



BEËINDIGINGSPLAN

Protonentherapie faciliteit Maastro Protonen BV

ABSTRACT

Dit beëindigingplan heeft betrekking op de medische protonenfaciliteit van Maastro Protonentherapie BV, welke ingezet wordt voor therapeutische bestraling van patiënten.

Auteurs

■■■■■■■■■■ (UM)

■■■■■■■■■■ (Maastro)



Inhoudsopgave

1 Inleiding	1
2 Beschrijving van het terrein en de faciliteit	2
2.1 Beschrijving van de locatie en de faciliteit	2
2.2 Bronnen	3
2.3 Nieuwe systemen, of systemen die moeten worden gemodificeerd	3
2.4 Historie van de locatie en de faciliteit en bedrijfservaring	3
2.5 Beschrijving van de handelingen / werkzaamheden op de locatie en in de faciliteiten	3
2.6 Inventaris van radioactieve en toxische stoffen	4
2.7 Radiologische karakterisering van de locatie en de faciliteit	6
2.8 Opslagfaciliteiten, en methoden voor verwijderen, transporteren en opslaan van grote componenten	6
3 Toepasselijke wet- en regelgeving	7
4 Strategie bij de beëindiging van de vergunde situatie	10
4.1 Doelstellingen	10
4.2 Mogelijke strategieën en rechtvaardiging/optimalisatie	10
5 Integraal managementsysteem voor beëindiging	13
5.1 Veiligheidsbeleid, veiligheidscultuur en kwaliteitsborging	13
5.2 Organisatie en verdeling van verantwoordelijkheden	14
5.3 Personeel en kwalificaties, inclusief trainingen	14
5.4 Betrokkenheid van geïnteresseerde partijen en communicatie met het Bevoegd Gezag	14
5.5 Procedures voor beëindigingsactiviteiten en radioactief afvalbeheer	14
5.6 Financiële en human resources	14
5.7 Overige relevante middelen	15
5.8 Verslaglegging	15
5.9 Verslaglegging, Documentatie en archivering	16
6 Uitvoering van beëindigingsactiviteit en -taken	17
6.1 Beschrijving van de geplande fasen en taken	17
6.2 Afsluitende vrijgave meting van de locatie en/of faciliteit of een deel daarvan	17
6.3 Afvaltypes, volumes en afvoerroutes	17
7 Veiligheidsevaluatie	18
8 Impact op het milieu	19
9 Definitieve vrijgave locatie en faciliteiten na beëindiging van de handelingen	20
10 Details van de kostenschattingen en de financiële voorzieningen	21
Bibliografie	22

1 Inleiding

Dit beëindigingplan, dat feitelijk een ontmantelingsplan is, heeft betrekking op de medische protonenfaciliteit van Maastricht Protonentherapie BV, welke ingezet wordt voor therapeutische bestraling van patiënten. Met medische protonenfaciliteit wordt bedoeld: de fysieke locatie, ook wel bunker genoemd, waarin het toestel zich bevindt én het toestel zelf dan in deze bunker geïnstalleerd is. De bron van dit toestel is een circulaire deeltjesversneller (cyclotron).

De protonenfaciliteit is gesitueerd [REDACTED] op de hoofdlocatie van Maastricht Protonentherapie B.V., Doctor Tanslaan 12, 6229 ET in Maastricht. De verantwoordelijke decentraal stralingsbeschermingsdeskundige van Maastricht is [REDACTED].

Het cyclotron, dat protonen kan creëren met een energie van maximaal 250 MeV, is vergund onder vergunning met kenmerk 2017/0511-12:

Het verrichten van handelingen in het kader van protonentherapie binnen de locatie van Zuidoost Nederland Protonen Therapie Centrum, ZON-PTC B.V., gelegen aan de Dr. Tanslaan 12 te Maastricht, met ioniserende straling uitzendende toestellen binnen de volgende omvang:

Ten behoeve van medische therapie, medisch wetenschappelijk onderzoek, onderwijs- en opleidingsdoeleinden, onderzoek, proefdieronderzoek en handelingen die onlosmakelijk verbonden zijn aan het in bedrijf houden van het cyclotron (zoals onderhoud en reparatie):

7. 1 cyclotron, merk Mevion, type S250, met een maximale protonenenergie van 250 MeV.

Hierbij moet worden opgemerkt dat in vergunning met kenmerk ANVS-PP-2020/0055622-04, de tenaamstelling wordt gewijzigd in: in Universiteit Maastricht, Academisch Ziekenhuis Maastricht, BioPartner Center Maastricht B.V., Stichting Maastricht Radiation Oncology Maastricht-Clinic en Maastricht Protonentherapie B.V.

Bij de aanvraag van de oorspronkelijk vergunning is reeds een beëindigingsplan ingediend. Dit plan dateert echter van 2017. Inmiddels worden er andere eisen gesteld aan beëindigingsplannen, waardoor is besloten het plan opnieuw op te stellen. Inhoudelijk is het plan gelijk aan het oorspronkelijk toegevoegde plan.

Voor de structuur van dit plan is gebruik gemaakt van het 'Concept handreiking voor het opstellen van een beëindigingsplan voor niet-nucleaire toepassingen' van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming. Tevens is dit plan getoetst aan het vernieuwde plan dat tot 22 augustus 2025 ter consultatie ligt.

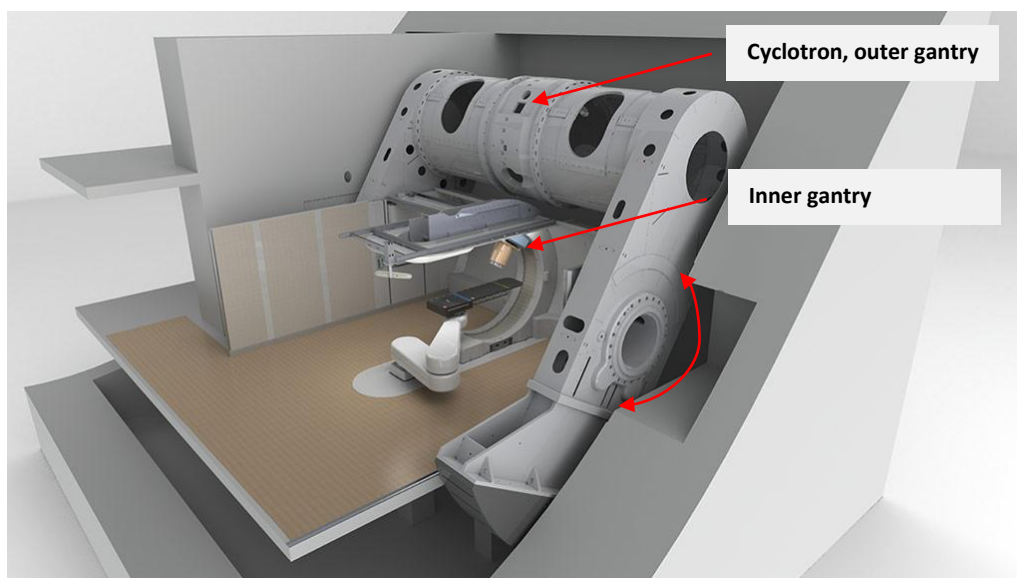
In hoofdstuk 3 wordt de toepasselijk wet- en regelgeving beschreven als ook de vergunningsvoorwaarde waaronder de faciliteit is vergund.

2 Beschrijving van het terrein en de faciliteit

In dit hoofdstuk worden de kenmerken van de faciliteit beschreven zoals locatie, bronnen, werkzaamheden en een inventarisatie van radioactieve stoffen.

2.1 Beschrijving van de locatie en de faciliteit

De protonentherapie faciliteit wordt gebruikt voor radiotherapeutische behandeling van patiënten. De fabrikant van het toestel is het Amerikaanse Mevion, het type is S250i. De faciliteit bestaat uit drie verdiepingen: het souterrain, de begane grond en de eerste verdieping. In Bijlage 10 is de plattegrond van het complex Randwyck weergegeven en in Bijlage 1 zijn de volledige plattegronden van de protonentherapie faciliteit te vinden. De behandelruimte bevindt zich in de bunker op de begane grond. Het souterrain en de eerste verdieping dienen als technische ruimte. In deze technische ruimtes is ook plaats voorzien voor de outer gantry met daarin het cyclotron dat, onzichtbaar voor de patiënt, met de inner gantry in de behandelruimte 180 graden kan meebewegen. Figuur 1 laat een doorsnede van een dergelijke bestralingsfaciliteit zien.



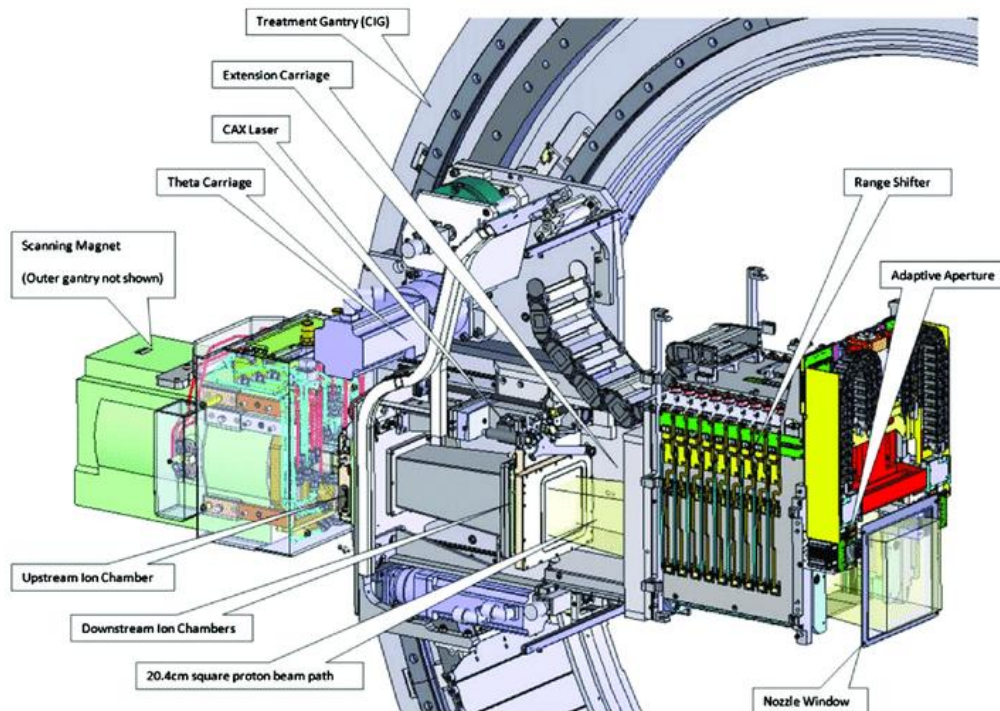
Figuur 1. Een schematische weergave van de bestralingsbunker en het bewegende cyclotron.

Figuur 1 in Bijlage 2 toont een dwarsdoorsnede van de protonenfaciliteit bij Maastrou. In geel is de gecontroleerde zone gemarkeerd. In Figuur 2 in Bijlage 2 is de plattegrond van de begane grond van protonenfaciliteit afgebeeld, het isocentrum van de stralingsbundel is gemarkeerd met een rode stip.

De behandelruimte wordt voor iedere behandeling vrijgegeven door gebruik te maken van het “room-doors”-systeem. De medewerker die de ruimte als laatste verlaat voor het bestralen activeert een drukknop in de behandelruimte. Wanneer deze medewerker door het labrynt is gelopen en aankomt bij de bedieningsruimte drukt deze op een tweede drukknop. Pas op dat moment is het toestel vrijgegeven om te bestralen, als aan deze voorwaarde niet voldaan is zal het toestel niet kunnen stralen omdat het zo ontworpen is. Naast deze room doors is er actieve luchtbehandeling in de ruimte aanwezig om de blootstelling aan geactiveerde lucht te minimaliseren. De aanwezige lucht in de ruimte wordt 5 keer per uur verversd door de luchtbehandelingsinstallatie, de in de bunker aanwezige lucht wordt gescheiden van de rest van direct afgezogen door een ventilatiesysteem dat gescheiden is van de rest van het gebouw. De afgezogen lucht wordt direct naar het dak van het gebouw geleid waar het uitgeblazen wordt.

2.2 Bronnen

Het cyclotron is de bron van de faciliteit, dit is een protonenversneller die protonen kan creëren met een energie van maximaal 250 MeV. Door de hoge energieën zijn delen van de machine en het gebouw geactiveerd. Een voorbeeld hiervan zijn de verschillende onderdelen van de inner gantry welke worden aangestraald en daardoor geactiveerd zijn. In Figuur 2 wordt weergegeven welke componenten allemaal in de inner gantry zitten.



Figuur 2. Technische tekening van de inner gantry van de Mevion S250i.

2.3 Nieuwe systemen, of systemen die moeten worden gemodificeerd

De bunker zal bij de beëindiging gebruikt worden als (tijdelijke) opslaglocatie van geactiveerde materialen. Hiervoor moet de beveiliging en toegangsrechten aangepast worden zodat enkel bevoegde personen toegang hebben tot de bunker.

2.4 Historie van de locatie en de faciliteit en bedrijfservaring

De bouw van de protontherapie faciliteit is gestart in januari 2017, de eerst patiënt is behandeld in februari 2019. Gezien de aard van het toestel, dat protonen opwekt, is er geen sprake van incidenten die kunnen leiden tot besmettingen op moeilijk bereikbare plekken. Alle uitgevoerde onderhouds- en reparatiewerkzaamheden worden gerapporteerd in het ticket systeem van leverancier Mevion.

2.5 Beschrijving van de handelingen / werkzaamheden op de locatie en in de faciliteiten

De handelingen die plaatsvinden zijn enkel en alleen het bestralen van patiënten. Om de kwaliteit van de behandeling en de prestaties van het toestel te waarborgen worden er periodiek (dagelijks, maandelijks én jaarlijks) verschillende metingen uitgevoerd. Tijdens deze metingen wordt de meetapparatuur dus ook bestraald.

2.6 Inventaris van radioactieve en toxische stoffen

De faciliteit betreft een toestel met een cyclotron dat protonen met een maximale energie van 250 MeV kan opwekken. Buiten de hierdoor geactiveerde onderdelen zijn hier zijn geen andere bronnen en radioactieve afvalstoffen aanwezig. Er is sprake van activering van het toestel, het gebouw, de lucht in de ruimte en potentieel alle voorwerpen die zich in de ruimte bevinden.

2.6.1 Geïnduceerde activiteit in het protonenapparaat

Uit een analyse (Bijlage 5) van de leverancier en een Mevion protonencentrum blijkt dat de totale activatie na 30 jaar gebruik van de cyclotron maximaal 2.53 GBq is, zie Tabel 1. De activatie van de cyclotron en andere onderdelen is maximaal 1.09 GBq. De overige activiteit kan worden verwacht in het beton en (in mindere mate) het wapeningsstaal. In

Tabel 2 is een overzicht weergegeven van de geactiveerde producten met een halfwaardetijd van meer dan 120 dagen (1).

Tabel 1. De geïnduceerde activiteit van zowel het apparaat als het beton (1).

Samenvatting	
Proton/neutron geïnduceerde activiteit	GBq
Cyclotron (lokaal opgeslagen)	0.55
Beamline (lokaal opgeslagen)	0.52
Scattering foils (lokaal opgeslagen)	0.02
Beton	1.44
Totaal	2.53

In Bijlage 5 wordt beschreven dat het cyclotron 200kg geactiveerd koper en 1400kg geactiveerd ijzer bevat. Hieruit kunnen we een benadering van de activiteitconcentratie bepalen: 1581.25 Bq/g.

Tabel 2. Activatieproducten in het cyclotron met een halfwaardetijd langer dan 120 dagen na 30 jaar gebruik

Summary	
Probable proton capture reactions in cyclotron	T _{1/2} (yr)
Fe56(p, p+He3)Mn54	0.86
Fe56(p, d)Fe55	2.74
Fe58(p, 2n)Co57	0.74
Fe-57(p, α)Mn54	0.86
Mn55(p, n)Fe55	2.74
Fe57(p, n)Co57	0.74
Mn55(p, d)Mn54	0.86
Fe57(p, t)Fe55	2.74
Fe56(p, γ)Co57	0.74
Cu65(p, n)Zn65	0.67
Total induced activity after 30 years = 14.8 mCi	

2.6.2 Geïnduceerde activiteit in het beton

Bijlage 6 beschrijft de geïnduceerde activiteit in het beton:

Beton bevat elementen van Europium en Cobalt in een zeer lage concentratie, maar door de grote cross sectie voor thermale neutronen resulteert dit in de activatie van radionucliden met een lange halfwaardetijd, namelijk 5.26 jaar voor ^{60}Co en 13.5 jaar voor ^{152}Eu . De vijf geactiveerde producten met een halfwaardetijd langer dan 120 dagen en met de hoogste geïnduceerde activiteit zijn weergegeven in Tabel 3 (1).

Tabel 3. Vijf geactiveerde producten met een halfwaardetijd langer dan 120 dagen (1).

Samenvatting		
Proton/neutron geïnduceerde activiteit in beton	$T_{1/2}$ (yr)	GBq
Co-60	5.7	0.08
Eu-152	13.5	0.35
Na-22	2.6	0.49
Fe-55	2.74	0.01
Zn-65	0.67	0.51
Total		1.44

In Lausanne was een faciliteit gepland die dezelfde Mevion apparatuur gebruikt als Maastricht. Het cyclotron en de gantry zijn identiek, daarbij heeft het toestel identieke binnen afmetingen. De afdeling stralingsfysica van Lausanne heeft Monte Carlo simulaties uitgevoerd (Bijlage 8) voor de berekening van de activering van de bouwmaterialen. Gezien de overeenkomsten in apparatuur, zijn deze berekeningen ook representatief voor de Maastrichtse situatie (2).

Uit berekeningen in Bijlage 7 kunnen we afleiden dat de te verwachten gesommeerde activiteitsconcentratie van het beton lager is dan 100 Bq/kg (Isotopen Co-60 en Eu-152 zijn niet meegenomen in deze berekening). Voor Co-60 blijkt dat twee jaar na bestraling de activiteitsconcentratie ongeveer 100 Bq/kg bedraagt (vrijstellingsgrens Bbs). De concentratie aan Eu-152 is beduidend lager. In Bijlage 7 wordt de activiteitsconcentratie in het betonijzer geschat: De figuur toont een gesommeerde activiteitsconcentratie van ca. 700 Bq/kg, twee jaar na bestraling gedurende 2 jaar waarin 1000 Gy/week is afgegeven. Deze waarde komt boven de vrijgavegrens van Mn-54 (100 Bq/kg, Bbs). Echter, hierbij moet worden vermeld dat de aannames op basis waarvan deze en alle andere grafieken tot stand zijn gekomen, zeer conservatief zijn. Zo is er een forse overschatting van de workload gemaakt en is verondersteld dat de bundel in één vaste positie is ingesteld. In realiteit draait het cyclotron en kan hiervoor ten minste een correctiefactor van 3 voor worden verondersteld. Dit in ogenschouw nemende, wordt verwacht dat de reële waarden beneden de vrijgavegrenzen zullen vallen.

De conclusie luidt: De activatie van het beton is uiterst gering. De activatie van de wapening (betonijzer) geeft meer substantiële activiteitsconcentraties, die echter zijn berekend op basis van uiterst conservatieve aannames (dosis, 100% de bundel gericht op dezelfde locatie, grotere volumes wapening dan de realiteit op een ondiepere locatie dan de realiteit). Het vertrouwen is dan ook dat de activiteitsconcentraties in realiteit beneden de in het Bbs gestelde vrijgavegrenzen zullen vallen (2).

In Bijlage 7 en 8 worden deze berekeningen en conclusies gedetailleerd beschreven.

2.7 Radiologische karakterisering van de locatie en de faciliteit

In de vorige paragraaf is beschreven waar zich activering bevindt. Wanneer werkzaamheden gedaan worden door het onderhoudspersoneel van Mevion mogen zij pas beginnen wanneer het omgevingsdosistempo beneden 2 mRem/h (0.02 mSv/h) is, dit is vastgelegd in de procedure 'Radiation Survey Procedure Following Beam Operation' van Mevion, te vinden in Bijlage 3. Dit dosistempo is het hoogst mogelijke waaraan personeel theoretisch blootgesteld kan worden bij het ontmantelen van het toestel, boven deze grens zullen werkzaamheden eenvoudigweg niet gestart worden.

Tot slot kan de geactiveerde lucht gezien worden als een bron van potentiële besmetting, hier wordt uitgebreid op ingegaan op pagina 5 van Bijlage 4. De effectieve dosis door submersie in een jaar als gevolg van verblijf in de protonenbunker na bestraling wordt geschat op 0.042 mSv/jaar. Bij een ontmanteling wordt er niet meer gestraald en zal de geactiveerde lucht binnen korte tijd zijn afgevoerd door het ventilatiesysteem, dus zal deze blootstelling verwaarloosbaar zijn.

2.8 Opslagfaciliteiten, en methoden voor verwijderen, transporteren en opslaan van grote componenten

Voor een beschrijving van de middelen en faciliteiten die nodig zijn voor de beëindiging wordt verwezen naar paragraaf 5.7 Overige relevante middelen.

3 Toepasselijke wet- en regelgeving

Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming

Art 3.6 lid 3e

een beveiligingsplan als bedoeld in [artikel 4.7](#), een bedrijfsnoodplan als bedoeld in [artikel 6.7](#) of een beëindigingsplan als bedoeld in [artikel 10.8](#) in gevallen, behorend tot een bij regeling van Onze Minister aangewezen categorie. De aanwijzing staat in een passende verhouding tot de aard en zwaarte van de betrokken risico's, overeenkomstig de graduele benadering, bedoeld in [artikel 1.1](#).

Art 3.6 lid 4

Bij verordening van de Autoriteit kunnen nadere regels worden gesteld over de wijze van aanvragen, de te verstrekken gegevens en de wijze van verstrekking. Onverminderd [artikel 68 van de wet](#) worden als gegevens als bedoeld in [artikel 19.3, eerste lid, laatste volzin, van de Wet milieubeheer](#) aangewezen: een beveiligingsplan als bedoeld in [artikel 4.7](#), een bedrijfsnoodplan als bedoeld in [artikel 6.7](#), een beëindigingsplan als bedoeld in [artikel 10.8](#), een risico-inventarisatie en evaluatie als bedoeld in [artikel 5 van de Arbeidsomstandighedenwet](#) en overige gegevens waarvan de openbaarmaking in strijd is met het belang van de veiligheid of beveiliging. Indien toepassing wordt gegeven aan de bevoegdheid, bedoeld in artikel 19.3 van de Wet milieubeheer, wordt een aangepast rapport beschikbaar gesteld, dat ten minste algemene informatie over risico's van ongevallen, de mogelijke gevolgen voor de menselijke gezondheid en het milieu bij een ongeval en in voorkomende gevallen de bevindingen bevat.

Art 10.2

1. De ondernemer die een handeling verricht, zorgt ervoor dat, zoveel als redelijkerwijs mogelijk is:
 - a. het ontstaan van radioactieve afvalstoffen en het lozen van radioactieve stoffen wordt voorkomen of beperkt,
 - b. bronnen na gebruik als zodanig opnieuw worden gebruikt,
 - c. radioactieve stoffen en materialen waaruit een bron bestaat, na het gebruik ervan opnieuw worden gebruikt, of
 - d. voorwerpen, stoffen en materialen die met radioactieve stoffen zijn besmet of geactiveerd, na het gebruik ervan zodanig worden bewerkt dat ze opnieuw kunnen worden gebruikt.
2. Bij het vervaardigen van bronnen wordt gebruik gemaakt van stoffen en materialen die na het gebruik van de bron geen of zo min mogelijk nadelige gevolgen voor het milieu veroorzaken.
3. De ondernemer zorgt er voor dat een handeling zoveel als mogelijk wordt verricht op een wijze waarbij blootstelling van werknemers en de bevolking wordt vermeden.

Art 10.8

1. In gevallen behorend tot een bij regeling van Onze Minister aangewezen categorie zorgt de ondernemer voor een beëindigingsplan waarin wordt beschreven welke voorzieningen met betrekking tot de beëindiging van het gebruik en het zich ontdoen van de bron zijn getroffen, waaronder in elk geval financiële voorzieningen.
2. De aanwijzing, bedoeld in het eerste lid, vindt uitsluitend plaats voor zover niet bij of krachtens de [Mijnbouwwet](#) of andere wet een vergelijkbare voorziening wordt of kan worden vereist. De aanwijzing staat in een passende verhouding tot de aard en zwaarte van de betrokken risico's, overeenkomstig de graduele benadering, bedoeld in [artikel 1.1](#). Bij verordening van de

Autoriteit kunnen afhankelijk van de aard en zwaarte van de betrokken risico's, eisen aan de vorm, inhoud en kwaliteit van het beëindigingsplan en de wijze van uitvoering ervan worden gesteld. Deze eisen kunnen een plicht tot rapportage aan de Autoriteit omvatten.

3. Nadat handelingen ten aanzien van het bereiden, bewerken of toepassen van een bron definitief zijn beëindigd, zorgt de ondernemer er voor dat, waar van toepassing overeenkomstig het beëindigingsplan:
 - a. hiervan overeenkomstig [artikel 3.6, achtste lid](#), [3.9, tweede lid](#), of [3.11, vijfde lid](#), een kennisgeving van beëindiging aan de Autoriteit wordt gedaan, en
 - b. hij zich, binnen twee jaar na die beëindiging, van de bron ontdoet door afgifte aan:
 - i. degene die de bron heeft vervaardigd of geleverd,
 - ii. een persoon die gerechtigd is met het oog op gebruik, product- of materiaalhergebruik van bronnen, of inzameling van bronnen, de bron te ontvangen, of
 - iii. een krachtens [artikel 10.6, vijfde of zevende lid](#), aangewezen instelling, of een krachtens [artikel 10.6, zesde lid](#), erkende ophaaldienst die gerechtigd is de bron te ontvangen, of
 - c. indien de bron een toestel of versneller betreft, binnen twee jaar na die beëindiging het desbetreffende toestel of de versneller wordt verschroot, met uitzondering van de onderdelen van de versneller waarin zich radioactieve stoffen bevinden die door activering zijn ontstaan vanwege het gebruik van de versneller.

Regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming

Art. 3.3

In gevallen, waarin krachtens [artikel 4.2](#), [6.2](#) of [10.1](#) een beveiligingsplan, bedrijfsnoodplan of beëindigingsplan is vereist, worden bij een aanvraag om een vergunning gegevens met betrekking tot die plannen verstrekt als bedoeld in [artikel 3.6, derde lid, aanhef en onderdeel e, van het besluit](#).

Art 10.1

In gevallen behorend tot de volgende categorieën handelingen zorgt de ondernemer voor een beëindigingsplan als bedoeld in [artikel 10.8, eerste lid, van het besluit](#):

- a. handelingen met een versneller die deeltjes met een energie van meer dan 20 mega-elektronvolt produceert of handelingen met een cyclotron die deeltjes met een energie van meer dan 8 mega-elektronvolt produceert;
- b. handelingen ten behoeve van olie- of gasexploratie of olie- of gasproductie als bedoeld in [bijlage 3.1](#), onderdeel A, onderdeel 4, waarbij van nature voorkomend radioactief materiaal voorhanden is;
- c. handelingen ten behoeve van kolengestookte energieproductie als bedoeld in [bijlage 3.1](#), onderdeel A, onderdeel 14, of
- d. handelingen ten behoeve van thermische fosforproductie als bedoeld in [bijlage 3.1](#), onderdeel A, onderdeel 7.

Het cyclotron, dat protonen kan creëren met een energie van maximaal 250 MeV, is vergund onder vergunning met kenmerk 2017/0511-12:

Het verrichten van handelingen in het kader van protonentherapie binnen de locatie van Zuidoost Nederland Protonen Therapie Centrum, ZON-PTC B.V., gelegen aan de Dr. Tanslaan 12 te Maastricht, met ioniserende straling uitzendende toestellen binnen de volgende omvang:

Ten behoeve van medische therapie, medisch wetenschappelijk onderzoek, onderwijs- en opleidingsdoeleinden, onderzoek, proefdieronderzoek en handelingen die onlosmakelijk verbonden zijn aan het in bedrijf houden van het cyclotron (zoals onderhoud en reparatie):



7. 1 cyclotron, merk Mevion, type S250, met een maximale protonenenergie van 250 MeV.

Hierbij moet worden opgemerkt dat in vergunning met kenmerk ANVS-PP-2020/0055622-04, de tenaamstelling wordt gewijzigd in: in Universiteit Maastricht, Academisch Ziekenhuis Maastricht, BioPartner Center Maastricht B.V., Stichting Maastricht Radiation Oncology Maastrro-Clinic en *Maastrro Protonentherapie B.V.*

Doordat het toestel voldoet aan het criterium genoemd bij onderdeel a van artikel 10.1 is er derhalve een beëindigingsplan nodig. Bij de beëindiging en ontmanteling zal zo veel mogelijk invulling worden gegeven aan artikel 10.2 van het Bbs, welke de zorgplicht voor de ondernemer bevat om zo min mogelijk radioactief afval te generen. In dit plan wordt daarom gekozen het scenario waarbij zo min mogelijke radioactieve afvalstoffen ontstaat, als primair plan te hanteren.

4 Strategie bij de beëindiging van de vergunde situatie

4.1 Doelstellingen

De (economische) levensduur van de protonenapparatuur (Mevion S250i) is 15 jaar. Dit is in vergelijking met andere protonencentra kort, ook alle leveranciers garanderen dat hun apparatuur langer operationeel kan werken. De bunker wordt afgeschreven over een periode van 30 jaar. Door de constructie van de protonenbunker in het verlengde van de bestaande fotonenbunkers van MAASTRO, is de verwachting dat de protonenbunker langer zal blijven staan, omdat deze, na het ontmantelen van de protonenapparatuur, nog steeds functioneel kan blijven. Zo kan er een fotonen versneller in geplaatst worden of kan er een andere bestemming voor de bunker gevonden worden (bijvoorbeeld opslagruimte). De kans dat de bunker effectief ontmanteld zal worden binnen een termijn van 30 jaar is gering (1).

De voorkeursstrategie is het uit gebruik nemen van het bestralingstoestel en dit gedurende een periode (circa 10 jaar) laten afkoelen, daarna het toestel ontmantelen. De bunker wordt behouden en kan voor andere doeleinden ingezet worden. In de volgende paragraaf worden, naast deze strategie, ook alternatieve strategieën verkend.

4.2 Mogelijke strategieën en rechtvaardiging/optimalisatie

Er zijn meerdere strategieën denkbaar:

1. Het toestel permanent uit bedrijf nemen, laten “afkoelen” en daarna pas ontmantelen:

Deze strategie is de voorkeursstrategie. Het uit bedrijf nemen van het toestel, waarbij het technisch onklaar gemaakt wordt en niet meer kan stralen, en het laten staan in de bunker totdat de activiteit van de geactiveerde delen significant verminderd is alvorens men begint met de ontmanteling van het toestel. Voor de complexiteit van de ontmanteling zou dit een stuk eenvoudiger en wellicht ook goedkoper kunnen zijn. De bunker, die een veel langere levensduur heeft kan hergebruikt worden voor andere doeleinden zoals bijvoorbeeld het huisvesten van een CT-scanner of dienen als opslagruimte. Bij deze strategie zal zowel de collectieve dosis als de hoeveelheid radioactief afval beperkt blijven, waardoor zowel aan het optimalisatiebeginsel als aan artikel 10.2 van het Bbs wordt voldaan. Daarnaast wordt zo ook de meest optimale trede op de ladder van Lansink gebruikt, namelijk “hergebruik”. De collectieve dosis blijft beperkt, doordat er geen handelingen aan het cyclotron worden uitgevoerd totdat het stralingsniveau tot een aanvaardbaar niveau is gezakt. In deze situatie zal een IBC-vergunning worden aangevraagd. Zoals aangegeven wordt het cyclotron buiten gebruik gesteld en geïsoleerd. Gedurende die periode zal de ruimte dusdanig worden afgesloten dat alleen bevoegden personen toegang hebben (beheersen). Voor de tijdelijke afkoelperiode zal een schriftelijke interne toestemming worden uitgegeven, die gebaseerd is op een risicoanalyse en waarbij een persoon wordt aangewezen om het toezicht uit te oefenen (controleren). Er zal worden onderzocht wat de optimale opslagtermijn zal zijn. Hierbij wordt gekeken naar de mogelijkheden afzonderlijke onderdelen van het cyclotron vrij te geven na een redelijke “afkoeltermijn” en de extra kosten die langere opslag met zich meebrengen om alle onderdelen vrij te geven. Er wordt verwacht dat enkele onderdelen alsnog naar COVRA NV. Zullen worden afgevoerd. De kosten voor het afvoeren van het toestel na 10 jaar zullen lager uitvallen dan de kosten voor het vrijwel direct afvoeren van het toestel, welke worden geschat bij strategie 2.



Voor een zeer conservatieve schatting van de ideale opslagtermijn van het cyclotron, de beamline en scattering foils (samen 1.09 GBq) maken we een aanname dat de allerhoogste halfwaardetijd van de activeringsproducten uit Tabel 2, namelijk 2.74 jaar, geldt voor de volledige activiteit van 1.09 GBq. Berekeningen uit Tabel 4 wijzen uit dat de totale activiteit na 10 jaar 0.09 GBq zal bedragen. In werkelijkheid kunnen we stellen dat deze activiteit nog lager zal zijn omdat niet alle activatieproducten een halfwaardetijd van 2.74 jaar hebben.

Tabel 4. Een conservatieve schatting van de activiteit van het cyclotron en de beamline na 5 en 10 jaar.

Activatie	T 1/2 (jaar)	A(0) GBq	A (5) GBq	A (10) GBq
Cyclotron	2.74	0.55	0.16	0.04
Beamline	2.74	0.52	0.15	0.04
Scattering foils	2.74	0.02	0.01	0.00
Totaal	-	1.09	0.31	0.09

Wanneer de bunker behouden blijft gedurende 25 jaar na de beëindiging, is de totale geïnduceerde activiteit in het beton en betonijzer vervallen van 1.44 GBq naar 0.101 GBq. De activiteit 50 jaar na beëindiging is 0.027 GBq. Na zowel 25 als 50 jaar is het overgrote deel van de activiteit zich in het beton in de vorm van Eu-152, zoals te zien is in Tabel 5. Uit paragraaf 2.6.2 blijkt dat de activiteitsconcentraties na 2 jaar in realiteit beneden de in het Bbs gestelde vrijgavegrenzen zullen vallen, we kunnen er daarom vanuit gaan dat de activiteitsconcentraties na 25 jaar binnen de vrijgavegrenzen vallen.

Tabel 5. Proton/neutron geïnduceerde activiteit in beton 25 en 50 jaar na beëindiging.

Isotoop	T 1/2 (jaar)	A(0) GBq	A (25) GBq	A (50) GBq
Co-60	5.7	0.08	0.004	0.000
Eu-152	13.5	0.35	0.097	0.027
Na-22	2.6	0.49	0.001	0.000
Fe-55	2.74	0.01	0.000	0.000
Zn-65	0.67	0.51	0.000	0.000
Totaal	-	1.44	0.101	0.027

2. Ontmanteling van het bestralingstoestel, behoud van de bunker:

Voor de tweede mogelijke strategie wordt het toestel vrijwel direct na uit gebruik name ontmanteld en afgevoerd. Bij deze strategie worden er meer onderdelen afgevoerd naar COVRA NV. De bunker, die een veel langere levensduur heeft kan daarna hergebruikt worden voor andere doeleinden, zoals het huisvesten van een nieuw bestralingstoestel.

In Bijlage 5 wordt beschreven dat het cyclotron 200kg geactiveerd koper en 1400kg geactiveerd ijzer bevat dat gelokaliseerd en geïsoleerd verwijderd kan worden. In paragraaf 2.6 van RIVM-rapport 2023-0233 (3) wordt aan de hand van tarieven voor overdracht naar de COVRA een grove schatting gemaakt van de kosten voor opslag van metaal in Konrad-containers:

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

Voor 1600kg aan metaal komen we uit op een schatting van 32.000 euro voor het afvoeren van de geactiveerde delen van het cyclotron.

3. Ontmanteling van het bestralingstoestel én sloop van de bunker:

Dit laatste scenario, waarin het toestel vrijwel direct na uit gebruik name ontmanteld wordt en de bunker gesloopt, is niet waarschijnlijk aangezien het de wens van Maastro is om de bunker te behouden. Bij dit scenario moet ook rekening worden gehouden met het feit dat delen van de bunker (beton en wapeningsstaal) mogelijk boven de vrijgavewaarden zijn en dus niet zo maar kunnen worden hergebruikt of gerecycled.

In paragraaf 2.6 van RIVM-rapport 2023-0233 (3) wordt aan de hand van tarieven voor overdracht naar de COVRA een grove schatting gemaakt van de kosten voor opslag van beton in Konrad-containers:

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

Om de totale massa van mogelijk geactiveerd beton te bepalen wordt de formule uit paragraaf 2.2.2 van het rapport gebruikt:

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

D_1 , D_2 en D_3 staat voor de afmetingen van de binnenkant van de bunker in meters, voor de bunker van de faciliteit van Maastro zijn deze afmetingen als volgt: 7,62x10,7x8,63m. Dit betekent dat het volume mogelijk geactiveerd beton 268 m³ bedraagt.

Vermenigvuldigen met het soortelijk gewicht van beton ($2.35 \cdot 10^3$ kg/m³) levert 630 ton aan mogelijk besmet beton op, wat resulteert in een kostenpost van 15.75 miljoen euro voor de opslag van het beton.

Aangenomen wordt dat de massa van het wapeningsstaal in de eerste 50cm van het beton 2.5% bedraagt van de massa van het beton in de eerste 50cm (3). Dit betekent een massa van 16 ton, wat resulteert in een kostenpost van 0,4 miljoen euro.

De geschatte kosten voor dit scenario onderstrepen waarom Maastro niet de voorkeur geeft aan dit scenario. Naast de hoge kosten ontstaat er tonnen aan afval dat afgevoerd en opgeslagen moet worden, want niet wenselijk is om duurzaamheidsredenen.

5 Integraal managementsysteem voor beëindiging

5.1 Veiligheidsbeleid, veiligheidscultuur en kwaliteitsborging

De veiligheidscultuur van een organisatie is het product van individuele en groepswaarden, attitudes, percepties, competenties en gedragspatronen dat bepaalt hoe geëngageerd en op welke manier de organisatie vormgeeft aan veiligheid (definitie IAEA). Een sterke veiligheidscultuur kenmerkt zich door:

- Verantwoordelijkheid dragen over de volle breedte
- De organisatie heeft een lerend vermogen
- Veiligheid is een duidelijk onderkende waarde bij alle activiteiten die worden uitgevoerd
- Sterk leiderschap

Bij Maastrro Protonen BV is veiligheidscultuur een belangrijk onderwerp. De leiding en de medewerkers zijn zich ervan bewust dat zij werken met een hoog risico stralingsbron en geven invulling aan de negen principes die invulling geven aan de veiligheidscultuur. Ook bij de ontmanteling zullen deze 9 principes als leidraad worden gehanteerd.



Ook bij de ontmanteling van de protonenfaciliteit wordt ervoor gezorgd dat het personeel geschikt is voor de ontmantelingstaken, zo zal zo nodig extra expertise worden ingewonnen. De personen die zich binnen Maastrro bezig houden met stralingshygiëne volgen bij- en nascholing op dit gebied en stellen zich op de hoogte van de laatste stand der techniek. Er heerst een open aanspreekcultuur ongeacht de hiërarchie. Deze werkwijze is al ingebed in de gehele organisatie. Wanneer er tijdens de ontmanteling dilemma's optreden wordt het risiconiveau meegewogen in de besluitvorming en zal veiligheid altijd voorop worden gesteld. Bij de ontmanteling wordt helder gecommuniceerd en afspraken zullen schriftelijk worden vastgelegd. Ook de verdeling van taken zal te zijne tijd schriftelijk worden vastgelegd waardoor het voor iedereen duidelijk is wat zijn rol is. In de voorbereiding worden risico ingeschat en benodigde maatregelen getroffen. Mocht er onverhoopt iets fout gaan dan wordt er gezorgd voor een laagdrempelige meldcultuur en worden werkzaamheden pas weer hervat nadat alle betrokkenen hier achter kunnen staan.

5.2 Organisatie en verdeling van verantwoordelijkheden

De verwachting is dat het managementsysteem van Maastricht voldoende toereikend is voor het uitvoeren van de beëindiging. Intern zijn er meerdere medewerkers geschoold tot coördinerend deskundige, bovendien is er nauwe samenwerking met de Stralingsbeschermingseenheid Randwyck. Wat betreft de bouwkundige uitvoering en planning van de beëindiging heeft de afdeling facility management van Maastricht veel ervaring met het bouwen en slopen van bunkers en het inschakelen van aannemers en andere partijen, hier is een bestaand netwerk opgebouwd met verschillende bedrijven. Het slopen van een geactiveerde bunker vereist echter specialistische kennis en ervaring welke gezocht moet worden bij een externe partij. Een voldoende groot en divers projectteam zal samengesteld worden om de beëindiging van begin tot eind in goede banen te leiden. Mocht het ter zijner tijd nodig of wenselijk blijken kan Maastricht een externe partij inschakelen voor het adviseren en begeleiden van de ontmanteling.

5.3 Personeel en kwalificaties, inclusief trainingen

In het stralingsbeschermingsbeleid van de locatie Randwyck staan de opleidingseisen voor het personeel en stralingsdeskundigen beschreven. Zowel de decentraal stralingsbeschermingsdeskundige als de toezichthoudend medewerker stralingsbescherming zijn geschoold op het niveau van coördinerend deskundige. Daarnaast heeft het Mevion personeel bij Maastricht training ontvangen van de leverancier over de werking, gebruik en onderhoudsvoorschriften van het cyclotron. Als een projectteam is opgesteld zal Maastricht in overleg met de stralingsbeschermingseenheid beoordelen of de kwalificaties van het projectteam (nog) voldoende zijn, en zo nodig zorgen voor extra training of opleiding intern of extern. Indien noodzakelijk zullen extra stralingsbeschermingsdeskundigen worden ingehuurd of monsters worden geanalyseerd door daarin gespecialiseerde bedrijven. Daarnaast zal contact worden opgenomen met organisaties die reeds ervaring hebben met een ontmanteling van een cyclotron.

5.4 Betrokkenheid van geïnteresseerde partijen en communicatie met het Bevoegd

Gezag

In het integrale managementsysteem van Maastricht wordt alle communicatie met interne en externe partijen vastgelegd. Hierbij verloopt communicatie met het Bevoegd Gezag (ANVS en NLA) via de Stralingsbeschermingseenheid van de locatie Randwyck. Communicatie met het MUMC+ volgen de dan daarvoor geldende kanalen. Maastricht zal de communicatie met externe partijen, zoals aannemers, voeren.

5.5 Procedures voor beëindigingsactiviteiten en radioactief afvalbeheer

Voor aanvang van de ontmanteling wordt de procedure voor ontmanteling beschreven, besproken met alle betrokken partijen en gedocumenteerd. Hierin wordt ook het beheer van het radioactief afval opgenomen. Het radioactief afval zal bestaan uit geactiveerde cyclotrononderdelen.

5.6 Financiële en human resources

Scenario 3 is financieel onhaalbaar en zal daarom niet besproken worden. Voor scenario 2 kunnen we de onderstaande kostenschattting maken. De kosten voor scenario 1 zullen lager uitvallen omdat er minder geactiveerd materiaal afgevoerd hoeft te worden.

Alle geactiveerde onderdelen van het cyclotron kunnen lokaal opgeslagen om 'af te koelen' totdat ze de grenswaarde voor afvoer hebben bereikt. Het centrum in de Verenigde Staten heeft een gedetailleerde berekening uitgevoerd om deze kosten in kaart te brengen en komen uit op een bedrag van \$336.000 (ongeveer €315.000). In de business case van Maastrro is een conservatieve aanname gedaan en een bedrag van €500.000 excl. BTW of €605.000 incl. BTW opgenomen, wat ruimschoots moet voldoen (1).

De verwachting is dat de personele capaciteit van Maastrro voldoende toereikend is voor het uitvoeren van de beëindiging. Een meer gedetailleerdere schatting van de kosten zal worden gemaakt zodra het projectteam voor de ontmanteling van de cyclotron faciliteit wordt opgericht.

5.7 Overige relevante middelen

Wat betreft middelen die nodig zijn voor de beëindiging kan gedacht worden aan onder anderen:

- Een externe partij die proefboringen en -metingen kan doen voor het geactiveerde beton;
- Een grote hijskraan om het dak van de bunker te openen en delen van het toestel naar buiten te hijsen;
- Transport om de af te voeren onderdelen te vervoeren;
- Externe partijen om deze werkzaamheden te begeleiden;
- Opslagplaats voor geactiveerd materiaal (COVRA).

Het proces zal vastgelegd worden door middel van verslaglegging van dag tot dag, ondersteund met foto en videomateriaal. Dit alles wordt overzien door de dan aangestelde projectleider. Dit beëindigingsplan zal 1 keer per 5 jaar worden geëvalueerd en zo nodig bijgesteld aan de huidige inzichten en stand der techniek.

5.8 Verslaglegging

De rapportages omvatten onder andere de volgende belangrijke momenten:

- Communicatie met het bevoegd gezag;
- Verslag van de workload over de afgelopen jaren;
- Verslag van de radiologische metingen rondom het cyclotron en andere geactiveerde delen vóór de start van de werkzaamheden;
- Kalibratiegegevens van meetapparatuur;
- Foto's en beeldmateriaal van alle belangrijke activiteiten;
- (Potentieel) onveilige situaties en incidenten;
- Verslagen van overleggen;
- Namen en gewerkte uren van uitvoerende medewerkers van de eigen organisatie en van andere externe organisatie, rekeninghouden met de AVG-eisen;
- Verslag van proefboringen in het beton en de resultaten hiervan;
- Verslag van de ontmanteling en afvoer van het cyclotron;
- Verslag van de ontmanteling en afvoer van de rest van het toestel;
- Hoeveelheden, samenstelling en bestemming van afgevoerd afval (zowel radioactief als niet-radioactief) inclusief transportformulieren;
- Overdrachtsformulieren aan COVRA NV;
- Verwijderen van waarschuwingssignalering;
- In scenario 3: verslag van de sloop en afvoer van de bunker;



5.9 Verslaglegging, Documentatie en archivering

Maastrro beschikt over een online omgeving (Zenya) waarin besluiten, procedures, rapportages, formulieren en beleidsdocumenten geüpload kunnen worden in PDF formaat. Aan elk document dat gepubliceerd wordt moet een eigenaar en revisietermijn worden toegekend. De documenten kunnen niet zomaar gewijzigd worden zonder toestemming van de auteur. Dit systeem wordt actief gebruikt door het hele bedrijf en zal ook gebruikt worden voor de archivering van alle documentatie omtrent de beëindiging. Hiermee kan gewaarborgd worden dat de alle verslaglegging en documentatie beveiligd en met back-ups bewaard wordt voor de toekomst.



6 Uitvoering van beëindigingsactiviteit en -taken

6.1 Beschrijving van de geplande fasen en taken

Voor de ontmanteling wordt, net als voor alle andere handelingen met bronnen van ioniserende straling, een schriftelijke interne toestemming aangevraagd. Daarnaast zal er een IBC-vergunning (Isoleren, Beheersen, Controleren) aangevraagd worden. De aanvraag gaat vergezeld van een risicoanalyse op zowel conventionele als stralingsveiligheid. Voor de ontmanteling zal, naast een projectleider, ook een toezichhoudend medewerker stralingsbescherming worden aangesteld en gemandateerd om toezicht te houden op de stralingsbeschermingsaspecten van de ontmanteling.

6.2 Afsluitende vrijgave meting van de locatie en/of faciliteit of een deel daarvan

De details hieromtrent zullen uitgewerkt worden wanneer de ontmanteling op afzienbare termijn zal gaan plaatsvinden en de projectgroep hiervoor is opgericht.

6.3 Afvaltypes, volumes en afvoerroutes

In paragraaf 4.2 Mogelijke strategieën en rechtvaardiging/optimalisatie, worden de afvaltypes (koper, staal, beton(ijzer)) en hun volumes uitvoerig beschreven.

7 Veiligheidsevaluatie

In paragraaf 4.2 zijn drie verschillende strategieën beschreven, namelijk:

- 1. Het toestel permanent uit bedrijf nemen, laten afkoelen en daarna pas ontmantelen:**
Deze strategie is de voorkeursstrategie. Het uit bedrijf nemen van het toestel, waarbij het technisch onklaar gemaakt wordt en niet meer kan stralen, en het laten staan in de bunker tot dat de activiteit van de geactiveerde delen significant verminderd is alvorens men begint met de ontmanteling van het toestel. Voor de veiligheid van het personeel is dit ook het meest optimale scenario, omdat er in eerste instantie geen blootstelling is. Pas na 10 jaar. In paragraaf 4.2 wordt met een zeer conservatieve schatting berekend dat de totale activiteit van het cyclotron, de beamline en scattering foils afgenomen is van samen 1.09 GBq naar 0.09 GBq.
- 2. Ontmanteling van het bestralingstoestel, behoud van de bunker:**
Voor de tweede mogelijke strategie wordt het toestel vrijwel direct na uit gebruik name ontmanteld en afgevoerd. De bunker, die een veel langere levensduur heeft kan daarna hergebruikt worden voor andere doeleinden, zoals het huisvesten van een nieuw bestralingstoestel. De totale activiteit van het cyclotron, de beamline en scattering foils (samen 1.09 GBq) welke door personen afgevoerd moeten worden is vele malen hoger dan in scenario 1.
- 3. Ontmanteling van het bestralingstoestel én sloop van de bunker:**
Dit laatste scenario, waarin het toestel vrijwel direct na uit gebruik name ontmanteld wordt en de bunker gesloopt, is het minst veilig omdat men ook geactiveerd beton en betonijzer gaat slopen en afvoeren, waar dit niet nodig is in scenario 1 en 2.

De voorkeursstrategie, nummer 1, is voor de veiligheid van het personeel het meest gunstige scenario, omdat er geen (risico op) blootstelling is. Het toestel wordt simpelweg uitgeschakeld, onklaar gemaakt en 'geparkeerd' met het cyclotron in de laagste positie. Het cyclotron zal zich dan in het souterrain van de bunker bevinden. De behandelruimte op de begane grond kan gebruikt worden voor andere doeleinden. Aangezien de bunker is ontworpen op een in bedrijf zijnde cyclotron mag ervan uit worden gegaan dat de blootstelling van personen in ruimte boven het souterrain, waarin het niet werkende cyclotron wordt geïsoleerd, een blootstelling ondergaan die lager is dan 10 $\mu\text{Sv}/\text{jaar}$. Bij een in bedrijf zijnde cyclotron wordt een maximale effectieve jaardosis voor omstanders van 50 $\mu\text{Sv}/\text{jaar}$. Verwacht (zie Tabel 2 van Bijlage 4).

Wanneer men zou kiezen voor strategie nummer 2 of 3 heeft dit wel implicaties voor de veiligheid van het personeel. Men heeft dan te maken met het ontmantelen van het geactiveerde cyclotron (0.55 GBq) en de onderdelen in de beamline (0.52 GBq). Bij strategie 3 komt nog eens het doen van proefboringen in het beton en het laten afvoeren hiervan, hoewel uit bijlage 7 blijkt dat men mag aannemen dat de activiteitsconcentraties in realiteit beneden de in het Bbs gestelde vrijgavegrenzen zullen vallen (2). In het geval van vroege ontmanteling zal voorafgaand aan de ontmanteling via een dan op te stellen risicoanalyse, worden overwogen of het nodig is om extremiteitendosimetrie uit te voeren.



8 Impact op het milieu

Voor activatie van de grond onder de bunker wordt verwezen naar bijlage 9. Hieruit blijkt dat alle waarden voor de activering van grond en grondwater onder het vrijgaveniveau liggen.



9 Definitieve vrijgave locatie en faciliteiten na beëindiging van de handelingen

Pas na de beëindiging van de handelingen kan het eindrapport over de definitieve vrijgave opgesteld worden.



10 Details van de kostenschattingen en de financiële voorzieningen

Er is door de ondernemer eerst een voorlopig beëindigingsplan opgesteld, dit plan. Hierbij is een kostenraming gemaakt van de kosten die kunnen worden verwacht, zie paragraaf 5.6. Wanneer de daadwerkelijke beëindiging realiteit wordt zal er een nieuwe, meer gedetailleerde kostenschatting gemaakt worden aan de hand van de huidige stand van zaken.



Bibliografie

1. [REDACTED]. *Bijlage 6 Memo Ontmantelingskosten protonenbunker*. sl : Maastrro, 2017.
2. *Bijlage 7 Memo Vergunningsaanvraag: Activering en ontmanteling*. 2017.
3. **RIVM**. *RIVM-rapport 2023-0233 Radioactieve rest- en afvalstoffen bij ontmanteling van cyclotrons in Nederland*. 2023.