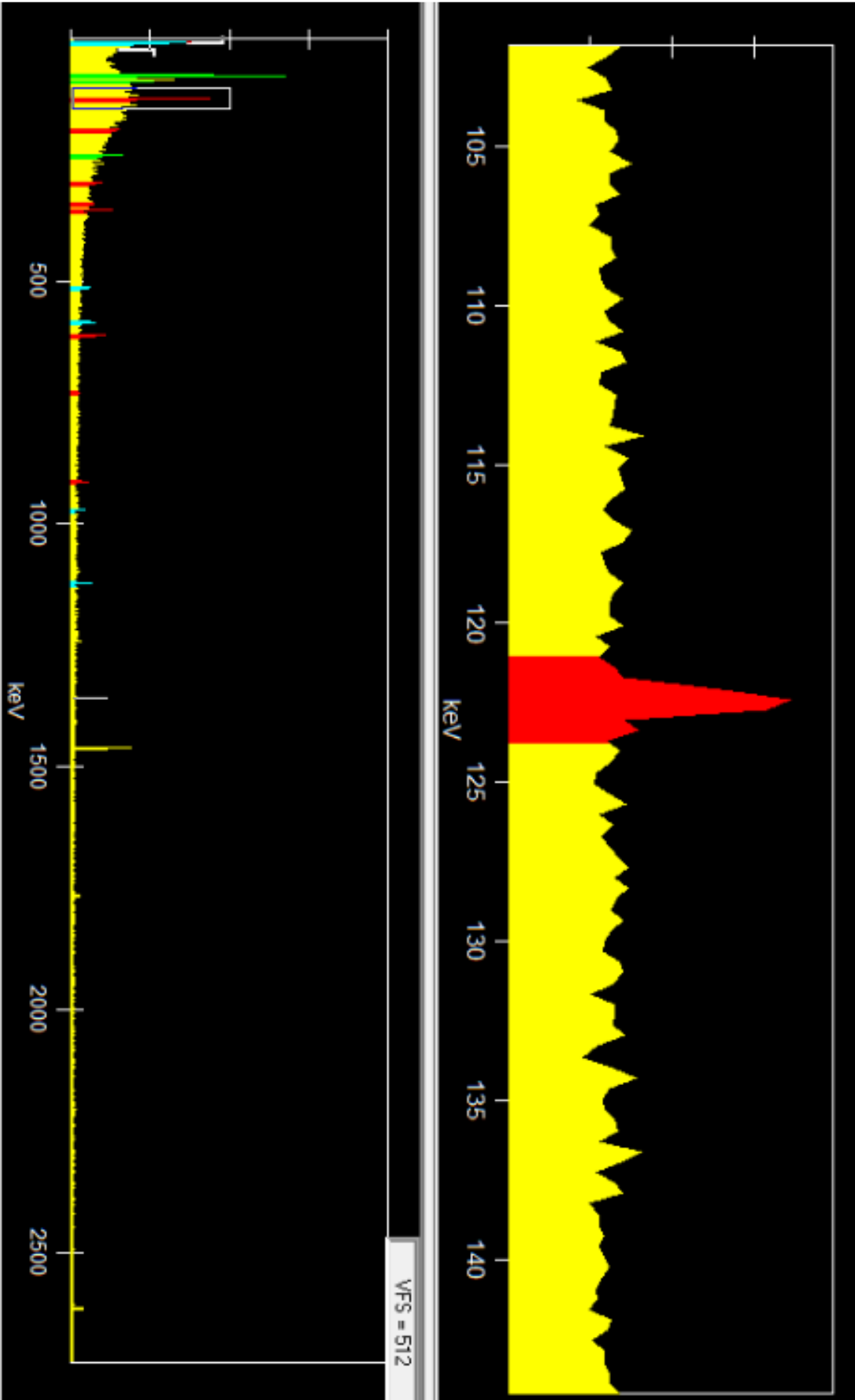
Nuclide Name	Energy (keV)	Yield (%)	Line MDA (Bq /Unit)	Nuclide MDA (Bq /Unit)	Activity (Bq /Unit)	
CS-136	153.22	7.46	2.1079E+004	2.22E+003	1.5597E+004	
	163.89	4.61	3.2946E+004		-2.7680E+003	
	176.55	13.56	1.1128E+004		-8.7184E+003	
	273.65	12.66	1.4121E+004		3.7389E+003	
	340.57	48.50	3.6087E+003		1.0735E+003	
	818.50	99.70	2.2156E+003		5.5063E+002	
	1048.07	79.60	2.8722E+003		-2.9017E+003	
	1235.34	19.70	1.7030E+004		-4.8038E+002	
	661.65	85.12	2.2986E+003		2.30E+003	-1.4752E+003
	138.10	1.49	1.1670E+005		3.87E+003	7.8176E+004
CS-137	227.76	1.51	1.2753E+005		-3.8068E+003	
	408.98	4.66	4.2753E+004		-5.3734E+003	
CS-138	462.79	30.70	7.5011E+003		2.9113E+003	
	546.94	10.80	2.0618E+004		-1.6263E+004	
	871.80	5.11	5.2733E+004		-5.3233E+003	
	1009.78	29.80	1.1127E+004		-2.2026E+003	
	1147.22	1.24	2.7841E+005		-2.0856E+005	
	1343.59	1.14	2.2935E+005		-4.7794E+003	
	1435.86	76.30	3.8679E+003		9.0068E+002	
	165.85	80.35	1.8529E+003	1.85E+003	-1.0811E+003	
	279.19	77.30	2.2901E+003	2.29E+003	-1.3067E+003	
	609.31*	46.30	2.3412E+003	2.34E+003	1.0410E+004	
	768.36	5.04	5.1674E+004		3.0603E+004	
	806.17	1.23	1.8150E+005		4.7281E+004	
	934.06	3.21	8.1676E+004		2.2794E+004	
1120.29*	15.10	7.9325E+003		1.7578E+004		
1155.19	1.69	1.8189E+005		6.3776E+004		
1238.11	5.94	5.1335E+004		-1.7726E+004		
1280.96	1.47	2.0553E+005		-5.0336E+004		
1377.67	4.11	7.3316E+004		-6.6333E+003		
1385.31	0.78	3.5299E+005		1.0894E+005		
1401.50	1.39	2.1744E+005		5.9212E+004		
1407.98	2.48	1.2691E+005		1.1278E+005		
1509.19	2.19	1.1321E+005		6.3553E+004		
1661.28	1.15	2.0160E+005		3.3408E+003		
1729.60	3.05	8.1281E+004		4.8193E+004		
1764.49	15.80	2.4195E+004		1.8758E+004		
1847.44	2.12	8.4497E+004		-3.9943E+003		
2118.54	1.21	1.4310E+005		-4.1696E+004		
PB-214	74.81*	6.33	1.3720E+004	2.85E+003	7.3511E+004	
	77.11	10.70	1.6085E+004		-1.9723E+004	
	87.20	3.70	4.3428E+004		-2.0140E+004	
	89.80	1.03	1.3871E+005		1.0978E+004	
	241.98	7.49	2.3116E+004		-4.5766E+002	
	295.21*	19.20	5.1293E+003		3.9939E+003	
	351.92*	37.20	2.8531E+003		5.2347E+003	
	785.91	1.10	2.1824E+005		-4.5568E+004	

- + - Nuclide identified during the nuclide identification
- \* - Energy line found in the spectrum
- > - Calculated MDA is zero due to zero counts in the region or the region is outside the spectrum
- @ - Half-life too short to be able to perform the decay correction





Bijlage 4: Spectrum van een meting met Co-57 bron





# Bijlage 5: Efficiëntie per nuclide van de Berthold LB124 SCINT detector [32]



LB 124 SCINT

Liste des radionucléides avec les facteurs de calibrage qui sont programmés dans LB 124 Scint pour la conversion de ips en Bq/cm<sup>2</sup>. Des sources de contrôle avec une surface normée de 10 cm x 10 cm ont été utilisées (DIN 44801). Les facteurs ont été déterminés conformément aux prescriptions de la norme ISO 7503-1.

LB124 SCINT			Efficacités et facteurs de calibrage LB 124 SCINT									
SW Version 3.18			A-100 <sup>1</sup> <i>Achutek</i>					ISO 7503-1 <sup>2</sup> <i>Erism</i>				
No.	Nucléide	Canal	Efficacité [%]	Réponse [s <sup>-1</sup> Bq <sup>-1</sup> cm <sup>2</sup> ]	Facteur de calibrage [s Bq cm <sup>-2</sup> ]	Seuil de décision [Bq/cm <sup>2</sup> ]	MDA [Bq/cm <sup>2</sup> ]	Efficacité [%]	Réponse [s <sup>-1</sup> Bq <sup>-1</sup> cm <sup>2</sup> ]	Facteur de calibrage [s Bq cm <sup>-2</sup> ]	Seuil de décision [Bq/cm <sup>2</sup> ]	MDA [Bq/cm <sup>2</sup> ]
1	Beta	b-g	35,0%	35,00	0,029	0,030	0,061	70,0%	59,50	0,017	0,018	0,038
2	<del>C-11</del>	b-g	37,8%	37,77	0,027	0,027	0,056	74,1%	63,00	0,016	0,017	0,034
3	<del>N-13</del>	b-g	74,7%	74,74	0,013	0,014	0,028	74,7%	63,53	0,016	0,017	0,034
4	<del>C-14</del>	b-g	10,9%	10,89	0,092	0,095	0,194	28,6%	12,16	0,082	0,085	0,173
5	<del>O-15</del>	b-g	38,2%	38,17	0,026	0,027	0,055	74,9%	63,66	0,016	0,017	0,034
6	<del>F-18</del>	b-g	43,7%	43,70	0,023	0,024	0,048	87,4%	74,28	0,013	0,013	0,028
7	<del>Na-22</del>	b-g	34,2%	34,19	0,029	0,030	0,062	67,1%	57,03	0,018	0,019	0,038
8	<del>P-32</del>	b-g	42,9%	42,86	0,023	0,024	0,049	68,8%	58,46	0,017	0,018	0,036
9	<del>P-33</del>	b-g	26,1%	26,06	0,038	0,040	0,081	59,9%	25,47	0,038	0,040	0,082
10	<del>S-35</del>	b-g	11,2%	11,22	0,089	0,092	0,188	25,9%	11,00	0,081	0,084	0,182
11	<del>Cl-36</del>	b-g	43,5%	43,51	0,023	0,024	0,049	68,7%	58,40	0,017	0,018	0,036
12	<del>K-40</del>	b-g	38,1%	38,09	0,026	0,027	0,056	74,7%	63,53	0,016	0,017	0,034
13	<del>K-42</del>	b-g	38,2%	38,17	0,026	0,027	0,055	74,9%	63,66	0,016	0,017	0,034
14	<del>Ca-45</del>	b-g	19,4%	19,40	0,052	0,053	0,109	38,1%	16,18	0,052	0,054	0,131
15	<del>Sc-46</del>	b-g	27,4%	27,43	0,037	0,038	0,077	53,8%	22,88	0,044	0,045	0,093
16	<del>Ca-47+</del>	b-g	3,2%	3,18	0,314	0,324	0,665	6,2%	5,31	0,189	0,195	0,400
17	<del>Cr-51</del>	b-g	0,0%	0,03	36,364	37,455	76,873	0,1%	0,05	22,222	22,889	46,977
18	<del>Mn-54</del>	b-g	0,8%	0,80	1,250	1,288	2,643	1,6%	1,36	0,734	0,755	1,552
19	<del>Fe-55</del>	b-g	0,0%	0,04	26,667	27,467	56,373	0,1%	0,07	15,152	15,607	32,031
20	<del>Co-57</del>	b-g	3,6%	3,64	0,275	0,283	0,581	7,3%	6,19	0,162	0,167	0,343
21	<del>Co-58</del>	b-g	8,4%	8,42	0,119	0,122	0,251	16,8%	14,31	0,070	0,072	0,148
22	<del>Fe-59</del>	b-g	34,2%	34,22	0,029	0,030	0,062	68,4%	58,17	0,017	0,018	0,036
23	<del>Co-60</del>	b-g	28,9%	28,86	0,035	0,036	0,073	58,2%	24,72	0,040	0,041	0,085
24	<del>Ni-63</del>	b-g	0,3%	0,32	3,125	3,219	6,606	0,6%	0,27	3,650	3,760	7,716
25	<del>Ga-67</del>	b-g	12,1%	12,08	0,083	0,085	0,175	24,2%	20,53	0,049	0,051	0,104
26	<del>Se-75</del>	b-g	5,2%	5,23	0,191	0,197	0,404	10,6%	8,90	0,112	0,115	0,237
27	<del>Sr-85</del>	b-g	1,6%	1,59	0,629	0,648	1,330	3,1%	2,65	0,377	0,388	0,797
28	<del>Rb-86</del>	b-g	38,2%	38,17	0,026	0,027	0,055	74,9%	63,66	0,016	0,017	0,034
29	<del>Sr-89</del>	b-g	41,9%	41,82	0,024	0,025	0,051	66,7%	56,70	0,018	0,019	0,038
30	<del>Sr-90+</del>	b-g	84,3%	84,33	0,012	0,012	0,025	67,7%	57,56	0,017	0,018	0,036
31	<del>Y-89</del>	b-g	41,0%	41,05	0,024	0,025	0,052	66,0%	55,25	0,018	0,019	0,038
32	<del>Tc-99m</del>	b-g	7,9%	7,85	0,127	0,131	0,269	15,7%	13,37	0,075	0,077	0,159

33	Tc-99	b-g	30,8%	30,50	0,033	0,034	0,069	61,9%	26,30	0,038	0,039	0,080
34	Ru-106*	b-g	38,2%	38,17	0,028	0,027	0,055	74,9%	63,68	0,018	0,017	0,034
35	In-111	b-g	13,0%	13,00	0,077	0,079	0,163	26,0%	22,10	0,045	0,046	0,086
36	Sr-113+	b-g	23,4%	23,37	0,043	0,044	0,091	46,7%	39,72	0,025	0,026	0,063
37	I-123	b-g	14,7%	14,67	0,068	0,070	0,144	29,3%	24,95	0,040	0,041	0,085
38	I-125	b-g	8,2%	8,25	0,121	0,125	0,256	16,5%	7,01	0,143	0,147	0,302
39	I-131	b-g	42,6%	42,58	0,024	0,024	0,050	74,4%	63,24	0,018	0,017	0,034
40	Ce-137+	b-g	43,1%	43,15	0,023	0,024	0,049	70,6%	60,01	0,017	0,018	0,036
41	Pm-147	b-g	14,7%	14,71	0,068	0,070	0,144	28,9%	12,27	0,082	0,085	0,173
42	Sr-153	b-g	69,5%	69,51	0,017	0,017	0,036	84,8%	72,06	0,014	0,014	0,030
43	Er-169	b-g	31,4%	31,40	0,032	0,033	0,067	61,4%	26,11	0,038	0,039	0,080
44	Re-185	b-g	42,0%	42,04	0,024	0,025	0,050	68,1%	57,68	0,017	0,018	0,036
45	Re-188	b-g	101,1%	101,11	0,010	0,010	0,021	75,6%	64,24	0,016	0,017	0,034
46	Au-198	b-g	37,8%	37,77	0,027	0,027	0,056	74,1%	63,00	0,016	0,017	0,034
47	Ti-201	b-g	1,4%	1,38	0,719	0,741	1,521	2,8%	2,36	0,423	0,436	0,894
48	Ti-204	b-g	37,2%	37,15	0,027	0,028	0,057	66,6%	55,94	0,018	0,019	0,038
49	U-238sec	b-g	48,1%	48,12	0,021	0,021	0,044	107,3%	45,61	0,022	0,023	0,047
50	Pu-238	b-g	3,6%	3,63	0,276	0,284	0,583	7,8%	3,31	0,302	0,311	0,638
51	Am-241	b-g	5,6%	5,57	0,180	0,185	0,380	11,6%	5,01	0,200	0,208	0,423
52	Po-210	a	21,6%	21,60	0,046	0,006	0,014	42,3%	17,99	0,056	0,006	0,017
53	U-238sec	a	27,8%	27,79	0,036	0,004	0,011	62,0%	26,34	0,038	0,004	0,012
54	Pu-238	a	20,7%	20,68	0,048	0,005	0,015	44,5%	18,82	0,053	0,005	0,016
55	Pu-239	a	18,3%	18,29	0,055	0,006	0,017	35,9%	15,25	0,068	0,007	0,021
56	Am-241	a	20,6%	20,58	0,049	0,005	0,015	43,6%	18,51	0,054	0,005	0,017
57	Alpha	a	20,0%	20,00	0,060	0,006	0,016	40,0%	17,00	0,059	0,007	0,018

- 1) Limites issues de l'Ordonnance sur la Radioprotection de 2001, annexe III, tableau 1, colonne 4  
 2) Référence aux activités nominales et à la surface de la source de 100 cm<sup>2</sup>  
 3) Référence aux taux d'émission de surface et à la surface sensible de détection de 170 cm<sup>2</sup>

## **Auteursrechtelijke overeenkomst**

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

**Toepassing van de ISOCS methode voor vrijgavemetingen van lokalen bij de ontmanteling van nucleaire installaties**

Richting: **master in de industriële wetenschappen: nucleaire technologie-milieutechnologie-radiochemie**

Jaar: **2016**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

**Haeldermans, Tom**

Datum: **4/06/2016**