



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

# Radioactieve rest- en afvalstoffen bij **ontmanteling** van cyclotrons in Nederland

RIVM-rapport 2023-0233





# **Radioactieve rest- en afvalstoffen bij ontmanteling van cyclotrons in Nederland**

RIVM-rapport 2023-0233

## Colofon

© RIVM 2023

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

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

DOI 10.21945/RIVM-2023-0233

P.D.B.M. Bekhuis (auteur), RIVM  
A.C. Hengeveld (auteur), RIVM

Contact:

Patricia Bekhuis  
Milieu en Veiligheid/Centrum Veiligheid  
patricia.bekhuis@rivm.nl  
of

Adriaan Hengeveld  
Milieu en Veiligheid/Centrum Veiligheid  
adriaan.hengeveld@rivm.nl

Dit onderzoek is verricht in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) in het kader van het programma Radioactief afval en ontmanteling

Afbeelding op cover met dank aan CYCLADE:

'CYCLADE' (**CYCL**otrons **Av**anced **DE**commissioning) is een samenwerkingsverband van vijf Belgische bedrijven (IBA, Interboring, IRE, SCK CEN en Transrad). CYCLADE bundelt alle expertise die nodig is voor de uitvoering van het proces bij de ontmanteling van cyclotrons ([www.cyclade.be](http://www.cyclade.be)).

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)

## Publiekssamenvatting

### **Radioactieve rest- en afvalstoffen bij ontmanteling van cyclotrons in Nederland**

Cyclotrons zijn machines die deeltjes versnellen. De meeste cyclotrons in Nederland worden gebruikt om radioactieve stoffen te maken die kanker opsporen. Tijdens het gebruik van een cyclotron wordt al het materiaal in en om het apparaat bestraald en kan dan radioactief worden.

Veel cyclotrons in Nederland zijn al een tijd in gebruik en sommige zijn aan vervanging toe. Bij de ontmanteling ervan komt het radioactieve metaal en beton vrij. De vraag is wat er met dit materiaal moet gebeuren. Het RIVM onderzocht daarom hoeveel restmateriaal er is en hoe radioactief dat is. Hierbij zijn alleen grote hoeveelheden materiaal (bulk) bekeken: de grote metalen onderdelen en het beton van de bunkers waarin cyclotrons staan.

De hoeveelheid radioactief restmateriaal is per cyclotron anders. Voor alle cyclotrons in Nederland samen kan tot 7.000 ton radioactief restmateriaal vrijkomen. Een groot deel van het restmateriaal blijkt heel laagradioactief te zijn, waardoor het geen gevaar veroorzaakt voor mensen of de omgeving. Daarmee is het waarschijnlijk geschikt voor 'specifieke vrijgave'. Dan mag het onder specifieke voorwaarden bijvoorbeeld worden gerecycled. Per geval moet worden beoordeeld of dat inderdaad kan. Recycling is wenselijk vanwege de circulaire economie.

Als het radioactieve materiaal gerecycled kan worden, is opslag niet meer nodig. Normaal gesproken moet radioactief afval naar een specifieke plek worden afgevoerd: de Centrale Opslag Voor Radioactief Afval (COVRA) in Zeeland. De eigenaars van het afval – in dit geval de ondernemingen en ziekenhuizen die de cyclotrons hebben gebruikt – moeten de COVRA voor deze opslag betalen. Het kost 35 miljoen tot 50 miljoen euro om de 7.000 ton radioactief restmateriaal op te slaan. Deze kosten kunnen door recycling bijna helemaal wegvallen. Voor dit onderzoek verzamelde het RIVM informatie uit het buitenland. Ook sprak het RIVM met gebruikers van cyclotrons in Nederland.

Kernwoorden: cyclotrons, ontmanteling, COVRA, radioactief materiaal, afval



## Synopsis

### **Radioactive residue and waste resulting from dismantling of cyclotrons**

Cyclotrons are machines that accelerate particles. Most cyclotrons in the Netherlands are used to produce radioactive substances that detect cancer. When a cyclotron is used, all the material in and around the machine is irradiated. This material can then become radioactive.

Many cyclotrons in the Netherlands have been in use for a long time and some are in need of replacement. Dismantling of cyclotrons results in radioactive metal and concrete that must be removed. The question is what should be done with this material. RIVM has therefore investigated how much residual material there is and how radioactive it is. Only large quantities of material (bulk) were included in this study: the large metal components and the concrete from the vaults that house the cyclotrons.

The amount of dismantled radioactive material is different for each cyclotron. All cyclotrons in the Netherlands combined could release 7,000 tonnes of radioactive material. A large part of the material turns out to have a very low radioactivity level, meaning it poses no danger to people or the environment. As such, it is likely suitable for 'specific clearance'. This means that for instance it can be recycled under specific conditions. Whether recycling is indeed possible will need to be assessed on a case-by-case basis. Recycling is desirable because it benefits the circular economy.

If radioactive material can be recycled, it no longer needs to be stored. Normally, radioactive waste must be stored in a specific place: the Central Organisation for Radioactive Waste (COVRA) in Zeeland. The owners of the waste – in this case the businesses and hospitals that have used the cyclotrons – must pay COVRA for this storage. It would cost €35 to €50 million to store the 7,000 tonnes of radioactive material. These costs can be almost completely eliminated by recycling. For this investigation, RIVM gathered information from other countries and talked to users of cyclotrons in the Netherlands.

Keywords: cyclotrons, dismantling, COVRA, radioactive material, waste





## Inhoudsopgave

### Samenvatting — 9

#### **1 Inleiding — 13**

- 1.1 Aanleiding en doel — 13
- 1.2 Het cyclotron en ongewenste activatie — 14
- 1.3 Wettelijk kader — 16
- 1.4 Afbakening — 16
- 1.5 Begripsomschrijvingen — 17
- 1.6 Dankwoord — 19

#### **2 Methode — 21**

- 2.1 Methode informatieverzameling — 21
- 2.2 Bepaling van massa van mogelijk geactiveerd materiaal — 21
  - 2.2.1 Massa van mogelijk geactiveerd metaal — 21
  - 2.2.2 Massa van mogelijk geactiveerd beton — 21
  - 2.2.3 Massa van mogelijk geactiveerde wapening van de bunker — 22
- 2.3 Bepaling van activiteitsconcentraties in restmaterialen — 22
  - 2.3.1 Herberekening activiteitsconcentraties in de tijd — 22
  - 2.3.2 Invloed van de bestralingsduur — 23
  - 2.3.3 Bepaling activiteitsconcentraties in metalen van het cyclotron — 23
  - 2.3.4 Bepaling van activiteitsconcentraties in bunkerbeton — 23
  - 2.3.5 Bepaling van activiteitsconcentraties in wapening van de bunker — 24
- 2.4 Methode voor bepaling vrijgave van materialen — 24
- 2.5 Aanname voor specifieke vrijgave — 24
- 2.6 Kostenbepaling voor overdracht van radioactief afval — 25

#### **3 Resultaten — 27**

- 3.1 Productiecyclotrons in Nederland — 27
- 3.2 Categorisering van productiecyclotrons — 28
  - 3.2.1 Technische eigenschappen voor de hoeveelheid ontmantelingsmateriaal en de activiteitsconcentratie — 28
  - 3.2.2 Categorie-indeling — 28
  - 3.2.3 Toelichting op technische eigenschappen voor de hoeveelheid ontmantelingsmateriaal — 30
  - 3.2.4 Toelichting technische eigenschappen voor de activiteitsconcentratie — 31
- 3.3 Mogelijk geactiveerde massa van cyclotroninstallaties — 33
  - 3.3.1 Mogelijk geactiveerde massa metaal — 33
  - 3.3.2 Mogelijk geactiveerde massa beton — 34
  - 3.3.3 Mogelijk geactiveerde massa wapeningstaal — 34
- 3.4 Activatieproducten in metaal en beton — 34
- 3.5 Activiteitsconcentraties in metaal en beton — 35
  - 3.5.1 Activiteitsconcentraties in cyclotronmetaal — 35
  - 3.5.2 Activiteitsconcentraties in beton — 36
  - 3.5.3 Activiteitsconcentraties in wapeningstaal — 39
- 3.6 Vrijgave van materialen — 39
- 3.7 Hoeveelheid radioactief rest- of afvalmateriaal — 43
  - 3.7.1 Hoeveelheid radioactief metaal per cyclotron — 43
  - 3.7.2 Hoeveelheid radioactief beton per cyclotron — 43
  - 3.7.3 Massa radioactief wapeningstaal per cyclotron — 44

3.7.4	Kosten per cyclotron van overdracht aan COVRA — 44
3.7.5	Totaal van cyclotrons in Nederland — 44
3.7.6	Specifieke vrijgave — 45
<b>4</b>	<b>Discussie — 47</b>
<b>5</b>	<b>Conclusies — 51</b>
5.1	Aanbevelingen — 53
<b>6</b>	<b>Literatuur — 55</b>

## Samenvatting

Cyclotrons zijn deeltjesversnellers die worden gebruikt voor de productie van medische radio-isotopen. Veel installaties zijn oud en de toenemende vraag naar radio-isotopen voor diagnostische handelingen vraagt om vervanging van machines voor hogere productiecapaciteiten. De ontmanteling van productiecyclotrons wordt steeds meer een thema. De Autoriteit voor Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) wil een handreiking voor ondernemers maken – de gebruikers van cyclotrons – om hen in het ontmantelingsproces te kunnen helpen. Hierbij wordt onder meer aandacht geschonken aan de reservering van financiële middelen voor de afvoer/overdracht van radioactief afval naar de Centrale Opslag Voor Radioactief Afval (COVRA). Om hiervoor een schatting te kunnen leveren, is het van belang om te weten hoeveel radioactief ontmantelingsmateriaal er afgevoerd moet worden en of dit materiaal als radioactief afval geclassificeerd moet worden.

Het RIVM zocht in opdracht van de ANVS uit:

- hoeveel en welke productiecyclotrons met een energie boven de 8 MeV er in Nederland zijn;
- hoeveel geactiveerd materiaal er afgevoerd moet worden bij de ontmanteling van een cyclotron;
- welke relevante radionucliden het materiaal bevat dat bij ontmanteling vrijkomt;
- wat de activiteitsconcentraties van de relevante radionucliden zijn;
- wat de overdrachtskosten zijn wanneer ontmantelingsmaterialen geactiveerd blijken te zijn tot boven de vrijgavegrens en afgevoerd moeten worden naar COVRA;
- of de af te voeren radioactieve materialen<sup>1</sup> mogelijk in aanmerking komen voor specifieke vrijgave. Daarbij is uitgegaan van een vereenvoudiging, waarbij aangenomen wordt dat specifieke vrijgave zeer waarschijnlijk mogelijk is bij een activiteitsconcentratie die lager is dan 100 x de vrijgavegrens.

Tijdens het gebruik van de cyclotrons worden zowel de onderdelen van de machine zelf, als de bunker(s) waarin de cyclotrons en hun targets staan, geactiveerd. Alleen bulkmateriaal zoals grote cyclotrononderdelen (>1000 kg) en bunkerbeton en -wapening zijn in dit onderzoek meegenomen. Het grootste onderdeel (meer dan 90 procent van de totale massa) van het cyclotron is het stalen juk. Ook de magneetspoelen van het cyclotron hebben een groot aandeel in de cyclotronmassa. Overige cyclotrononderdelen zijn niet meegenomen in dit onderzoek. Neutronen activeren zowel het juk als de magneetspoelen. Ook zijn neutronen verantwoordelijk voor de activering van het beton van de bunker en het wapeningstaal dat eventueel in dit beton aanwezig is. Voor het beton van de bunker is alleen de binnenste 50 centimeter beschouwd. Zowel de massa als de gemiddelde activiteitsconcentraties betreffen deze geactiveerde laag. Er is dus niet

<sup>1</sup> Met radioactieve materialen bedoelen we hier materialen waarbij, op basis van de activiteitsconcentraties, de vrijgavegrens wordt overschreden.

gemiddeld met het overige niet-geactiveerde beton van de soms 2 meter dikke bunkermuur.

Informatie over afmetingen, massa's en activiteitsconcentraties komen uit internationale literatuur, jaarverslagen, vergunningen, interviews en websites van fabrikanten.

Er is veel variatie tussen de verschillende typen cyclotrons. Dit rapport verdeelt de cyclotrons in Nederland in drie categorieën (A, B en C). Dit is gedaan op basis van enkele technische eigenschappen van cyclotrons en bunkers. De eerste eigenschap is de maximale protonenergie van het cyclotron. Deze is direct gerelateerd aan de geproduceerde radio-isotopen. De andere belangrijke eigenschap voor de indeling in de verschillende categorieën is het bunker-ontwerp.

Categorie A bestaat uit cyclotrons met een maximale protonenergie tussen de 8 en 17 MeV die zelfafscherming op het cyclotron hebben. Deze cyclotrons produceren verschillende radio-isotopen, zoals  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$  en  $^{18}\text{F}$ . De cyclotrons staan in een grote ruimte (ongeveer  $6\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$ ) waarvan de muren uit 50 centimeter dik beton bestaan. Hiervan zijn er in Nederland drie in gebruik.

Categorie B bestaat uit cyclotrons met een maximale protonenergie van 18 MeV. Dit is het meest gangbare type voor de productie van  $^{18}\text{F}$  en met zes cyclotrons in Nederland is dit ook het meest voorkomende type cyclotron. Categorie B-cyclotrons hebben geen zelfafscherming en staan in een kleine bunker (ongeveer  $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 2,5\text{ m}$ ) waarvan de muren meestal bestaan uit 2 meter dik gewapend beton. De targets zijn direct bij het cyclotron in dezelfde bunker gesitueerd.

Categorie C-cyclotrons hebben een maximale protonenergie tussen de 19 en 30 MeV. Deze energieën worden vooral gebruikt voor de productie van  $^{123}\text{I}$ . De targets bevinden zich in aparte bunkers. Ook de muren van de cyclotronbunker en de targetbunkers zijn meestal van 2 meter dik gewapend beton. Van dit type cyclotrons zijn er drie in gebruik en zijn er twee in ontmanteling.

In het door neutronen geactiveerde cyclotronmetaal variëren de activiteitsconcentraties van  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$  en  $^{63}\text{Ni}$  direct na buitengebruikstelling tussen bijna 1 en 30 kBq/kg. Het radionuclide  $^{63}\text{Ni}$  heeft een hoge vrijgavewaarde (100 kBq/kg). Hierdoor levert dit nuclide geen relevante bijdrage aan de classificatie voor vrijgave. Het radionuclide  $^{54}\text{Mn}$  heeft een halveringstijd van 312 dagen. Vijf jaar na buitengebruikstelling is daarom vooral de activiteitsconcentratie van  $^{60}\text{Co}$  relevant. De onderzochte onderdelen van het cyclotronmetaal (juk en spoelen) zijn in cyclotrons van alle drie categorieën vijf jaar na buitengebruikstelling niet vrij te geven en moeten als radioactief materiaal worden afgevoerd. Voor categorie A- en B-cyclotrons wordt de massa daarvan geschat op maximaal 20 ton per cyclotron. Voor categorie C-cyclotrons varieert de massa van dit radioactieve metaal tussen de 50 en 100 ton per cyclotron.

De relevante nucliden in het geactiveerde beton zijn  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ , en  $^{154}\text{Eu}$ . De hoogste activiteitsconcentraties zijn gevonden voor  $^{60}\text{Co}$  en  $^{152}\text{Eu}$ . Direct na buitengebruikstelling variëren

activiteitsconcentraties tussen 0,02 en 0,3 kBq/kg voor zowel  $^{60}\text{Co}$  als  $^{152}\text{Eu}$  in het beton van de cyclotronbunkers. Activiteitsconcentraties in het beton van de bij categorie C-cyclotrons aanwezige targetbunkers zijn hoger (tot 3 kBq/kg). Het beton van de categorie A-cyclotronruimte kan vijf jaar na buitengebruikstelling worden vrijgegeven. Het beton van de cyclotronbunkers uit de categorie B en C ligt, vijf jaar na buitengebruikstelling, rond de vrijgavegrens en kan mogelijk nog niet worden vrijgegeven. Het beton van de categorie C-targetbunker kan, vijf jaar na buitengebruikstelling, niet worden vrijgegeven. Het betreft circa 110 ton beton afval bij een categorie B-cyclotronbunker en varieert bij categorie C-cyclotrons van 250 tot 1400 ton beton.

Het wapeningstaal dat aanwezig is in de binnenste 50 centimeter beton bij categorie B- en C-bunkers zal geactiveerd zijn. Voor het wapeningstaal uit de targetbunker van categorie C-cyclotrons is bekend dat de activiteitsconcentratie van  $^{60}\text{Co}$  ook vijf jaar na buitengebruikstelling met 7 kBq/kg nog ver boven de vrijgavegrens ligt. Daarmee is het materiaal geclassificeerd als radioactief materiaal.

Radioactief afval moet in het algemeen naar de COVRA worden afgevoerd. De overdrachtskosten voor het radioactieve metaal (juk en spoelen), beton (binnenste 50 centimeter) en wapeningstaal zijn per cyclotron in de verschillende categorieën respectievelijk 0-0,6 miljoen euro (categorie A), circa 1 miljoen euro (categorie B) en 2,4-11 miljoen euro (categorie C). De variatie in de kosten bij categorie C-cyclotrons is groot, omdat in deze categorie zowel oude (gebouwd in de jaren zestig) als moderne cyclotrons (in gebruik vanaf de jaren negentig) zijn opgenomen. De oudere cyclotrons en bijbehorende targets staan vaak in erg grote bunkers (ongeveer 18m × 10m × 8m), terwijl bij de moderne (categorie C-) cyclotrons en targets gestreefd wordt naar compactheid.

De activiteitsconcentraties in grote metalen onderdelen, beton en wapeningstaal, blijken vijf jaar na buitengebruikstelling ruim lager te zijn dan 100 keer de vrijgavegrens. In dit rapport is aangenomen dat de materialen daarmee waarschijnlijk in aanmerking komen voor specifieke vrijgave. In de context van dit onderzoek wil dat zeggen dat ze mogelijk kunnen worden gerecycled onder specifieke voorwaarden, waarbij ze geen stralingsrisico voor mens of milieu vormen. Het RIVM beveelt ondernemers aan om bij ontmanteling van eigen cyclotrons een specifieke vrijgave voor recycling aan te vragen bij de ANVS als de situatie het toelaat. Hiermee kan opslag bij COVRA van een totale hoeveelheid van 4.830 tot 6.940 ton radioactief afval in Nederland voorkomen worden, waarmee een bedrag van 35 tot 50 miljoen euro is gemoeid.

Bij nieuw te bouwen cyclotrons is het aan te bevelen om rekening te houden met uiteindelijke restmaterialen. Bij de constructie kan gebruik worden gemaakt van zogenoemd 'laag-activeerbare' materialen voor zowel het cyclotron als de bunker en kan de wapening in de binnenste 50 centimeter van de muren achterwege gelaten worden. Verder kunnen muren zo worden gebouwd dat de binnenste 50 centimeter van het beton makkelijk verwijderd kan worden.

Vanwege de schaarste van publiek beschikbare gegevens over dit onderwerp, adviseert het RIVM bovendien alle gebruikers die gegevens over ontmanteling van cyclotrons hebben om deze openbaar te maken. Dit is vooral belangrijk om de bovenstaande conclusies te bevestigen voor cyclotrons die in de laatste jaren actief zijn geweest onder een hogere protonenstroom dan gebruikelijk was voor de cyclotrons waarvan de gegevens voor dit onderzoek beschikbaar waren.

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en doel

In Nederland worden cyclotrons gebruikt voor de productie van medische radio-isotopen. Het aantal PET-scans (diagnostisch onderzoek) waarbij de radio-isotopen worden gebruikt, is in de periode van 1991 tot 2019 met bijna 75 procent toegenomen [1]. De verwachting is dat de vraag naar de benodigde radio-isotopen de komende jaren verder gaat groeien [2, 3]. Deze groei is op te vangen door een groeiend cyclotronbestand of door het vervangen van bestaande machines voor nieuwere versies die een hogere productie kunnen draaien [4]. In beide gevallen moeten hierdoor steeds meer installaties ontmanteld en afgevoerd worden [5]. Bovendien lopen de meeste cyclotrons die 30 tot 40 jaar geleden in werking zijn genomen tegen het einde van hun economische levensduur. Er zijn schattingen van 50 ontmantelingsprojecten wereldwijd in het jaar 2030, tot 200 ontmantelingsprojecten wereldwijd tegen het jaar 2040 [6]. Het ontmantelingsmateriaal, dat vooral uit beton en metaal bestaat, kan door straling van het cyclotron zodanig geactiveerd zijn dat het wettelijk als radioactief moet worden geclassificeerd.

Om de ondernemingen ondersteuning te bieden bij een realistische schatting van de ontmantelingskosten, is een onderbouwde schatting nodig van de hoeveelheid radioactief afval die te verwachten is bij ontmanteling van de productiecyclotrons, toegespitst op de Nederlandse situatie. De ANVS heeft behoefte aan deze informatie voor de totstandkoming van een handleiding voor bedrijven over de ontmanteling van (productie)cyclotrons. Bedrijven kunnen voortaan een beroep doen op de handleiding voor ontmanteling voor algemeen gebruiksgemak en om invulling te geven aan de financiële voorwaarden voor deze handeling. Tegelijkertijd is de hoop dat er meer invulling mogelijk is voor hergebruik/recycling om aan de doelstellingen van 2050 (circulaire economie) te kunnen bijdragen.

Dit rapport geeft een beeld van de ontstane radioactieve rest- en afvalstromen bij ontmanteling van productiecyclotrons met een schatting van mogelijke kosten van het opslaan van radioactief afval en de mogelijkheden voor recycling.

Het doel van dit onderzoek is opgesplitst in de volgende deelvragen:

- Hoeveel en welke productiecyclotrons zijn er in Nederland?
- Welke relevante radionucliden bevat het radioactieve materiaal dat vrijkomt bij ontmanteling?
- Hoeveel radioactieve rest-en-afvalstoffen komen vrij bij ontmanteling?
- Wat is de geschatte activiteitsconcentratie van de radioactieve rest- en afvalstoffen?
- Komen de afvalstoffen in aanmerking voor specifieke vrijgave, uitgaande van een vereenvoudiging waarbij aangenomen wordt dat specifieke vrijgave wellicht mogelijk is bij een activiteitsconcentratie die lager is dan 100 x de vrijgavegrens?

- Wat zijn de kosten van overdracht van bij ontmanteling vrijgekomen radioactieve rest- en afvalstoffen aan COVRA?

Niet alle cyclotrons en cyclotronbunkers zijn hetzelfde. Verschillende specificaties beïnvloeden de hoeveelheid ontmantelingsafval en de activiteitsconcentratie daarin. Van de in Nederland aanwezige cyclotrons worden de eigenschappen in kaart gebracht om ze vervolgens in categorieën te verdelen.

In dit rapport wordt per categorie de te verwachten hoeveelheid radioactief beton en metaal geschat die vrijkomt bij ontmanteling van de in Nederland aanwezige cyclotrons. Naast een schatting van de hoeveelheid geactiveerde materialen per categorie worden de activiteitsconcentraties gegeven voor de relevante nucliden. Er wordt een grove schatting gegeven van de (verval)opslagkosten voor radioactief afval dat aan de COVRA moet worden overgedragen. Als laatste wordt geschat of rest- en afvalstoffen bij beëindiging van productiecyclotrons specifiek kunnen worden vrijgegeven voor hergebruik. Dit wordt gedaan met het oog op de doelstelling dat Nederland in 2050 aan de voorwaarden van een volledig circulaire economie moet voldoen [7].

## 1.2 Het cyclotron en ongewenste activatie

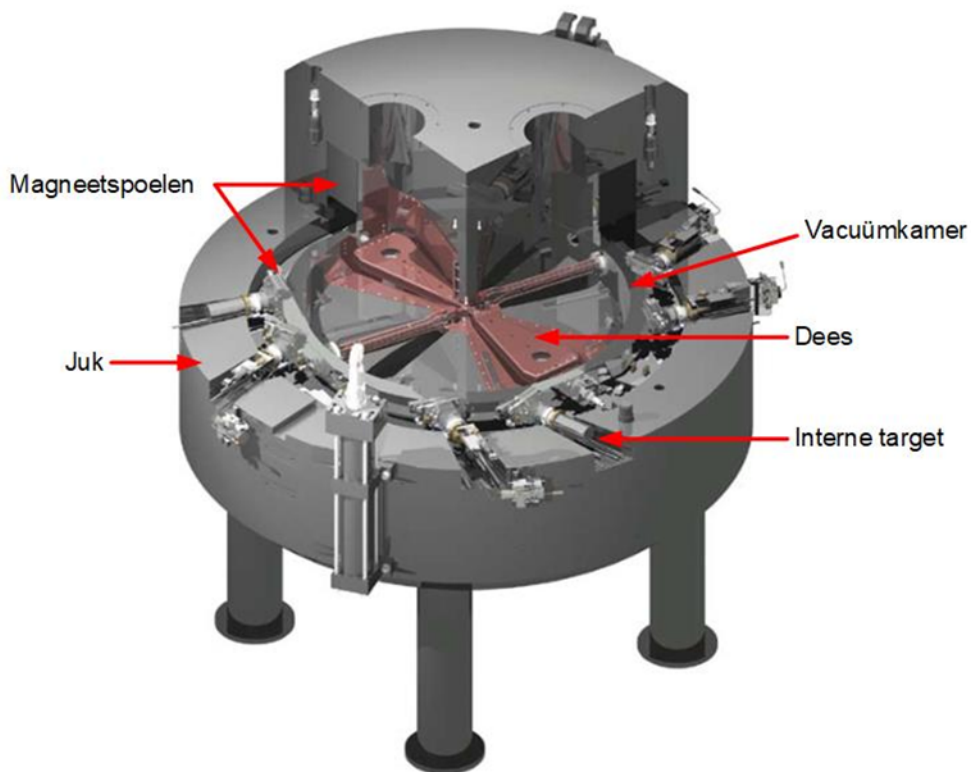
Geladen deeltjes worden onder invloed van een wisselend elektrisch veld en een sterk magnetisch veld in een spiraalvormige baan versneld tot ze een bepaalde (kinetische) energie hebben bereikt. Bij de gewenste energie verlaten de geladen deeltjes - samen de *bundel* genoemd - het cyclotron. De bundel wordt naar de target geleid. Bij de meeste cyclotrons bevinden zich de targets in dezelfde ruimte als het cyclotron. Soms wordt de bundel via vacuümbuizen en magneten (de *bundellijn*) naar de eindbestemming (het *target*) in een externe bunker geleid [8].

In de Nederlandse productiecyclotrons met een energie boven de 8 mega-elektronvolt (MeV) betreft het meestal versnelde protonen die op een target worden geschoten. Door de hoge energie van het ingevangen proton treden kernreacties op in de target en worden de gewenste radio-isotopen geproduceerd. De energie van het invallende proton en de samenstelling van de target bepalen welke reactieproducten het proces oplevert [9-11].

Naast de productie van radio-isotopen vindt er ook ongewenste activatie van de omgeving plaats. Een deel van de versnelde protonen zal het gewenste doel, het target, niet bereiken. Deze protonen komen in aanraking met materiaal in de omgeving, waarbij kernreacties optreden. Dit begint al in het cyclotron zelf, waar protonen tegen de koperen elektroden (de *dees*) botsen. Daarbij worden de dees geactiveerd en komen er onder meer neutronen vrij. Ook tijdens bundeltransport vinden interacties plaats, vooral in de *collimatoren* die de protonenbundel bijsnijden. Protonen zorgen voor de activatie van metalen onderdelen aan de binnenkant van het cyclotron-apparaat en in eventueel aanwezige bundellijnen. Neutronen zorgen voor de activatie van de omgeving in de cyclotronbunker (zoals het beton) en de buitenkant van het cyclotron-apparaat (metaal).



De belangrijkste bijdrage aan vrijgekomen neutronen wordt gevormd door kernreacties van versnelde protonen met het materiaal van de target [12-15]. Sommige cyclotrons schermen neutronen af door een extra toegevoegde schil om het apparaat. De afschermende laag heet in het Engels 'self-shielding' en noemen wij in dit rapport 'zelfafscherming'. In Figuur 1.1 is een cyclotron zonder zelfafscherming te zien met interne targets. De doorsnede van het cyclotron in Figuur 1.1 is 2 meter. Afmetingen van de bunker waarin dit cyclotron staat, zijn standaard 4m × 4m × 2,5m. De bunkermuren, die voor de afscherming van de straling zorgen, zijn vaak 2 meter dik (denk daarbij ook aan het plafond en de vloer). Er zijn echter vele verschillende typen cyclotrons. Detailinformatie over onder meer cyclotronmassa's en bunker-afmetingen staat in dit rapport.



Figuur 1.1 Een cyclotron met interne targets (Cyclone® 18/9 - IBA).

Activatie zorgt ervoor dat bestanddelen die van nature in het staal van de installatie en het beton van de bunker zitten, veranderen in radioactieve isotopen. Sommige radionucliden zijn kortlevend. Andere radionucliden hebben een halveringstijd van enkele of zelfs tientallen jaren [16]. Het risico op blootstelling aan het materiaal waarin deze relatief langlevende nucliden zijn gevormd, is mogelijk niet verwaarloosbaar vanuit het oogpunt van stralingsbescherming. Dit maakt dat er een geschikte bestemming voor het geactiveerde materiaal nodig is – zij het als radioactief afval, of als een opnieuw te gebruiken grondstof.

### 1.3 Wettelijk kader

Na een bepaalde periode van gebruik, worden cyclotroninstallaties ontmanteld en eventueel vervangen. Wanneer de restmaterialen boven de wettelijk vastgelegde vrijgavegrenzen geactiveerd zijn, gelden ze als 'radioactieve stof'. Hiermee zijn ze onderhevig aan wetgeving die bepaalt hoe en waar met de stoffen moet worden omgegaan. Als de ondernemer zich van de reststoffen wil ontdoen en deze niet kunnen worden verwerkt of hergebruikt, gelden ze vanaf dat moment als 'radioactief afval'. Radioactief afval mag voor verval twee jaar op eigen locatie worden opgeslagen. De wetgeving voorziet vervolgens in de mogelijkheid om dit radioactief afval veilig op te (laten) slaan bij het bedrijf dat hierin gespecialiseerd is: de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA). Aan die gespecialiseerde opslag zijn kosten verbonden, waarin de ondernemer moet voorzien. Om een cyclotron in gebruik te nemen, moet volgens de vigerende wetgeving, het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs) en de Regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Rbs), een vergunning worden aangevraagd. Sinds 2018 is de ondernemer tevens verplicht om een beëindigingsplan in te dienen bij het aanvragen van een Kernenergiewetvergunning (Bbs, artikel 10.8). De benodigde financiële voorzieningen voor de ontmanteling dienen gereserveerd te worden vóór aanvang van de bedrijfsvoering. Voorafgaande geldt voor handelingen met een cyclotron dat deeltjes met een energie van meer dan 8 MeV produceert (Rbs, artikel 10.1).

### 1.4 Afbakening

Dit rapport beschrijft radioactieve rest- en afvalhoeveelheden bij ontmanteling:

- voor de Nederlandse situatie.
- van cyclotrons die deeltjes met een energie van meer dan 8 MeV produceren. Voor cyclotrons met een lagere maximale protonenergie dan 8 MeV wordt vrijwel geen activatie verwacht en is een beëindigingsplan volgens Rbs artikel 10.1 niet verplicht.
- van cyclotrons die gebruikt worden voor productie van isotopen. Buiten de scope vallen cyclotrons die hoogenergetische deeltjes produceren voor therapeutische doeleinden of onderzoeksdoeleinden.
- van cyclotrons die beschikken over een vergunning op grond van de Kernenergiewet. Er wordt aangenomen dat er geen cyclotrons actief zijn in Nederland die buiten het controlestelsel opereren.
- die afkomstig zijn van het primaire ontmantelingsproces. Hiermee worden de restmaterialen bedoeld die afkomstig zijn van componenten van de te ontmantelen installatie. Dus onderdelen van de machine (het cyclotron en de eventuele bundellijnen) zelf en de omliggende bunker(s). Secundair ontmantelingsafval valt buiten de scope van dit onderzoek. Met secundair afval worden materialen bedoeld die gebruikt worden voor de ontmantelingsactiviteiten en besmet raken met radioactiviteit, zoals HEPA-filters, gereedschap en persoonlijke beschermingsmiddelen als handschoenen en mondkapjes.

- als de totale massa van de individuele reststroom minstens 1.000 kg bedraagt. Matige hoeveelheden tot 1.000 kg worden niet in ogenschouw genomen.
- die van vaste aard zijn en afgevoerd kunnen worden. Eventuele bodembesmetting en/of lozing van radioactieve stoffen vallen buiten de onderzoeksscope.
- eventueel aanwezige metalen in de cyclotronruimte anders dan van het cyclotron zelf, worden in dit rapport niet meegenomen. Wapeningstaal in de bunker wordt wel meegenomen.
- De kostenschatting voor ontmanteling beperkt zich in dit rapport tot het schatten van de overdrachtskosten van radioactieve afvalstoffen aan COVRA tegen de COVRA-tarieven van 2023. Overige kosten, zoals personeels- en materiaalkosten die door de ondernemer in kaart moeten worden gebracht, staan niet in dit rapport beschreven.

## 1.5 Begripsomschrijvingen

Dit hoofdstuk definieert een aantal begrippen en concepten die in dit rapport worden gebruikt. De gebruikte concepten komen overeen met de concepten, zoals toegelicht in het RIVM-afvalrapport over radioactieve rest- en afvalstromen in Nederland [17]. Figuur 1.2 geeft een aantal belangrijke wettelijke begrippen en concepten in relatie tot elkaar weer.

**Afvalstoffen** zijn in artikel 1.1 van de Wet milieubeheer gedefinieerd als *alle stoffen, preparaten of voorwerpen, waarvan de houder zich ontdoet, voornemens is zich te ontdoen, of zich moet ontdoen*. Anders dan bij radioactieve stoffen wordt er dus geen onderscheid gemaakt op basis van een perspectief op recycling of hergebruik.

**Radioactieve stoffen** zijn in artikel 1, onder d, van de Kernenergiewet gedefinieerd als *stoffen met uitzondering van splijtstoffen en ertsen, die in zodanige mate radionucliden bevatten dat zij, voor zover het de bescherming tegen ioniserende straling betreft, niet mogen worden verwaarloosd*. In de praktijk wordt als criterium de betreffende grenswaarde<sup>2</sup> voor generieke vrijstelling en vrijgave aangehouden (Tabel A in onderdeel B van Bijlage 3 bij het Bbs).

**Radioactieve afvalstoffen** zijn in Bijlage 1 van het Bbs gedefinieerd als *radioactief materiaal in gasvormige, vloeibare of vaste staat dat door de ANVS of de ondernemer als radioactieve afvalstof is aangemerkt*. In dezelfde bijlage is radioactief materiaal gedefinieerd als *materiaal dat radioactieve stoffen bevat*. Daarmee zijn radioactieve afvalstoffen een deelverzameling van 'radioactieve stoffen'. Op grond van artikel 10.7, eerste lid, van het Bbs, kan een radioactieve stof als radioactieve afvalstof worden aangemerkt als *voor deze stof geen gebruik of product- of materiaalhergebruik is voorzien door de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) of door de ondernemer en er geen sprake is van lozing van de stof*. Een afvalstof wordt niet als radioactieve afvalstof aangemerkt als de activiteitsconcentratie van die afvalstof lager is dan de betreffende grenswaarde voor vrijgave.

<sup>2</sup> Als er sprake is van meerdere nucliden, moet hier en in vergelijkbare zinnen in de rest van dit rapport 'grenswaarden' worden gelezen.

Voor het beheer van radioactieve afvalstoffen gelden de voorschriften op grond van de Kernenergiewet. Deze voorschriften houden onder meer in dat door het aanmerken van een radioactieve stof als radioactieve afvalstof een afvoerverplichting ontstaat. Vervolgens is van belang dat alleen de COVRA en aangewezen deponieën gerechtigd zijn radioactieve afvalstoffen te ontvangen. Als afvoer naar COVRA of een aangewezen deponie (nog) niet aan de orde is, of (nog) niet wenselijk is, wordt een radioactieve stof (nog) niet als radioactieve afvalstof aangemerkt.

Radioactieve afvalstoffen afkomstig van de ontmanteling van cyclotrons worden afgevoerd naar de COVRA voor langetermijnopslag en uiteindelijke eindberging of naar COVRA voor vervalopslag van 50 jaar.

**Radioactieve reststoffen** is een term die niet is gedefinieerd in regelgeving, maar die in het RIVM-afvalrapport [17] als concept is geïntroduceerd. Met 'radioactieve reststoffen' wordt bedoeld op radioactieve stoffen die ontstaan bij een proces en die (nog) niet als radioactieve afvalstof zijn aangemerkt (zie Figuur 1.2), en waarvan een ondernemer zich ontdoet voor recycling of hergebruik, al dan niet voorafgaand door bewerking.

Zolang een radioactieve reststof niet als radioactieve afvalstof is aangemerkt, is er ook geen afvoerplicht. Wel gelden de gangbare voorschriften voor radioactieve stoffen op grond van de Kernenergiewet.

**Onderneming:** Verreweg de meeste voorschriften op grond van de Kernenergiewet adresseren 'de ondernemer'. Dit begrip is in Bijlage 1 bij het Bbs gedefinieerd als *natuurlijke persoon, rechtspersoon of bestuursorgaan onder wiens verantwoordelijkheid een handeling wordt verricht of maatregel wordt uitgevoerd*. Om enerzijds zoveel mogelijk aan te sluiten bij het begrip 'ondernemer', maar anderzijds te benadrukken dat het in dit onderzoek gaat om het geheel van 'ondernemer, organisatie en installaties', gebruikt dit rapport het begrip 'onderneming'.

**Ontdoener:** Met ontdoener wordt de onderneming bedoeld die zich ontdoet van afvalstoffen die binnen de onderneming zijn ontstaan.

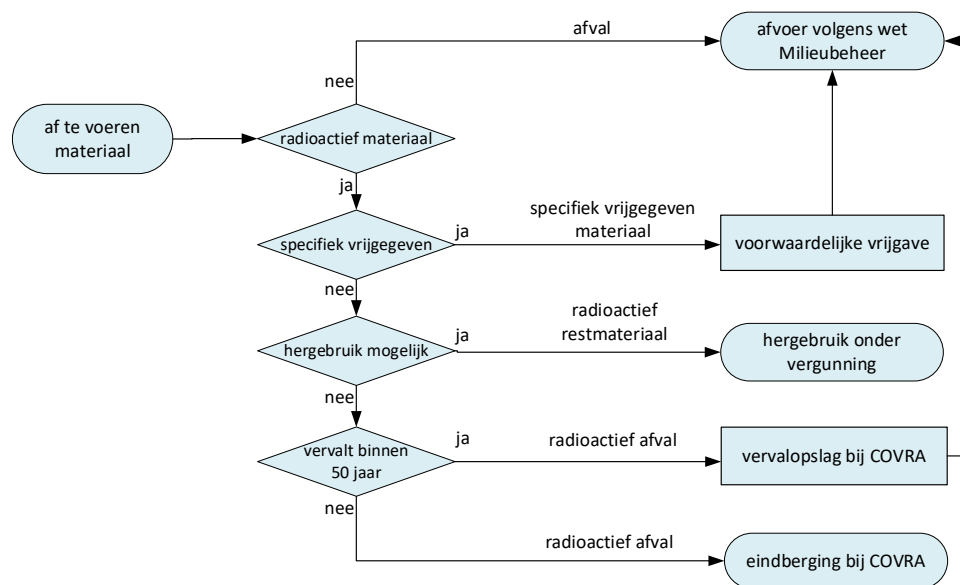
**Ontmanteling:** Dit rapport verstaat onder ontmanteling het buitengebruikstellen<sup>3</sup> van een cyclotron en het verwijderen van de vrijkomende radioactieve rest- en afvalstoffen van de locatie. Hierbij is een wijziging of intrekking van de Kernenergiewetvergunning noodzakelijk.

**Vrijgave:** Radioactieve stoffen waarvan de activiteitsconcentratie lager is dan de grenswaarden voor (vrijstelling en) vrijgave, kunnen worden 'vrijgegeven'. Vrijgave houdt in dat er vanaf dat moment geen sprake meer is van een radioactieve rest- of afvalstof, maar van een 'afvalstof'.

**Specifieke vrijgave:** Specifieke vrijgave is een voorwaardelijke vrijgave. Wanneer aantoonbaar is dat men na het vrijgeven van de radioactieve stof onder het dosis criterium blijft, kan een hogere vrijgavegrens (activiteitsconcentratie) als nieuwe vrijgavewaarde gelden. Voldoen aan het dosis criterium wordt aangetoond door een dosisberekening met daarin een uitwerking van de blootstellingsroutes,

<sup>3</sup> Beleid en regelgeving maken een onderscheid tussen 'ontmanteling' en 'beëindiging'. Met het eerste bedoelen we meestal nucleaire installaties, en met het tweede niet-nucleaire installaties.

blootstellingsscenario's en de gebruikte parameters. Op grond van artikel 10.7, tweede lid, van het Bbs, geldt dat een specifiek vrijgegeven radioactieve stof niet als radioactieve afvalstof wordt aangemerkt. Daarmee vervalt de afvoerverplichting naar de COVRA. Het materiaal dat specifiek wordt vrijgegeven, valt als afval onder de Wet milieubeheer en onder de in de uitwerking genoemde gestelde specifieke voorwaarden.



Figuur 1.2 Wettelijke begrippen en concepten in relatie tot elkaar.

## 1.6 Dankwoord

Dit onderzoek was niet mogelijk zonder de input van een aantal partijen. Het RIVM bedankt de TU-Eindhoven, GE-Healthcare, BV Cyclotron VU, COVRA en in het bijzonder SBD van Driel BV.



## 2 Methode

### 2.1 Methode informatieverzameling

Informatie over technische gegevens van buitenlandse cyclotrons is verkregen door een zoektocht in literatuur. Deze informatie is voor Nederlandse cyclotrons verkregen door het inzien van data uit jaarverslagen van twee ondernemingen, vergunningsaanvragen van zes ondernemingen en vier interviews met mensen uit het werkveld. Websites van fabrikanten zijn geraadpleegd voor praktische gegevens, zoals afmetingen en massa's van een aantal typen cyclotron [18-21]. Informatie over activiteitsconcentraties in ontmantelingsmateriaal van cyclotrons is verkregen uit literatuur. De gebruikte literatuur is verzameld via PubMed-zoekopdrachten met de zoektermen '*decommissioning accelerator*' en '*decommissioning cyclotron*'. Er zijn tien publicaties gevonden met informatie over activiteitsconcentraties in ontmantelingsmateriaal van verschillende typen cyclotrons. Vrijgavegrenzen voor relevante nucliden zijn uit de vigerende regelgeving overgenomen (Bbs, Bijlage 3, onderdeel B, tabel A, deel 1). Informatie over kosten voor overdracht van radioactief bulkafval per Konradcontainer is verkregen via COVRA.

### 2.2 Bepaling van massa van mogelijk geactiveerd materiaal

#### 2.2.1 *Massa van mogelijk geactiveerd metaal*

Er is aangenomen dat de totale massa van het cyclotron geactiveerd wordt. De massa's van de verschillende typen cyclotron zijn gelijk gesteld aan de massa van de grote onderdelen waarvoor meetwaarden van activiteitsconcentraties gevonden zijn. De onderdelen boven de 1.000 kg zijn het juk en de magneetspoelen [22]. Het juk van het in Figuur 1.1 afgebeelde cyclotron heeft een massa van 20.000 kg. Voor de meeste cyclotrons behelst het magneetjuk tot bijna 90 procent van de totale massa van het cyclotron. Daarmee is het verreweg het belangrijkste onderdeel voor verwerking van restmetalen in bulk [24, 25]. Dit rapport gaat ervan uit dat de massa van de koperen of aluminium magneetspoelen de overige 10 procent beslaat.

#### 2.2.2 *Massa van mogelijk geactiveerd beton*

Beton wordt gebruikt voor de bunker van het cyclotron en eventuele targetruimtes en in een enkel geval voor directe afscherming om het cyclotronapparaat (de zelfafscherming).

Voor de constructie van bunkers kan gekozen worden uit meerdere typen beton. Het type beton dat gebruikt is voor de constructie van zowel de Nederlandse als de buitenlandse cyclotronbunkers is niet altijd bekend. Er is uitgegaan van standaardbeton op basis van portlandcement. Mogelijke verschillen in de betonsamenstelling zijn in dit rapport niet meegenomen.

Voor neutron-activatie in de betonnen muur van de bunker waarin het cyclotron staat opgesteld, is eerst enige moderatie van de neutronen nodig. De hoogste activatie wordt doorgaans aangetroffen op 10 centimeter diepte in de muur. Daarna neemt de activatie af. Voor de

massabepaling van mogelijk geactiveerd bunkerbeton wordt aangenomen dat activatie tot maximaal 50 centimeter diepte kan plaatsvinden [25]. Om de massa van deze binnenste betonlaag te berekenen, zijn voor een aantal typen cyclotrons de door een fabrikant gerapporteerde 'aanbevolen afmetingen' van bunkers gebruikt [18-21]. Deze afmetingen zijn in overeenkomst met de afmetingen van cyclotronbunkers in Nederland voor vergelijkbare cyclotrons. De totale massa aan mogelijk geactiveerd beton  $M_B$  is volgens de aanname dat activatie tot maximaal 50 centimeter diepte gebeurt, uitgerekend volgens de formule:

$$M_B = ((D_1 + 1) \times (D_2 + 1) \times (D_3 + 1) - (D_1 \times D_2 \times D_3)) \times \rho_B.$$

Hierbij staan  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  voor de drie ruimtelijke afmetingen van de binnenkant van de bunker (in meters) en  $\rho_B$  – het soortelijk gewicht van beton – is gesteld op  $\rho_B = 2,35 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

Naast het beton van de bunkers, dat voor alle cyclotrons wordt onderzocht, wordt ook informatie over de massa van de eventueel direct om het cyclotronapparaat aanwezige betonnen zelfafscherming meegenomen. Informatie over deze massa komt van de fabrikant. Bij aanwezigheid van zelfafscherming wordt de volledige massa gezien als 'mogelijk geactiveerd'.

### 2.2.3

#### *Massa van mogelijk geactiveerde wapening van de bunker*

Alleen wapening in beton dat op minder dan 50 centimeter diepte aanwezig is, zal geactiveerd zijn. De massa van deze wapening wordt in dit rapport berekend met de aanname dat de massa wapeningstaal gelijk is aan 2,5 procent van de massa van de binnenste 50 centimeter van de betonnen bunker rond zowel het cyclotron als de eventuele targetruimtes. Deze aanname is gedaan op basis van de enige gevonden publicatie met informatie over wapeningstaal in cyclotronbunkers. De gegevens van deze Belgische publicatie zijn daarbij aangepast aan de Nederlandse situatie. In een Belgische cyclotronfaciliteit [23] vormt het wapeningstaal 9 procent van de massa van de binnenste 25 centimeter van de muur. Bij deze cyclotronfaciliteit waren twee wapeningsmatten geplaatst in de binnenste 25 centimeter van de betonnen bunkermuur. Vanuit gegevens over enkele cyclotrons in Nederland is bekend dat het in Nederland gebruikelijk is om een enkele wapeningsmat te gebruiken in de binnenste 50 centimeter van de cyclotronbunker. Omdat dit rapport uitgaat van het dubbele volume beton ten opzichte van de Belgische situatie en daarmee dubbele massa beton (binnenste 50 centimeter in plaats van binnenste 25 centimeter van de muur) en van de helft minder wapeningstaal in deze massa, wordt de in de publicatie genoemde 9 procent verlaagd met een factor 4. Het gevonden percentage is vervolgens afgerond op een half procentpunt.

## 2.3

### **Bepaling van activiteitsconcentraties in restmaterialen**

#### 2.3.1

##### *Herberekening activiteitsconcentraties in de tijd*

In de literatuur gevonden waarden voor activatie van metaal, beton, en wapeningstaal zijn herberekend om vergelijkingen tussen de verschillende publicaties mogelijk te maken. Waar sprake was van een niet te verwaarlozen tijd tussen buitengebruikstelling (stopzetting) van



het cyclotron en het uitvoeren van metingen, zijn de activiteitsconcentraties teruggerekend naar het moment van stopzetting van het cyclotron.

Als aanvulling op de waarden bij stopzetting, is ervoor gekozen om de activiteitsconcentratie eveneens te berekenen op een moment dat vijf jaar na stopzetting ligt. Er is voor vijf jaar gekozen, omdat geschat wordt dat dit een voor de praktijk representatieve periode is tussen stopzetting en daadwerkelijke ontmanteling. Het is gebruikelijk dat er enkele jaren verstrijken, terwijl karakterisering, vergunningaanvraag en -verlening, en de termijn voor vervalopslag op locatie plaatsvinden.

### 2.3.2 *Invloed van de bestralingsduur*

De tijd van bestraling van de materialen speelt een belangrijke rol bij de mate van activatie van het te ontmantelen materiaal. Het gebruikspatroon van het cyclotron is bepalend voor de totale bestralingsduur. Cyclotrons die voornamelijk draaien voor levering van zeer kortlevende nucliden voor lokaal gebruik (in ziekenhuizen) draaien doorgaans minder uren dan cyclotrons die produceren voor de handel [14]. Voor de eenvoud stelt dit rapport de bestralingsduur voor alle cyclotrons gelijk. Dit geldt dus ook voor het aantal jaren dat ze in bedrijf waren.

De uiteindelijke bestralingsduur bij ontmanteling van de Nederlandse cyclotrons is pas bekend wanneer de productie definitief wordt stopgezet. Een schatting van de bestralingsduur op basis van hoe lang een cyclotron technisch gezien kan meegaan, is niet zinvol. Cyclotrons worden meestal vervangen omdat zij niet meer aan de nieuwe gebruikerswensen voldoen, en niet omdat het apparaat het heeft begeven.

### 2.3.3 *Bepaling activiteitsconcentraties in metalen van het cyclotron*

Metingen van activiteitsconcentraties in de metalen onderdelen van het cyclotron zijn in de literatuur op verschillende manieren gedaan. Enkele publicaties geven alleen meetwaarden van het juk van het cyclotron. Andere publicaties rapporteren ook over overige cyclotrononderdelen. De rapportanalyse neemt alleen het juk en de magneetspoelen mee. Omdat er geen eenduidige theorie bestaat over diepte-afhankelijkheid van activiteitsconcentraties in metalen onderdelen, is ervoor gekozen om gerapporteerde meetwaarden te beschouwen als gemiddeld representatief voor het gehele onderdeel (juk of magneetspoel). Wanneer gemiddelde waarden niet zijn gerapporteerd, is de gemiddelde activiteitsconcentratie in het metaal uitgerekend op basis van de gegeven meetwaarden. In het geval waarin (gemiddelde) activiteitsconcentraties van beide onderdelen zijn gerapporteerd, is voor het cyclotron de massagemiddelde activiteitsconcentratie uitgerekend voor de som van deze onderdelen.

### 2.3.4 *Bepaling van activiteitsconcentraties in bunkerbeton*

Metingen van activiteitsconcentraties in het bunkerbeton van zowel de cyclotronruimtes als de eventuele targetruimtes zijn op verschillende manieren gerapporteerd in de literatuur. Data is afkomstig van verschillende hoeveelheden meetpunten, al dan niet met een diepteprofiel van activatie in de muur. Daarbij varieert de maximale diepte tussen de bronnen. In dit rapport is gekozen voor een bepaling van de gemiddelde

waarde in het beton voor een diepte van 0 tot 50 centimeter aan de binnenzijde van de bunker. Het aanhouden van een gemiddelde waarde kan verdedigd worden, omdat in de ontmantelingspraktijk het beton wordt vergruisd. Dit vergruizen of granuleren van het beton zorgt voor homogenisatie van de activiteitsconcentratie in het materiaal. Om tot een gemiddelde activiteitsconcentratie in de binnenste 50 centimeter van de betonnen bunker te komen, zijn de waarden uit de literatuur als volgt behandeld:

1. Waar in de literatuur informatie over een diepteprofiel ontbrak, zijn activiteitsconcentraties vaak gegeven op een vaste diepte van 5 of 10 centimeter. Op of rond deze diepte wordt in de meeste bunkers van productie-cyclotrons de piek van de neutronenactivatie verwacht. Het gemiddelde over de binnenste 50 centimeter wordt daarbij geschat op ongeveer de helft van de piekwaarde. Deze schatting komt overeen met de data uit de literatuur waarbij wel diepteprofielen beschikbaar zijn.
2. Waar bronnen diepteprofielen tot slechts 20 centimeter gaven, is de gemiddelde activiteitsconcentratie over die diepte beschouwd als de piekwaarde. En wordt de gemiddelde activiteitsconcentratie over de volledige 50 centimeter op de helft daarvan geschat.
3. Wanneer meerdere meetpunten in een ruimte met gelijke diepteprofielen gerapporteerd worden, is het gemiddelde voor de binnenste 50 centimeter beton over al deze meetpunten berekend. Dit om rekening te houden met de eventuele heterogeniteit van de activatie in de ruimte.

### 2.3.5 *Bepaling van activiteitsconcentraties in wapening van de bunker*

Bij één studie uit de literatuurlijst zijn metingen van activiteitsconcentraties in wapeningstaal uitgevoerd [23]. De conclusies van die studie zijn als uitgangspunt voor geïnduceerde activiteitsconcentraties in wapeningstaal gebruikt.

## 2.4 **Methode voor bepaling vrijgave van materialen**

Vrijgave van materiaal is getoetst aan het criterium van de gewogen som (Bbs artikel 3.17.2.b, Bbs artikel 3.17.3). Voor vrijgave moet de som van de fracties van alle activiteitsconcentraties in een materiaal met de corresponderende vrijgavegrenzen lager zijn dan 1:

$$\sum_i \frac{A_i}{G_i} < 1,$$

waarbij  $i$  staat voor de index van de relevante nucliden,  $A_i$  staat voor de gevonden activiteitsconcentratie, en  $G_i$  staat voor de corresponderende vrijgavegrens. In dit rapport is de gewogen som berekend over alleen de nucliden die volgens de onderzoeksmethode tot de relevante nucliden behoren.

## 2.5 **Aanname voor specifieke vrijgave**

Wanneer het materiaal niet kan worden vrijgegeven, wordt het aangemerkt als radioactief materiaal. Om in te schatten of het radioactieve materiaal specifiek vrijgegeven kan worden, wordt gebruikgemaakt van een vereenvoudiging. Hiervoor wordt aangenomen dat bij een gewogen som van activiteitsconcentraties lager dan honderd,

het materiaal waarschijnlijk geschikt is voor specifieke vrijgave. Dit komt overeen met materiaal dat in dit rapport is beoordeeld als 'klasse II' - materiaal. Deze indicatieve grens van 100 maal de vrijgavegrens is geen wettelijke norm, maar geïnspireerd op waarden voor specifieke vrijgave bij nucliden van natuurlijke oorsprong. Voor ontmantelingsmateriaal afkomstig van cyclotron(bunkers) moet per individuele situatie beoordeeld worden of het materiaal daadwerkelijk voldoet aan de voorwaarden voor specifieke vrijgave. Daarbij moeten dosisberekeningen als gevolg van verscheidene scenario's worden uitgevoerd. De stappen van dit proces vallen buiten de scope van dit rapport.

## 2.6 Kostenbepaling voor overdracht van radioactief afval

De tarieven voor overdracht naar COVRA variëren afhankelijk van het type container dat gebruikt wordt voor opslag of vervalopslag. De prijzen voor opslag van een Konrad-container (voor opslag) en een 20-voets zeecontainer (voor vervalopslag) zijn ongeveer gelijk. Echter verschilt de massa aan radioactief afval die per container van elk type kan worden opgeslagen.

De lading van een Konrad-container wordt begrensd door volume ( $3,3 \text{ m}^3$ ) of de maximaal toegestane massa (20 ton) [24]. Welke van de twee (volume of massa) bepalend is, is afhankelijk van de dichtheid van de lading. Gebruikt voor metaal gaan we uit van een gemiddelde massa van de lading van een Konrad-container van 10 ton. Het zal namelijk niet vaak voorkomen dat de container volledig gevuld kan worden met metaal. Voor beton is gemiddelde massa van de lading maximaal 8 ton.

De lading van een zeecontainer wordt begrensd door de maximaal toegestane massa (28 ton). Deze massa geldt voor zowel metaal als beton.

De opslagkosten zijn voor beide typen container – afgerond op honderdduizenden - geschat op 200.000 euro per container [25]. Deze tarieven moeten worden gezien als een grove schatting. Er kunnen geen rechten aan worden ontleend.

De kosten  $K$  (€) voor overdracht van een massa radioactief afval  $M_A$  zijn berekend volgens de onderstaande formules.

Voor opslag van metaal in Konrad-containers geldt:

$$K (\text{€}) = \frac{M_A (\text{ton})}{10 (\text{ton})} * 200\ 000 (\text{€}).$$

Voor opslag van beton in Konrad-containers geldt:

$$K (\text{€}) = \frac{M_A (\text{ton})}{8 (\text{ton})} * 200\ 000 (\text{€}).$$

Voor vervalopslag in zeecontainers geldt:

$$K (\text{€}) = \frac{M_A (\text{ton})}{28 (\text{ton})} * 200\ 000 (\text{€}).$$



## 3 Resultaten

### 3.1 Productiecyclotrons in Nederland

Er zijn in Nederland twaalf (vergunningplichtige) cyclotrons, die een maximale protonenergie boven de 8 MeV hebben en die op het moment van schrijven van dit rapport radio-isotopen produceren. Tevens zijn er nog twee cyclotrons die voorheen radio-isotopen produceerden en nu in ontmanteling zijn. Deze veertien cyclotrons zijn verdeeld over zeven ondernemingen. Een geanonimiseerd overzicht van de ondernemingen en cyclotrons staat in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Ondernemingen (geanonimiseerd) en cyclotrons (met protonenergie boven de 8 MeV) voor de productie van medische isotopen (uit het RIVM-rapport 2022-0073).

Onderneming	Aantal cyclotrons	Maximale protonenergie (MeV)	Isotopen
A	1	18	$^{18}\text{F}$ , $^{13}\text{N}$
B	1	28	(in ontmanteling)
	3	18	$^{18}\text{F}$ , $^{89}\text{Zr}$
	1	11	$^{18}\text{F}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{11}\text{C}$ , $^{15}\text{O}$
C	1	30	$^{123}\text{I}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{81}\text{Rb}$
	1	30	(in ontmanteling)
D	1	18	$^{18}\text{F}$
	1	17	$^{18}\text{F}$
E	2	30	$^{123}\text{I}$ , $^{201}\text{Tl}$ , $^{67}\text{Ga}$ , $^{111}\text{In}$
F	1	16	$^{18}\text{F}$
G	1	11	$^{18}\text{F}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{11}\text{C}$

In de (Nederlandse) praktijk is  $^{18}\text{F}$  verreweg de meest geproduceerde PET-tracer. De meest gebruikte methode om  $^{18}\text{F}$  te produceren, is door het bestralen van verrijkt  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  met protonen, variërend in energie tussen de 3 en 20 MeV. De energie van de invallende (versnelde) protonen is daarbij bepalend voor de efficiëntie van de kernreacties in de targets. Hoe hoger de energie binnen dit bereik, hoe hoger de opbrengst bij verzadiging (in Bq/ $\mu\text{A}$ ) [26]. Om deze reden zijn de in Nederland aanwezige cyclotrons met een protonenergie van 16, 17 of 18 MeV direct te linken aan de productie van  $^{18}\text{F}$ .

In Tabel 3.1 is te zien dat een maximale energie tot 18 MeV gebruikelijk is voor de productie van  $^{18}\text{F}$ . Naast  $^{18}\text{F}$  worden soms ook andere radio-isotopen geproduceerd. Dit rapport gaat uit van een dominante bijdrage van de productie van  $^{18}\text{F}$  voor deze cyclotrons. De cyclotrons met een protonenergie van 11 MeV zijn minder efficiënt voor de productie van  $^{18}\text{F}$ , maar beter in staat om  $^{13}\text{N}$ ,  $^{11}\text{C}$  en  $^{15}\text{O}$  te produceren. Ook voor deze cyclotrons wordt uitgegaan van een dominante productie van  $^{18}\text{F}$ .

De in Nederland aanwezige cyclotrons met een maximale energie van 30 MeV zijn in eerste instantie bedoeld voor de productie van vooral  $^{123}\text{I}$ . Ook andere radio-isotopen kunnen worden geproduceerd [27]. Wanneer het cyclotron in staat is om ook protonen met een lagere energie te

maken, kan ook  $^{18}\text{F}$  efficiënt worden geproduceerd. Ondanks de productie van andere isotopen dan  $^{123}\text{I}$ , wordt voor de cyclotrons met een maximale protonenergie van 30 MeV uitgegaan van de dominantie van  $^{123}\text{I}$ -productie. Het radio-isotoop  $^{123}\text{I}$  dat wordt gebruikt voor medische diagnostiek, wordt in Nederland geproduceerd door gebruik te maken van een target met het gasvormige  $^{124}\text{Xe}$ . De protonen die voor de reactie  $^{124}\text{Xe}(p, pn)^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$  zorgen, hebben een energie van 15 tot 30 MeV [26].

### 3.2 Categorisering van productiecyclotrons

#### 3.2.1 *Technische eigenschappen voor de hoeveelheid ontmantelingsmateriaal en de activiteitsconcentratie*

Omdat er verschillende typen cyclotrons in Nederland zijn, hebben we ze ingedeeld in categorieën. Binnen een categorie verwachten we vergelijkbare activiteitsconcentraties en hoeveelheden ontmantelingsmateriaal.

Uit de literatuur werd duidelijk dat er meerdere technische eigenschappen van de cyclotroninstallaties zijn die invloed hebben op de te verwachten hoeveelheid radioactief restmateriaal. Deze zijn:

- het type interactie in de targets [12, 28];
- de energie van de versnelde protonen;
- de bundelstroom;
- het ontwerp van cyclotron en bunker(s):
  - eventuele aanwezigheid van zelfafscherming van het cyclotron [29];
  - de locatie van de targets (in dezelfde bunker als het cyclotron of niet);
  - de geometrie van de bunkers (afstand van beton tot de neutronenbronnen) [12].

#### 3.2.2 *Categorie-indeling*

In Tabel 3.2 staan de Nederlandse cyclotrons gerangschikt op maximale protonenergie. Tevens is aangegeven of er sprake is van zelfafscherming of een externe targetbunker en wat de typische protonenstroom is. Op basis van het bunker-ontwerp (zelfafscherming en de locatie van de targets) en de protonenergie zijn de cyclotrons in Nederland in drie categorieën verdeeld. Per categorie is de hoeveelheid radioactieve restmaterialen bepaald. De drie categorieën zijn:

- A. Kleinere cyclotrons met een energie < 18 MeV, met zelfafscherming. Productie van vooral  $^{18}\text{F}$ .
- B. Midden-categoriemodellen met een energie van (ongeveer) 18 MeV, waarbij de targets zich bevinden in dezelfde bunker als het cyclotron. Productie van  $^{18}\text{F}$  is dominant.
- C. Grotere cyclotrons met een energie tot 30 MeV. Targets bevinden zich in externe bunkers en de productie van  $^{123}\text{I}$  is dominant.

Tabel 3.2 Nederlandse cyclotrons voor de productie van medische isotopen, gerangschikt op maximale protonenergie. Typische protonenstroom wordt gegeven voor het meest geproduceerde nuclide:  $^{18}\text{F}$  bij cyclotrons van categorieën A en B,  $^{123}\text{I}$  bij cyclotrons van categorie C.

Cyclotron categorie	Maximale proton-energie van cyclotron (MeV)	Geproduceerde isotopen	Zelfafscherming (ja/nee)	Target in externe bunker (ja/nee)	Typische protonenstroom op target voor meest geproduceerde nuclide ( $\mu\text{A}$ )
A	11	$^{18}\text{F}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{11}\text{C}$ , $^{15}\text{O}$	Ja	Nee	60
	11	$^{18}\text{F}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{11}\text{C}$	Ja	Nee	?
	16	$^{18}\text{F}$	Ja	Nee	60
B	17	$^{18}\text{F}$	Nee	Nee	?
	18	$^{18}\text{F}$ , $^{13}\text{N}$	Nee	Nee	?
	18	$^{18}\text{F}$ , $^{89}\text{Zr}$	Nee	Nee	90
	18	$^{18}\text{F}$	Nee	Nee	90
	18	$^{18}\text{F}$	Nee	Nee	?
	18	$^{18}\text{F}$	Nee	Nee	50
C	28	in ontmanteling	Nee	Ja	?
	30	$^{123}\text{I}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{201}\text{Tl}$ , $^{67}\text{Ga}$	Nee	Ja	100 voor $^{123}\text{I}$ target
	30	$^{123}\text{I}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{81}\text{Rb}$	Nee	Ja	300 voor $^{123}\text{I}$ target; 120 voor $^{18}\text{F}$ target
	30	$^{111}\text{In}$ , $^{67}\text{Ga}$	Nee	Ja	?
	30	in ontmanteling	Nee	Ja	?

Ook de cyclotrons waarover vanuit het buitenland wordt gerapporteerd, zijn in categorieën ingedeeld volgens in de voorgaande paragrafen beschreven criteria. De cyclotrons staan met hun bepalende eigenschappen in Tabel 3.3.

*Tabel 3.3 Eigenschappen van productiecyclotrons uit de internationale literatuur gerangschikt op maximale protonenergie. Verschillende cyclotrons uit dezelfde bron worden aangeduid met cijfer 1 of 2.*

Cyclotroncategorie	Publicatie	Bouwjaar cyclotron	Maximale Proton Energie van cyclotron (MeV)	Zelfafscherming (ja/nee)	Target in externe bunker (ja/nee)	Typische protonenstroom ( $\mu\text{A}$ )	Materialen waarover informatie betreffende activiteitsconcentratie is gegeven
A	[30]	1988	11	Ja	Nee	40	Metaal, beton
	[31] <b>1</b>	1990	?	?	?	?	Beton
	[5] <b>1</b>	2003	10	Ja	Nee	50	Metaal
	[13]	1983	17	Ja	Nee	21	Beton
	[32]	2001	18	Ja	Nee	40	Metaal
B	[33]	1991	17	Nee	Nee	35	Beton
	[5] <b>2</b>	2003	17	Nee	Nee	50	Metaal
	[15]	2000	18	Nee	Nee	?	Metaal
C	[34]	1979	40	Nee	Ja	50	Beton
	[23]	1985	43	Nee	Ja	70	Beton, wapening
	[35]	1951	11 - 40	?	Ja	?	Metaal
	[31] <b>2</b>	1974	50	?	?	10	Beton

### 3.2.3 Toelichting op technische eigenschappen voor de hoeveelheid ontmantelingsmateriaal

Het ontwerp van het cyclotron en de bunker(s) heeft de grootste invloed op de hoeveelheid ontmantelingsmateriaal. Bij de verschillende ontwerpen van cyclotrons en hun bunkers is er een duidelijk onderscheid tussen de cyclotrons tot 18 MeV en de 30 MeV-cyclotrons. Bij de cyclotrons tot 18 MeV zijn de targets aanwezig in dezelfde bunker als waar het cyclotron zich bevindt. Echter alle in Nederland aanwezige cyclotrons met een protonenergie van maximaal 30 MeV zijn voorzien van aparte bunkers waarin de targets zich bevinden.

Daarnaast is er een derde categorie in bunkerontwerp. Het betreft drie cyclotrons in Nederland die zelfafscherming hebben, zodat er geen of minimale activatie van de omliggende bunker wordt verwacht. Twee



hiervan zijn cyclotrons met een maximale protonenergie van 11 MeV, en één met een maximale protonenergie van 16 MeV. De zelfafscherming moet tijdens onderhoud opzij geschoven kunnen worden. De bunker moet dus groter zijn ten opzichte van de standaard 18 MeV-cyclotronbunker (zonder zelfafscherming). Vanwege de zelfafscherming zijn de bunkermuren dan minder dik (vaak 50 in plaats van 200 centimeter). In de jaren 1980-2000 werd de zelfafscherming uit beton vervaardigd. In de jaren erna werden ook laag-actieveerbare materialen gebruikt [14], zoals kunststof deuren, gevuld met boorwater. De grote verschillen in bunkerafmetingen zijn een belangrijke factor voor de categorisering van cyclotrons.

Op basis van de verwachte hoeveelheid ontmantelingsafval zijn de Nederlandse cyclotrons dus in te delen in drie categorieën.

### 3.2.4

#### *Toelichting technische eigenschappen voor de activiteitsconcentratie*

Alle in 3.2.1 genoemde eigenschappen hebben invloed op de activiteitsconcentratie in het ontmantelingsmateriaal. De eigenschappen type targetinteractie, protonenergie en bundelstroom zijn direct aan elkaar gerelateerd.

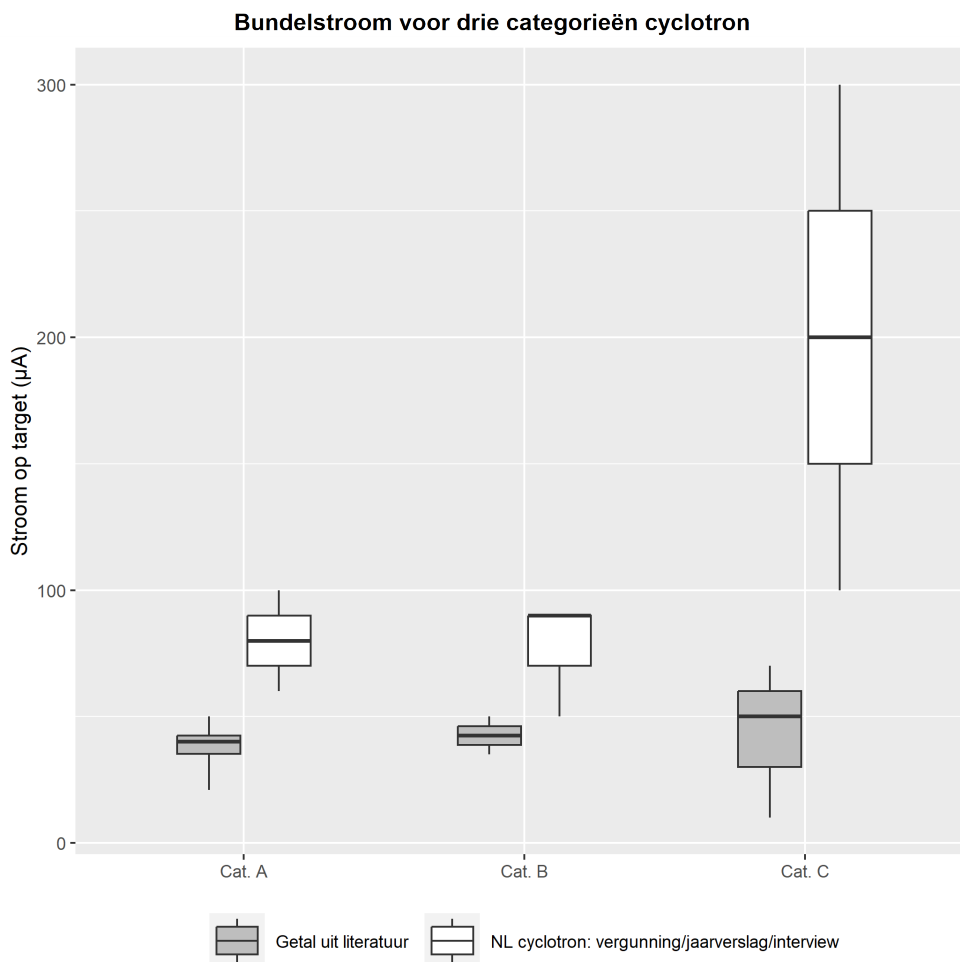
De activiteitsconcentratie van neutron-geactiveerde onderdelen hangt onder meer af van hoeveel en welke radio-isotopen worden geproduceerd. In gevallen waarbij neutronen ontstaan in de primaire reactie in de targets, is de neutronenflux tevens tot enkele malen hoger dan wanneer neutronen alleen in 'ongewenste' bij-reacties worden opgewekt [28]. Een voorbeeld is de vergelijking tussen de (neutron-producerende) primaire reactie voor  $^{18}\text{F}$ :  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$  versus de reactie voor  $^{11}\text{C}$ :  $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$  [36]. Zoals eerder vermeld, zijn we in dit rapport uitgegaan van  $^{18}\text{F}$ -productie voor cyclotrons tot 18 MeV en van productie van  $^{123}\text{I}$  voor cyclotrons die een energie gebruiken van 18-30 MeV. Zowel bij de (p,n) reactie voor  $^{18}\text{F}$  als bij de (p,pn) reactie voor  $^{123}\text{I}$  ontstaan neutronen bij de primaire reactie.

De efficiëntie van de kernreacties waarmee radio-isotopen worden geproduceerd, is sterk afhankelijk van de energie van de invallende deeltjes [26, 37]. Voor cyclotrons worden machines die protonen tot specifieke energieën versnellen gekozen, corresponderend met een optimum in de productie-efficiëntie voor de beoogde reacties. De energie van het cyclotron is dus indicatief voor de identiteit van de gebruikte kernreactie en een bepalende factor in de efficiëntie waarmee de reactie plaatsvindt – en daarmee de efficiëntie van de neutronen-opbrengst.

De geproduceerde activiteit, en daarmee de hoeveelheid vrijgekomen neutronen voor activatie van de omgeving, hangt niet alleen af van het targetmateriaal en de geleverde protonenergie, maar ook van de gebruikte stroom en de bestralingsduur.

De gebruikelijke protonstroom voor de productie van radio-isotopen is afhankelijk van het target en het cyclotron en ligt in de orde van grootte van tientallen micro-ampères ( $\mu\text{A}$ ) [26]. Een hogere stroom levert een hogere productiviteit. De stroom moet echter worden begrensd om oververhitting van het target te voorkomen. Het IAEA-rapport over *Cyclotron produced radionuclides* uit 2009 stelde de maximale

protonenstroom voor de productie van  $^{18}\text{F}$  met een  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ -target op 60  $\mu\text{A}$ , maar meldde ook dat stromen tussen de 20 en 40  $\mu\text{A}$  gebruikelijker waren [26]. Bij huidige generaties cyclotrons zijn hogere stromen gangbaar (zie Figuur 3.1, Tabel 3.2, Tabel 3.3). Door nieuwe ontwikkelingen in de targets lukt het om met hogere stromen hogere opbrengsten te genereren en daarbij oververhitting te voorkomen. Voor  $^{18}\text{F}$  is bij enkele cyclotrons 120  $\mu\text{A}$  haalbaar en voor  $^{123}\text{I}$  worden stromen tot 300  $\mu\text{A}$  gebruikt. Het gebruik van hogere stromen en daarmee een hogere productie betekent ook dat de geïnduceerde neutronenflux toeneemt en daarmee de activiteitsconcentratie van de geactiveerde materialen. Omdat de gebruikte stroom op de targets in al ontmantelde cyclotrons mogelijk afwijkt van de Nederlandse nog te ontmantelen cyclotrons kan dit betekenen dat de hoogte van de gevonden activiteitsconcentratie in ontmantelingsmaterialen in de toekomst mogelijk hoger ligt. Voor de categorieën-indeling heeft de bundelstroom geen afwijkende impact.



*Figuur 3.1 Gebruikte bundelstroom op het target voor zowel de huidige Nederlandse cyclotrons als voor de al ontmantelde buitenlandse cyclotrons. Voor de Nederlandse cyclotrons is alleen de stroom, gebruikt voor het dominante reactieproduct, gegeven.*

Activatie van materiaal is tevens afhankelijk van de afstand tussen het materiaal en het punt waar de neutronen geproduceerd worden [14, 23]. De afmetingen van de bunker zijn dus belangrijk voor de geïnduceerde activiteitsconcentratie.

De tijd en de intensiteit waarin/waarmee het cyclotron in gebruik is (geweest), worden voor alle cyclotrons gelijkgesteld (zie paragraaf 2.3.2).

### 3.3 Mogelijk geactiveerde massa van cyclotroninstallaties

In Tabel 3.4 staan voor de Nederlandse cyclotrons representatieve massa's voor metalen (massa cyclotron), beton, eventuele zelfafscherming en wapeningstaal, die geactiveerd kunnen worden.

Tabel 3.4 Mogelijk geactiveerde massa aan metalen, beton, en wapeningstaal bij representatieve cyclotronmodellen voor de verschillende categorieën.

Cyclotron categorie	Merk & model cyclotron (Ep in MeV)	Afmetingen cyclotronbunker LxBxH (m)	Aantal targetruimtes en afmetingen LxBxH (# : m)	Massa cyclotron-metaal (kg)	Massa beton zelfafscherming (kg)	Massa bunkerbeton (kg)	Massa wapeningstaal (kg)
A	IBA Key (9)	6,1×4,3×2,7	0	$7,5 \cdot 10^3$	$4,6 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$	0
	Siemens Eclipse (11)	7,3×7,0×4,3	0	$1,0 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^5$	0
	GE PETtrace 800 (16)	6,5×6,5×3,5	0	$2,0 \cdot 10^4$	0	$2,5 \cdot 10^5$	0
B	IBA KIUBE (18)	4,0×4,0×2,5	0	$1,8 \cdot 10^4$	0	$1,1 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^3$
C oud	Philips AVF (28/30)	6,0×10,0×5,0	1: 18×10 ×8	$\sim 1,0 \cdot 10^5$	0	$1,4 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^4$
C modern	IBA Cyclone 30 (30)	8,0×7,5×4,0	4: 3,0×2,0 ×2,5	$5,0 \cdot 10^4$	0	$5,9 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^4$

#### 3.3.1 Mogelijk geactiveerde massa metaal

De geactiveerde metalen onderdelen van een cyclotron met een massa van meer dan 1.000 kg betreffen het juk en de magneetspoelen. Zowel het juk als de magneetspoelen bevinden zich buiten de vacuümkamer en worden dus geactiveerd door neutronen [14]. De massa van onderdelen die zich in de vacuümkamer of in de bundellijn bevinden en door protonen geactiveerd worden, hebben een (gezamenlijke) massa van minder dan 1.000 kilogram. Hiermee zijn ze qua massa verwaarloosbaar ten opzichte van het juk en de magneetspoelen en vallen ze buiten de onderzoekscope.

Hoe hoger de protonenergie dat een cyclotron kan genereren, hoe groter de massa van het apparaat en daarmee van het juk en de magneetspoelen die kunnen worden geactiveerd. Cyclotrons uit

categorie A bevatten een massa van ongeveer 10 à 20 ton metaal. Cyclotron van categorie B bestaan uit ongeveer 20 ton metaal en categorie C-cyclotrons hebben een massa van 50 tot 100 ton metaal voor respectievelijk de moderne en oude modellen.

### 3.3.2 *Mogelijk geactiveerde massa beton*

Categorie B-bunkers hebben de kleinste afmetingen van alle cyclotronbunkers. De massa mogelijk geactiveerd beton is in deze categorie dan ook het laagst en bedraagt ongeveer 110 ton (zie Tabel 3.4). Categorie A-cyclotronbunkers zijn groter dan categorie B-bunkers. Categorie A-bunkers hebben een massa aan beton variërend van 160 tot 310 ton dat mogelijk geactiveerd is. Categorie C-cyclotrons hebben aparte targetbunkers waar de productie van radio-isotopen plaatsvindt. De hoeveelheid geactiveerd beton is daardoor hoger vergeleken met een bunker uit categorie A of B, waar targets zich direct bij het cyclotron bevinden; er wordt eenvoudigweg in totaal meer beton bestraald. Tabel 3.4 telt twee voorbeelden van cyclotrons in categorie C die erg verschillen. Hiervan is het Philips-cyclotron representatief voor een subgroep van deze categorie van oudere modellen die op het moment van schrijven in twee gevallen in Nederland in een lopend ontmantelingsproject verwickeld zijn, en daarnaast nog bij één onderneming in gebruik is. In de periode waarin deze installaties gebouwd zijn (vanaf omstreeks de jaren zestig) werd er gekozen voor een grote faciliteit. Er is voor deze subgroep tevens minder homogeniteit van ontwerp van de bunkerfaciliteit. In moderne ontwerpen wordt gestreefd naar compactheid. De mogelijk geactiveerde betonmassa voor de 'modernere' subgroep binnen categorie C ligt zoals bij de IBA-Cyclone 30 (in gebruik vanaf de jaren negentig/2000) ongeveer de helft lager. Voor alle bunkers van categorie C in Nederland geldt dat de totale betonmassa voor ongeveer gelijke delen bestaat uit beton van de cyclotronruimte en beton afkomstig van de targetbunkers.

### 3.3.3 *Mogelijk geactiveerde massa wapeningstaal*

Voor wapeningstaal geldt dat de massa gelijk is aan 2,5 procent van de massa van de binnenste 50 centimeter van de betonnen bunker. Uitgezonderd zijn de bunkers van categorie A-cyclotrons, deze bevatten geen wapeningstaal. Voor categorie B betekent dit een massa staal van  $2,8 \cdot 10^3$  kg ( $\sim 3$  ton). Voor categorie C waar wapening in zowel bunkers voor cyclotron als voor targets zit, is de gezamenlijke massa wapeningstaal  $1,5 \cdot 10^4$  kg (15 ton) voor de moderne subcategorie en  $3,5 \cdot 10^4$  kg (35 ton) voor de oude subcategorie.

## 3.4 **Activatieproducten in metaal en beton**

Nucliden worden aangemerkt als 'relevant' wanneer ze in minstens twee publicaties zijn gerapporteerd en een halveringstijd van langer dan 30 dagen hebben<sup>4</sup>. Een uitzondering zijn de 'relevante nucliden' in wapeningstaal. Deze zijn afkomstig van één publicatie.

In Tabel 3.5 staan de in literatuur aangetroffen activatieproducten met een halveringstijd langer dan 30 dagen. Tevens staan in deze tabel de

<sup>4</sup> Kortlevende nucliden worden vanwege de periode tussen stopzetting van het cyclotron en metingen doorgaans al niet meegenomen in de originele publicaties. Bij ontmanteling is een periode van enkele jaren tussen stopzetting van het cyclotron en het verwijderen van materiaal gebruikelijk.

halveringstijden die bij die activatieproducten horen en de meest waarschijnlijke kernreactie die aangeeft hoe het activatieproduct is ontstaan.

Tabel 3.5 Neutron-geïnduceerde activatieproducten in metaal en/of beton, met een halveringstijd langer dan 30 dagen [14, 30, 32-34]. Er zijn voor een groot deel van de activatieproducten meer activatiereacties mogelijk dan hier genoemd.

Geactiveerd materiaal	Activatie product	Geïnduceerde activatiereactie	Halveringstijd van activatieproduct
<b>Metaal</b>	<sup>54</sup> Mn	<sup>54</sup> Fe (n,p) <sup>54</sup> Mn	312 dagen
	<sup>60</sup> Co	<sup>59</sup> Co (n,γ) <sup>60</sup> Co	5,3 jaar
	<sup>60</sup> Co	<sup>63</sup> Cu (n,α) <sup>60</sup> Co	5,3 jaar
	<sup>55</sup> Fe	<sup>54</sup> Fe (n, γ) <sup>55</sup> Fe	2,7 jaar
	<sup>59</sup> Fe	<sup>59</sup> Co (n,p) <sup>59</sup> Fe	44 dagen
	<sup>63</sup> Ni	<sup>62</sup> Ni (n, γ) <sup>63</sup> Ni	100 jaar
<b>Beton</b>	<sup>3</sup> H	<sup>2</sup> H (n,γ) <sup>3</sup> H	12,3 jaar
	<sup>14</sup> C	<sup>17</sup> O (n,α) <sup>14</sup> C	5700 jaar
	<sup>35</sup> S	<sup>34</sup> S (n,γ) <sup>35</sup> S	87 dagen
	<sup>36</sup> Cl	<sup>39</sup> K (n,α) <sup>36</sup> Cl	301.300 jaar
	<sup>39</sup> Ar	<sup>42</sup> Ca (n,α) <sup>39</sup> Ar	269 jaar
	<sup>40</sup> K	<sup>40</sup> Ca (n,p) <sup>40</sup> K	1,28 miljard jaar
	<sup>41</sup> Ca	<sup>40</sup> Ca (n,γ) <sup>41</sup> Ca	103.000 jaar
	<sup>45</sup> Ca	<sup>44</sup> Ca (n,γ) <sup>45</sup> Ca	163 dagen
	<sup>54</sup> Mn	<sup>54</sup> Fe (n,p) <sup>54</sup> Mn	312 dagen
	<sup>55</sup> Fe	<sup>54</sup> Fe (n,γ) <sup>55</sup> Fe	2,7 jaar
	<sup>59</sup> Fe	<sup>58</sup> Fe (n,γ) <sup>59</sup> Fe	44 dagen
	<sup>60</sup> Co	<sup>59</sup> Co (n,γ) <sup>60</sup> Co	5,3 jaar
	<sup>134</sup> Cs	<sup>133</sup> Cs(n,γ) <sup>134</sup> Cs	2,1 jaar
	<sup>152</sup> Eu	<sup>151</sup> Eu (n,γ) <sup>152</sup> Eu	13,6 jaar
	<sup>154</sup> Eu	<sup>153</sup> Eu (n,γ) <sup>154</sup> Eu	8,8 jaar

De in Tabel 3.5 door neutronen geïnduceerde activatieproducten in metalen delen zijn: <sup>54</sup>Mn, <sup>60</sup>Co, <sup>55</sup>Fe, <sup>59</sup>Fe en <sup>63</sup>Ni. Voor zowel <sup>55</sup>Fe en <sup>59</sup>Fe geldt dat er slechts in één gevonden publicatie meetwaarden worden gegeven. De Fe-isotopen zijn daarom als 'niet relevant' beschouwd. De relevante nucliden in de grote metalen delen van het cyclotron zijn: <sup>54</sup>Mn, <sup>60</sup>Co en <sup>63</sup>Ni.

Voor het beton van de bunkermuren en eventuele cyclotron-afscherming (mits van beton) zijn de relevante nucliden: <sup>54</sup>Mn, <sup>60</sup>Co, <sup>134</sup>Cs, <sup>152</sup>Eu, en <sup>154</sup>Eu. De overige activatieproducten kwamen slechts in één publicatie voor.

### 3.5 Activiteitsconcentraties in metaal en beton

#### 3.5.1 Activiteitsconcentraties in cyclotronmetaal

De activiteitsconcentraties van de nucliden <sup>54</sup>Mn, <sup>60</sup>Co en <sup>63</sup>Ni in cyclotron-metaal afkomstig uit de internationale literatuur staan in Tabel 3.6. Niet in alle publicaties zijn waarden van <sup>63</sup>Ni gegeven. De reden hiervoor kan liggen in het feit dat <sup>63</sup>Ni niet met

gamaspectrometrie detecteerbaar is;  $^{63}\text{Ni}$  is een pure bètastraler met een lage maximale bèta-energie ( $E_{\beta, \text{max}} = 66 \text{ keV}$ ). Van de gammastralers  $^{54}\text{Mn}$  en  $^{60}\text{Co}$  variëren de gemiddelde activiteitsconcentraties tussen 0 en 10 kBq/kg op het moment van buitengebruikstelling. Vijf jaar na het buitengebruikstellen van het cyclotron, is  $^{54}\text{Mn}$  voor een groot deel vervallen en varieert de activiteitsconcentratie van  $^{60}\text{Co}$  tussen 0,03 – 1,4 kBq/kg in alle categorieën cyclotrons.  $^{60}\text{Co}$  heeft, naast de hogere activiteitsconcentratie, vergeleken met  $^{54}\text{Mn}$  een langere halveringstijd en het nuclide geeft een hogere externe dosis bij dezelfde activiteit.  $^{60}\text{Co}$  is daarmee het belangrijkste activatieproduct in het neutron-geactiveerde deel van het cyclotron-metaal. Voor de bronnen waarbij meerdere meetpunten gerapporteerd werden, geldt dat de ruimtelijke variatie in gemeten activiteitsconcentratie van dezelfde orde is als het gemiddelde over alle meetpunten.

*Tabel 3.6 Gemiddelde activiteitsconcentraties in metalen onderdelen van cyclotrons (uit internationale literatuur). De in zwart weergegeven waarden beschrijven getallen die direct (behoudens de berekening voor verval) zijn overgenomen vanuit de bronpublicatie. Waarden die in blauw zijn weergegeven, zijn voor dit onderzoek berekend over alle gerapporteerde meetpunten in een publicatie. Verschillende cyclotrons uit dezelfde bron worden aangeduid met cijfer **1** of **2**.*

Cyclotron categorie	Bron	0 jaar na stop			5 jaar na stop		
		$^{54}\text{Mn}$ (kBq/kg)	$^{60}\text{Co}$ (kBq/kg)	$^{63}\text{Ni}$ (kBq/kg)	$^{54}\text{Mn}$ (kBq/kg)	$^{60}\text{Co}$ (kBq/kg)	$^{63}\text{Ni}$ (kBq/kg)
A	[30]		0	1		0	1
	[5] <b>1</b>	5	1		0	0	
	[32]	9	2	30	0	1	30
B	[5] <b>2</b>	0,8	1		0	0	
	[15]		3	10		1	10
C	[35]	10	2		0	1	

### 3.5.2

#### *Activiteitsconcentraties in beton*

De activiteitsconcentraties in bunkerbeton afkomstig uit de internationale literatuur staan in Tabel 3.7.

Op het moment van buitengebruikstelling van het cyclotron (0 jaar na stop) worden de hoogste activiteitsconcentraties veroorzaakt door de nucliden  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$  en  $^{152}\text{Eu}$ . Door de relatief korte halveringstijd van  $^{54}\text{Mn}$  ( $T_{1/2} = 312$  dagen) is dit nuclide vijf jaar na het buitengebruikstellen van het cyclotron slechts in extreem lage concentraties aanwezig (maximaal 0,0003 kBq/kg). De activatieproducten  $^{60}\text{Co}$  en  $^{152}\text{Eu}$  zijn na een aantal jaren in al het bunkerbeton verantwoordelijk bevonden voor 99 tot 100 procent van de radioactiviteit [38]. De activiteitsconcentraties van deze twee nucliden verschillen weinig voor de categorie A- en B-cyclotrons. Duidelijk hogere activiteitsconcentraties worden aangetroffen in het beton van de targetbunkers van categorie C-cyclotrons (gemiddeld 3 kBq/kg voor  $^{152}\text{Eu}$ ). Op de langere termijn (> 5 jaar) is  $^{152}\text{Eu}$  bepalend vanwege de langere halveringstijd [22].

Informatie over activiteitsconcentraties in het zelfafermingsbeton van een cyclotron uit de A-categorie is helaas niet beschikbaar en is daarom niet opgenomen in Tabel 3.7.

Voor de bronnen waarbij meerdere meetpunten gerapporteerd werden, geldt dat de variatie in gemeten activiteitsconcentratie in de ruimte van dezelfde orde is als het gemiddelde over alle meetpunten.

Tabel 3.7 Gemiddelde activiteitsconcentraties in bunkerbeton. Waarden die in zwart zijn weergegeven, beschrijven getallen die direct (behoudens de berekening voor verval) zijn overgenomen vanuit de bronpublicatie. Waarden die in blauw zijn weergegeven, zijn voor dit onderzoek berekend tot gemiddelde activiteiten over alle gerapporteerde meetpunten, over een diepte van 50 centimeter. Verschillende cyclotrons uit dezelfde bron worden aangeduid met cijfer **1** of **2**.

Cyclotron categorie	Bron	0 jaar na stop					5 jaar na stop				
		<sup>54</sup> Mn (kBq/kg)	<sup>60</sup> Co (kBq/kg)	<sup>134</sup> Cs (kBq/kg)	<sup>152</sup> Eu (kBq/kg)	<sup>154</sup> Eu (kBq/kg)	<sup>54</sup> Mn (kBq/kg)	<sup>60</sup> Co (kBq/kg)	<sup>134</sup> Cs (kBq/kg)	<sup>152</sup> Eu (kBq/kg)	<sup>154</sup> Eu (kBq/kg)
A	[30]	1 · 10 <sup>-2</sup>	4 · 10 <sup>-2</sup>		7 · 10 <sup>-2</sup>	8 · 10 <sup>-3</sup>	3 · 10 <sup>-4</sup>	2 · 10 <sup>-2</sup>		6 · 10 <sup>-2</sup>	6 · 10 <sup>-3</sup>
	[31] <b>1</b>	5 · 10 <sup>-4</sup>	5 · 10 <sup>-2</sup>	9 · 10 <sup>-4</sup>	2 · 10 <sup>-2</sup>		1 · 10 <sup>-5</sup>	2 · 10 <sup>-2</sup>	2 · 10 <sup>-4</sup>	2 · 10 <sup>-2</sup>	
	[12]		2 · 10 <sup>-2</sup>		2 · 10 <sup>-2</sup>			8 · 10 <sup>-3</sup>		2 · 10 <sup>-2</sup>	
B	[33]	2 · 10 <sup>-2</sup>	7 · 10 <sup>-2</sup>	5 · 10 <sup>-3</sup>	8 · 10 <sup>-2</sup>	1 · 10 <sup>-2</sup>	3 · 10 <sup>-4</sup>	4 · 10 <sup>-2</sup>		6 · 10 <sup>-2</sup>	6 · 10 <sup>-3</sup>
C	[34]	8 · 10 <sup>-3</sup>	5 · 10 <sup>-2</sup>	2 · 10 <sup>-3</sup>	5 · 10 <sup>-2</sup>	3 · 10 <sup>-3</sup>	2 · 10 <sup>-4</sup>	2 · 10 <sup>-2</sup>		3 · 10 <sup>-2</sup>	2 · 10 <sup>-3</sup>
	[23] cyclotronruimte		1 · 10 <sup>-1</sup>		3 · 10 <sup>-1</sup>			6 · 10 <sup>-2</sup>		2 · 10 <sup>-1</sup>	
	[23] targetbunker		2		3			1		3	
	[31] <b>2</b>		5 · 10 <sup>-2</sup>	2 · 10 <sup>-2</sup>	8 · 10 <sup>-2</sup>			3 · 10 <sup>-2</sup>		6 · 10 <sup>-2</sup>	



### 3.5.3 Activiteitsconcentraties in wapeningstaal

Alleen wapeningstaal aanwezig in de binnenste 50 centimeter van de bunkermuur kan worden geactiveerd en wordt derhalve beschouwd. De literatuur beschrijft slechts waarden voor wapening uit de muur van een targetbunker. De gemiddelde activiteitsconcentratie van  $^{54}\text{Mn}$  is 1 kBq/kg (met een bereik van 0,4 – 2 kBq/kg) direct na het buitengebruikstellen van het cyclotron. De gemiddelde activiteitsconcentratie van  $^{60}\text{Co}$  is 10 kBq/kg (met een bereik van 7 – 20 kBq/kg) op dat moment [23] (zie Tabel 3.8). Opgemerkt wordt dat de gemiddelde activiteitsconcentratie van  $^{60}\text{Co}$  in wapeningstaal beduidend hoger ligt dan die van het beton ter plaatse.

Tabel 3.8 Gemiddelde activiteitsconcentraties in wapening van bunkermuur afkomstig uit internationale literatuur.

Cyclotron categorie	Bron	0 jaar na stop		5 jaar na stop	
		$^{54}\text{Mn}$ (kBq/kg)	$^{60}\text{Co}$ (kBq/kg)	$^{54}\text{Mn}$ (kBq/kg)	$^{60}\text{Co}$ (kBq/kg)
C	[23] target-bunker	1	10	$3 \cdot 10^{-2}$	7

## 3.6 Vrijgave van materialen

Om per restmateriaal te bepalen of het vrijgegeven kan worden, is een gewogen sommatie uitgevoerd over de relevante nucliden. Dit is gedaan voor de materialen beton en metaal, zowel op het moment van het buitengebruikstellen van het cyclotron als vijf jaar na het stoppen van de protonenversnelling. De vrijgavegrenzen per nuclide staan in Tabel 3.9. De resultaten van de gewogen sommen staan in Figuur 3.2 en in Tabel 3.10, samen met een weergave in 'klassen'. Daarbij staat 'Klasse I' voor een waarde onder de vrijgavegrens. 'Klasse II' staat voor een waarde tussen de vrijgavegrens en honderdmaal de vrijgavegrens. 'Klasse III' staat voor waarden van boven honderdmaal de vrijgavegrens.

Tabel 3.9 Vrijgavegrenzen van relevante radionucliden in metalen en beton als gevolg van neutronenbestraling door cyclotrons.

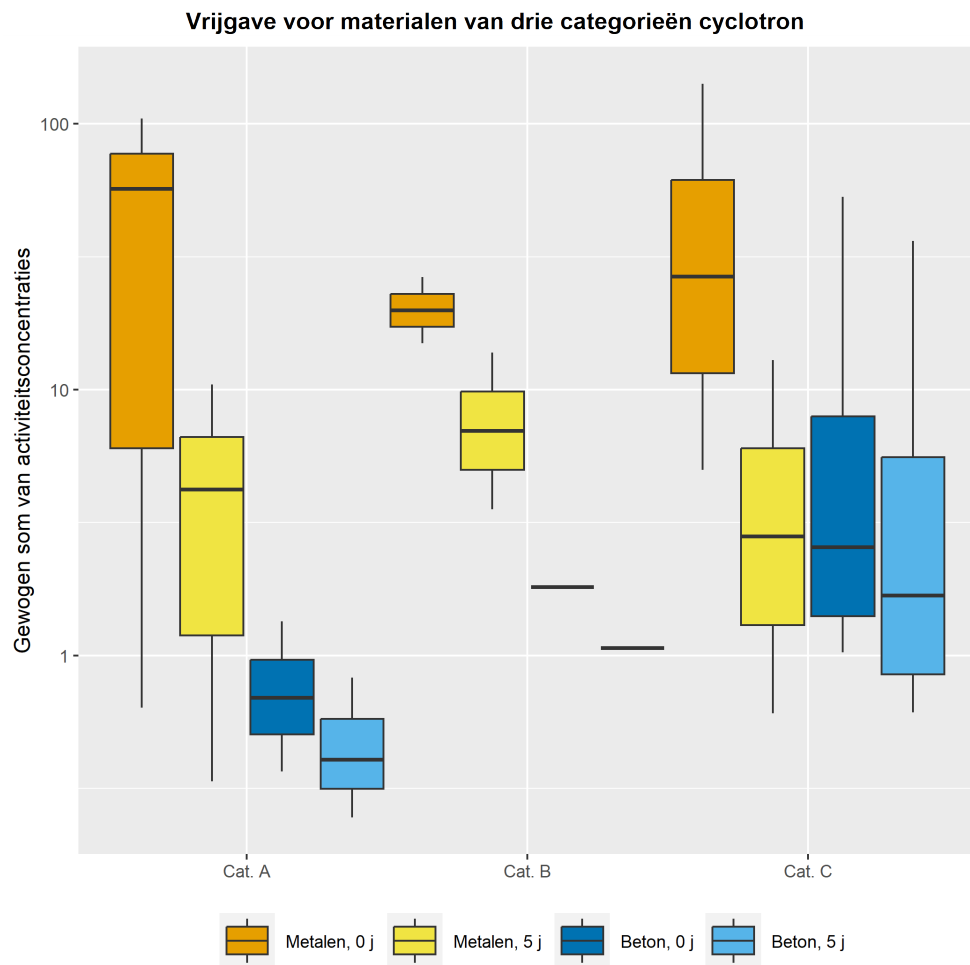
Nuclide	Vrijgavegrens (kBq/kg)
$^{54}\text{Mn}$	$1,00 \cdot 10^{-1}$
$^{60}\text{Co}$	$1,00 \cdot 10^{-1}$
$^{63}\text{Ni}$	$1,00 \cdot 10^2$
$^{134}\text{Cs}$	$1,00 \cdot 10^{-1}$
$^{152}\text{Eu}$	$1,00 \cdot 10^{-1}$
$^{154}\text{Eu}$	$1,00 \cdot 10^{-1}$

Volgens onze berekeningen kan het cyclotronmetaal niet direct na buitengebruikstelling worden vrijgegeven en moet als radioactief rest- of afvalmateriaal geclassificeerd worden. Vijf jaar na de buitengebruikstelling vallen alle door neutronen geactiveerde metalen onderdelen in klasse II. De mogelijkheid bestaat dat dit metaal na vijf jaar zelfs al algemeen vrijgegeven kan worden (klasse I) [30].

Het bunkerbeton van categorie A-cyclotrons kan direct na de stop in de meeste gevallen worden vrijgegeven. Vijf jaar na buitengebruikstelling van het cyclotron kan het bunkerbeton dankzij verval in ieder geval worden vrijgegeven. Het beton wordt dus niet meer geclassificeerd als 'radioactief materiaal'. Voor categorie B- en C-cyclotrons kan het bunkerbeton niet direct na de stop worden vrijgegeven. Na vijf jaar liggen de gewogen somwaarden van al het beton van cyclotronbunkers rond de vrijgavegrens. Een uitzondering is er voor het beton van de targetbunkers (categorie C). Dit is het hoogst-actieve beton en kan ook na vijf jaar nog niet worden vrijgegeven. Wel blijft in het targetbunkerbeton de gewogen activiteitsconcentratie onder de grens van honderdmaal de vrijgavewaarde.

In de enige bekende publicatie die wapeningstaal behandelt is het wapeningstaal uit de targetbunker geactiveerd tot ruim boven de vrijgavegrens [23]. Ook na een vervalperiode van vijf jaar blijft de activiteitsconcentratie in het wapeningstaal boven de vrijgavegrens. Daarmee blijft het materiaal geclassificeerd als radioactief rest- of afvalmateriaal. Wel geldt dat de gewogen activiteitsconcentratie vanaf vijf jaar na buitengebruikstelling gedaald was tot minder dan honderdmaal de vrijgavegrens.

Omdat de activatie van beton en wapeningstaal allebei afhankelijk zijn van de lokale neutronenflux, zal de activiteitsconcentratie in het beton gerelateerd zijn aan de activiteitsconcentratie in het wapeningstaal. Uit dezelfde studie blijkt het wapeningstaal ongeveer vijf à tien maal hoger geactiveerd te zijn dan het beton op dezelfde plek in de bunker. Uitgaande van die aanname, is het te verwachten dat de activiteitsconcentratie in wapeningstaal uit de cyclotronbunker (in categorie B en C) boven de vrijgavegrens ligt op het moment van buitengebruikstelling, maar dat het lager geactiveerd zal zijn dan het wapeningstaal uit de targetbunker. Vijf jaar na buitengebruikstelling zal de gewogen activiteitsconcentratie van het wapeningstaal uit de cyclotronbunkers rond de vrijgavegrens liggen.



*Figuur 3.2 Gewogen som voor vrijgave van de ontmantelingsmaterialen beton en metaal (exclusief wapeningstaal) per categorie cyclotron op het moment van buitengebruikstelling (0 j) en vijf jaar daarna (5 j).*

Tabel 3.10 Gewogen som voor vrijgave van materiaal bij cyclotrons uit de literatuur. De berekende waarde van de gewogen som staat in het linkerdeel van de tabel. Het rechterdeel beschrijft de klasse-indeling voor vrijgave. Klasse I-materiaal kan algemeen worden vrijgegeven. Voor klasse II-materiaal (gewogen som tussen 1 en 100) komt misschien in aanmerking voor specifieke vrijgave. Klasse III-materiaal (gewogen som > 100) moet worden afgevoerd naar de COVRA. Metaal = juk en/of magneetspoelen; Wapening = wapeningstaal uit bunker. Verschillende cyclotrons uit dezelfde bron worden aangeduid met cijfer 1 of 2. Aangegeven tijd (in jaren) betreft de periode na buitengebruikstelling.

Cyclotron categorie	Bron	Gewogen Som						Klasse-indeling voor vrijgave					
		Metaal		Beton		Wapening		Metaal		Beton		Wapening	
		0 jaar	5 jaar	0 jaar	5 jaar	0 jaar	5 jaar	0 jaar	5 jaar	0 jaar	5 jaar	0 jaar	5 jaar
A	[5] <b>1</b>	57	4					II	II				
	[30]	<1	<1	1	<1			I	I	II	I		
	[32]	100	10					III	II				
	[31] <b>1</b>			<1	<1					I	I		
	[12]			<1	<1					I	I		
B	[5] <b>2</b>	15	4					II	II				
	[15]	26	14					II	II				
	[33]			2	1					II	II		
C	[35] cyclotronruimte	140	13					III	II				
	[34] cyclotronruimte			1	<1					II	I		
	[23] cyclotronruimte			4	3					II	II		
	[23] target-bunker			53	36	156	74			II	II	III	II
	[31] <b>2</b> cyclotronruimte			2	<1					II	I		

### 3.7 Hoeveelheid radioactief rest- of afvalmateriaal

#### 3.7.1 *Hoeveelheid radioactief metaal per cyclotron*

Voor de meeste cyclotrons geldt dat direct na buitengebruikstelling de door neutronen geactiveerde metalen cyclotrondelen (juk of spoelen) als radioactief geïnclassificeerd moeten worden. Een uitzondering kan worden gemaakt voor een cyclotron in categorie A. In deze categorie zijn in de literatuur namelijk ook cyclotronmetalen aangetroffen die vrijgegeven konden worden volgens de vigerende vrijgavegrenzen. Omdat ook waarden net boven de vrijgavegrens zijn gevonden, moet er voor categorie A-cyclotrons rekening worden gehouden met een massa van maximaal  $2 \cdot 10^4$  kg (20 ton) metaal dat geïnclassificeerd als radioactief materiaal afgevoerd moet worden.

Vanwege de aangetroffen activiteitsconcentraties wordt voor categorieën B en C al het door neutronen geactiveerde metaal van de cyclotroninstallaties als radioactief rest- of afvalmateriaal beschouwd. Voor categorie B betreft het  $2,0 \cdot 10^4$  kg (20 ton) radioactief metaal. Voor categorie C gaat het om  $5,0 \cdot 10^4$  kg (50 ton) tot  $1,0 \cdot 10^5$  kg (100 ton) radioactief metaal. Wel geldt dat vijf jaar na de buitengebruikstelling al dit metaal lager dan 100 keer de gewogen vrijgavegrens zal zijn (klasse II).

Met het oog op het waarschijnlijke einddoel van smelting van het materiaal voor recycling (eventueel na vijftig jaar vervalopslag bij COVRA), wordt de eventuele heterogeniteit van de activiteitsconcentratie in het juk en de spoelen verwaarloosd.

#### 3.7.2 *Hoeveelheid radioactief beton per cyclotron*

Vijf jaar na de stop kan al het bunkerbeton van categorie A-cyclotrons worden vrijgegeven. Mogelijk moet wel het eventuele beton van de zelfafscherming, met een massa tot  $4,6 \cdot 10^4$  kg (~50 ton), als radioactief materiaal geïnclassificeerd worden. Helaas zijn hiervoor geen meetgegevens beschikbaar en kan dit rapport er dus geen informatie over geven.

Met de uitkomst dat voor categorie B al het beton als radioactief rest- of afvalmateriaal moet worden beschouwd, komt de totale hoeveelheid radioactief bunkerbeton in deze categorie uit op  $1,1 \cdot 10^5$  kg (110 ton).

De massa van het geactiveerde bunkerbeton voor categorie C-cyclotrons is tot enkele malen groter dan die van de minder krachtige cyclotrons. Voor de categorie C-cyclotrons die in de jaren zestig zijn gebouwd, kan de massa radioactief beton oplopen tot  $1,4 \cdot 10^6$  kg (1400 ton). Voor cyclotrons binnen categorie C die van na het jaar 1990 zijn, kan de massa tot  $5,9 \cdot 10^5$  kg (~600 ton) bedragen.

Voor categorie C moet een onderscheid worden gemaakt tussen het beton van de cyclotronbunker en dat van de targetbunker(s). Voor de oudere cyclotrons is bekend dat de targetbunker hoger radioactief wordt dan de cyclotronbunker. Omdat de meeste neutronen door reacties in de targets ontstaan, zal ditzelfde gelden voor moderne cyclotrons waarbij het bundelverlies bovendien lager is. Tegelijkertijd blijft de activiteitsconcentratie in beton sterk afhankelijk van de afmetingen van

de ruimtes. De hoeveelheid beton in de cyclotronruimte bij oude cyclotrons is  $3,8 \cdot 10^5$  kg ( $\sim 400$  ton). Voor nieuwe cyclotrons is dat  $3,4 \cdot 10^5$  kg ( $\sim 300$  ton). Dit beton is mogelijk te classificeren als niet-radioactief. Voor beton dat uit de targetbunkers komt, is de massa ongeveer  $1,0 \cdot 10^6$  kg (1000 ton) bij de oude cyclotrons en  $2,5 \cdot 10^5$  kg (250 ton) voor de moderne. Dit beton is vijf jaar na buitengebruikstelling waarschijnlijk nog altijd geactiveerd tot boven de vrijgavegrens.

### 3.7.3 *Massa radioactief wapeningstaal per cyclotron*

Al het wapeningstaal waarbij activatie mogelijk was, lijkt geactiveerd te zijn tot boven de vrijgavegrens. Daarmee wordt de massa aan radioactief wapeningstaal geschat op 0 kg voor cyclotrons van categorie A,  $2,8 \cdot 10^3$  kg ( $\sim 3$  ton) voor categorie B, en  $3,5 \cdot 10^4$  kg (35 ton) voor de oudere exemplaren in categorie C. Voor cyclotrons van categorie C met een bouwjaar na 1990 betreft dit getal ongeveer  $1,5 \cdot 10^4$  kg (15 ton).

### 3.7.4 *Kosten per cyclotron van overdracht aan COVRA*

De verwachte overdrachtskosten aan COVRA van radioactief ontmantelingsafval beschouwd in dit rapport (neutron geactiveerde metaaldelen van het cyclotron, bunker beton en wapeningstaal) staan in Tabel 3.11. Bij deze kosten is het uitgangspunt dat al het radioactieve afval overgedragen wordt voor vervalopslag. Dit uitgangspunt is aannemelijk gezien de lage activiteitsconcentraties, de relatief korte halveringstijden en de aard van het beschouwde ontmantelingsmateriaal (beton en metaal).

Voor cyclotrons van categorie A variëren de verwachte kosten 0 tot 600.000 euro per cyclotron. Er zijn geen overdrachtskosten voor het ontmantelingsmateriaal wanneer dit onder de vrijgavegrens blijkt te liggen. Dit is mogelijk bij deze categorie cyclotrons. In het maximale bedrag voor categorie A (600.000 euro) zijn de kosten voor de eventuele betonnen zelfafscherming van het cyclotron meegenomen. Het is echter niet met zekerheid te zeggen of deze afscherming geactiveerd is tot boven de vrijgavegrens. Voor categorie B is het bedrag ongeveer 1 miljoen euro per cyclotron, waarvan het grootste deel van deze kosten komt door radioactief betonafval.

Voor categorie C is de spreiding hoog, met kosten variërend tussen ongeveer 8 miljoen euro en 11 miljoen euro per cyclotron. Voor de moderne cyclotrons in deze categorie, met een bouwjaar na 1990, gaat het om bedragen van 2,4 miljoen euro tot 4,8 miljoen euro.

### 3.7.5 *Totaal van cyclotrons in Nederland*

Als we alle cyclotrons in Nederland samen nemen, komen we uit op (in 2023) drie cyclotrons in categorie A, zes cyclotrons in categorie B, en vijf in categorie C. Van deze laatste passen er drie in de subcategorie oud, en twee in de subcategorie modern. Van de oude zijn er twee in een ontmantelingstraject verwickeld. Deze twee cyclotrons staan al geruime tijd (veel langer dan vijf jaar) buiten gebruik. Dit houdt in dat activiteitsconcentraties lager zijn dan genoemd in paragraaf 3.5.

Wanneer geen rekening wordt gehouden met een langere vervaltijd dan vijf jaar, komt het totaal aan radioactief rest- of afvalmateriaal op 4.830 tot 6.940 ton ( $\sim 5$  tot 7 miljoen kg). De totale overdrachtskosten voor

vervalopslag bij COVRA zouden hiervoor circa 35 tot 50 miljoen euro bedragen.

Tabel 3.11 Schatting van massa's aan radioactieve restmaterialen/afval in bulk en corresponderende opslagkosten bij COVRA, 5 jaar na buitengebruikstelling van cyclotrons.

Categorie cyclotron	Radioactief afval, 5 jaar na buitengebruikstelling							
	Massa metaal (ton)	Massa zelfafscherming (ton)	Massa bunkerbeton (ton)	Massa wapeningstaal (ton)	Massa totaal (ton)	Aantal 20-voets zeecontainers	Schatting kosten per cyclotron (M€)	Schatting kosten totaal in Nederland (M€)
A	0-20	0-50	0	0	0-70	0-3	0-0,6	0-1,8
B	20	0	110	3	133	5	1	6
C oud	100	0	1000-1400	35	1135-1535	41-55	8-11	24-33
C modern	50	0	250-600	15	315-665	12-24	2,4-4,8	4,8-10
Totaal	520-580	0-150	4160-6060	150	4830-6940	173-248		35-50

### 3.7.6 Specifieke vrijgave

Uitgaande van een vereenvoudiging, waarbij aangenomen wordt dat specifieke vrijgave zeer waarschijnlijk mogelijk is bij een activiteitsconcentratie die lager is dan 100 x de vrijgavegrens (klasse II), komt het radioactieve metaal vijf jaar na buitengebruikstelling van het cyclotron in aanmerking voor specifieke vrijgave. Bovendien komt al het beton en radioactieve wapeningstaal dat in dit rapport wordt beschouwd vijf jaar na het buitengebruikstellen van het cyclotron in aanmerking voor specifieke vrijgave. Het betreft dus radioactieve reststromen die mogelijk voor hergebruik in aanmerking komen. Buiten de scope vallende en daarom niet in detail onderzochte metalen delen van het cyclotron, zoals de *dees* in de vacuümkamer, bundelgeleidingsbuizen en targethouders, zullen naar alle waarschijnlijkheid hoog geactiveerd zijn en als radioactief afval moeten worden afgevoerd.

Al het radioactieve restmateriaal dat gevonden werd in de internationale literatuur bevindt zich na een vervalperiode van vijf jaar in klasse II of lager (zie Tabel 3.10). Aangenomen dat de internationale literatuur representatief is voor de Nederlandse situatie, betekent dat dat al het beschouwde materiaal waarschijnlijk in aanmerking komt voor specifieke vrijgave. Daarmee kan 4.830 tot 6.940 ton aan radioactief bulkafval worden gerecycled. Zo is in Nederland een besparing mogelijk van ongeveer 50 miljoen euro aan (verval)opslagkosten voor radioactief afval.





## 4 Discussie

In dit onderzoek is ervoor gekozen om de cyclotrons in Nederland in te delen in drie categorieën en voor elke categorie een *best estimate* te bepalen van de hoeveelheid af te voeren radioactief materiaal. De uiteindelijke hoeveelheid als radioactieve afvalstoffen af te voeren materiaal hangt sterk af van eventuele specifieke vrijgaveroutes die mogelijk in de toekomst voor deze materialen worden toegestaan. Tegelijkertijd is het mogelijk dat vrijgavegrenzen in de toekomst (verder) naar beneden worden bijgesteld. Dat kan (specifieke) vrijgave juist bemoeilijken. Dit gebeurde voor het laatst in 2018 met de invoering van het Bbs.

Er is slechts in beperkte mate informatie beschikbaar in de literatuur over hoeveelheden radioactieve rest- en afvalstoffen die vrijkomen bij de ontmanteling van cyclotrons. Vanwege de onderlinge verschillen tussen de cyclotrons en hun bunkers zijn deze cijfers niet eenvoudig te extrapoleren naar andere cyclotrons. Er zijn tien publicaties gevonden die activatie van materiaal expliciet beschrijven en (schattingen van) activiteitsconcentraties geven. Hiervan zijn er vijf die een schatting maken voor metalen onderdelen, en zes met een schatting voor activiteitsconcentraties in beton. De publicaties beslaan cyclotrons met onderlinge verschillen in de eigenschappen relevant voor activatie van materiaal. Er is maar één publicatie die activatie van beton beschrijft voor categorie B [33]. Daarnaast is er slechts één publicatie die expliciet activatie van staal uit de bewapening van het beton rapporteert [23]. Naast de onderlinge verschillen tussen de cyclotrons en hun bunkers verschillen ook de gevolgde methode om tot activiteitsconcentraties te komen. Bij metingen van boormonsters is niet altijd duidelijk hoeveel monsters zijn genomen of hoe de datum van metingen zich verhoudt tot de datum van buitengebruikstelling van het cyclotron. Daarnaast zijn activiteitsconcentraties verkregen op verschillende diepten. Niet alle publicaties hebben een diepteprofiel van activatie in metaal of beton gegeven. Sommige publicaties hebben te weinig meetpunten genomen om van een representatieve verdeling over de cyclotron- of targetruimte te kunnen spreken. Door deze verschillen zijn activiteitsconcentraties niet altijd vergelijkbaar.

Naast de beperkte informatie over activiteitsconcentraties is er weinig informatie over de hoeveelheid metaal en/of beton dat als radioactief materiaal moet worden afgevoerd. Hierdoor is er weinig vergelijkingsmateriaal vanuit de literatuur beschikbaar voor de Nederlandse situatie. Daarbij komt dat met de wijziging van vrijgavegrenzen in 2018 informatie over hoeveelheden radioactief afval in rapporten van voor 2018 niet meer met huidige hoeveelheden zijn te vergelijken.

Een opvallend verschil tussen de voor het onderzoek gebruikte literatuur en de eigenschappen van de Nederlandse productiecyclotrons is dat de laatstgenoemde op een hogere bundelstroom bedreven lijken te worden dan de voorbeelden uit de literatuur. Door ontwikkeling aan de targetkant is ruimte gekomen om de stroom te verhogen – de cyclotrons

zelf waren al in staat tot het produceren van deze hogere stroom. De vraag doet zich voor of de activiteitsconcentraties vanuit de literatuur representatief blijven voor modernere omstandigheden waar de stroom op de targets tot enkele malen hoger ligt. Het is aannemelijk dat er een (min of meer) lineair verband bestaat tussen stroom en omliggende activiteitsconcentraties [39]. In dat geval kan een verhoging van een factor twee tot gevolg hebben dat het bunkerbeton rond cyclotrons van categorie A ook vijf jaar na buitengebruikstelling van het cyclotron tot boven de vrijgavegrenzen worden geactiveerd. Hiermee zou de verwachte hoeveelheid aan radioactief restmateriaal kunnen toenemen met ongeveer 200 ton beton voor cyclotroncategorie A. Voor categorie C wordt ook de kans kleiner dat het beton van de cyclotronruimtes vijf jaar na buitengebruikstelling van het cyclotron kan worden vrijgegeven. Om hierover uitsluitsel te kunnen geven, is onderzoek nodig naar activiteitsconcentraties rond moderne cyclotrons die hun targets voorzien van een hogere stroom protonen.

Bij categorie C-cyclotrons wordt er vaak noodzakelijkerwijs meer gebruikgemaakt van wapening van de vloer om de draagkracht daarvan te vergroten. De massa van de 30 MeV-cyclotrons is namelijk tot enkele malen groter vergeleken met cyclotrons van categorie A en B. Dit maakt dat de aannames voor de berekening van de massa aan wapeningstaal voor categorie C een onderschatting kunnen opleveren. Het verschil zal echter relatief klein zijn ten opzichte van de massa aan radioactieve metalen van het cyclotron en eventueel radioactief beton.

De berekening voor de totale hoeveelheid radioactief restmateriaal in Nederland bevat twee oude categorie C-cyclotrons die in werkelijkheid al veel langer dan de in dit rapport gestelde vervaltijd van vijf jaar buiten gebruik zijn. Deze zullen vermoedelijk minder bijdragen aan de totale kosten dan in dit rapport wordt gesteld.

Een ander feit om bij ontmanteling rekening mee te houden, is dat bunkermuren niet in alle gevallen te 'scheiden' zijn. Zeker bij faciliteiten van voor het jaar 2009 is het niet gebruikelijk om modulair te bouwen. Afhankelijk van de manier waarop de sloop wordt gepland, kan het geactiveerde deel alsnog apart van de rest van de muur worden verwijderd. Vaak valt de keuze echter op slopen van de volledige bunkermuur, waarna het beton vergruisd en gemengd wordt. Hierbij zal dus het geactiveerde beton met het niet-geactiveerde beton mengen. Deze verdunning zou met het oog op hergebruik of recycling kunnen worden toegestaan (Bbs. Art. 3.23). In ieder geval neemt de gemiddelde activiteitsconcentratie hiermee af voor cyclotrons van categorie B en C (categorie A kent 'bunker'muren van niet meer dan 50 centimeter dikte). Gezien de bunkermuren van B en C meestal minimaal 200 centimeter dik zijn, zal de verdunning een factor 4 bedragen. Hiermee blijven qua beton alleen de targetruimtes van categorie C over als radioactieve reststoffen. Als het geactiveerde deel van het beton gemengd wordt met het overige beton van de bunker, zal het beton (voor alle categorieën) dus aan te merken zijn als bouwafval in plaats van radioactief afval.

De stelling dat het beton bij slopen van de volledige bunkermuur van cyclotrons als bouwafval afgevoerd kan worden, is zeker geen algemeen

voorschrift. We moeten hier opnieuw benadrukken dat individuele faciliteiten altijd onderling verschillen. Het blijft dus altijd nodig om meetcampagnes op te zetten om de activiteitsconcentraties van het vrijgekomen materiaal bij ontmanteling te achterhalen. Alleen dan is het mogelijk om de hoeveelheid vrijgekomen radioactief restmateriaal – en dus de resulterende kosten voor bijvoorbeeld de overdracht aan COVRA – te bepalen.

Kosten van ontmanteling van cyclotrons bestaan niet alleen uit overdrachtskosten van eventueel radioactief bulkafval naar de COVRA. Ook kleinere metalen cyclotrononderdelen, mogelijk met activiteitsconcentraties die hoger zijn dan honderdmaal de vrijgavegrens (onder meer door het activatieproduct  $^{65}\text{Zn}$ ), en radioactieve materialen die ontstaan tijdens de ontmanteling (secundaire ontmantelingsmaterialen) moeten aan COVRA worden overgedragen. Tevens spelen proceskosten een rol. Deze kosten behandelt dit rapport niet. Bovendien zullen ze, evenals de geschatte overdrachtskosten voor bulkafval, sterk verschillen per ontmantelingsproject. Het IAEA heeft in de afgelopen jaren documenten uitgebracht die houvast kunnen bieden bij het plannen van ontmantelingsprojecten en de bijbehorende proces- en materiaalkosten [14, 40].



## 5 Conclusies

Voor de Nederlandse situatie is geïnventariseerd welke productie-cyclotrons voor radio-isotopen er zijn. Voor deze cyclotrons is de hoeveelheid radioactief rest- of afvalmateriaal die vrijkomt bij ontmanteling geschat. Hierbij is gekeken naar de bulkhoeveelheden en is uitgegaan van een lange gelijkwaardige bestralingsduur voor alle cyclotrons. Tevens is een schatting gemaakt of het restmateriaal in aanmerking komt voor specifieke vrijgave en wat mogelijk de kosten zijn voor overdracht naar COVRA wanneer het materiaal als radioactief afval moet worden afgevoerd.

Er zijn in Nederland twaalf cyclotrons die een maximale protonenergie boven de 8 MeV hebben en die radio-isotopen produceren. Tevens zijn er nog twee cyclotrons die voorheen radio-isotopen produceerden en nu in ontmanteling zijn. Deze veertien cyclotrons zijn in te delen in drie categorieën; 3 cyclotrons in categorie A (<18 MeV-cyclotrons met zelfafscherming), 6 cyclotrons in categorie B (~18 MeV-cyclotrons zonder zelfafscherming, <sup>18</sup>F-productie), en 5 cyclotrons in categorie C (~30 MeV-cyclotrons met targets in externe ruimten).

De literatuur over geactiveerd materiaal bij ontmanteling van cyclotrons is beperkt. Informatie is gevonden voor de grote metalen delen van het cyclotron (het juk en de spoelen), voor het beton van de bunker en (beperkt) voor beton van het cyclotron (zelfafscherming) en wapeningstaal in het beton. Al deze onderdelen worden door neutronen geactiveerd. Voor bunkerbeton kan activatie alleen in de binnenste 50 centimeter optreden; het overige beton is dan ook buiten beschouwing gelaten in de schatting van hoeveelheden aan radioactief beton. Voor de metalen geldt dat kleinere metalen onderdelen van het cyclotron, vaak door protonen geactiveerd, ook buiten beschouwing zijn gelaten. Vijf jaar na buitengebruikstelling van het cyclotron is <sup>60</sup>Co het belangrijkste activatieproduct in het door neutronen geactiveerde metaal. In het beton zorgt <sup>152</sup>Eu dan voor de belangrijkste bijdrage.

Al het in dit rapport beschouwde radioactieve afval dat eventueel bij ontmanteling van cyclotrons vrijkomt, zal zelfs in de meest conservatieve scenario's voor vervalopslag bij de COVRA geschikt zijn. Daarmee kan in een tijdspanne van vijftig jaar na opslag in recycling van het materiaal worden voorzien.

Het beton van categorie A-cyclotronbunkers kan vijf jaar na het buitengebruikstellen van het cyclotron worden vrijgegeven van het wettelijke controlestelsel vanwege de lage activiteitsconcentraties. De grote metalen delen van cyclotrons uit deze categorie kunnen niet direct worden vrijgegeven, maar zijn mogelijk geschikt voor specifieke vrijgave. Anders kunnen ze, na een vervalperiode van tientallen jaren, alsnog worden vrijgegeven en worden gerecycled. In het laatste geval moet dit materiaal voor vervalopslag bij de COVRA worden opgeslagen. De overdrachtkosten voor vervalopslag bij COVRA van maximaal 20 ton radioactief metaal plus mogelijk 50 ton tot boven de vrijgavegrens

geactiveerd beton (afkomstig van de zelf-afscherming) worden geschat op 0,6 miljoen euro per categorie A cyclotron.

Voor categorie B geldt dat zowel de grote metalen onderdelen van het cyclotron als het beton en het aanwezige wapeningstaal in de bunker ook vijf jaar na buitengebruikstelling tot boven de vrijgavegrens geactiveerd zijn. De hoeveelheden bedragen ongeveer 20 ton voor metalen, tot 110 ton beton en zo'n 3 ton wapeningstaal. Wel is al dit materiaal mogelijk specifiek vrij te geven. Wanneer er geen veilig hergebruik wordt voorzien, moet het materiaal als radioactief afval worden afgevoerd. De overdrachtskosten voor vervalopslag bij COVRA die met deze hoeveelheden gemoeid zijn, bedragen ongeveer 1 miljoen euro per categorie B cyclotron.

Voor categorie C is een grote variatie in hoeveelheden ontmantelingsmateriaal gevonden. Dit komt voor een deel doordat het beton voor de helft afkomstig is van de cyclotronruimte, en de helft van de targetruimtes. Voor het beton uit de cyclotronruimtes geldt dat het mogelijk na vijf jaar vrijgegeven kan worden. Voor de targetruimtes geldt dat vijf jaar na de buitengebruikstelling van het cyclotron de materialen nog steeds radioactief zijn. Wel wordt ingeschat dat specifieke vrijgave mogelijk is. Als er geen hergebruik wordt voorzien, moet dit materiaal als radioactief afval naar de COVRA worden afgevoerd.

Een andere oorzaak voor grote variatie in hoeveelheden ontmantelingsmateriaal zit in het ontwerp van de cyclotronfaciliteit gedurende verschillende bouwperiodes. Voor een groot cyclotron met grote (target)bunkers bij faciliteiten uit de jaren zestig zijn de hoeveelheden radioactieve reststoffen groter dan voor compactere faciliteiten die na 1990 zijn gebouwd. Voor oude faciliteiten wordt de hoeveelheid radioactieve reststoffen geschat op 100 ton aan neutron-geactiveerde grote metalen onderdelen van het cyclotron, 1.000 tot 1.400 ton beton en ongeveer 35 ton wapeningstaal. Als het beton van de cyclotronruimte boven de vrijgavegrens zit, komen de overdrachtskosten voor vervalopslag bij COVRA op 11 miljoen euro per categorie C (oud) cyclotron.

Voor de modernere, compactere cyclotronfaciliteiten, zijn de massa's radioactieve reststoffen geschat op 50 ton aan neutron geactiveerde grote metalen onderdelen van het cyclotron, 250 tot 500 ton beton en ongeveer 15 ton wapeningstaal. Hiermee komen de overdrachtskosten voor vervalopslag bij COVRA op maximaal 4,8 miljoen euro voor deze materialen per categorie C (nieuw) cyclotron.

De geschatte hoeveelheid neutron-geactiveerd ontmantelingsmateriaal voor alle Nederlandse cyclotrons dat als radioactieve rest- of afvalstof moet worden afgevoerd, bedraagt 520-580 ton cyclotronmetaal, 4.160-6.060 ton bunkerbeton, circa 150 ton wapeningstaal en 0-150 ton zelfafschermingsmateriaal. De totale kosten voor vervalopslag bij een dergelijke hoeveelheid zullen ongeveer 35 tot 50 miljoen euro bedragen.

Wanneer we uitgaan van een grens voor specifieke vrijgave van honderd keer de vrijgavegrens blijkt al het in dit rapport beschouwde ontmantelingsmateriaal, vijf jaar na het stopzetten van het cyclotron, hieronder te vallen. Het is dus waarschijnlijk mogelijk om de kostenpost

voor vervalopslag van radioactief bulkafval bij ontmanteling van cyclotrons vrijwel volledig met specifieke vrijgave weg te nemen.

De relatie tussen gebruikte (protonen)stroom en activatie verdient hierbij nog wel aandacht. De aanwezige literatuur rapporteert over faciliteiten waarvan de gebruikte stroom niet (meer) representatief is voor de Nederlandse situatie. Door het gebruik van de huidige hogere protonenstromen met tientallen jaren geleden te vergelijken, is te verwachten dat activiteitsconcentraties in metaal en beton bij toekomstige ontmantelingen hoger zijn dan dit rapport benoemt. Hierdoor komen de restmaterialen mogelijk niet meer in aanmerking voor specifieke vrijgave en moeten ze alsnog als radioactief afval aan COVRA worden overgedragen. Onderzoek bij ontmanteling van moderne cyclotrons is nodig om de betrouwbaarheid van bovenstaande conclusies te kunnen bevestigen.

## 5.1 Aanbevelingen

Bij de ontmanteling van cyclotrons moeten ondernemers gegevens verzamelen over activiteitsconcentraties in materialen. Om een completer en bovendien actueler beeld te krijgen van de te verwachten activiteitsconcentraties bij ontmanteling, raadt het RIVM de ondernemers aan die gegevens te delen met de wetenschappelijke en professionele gemeenschappen. Hierbij zouden een systematische aanpak waarbij rapportage van de technische gegevens van de installatie zelf en informatie over een representatieve meetcampagne minimaal vereist zijn. Resultaten moeten getoond worden op verschillende dieptes voor activiteitsconcentratie in zowel het beton van de bunker, de metalen cyclotrononderdelen, en het eventueel aanwezige wapeningstaal.

Bij nieuw te bouwen cyclotrons is het aan te bevelen om rekening te houden met uiteindelijke restmaterialen. Bij de constructie kan gebruik worden gemaakt van zogenoemd 'laag-activeerbaar' beton. Dit beton is ontwikkeld om een lager aandeel van stabiele isotopen van kobalt en europium te bevatten [12, 13, 38]. Ook kan er gekozen worden voor laag-activeerbaar staal in bijvoorbeeld het magneetjuk [23]. Het RIVM beveelt wat betreft de activatie van beton en wapeningstaal aan om de wapening in de binnenste 50 centimeter van de muren achterwege te laten en de muren zo te bouwen dat de binnenste 50 centimeter van het beton makkelijk te verwijderen is.

Recycling van materialen als beton en metaal is een wenselijk streven met het oog op de circulaire ambities van Nederland. Gezien de mogelijke besparingen voor ondernemingen en van opslagruimte beveelt het RIVM de bevoegde autoriteiten aan om in een mechanisme te voorzien dat hiertoe ruimte geeft. Een voor de hand liggend voorbeeld is daarbij de specifieke vrijgave voor recycling.

Het vrijgekomen materiaal bij ontmantelingsprojecten van productiecyclotrons moet individueel beoordeeld worden op de geschiktheid voor specifieke vrijgave. De ANVS moet in ieder individueel geval de stralingsgezondheidsrisico's toetsen en beoordelen.

Het RIVM beveelt aan om hierbij een holistische aanpak te gebruiken. De afweging aangaande recycling maken op basis van alleen een toename in gezondheidsrisico voor het publiek door een verhoogd stralingsniveau is niet voldoende. Bij afwegingen aangaande recycling zal men ook rekening moeten houden met meer dan louter financiële argumenten; het bewerkstelligen van een circulaire economie zal een positieve uitwerking hebben op andere gebieden als land- en grondstoffengebruik, minder bijdragen aan klimaatverandering, en verminderde negatieve effecten hebben op milieu en gezondheid door vervuilende en gevaarlijke mijn- en maalwerkzaamheden [41, 42].



## 6 Literatuur

1. RIVM. *Trend in het aantal nucleair geneeskundige onderzoeken*. Beschikbaar via <https://www.rivm.nl/medische-stralingstoepassingen/trends-en-stand-van-zaken/diagnostiek/nucleaire-geneeskunde/trend-in-aantal-nucleair-geneeskundige-onderzoeken>. (Geraadpleegd 23/01/2023).
2. L.H.A. Boudewijns en I.R. de Waard, *Recente ontwikkelingen in medische stralingstoepassingen*, RIVM, Rapportnummer 2019-0129, 2019.
3. P. Schmor, *Review of cyclotrons for the production of radioactive isotopes for medical and industrial applications*. Reviews Of Accelerator Science And Technology: Volume 4: Accelerator Applications in Industry and the Environment, 2011: p. 103-116.
4. C. Scholten, L. Petrosova, en G. van de Veen, *Medical isotope production using local cyclotrons: A comparative study between Denmark and the Netherlands*, Technopolis Group, 2022.
5. A. Toyoda, et al. *Evaluation of induced activity in various components of a PET-cyclotron*. Journal of Physics: Conference Series. pp. 2018.
6. SCK-CEN. *Vijf Belgische bedrijven richten CYCLADE op: expertisecentrum voor de ontmanteling van versnellers en cyclotrons*. Beschikbaar via <https://www.sckcen.be/nl/nieuws/vijf-belgische-bedrijven-richten-cyclade-op-expertisecentrum-voor-de-ontmanteling-van-versnellers-en-cyclotrons>. (Geraadpleegd 16/03/2023).
7. Rijksoverheid. *Nederland circulair in 2050 - Rijksbreed programma Circulaire Economie*. Beschikbaar via <https://open.overheid.nl/repository/ronl-a6ce8220-07e8-4b64-9f3d-e69bb4ed2f9c/1/pdf/bijlage-1-nederland-circulair-in-2050.pdf>. (Geraadpleegd 12/12/2022).
8. J.J. Livingood, D. Van Nostrand, en T.F. Zipf, *Principles of cyclic particle accelerators*. Physics Today, 1962. **15**(5): p. 57.
9. J.C. Clark en D.J. Silvester, *A cyclotron method for the production of fluorine-18*. The International journal of applied radiation and isotopes, 1966. **17**(3): p. 151-154.
10. G.B. Saha, W.J. MacIntyre, en R.T. Go. *Cyclotrons and positron emission tomography radiopharmaceuticals for clinical imaging*. Seminars in nuclear medicine. pp. 150-161. 1992.
11. IAEA, *Cyclotron produced radionuclides: principles and practice*, 2008.
12. T. Fujibuchi, et al., *Distribution of residual long-lived radioactivity in the inner concrete walls of a compact medical cyclotron vault room*. Annals of nuclear medicine, 2015. **29**(1): p. 84-90.
13. T. Fujibuchi, et al., *Measurement of thermal neutron fluence distribution with use of <sup>23</sup>Na radioactivation around a medical compact cyclotron*. Radiological physics and technology, 2009. **2**(2): p. 159-165.
14. IAEA, *Decommissioning of particle accelerators*, International Atomic Energy Agency, No. NW-T-2.9, 2020.

15. V. Bonvin, et al., *Detailed study of the distribution of activation inside the magnet coils of a compact PET cyclotron*. Applied Radiation and Isotopes, 2021. **168**.
16. IAEA, *Decommissioning of small medical, industrial and research facilities*, International Atomic Energy Agency, Technical report series 404, 2003.
17. M. Van der Schaaf, P.D.B.M. Bekhuis, en L.H.A. Boudewijns, *Radioactieve rest- en afvalstromen in Nederland*, RIVM, Rapportnummer 2022-0073, 2022.
18. IBA, *CYCLONE 30 Brochure*. 2010.
19. IBA, *CYCLONE KEY Brochure*. 2022.
20. IBA, *CYCLONE KIUBE Brochure*. 2022.
21. Siemens, *Siemens ECLIPSE Brochure*. 2011.
22. *Interview met stralingsbeschermingsdeskundige TU Eindhoven* 2021.
23. Vrije Universiteit Brussel, *Evaluation of the radiological and economic consequences of decommissioning particle accelerators*, European Commission, EUR 19151, 1999.
24. COVRA, *Het Oranje Boekje*. 2017.
25. *Persoonlijke communicatie met werknemer van COVRA*. 2023.
26. IAEA, *Cyclotron produced radionuclides: Physical characteristics and production methods*, International Atomic Energy Agency, Technical report series 468, 2009.
27. ANVS, *Transportvergunning Curium Netherlands B.V.* ANVS-PP-2022/0093593. Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming, 2022.  
[https://puc.overheid.nl/anvs/doc/PUC\\_726108\\_32/1/](https://puc.overheid.nl/anvs/doc/PUC_726108_32/1/).
28. R. Gallerani, et al., *Neutron production in the operation of a 16.5 MeV PETrace cyclotron*. Progress in Nuclear Energy, 2008. **50**(8): p. 939-943.
29. H. Tochon-Danguy, et al. *Occupational Radiation Exposure at The Self-Shielded IBA Cyclone 10/5 Cyclotron of The A&RMC, Melbourne Australia*. Proceedings of the 15th International Conference on Cyclotrons and their Applications. Caen, France, pp. 1998.
30. R. Calandrino, et al., *Decommissioning procedures for an 11 MeV self-shielded medical cyclotron after 16 years of working time*. Health physics, 2006. **90**(6): p. 588-596.
31. Q. Wang, et al., *Evaluation of the radioactivity in concrete from accelerator facilities*. Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, 2007. **273**(1): p. 55-58.
32. R. Calandrino, et al., *Decommissioning procedure and induced activation levels, calculations and measurements in an 18 MeV medical cyclotron*. Journal of Radiological Protection, 2021. **41**(4).
33. J. Sunderland, et al. *Considerations, measurements and logistics associated with low-energy cyclotron decommissioning*. AIP Conference Proceedings. pp. 16-20. 2012.
34. K. Kimura, et al., *Residual long-lived radioactivity distribution in the inner concrete wall of a cyclotron vault*. Health physics, 1994. **67**(6): p. 621-631.
35. Argonne National Laboratory, *Building 211 Cyclotron characterization survey report*, University of Chicago, No. ANL/ESH-HP-98/01, 1998.

36. Y. Ogata, et al., *Distribution of thermal neutron flux around a PET cyclotron*. Health Physics, 2011. **100**(5).
37. IAEA, *Cyclotron produced radionuclides: Principles and practice*, International Atomic Energy Agency, Technical report series 465, 2008.
38. M. Kinno, K. Kimura, en T. Nakamura, *Raw materials for low-activation concrete neutron shields*. Journal of Nuclear Science and Technology, 2002. **39**(12): p. 1275-1280.
39. *Interview met stralingsbeschermingsdeskundige TU Eindhoven* 2022.
40. IAEA, *Decommissioning at a multifacility site: an integrated approach*, International Atomic Energy Agency, No. NW-T-2.13, 2022.
41. NEA, *Recycling and Reuse of Scrap Metals*, Organisation for Economic Co-operation and Development, 1996.
42. NEA, *Recycling and reuse of materials from decommissioning*, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2016.

P.D.B.M. Bekhuis | A.C. Hengeveld

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)

juli 2023

De zorg voor morgen  
begint vandaag