

**Bijlagen bij
Deel A: Kew-deel**

**Revisie van Bijlage A22:
Jaardosis ruimten**

Revisie 11/03/2015

Revisie overzicht

Wijzigingsdatum

11/03/2015

Aanleiding van de wijzigingen

Sinds de op 16 juni 2013 toegekende Kew vergunning heeft HollandPTC voor andere leverancier van protonenapparatuur gekozen dan eerder was voorzien. Dit heeft veranderingen tot gevolg in de technische specificaties van het cyclotron en op detailniveau in het gebouwontwerp. Vanwege deze wijzigingen zijn nieuwe dosisberekeningen nodig. Deze nieuwe berekeningen bieden ook de mogelijkheid om de nieuwste inzichten omtrent relevante parameters mee te nemen om zo tot nog realistischere schattingen te komen, alsmede om onvolkomenheden in de eerdere versie van deze bijlage adresseren.

Samenvatting van de wijzigingen

Overzicht bronlocaties

- De overzichtstekeningen (Fig. 1 en 2) zijn aangepast om veranderingen in gebouwontwerp als gevolg van de gewijzigde technische specificaties van de apparatuur te reflecteren.
- De term "doeldosis" is overal vervangen door "operationele grenswaarde" om te benadrukken dat het geen "doel" is om deze dosis te bereiken. Integendeel, de werkelijke dosis zal beneden deze waarde (moeten) blijven. De parameter "DD" is niet van naam veranderd.
- De correctiefactoren worden niet langer in Bijlage A22 toegepast maar in de onderliggende getallen van Bijlage A16 "Afschermingsberekeningen Protonen". Daarmee komt het overzicht en uitleg in Bijlage A22 hieromtrent te vervallen.
- Grenswaarde DD-a is opgesplitst in DD-a1 (1 mSv/jaar binnen de bunkers) en DD-a2 (0,1 mSv/jaar buiten de bunkers). In de vergunningsaanvraag d.d. 12/2013 was eerstgenoemde operationele grenswaarde binnen de bunkers wel degelijk aangehouden maar niet in de tekst gespecificeerd. Dit betreft dus geen verandering maar een verdere verduidelijking van het stralingsbeschermingsbeleid. De maximale jaardosis in de bunkers was in de vorige aanvraag d.d. 12/2013 berekend als 0.6 mSv.

Verblijfsfactoren

- De verblijfsfactoren zijn opnieuw bepaald, gebaseerd op de aanpak van rapport 151 van de NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements). Daarbij zijn de verblijfsfactoren van de protonentherapie bunkers verder aangescherpt aan de realiteit. De aanpassingen zijn in de tekst toegelicht.
- In het overzicht van de verblijfsfactoren is nu ook expliciet aandacht besteed aan de workshop die in het gebouw voorzien is; deze was eerder niet vermeld.
- In het overzicht van de verblijfsfactoren is het onderdeel "onderhoudspersoneel in het achterste bunkergedeelte" verplaatst van de categorie "gantrybunkers" naar "overige gecontroleerde zones"

Jaardoses

- In de plots en toelichtingen is de totale jaardosis voor de inzichtelijkheid uitgesplitst naar alle bronnen. De onderschriften bij de plots zijn uitgebreid om meer uitleg te geven. De maximale jaardosis per bron is expliciet vermeld. Een plot van de totale dosis is toegevoegd.

- De jaardosis als gevolg van de protontherapieapparatuur buiten de protontherapiebunkers (d.w.z. buiten de bunkerruimtes, de doolhoven naar de bunkers, en de bunkermuren) is verbeterd van $<0,5$ mSv/jaar zoals beschreven in de voorgaande vergunningsaanvraagdocumenten naar $<0,1$ mSv/jaar.
- Alle overige berekende waarden voor de jaardoses blijven onveranderd onder de operationele grenswaarden.
- Bij het onderdeel "Jaardosis binnen de R&D bunker" is een overzicht gegeven van extra maatregelen in het kader van ALARA.
- Een weergave van de berekening van de maximale urdoses rondom de opstellingen van HollandPTC is toegevoegd.

Modelering in de verticale richting

- De modellering in de verticale richting is opnieuw uitgevoerd. Hierbij is de kwalitatieve benadering uit de eerdere aanvraag vervangen door een kwantitatieve.
- De muur- en plafonddiktes (Tabel 1) zijn aangepast aan het gewijzigde gebouwwontwerp.
- Bij de vergunningsaanvraag d.d. 12/2013 was het voorgestelde stralingsbeschermingsbeleid dat er geen actieve bundel is in ruimtes waarboven op het dak gewerkt wordt (verblijfsfactor nul). Met de nu nauwkeuriger berekende en zeer lage jaardosis op het dak is deze richtlijn komen te vervallen.

Ruimteclassificatie

- De classificatie van de ruimtes op HollandPTC (onveranderd sinds de eerdere aanvraag) is voor de inzichtelijkheid aan deze bijlage toegevoegd, aangezien het rechtstreeks volgt uit de berekende jaardoses per ruimte.

Conclusie van de wijzigingen

In de gewijzigde situatie wordt onverminderd aan de voorschriften van de vergunning voldaan. Er wordt hierin dan ook geen wijziging aangevraagd. Wel wordt verzocht Bijlage A22 zoals genoemd in de vigerende vergunning te vervangen door deze gewijzigde bijlage als beschrijving van de handelingen (**vergunning V, onder L, onder 1**).

Ten geleide

De berekeningen in de **Bijlage A16 “Afschermingsberekeningen Protonen”** zijn gebaseerd op een aantal van 1050 patiënten volgens een mix van indicaties die door de klinische staf van de HollandPTC partners als realistisch is vastgesteld.

Tot 2020 zal het aantal patiënten in HollandPTC door middel van de WBMV vergunning gelimiteerd zijn, maar in principe kan HollandPTC in de huidige configuratie protonetherapie aanbieden aan deze 1050 patiënten (waarvan 950 patiënten op de beide gantries en 100 oogpatiënten).

Het is niet het aantal patiënten alléén dat het uiteindelijke gebruik aan protonen, en daarmee de dosis naar medewerkers en omstanders, bepaalt. Het daadwerkelijk gebruik van protonen zal afhangen van toekomstige verbeteringen in de efficiency in de behandelruimte en toekomstige ontwikkelingen in behandelprotocollen, zoals hypo-fractionering waarin grotere dosis per fractie (en minder fracties per patiënt) worden gebruikt. Er dient daarnaast onder andere rekening gehouden te worden met bundelgebruik voor kwaliteitscontrole. Voor een consistente aanpak zijn deze correctiefactoren nu al in rekening gebracht in **Bijlage A16 “Afschermingsberekeningen Protonen”** en dus hier verwijderd. In deze bijlage (A22) wordt in detail gekeken naar de te verwachten dosis binnen en buiten HollandPTC, daarbij meenemend de verschillende verblijfsfactoren.

Dit document houdt naast de protonetherapie apparatuur ook rekening met dosisbijdragen van:

- Beeldvormingsmodaliteiten in het imagingblok van HollandPTC
- Reactor Instituut Delft

De dosisbijdragen van beeldvormingsmodaliteiten binnen de bestralingsbunkers zijn niet gemodelleerd. De bijdrage van deze bronnen aan de jaardosis buiten de bunkers is nihil, zie Bijlage A17 “Afschermingsberekeningen Röntgentoestellen”.

Overzicht bronlocaties

Hier volgt eerst een overzicht van alle bronlocaties op HollandPTC en de gestelde operationele grenswaardes. Deze locaties zijn ook gepresenteerd op de daaropvolgende 2D plots van verblijfsfactoren en jaardosis.

De plattegronden in deze sectie, zie Fig.1 en Fig. 2, bevatten veel detail en kunnen het beste op groot formaat uitgeprint worden.

- De operationele grenswaarde voor de protonetherapie apparatuur is tweeledig.
 - DD-a-1: Binnen in het bunkergedeelte (d.w.z. cyclotron, bundelgang, gantries, oogbunker en R&D bunker, inclusief de in-room CTs en in-room Röntgen-toestellen voor orthogonale beeldvorming) is de operationele grenswaarde 1.0 mSv per jaar. In deze speciale werkruimten komt alleen hooggetraind specialistisch personeel,

waarvan de verblijfstijd beperkt is. In de drie klinische bunkers komen ook patiënten voor hun bestralingsbehandeling.

- DD-a-2: Voor alle ruimten buiten het bunkergedeelte (d.w.z. controlekamers, gangen, technische ruimtes, overige werkplekken, en ook direct aangrenzend aan de buitenmuur van HollandPTC) is de operationele grenswaarde 0.1 mSv per jaar. In de veiligheidsinstructie van het RID (zie Bijlage A07) geldt bovendien een operationele grenswaarde van 1 μ Sv per uur rond een opstelling.
- DD-b: Voor alle bronnen in het beeldvormingsblok is de operationele grenswaarde direct aan de buitenmuur van de ruimte op 0.1 mSv per bron per jaar gesteld.
Gebruik van het beeldvormingsblok is 2080 uur per jaar (52 weken van 40 uur). Ook hier wordt dus ruimschoots aan de waarde van 1 μ Sv per uur voldaan.
- DD-c: Voor de onderzoekslaboratoria op de eerste verdieping geldt een praktische handhavinglimiet van 1 micro-Sievert per uur op enige locatie die vrij toegankelijk is.

Bron	Omschrijving	Afscherming	Operationele grenswaarde
A	Cyclotron. 250 MeV, maximale stroom 800 nA.	Beton	DD-a-1 DD-a-2
B	Energie selectie systeem (ESS). Hier wordt de bundelenergie verlaagd tot de gewenste energie voor de behandeling.	Beton	DD-a-1 DD-a-2
C	Bundelgang. Hier wordt de bundel verder getransporteerd naar de diverse behandelbunkers	Beton	DD-a-1 DD-a-2
D	R&D bunker. Hier komt een protonen pencil beam binnen waarvan de energie en intensiteit geselecteerd kan worden. Deze bunker wordt gebruikt voor experimenten.	Beton	DD-a-1 DD-a-2
E	Gantry 1. Bestralen van patiënten. De pencil beam wordt magnetisch gedeflecteerd zodat variabele veldgroottes toegepast kunnen worden. De positie van de bundel wordt door het ESS in de diepterichting aangepast. Rond de patiënt zijn twee Röntgenbuizen voor orthogonale positieverificatie van de patiënt.	Beton	DD-a-1 DD-a-2
F	In-room CT in gantry 1. Gebruikt voor 3D beeldvorming van de patiënt voorafgaand aan een bestralingsfractie.	Beton	DD-a-1 DD-a-2
G	Gantry 2. Zie gantry 1	Beton	DD-a-1 DD-a-2
H	In-room CT in gantry 2. Zie in-room CT in gantry 1	Beton	DD-a-1 DD-a-2
I	Oogbunker. Hier worden tumoren in het oog bestraald. In deze bunker worden ook twee	Beton	DD-a-1 DD-a-2

	Röntgenbuizen gebruikt voor orthogonale positieverificatie van het oog, door middel van tantalum clips die chirurgisch aan het oog zijn bevestigd.		
J	FDG leverancierskluis. Twee keer per dag levering van maximaal 9,126 GBq FDG in voorgevulde spuit. Verblijfstijd in kluis << 30 minuten.	Lood	DD-b
K	PET hotlab, klasse C. Opslag van spuit en afval. Gemiddelde activiteit over een dag met volledig gebruik van de PET is 3333 MBq (tussen 7:00 en 15:00). Daarbuiten worden hier de ingekapselde FDG calibratiebronnen opgeslagen (⁶⁸ Ge. Twee bronnen van 46.25 MBq, en één van 92.5 MBq).	Robaliet	DD-b
L	Twee toedien-/ruimtes. Bij een volledig PET programma is de gemiddelde activiteit, in beide ruimtes gecombineerd, 230 MBq tussen 8:00 en 16:00), en 0 MBq daarbuiten.	Robaliet	DD-b
M	PET-CT scanner. Gemiddelde FDG activiteit bij een volledige programma is 320 MBq tussen 8:00 en 17:00.	Robaliet	DD-b
N	Diagnostische CT-scanner.	Lood	DD-b
O	Onderzoekslaboratorium, klasse C. Gebruik en (tijdelijke) opslag van kleine ingekapselde calibratiebronnen, van maximaal enkele MBq elk.	Beton	DD-c
P	Onderzoekslaboratorium, klasse C. Gebruik en (tijdelijke) opslag van kleine ingekapselde calibratiebronnen, van maximaal enkele MBq elk.	Beton	DD-c

BEGANE GROND



Fig. 1: Plattegrond van de begane grond van HollandPTC.

1e Verdieping



Fig. 2: Plattegrond van de eerste verdieping van HollandPTC

2e Verdieping

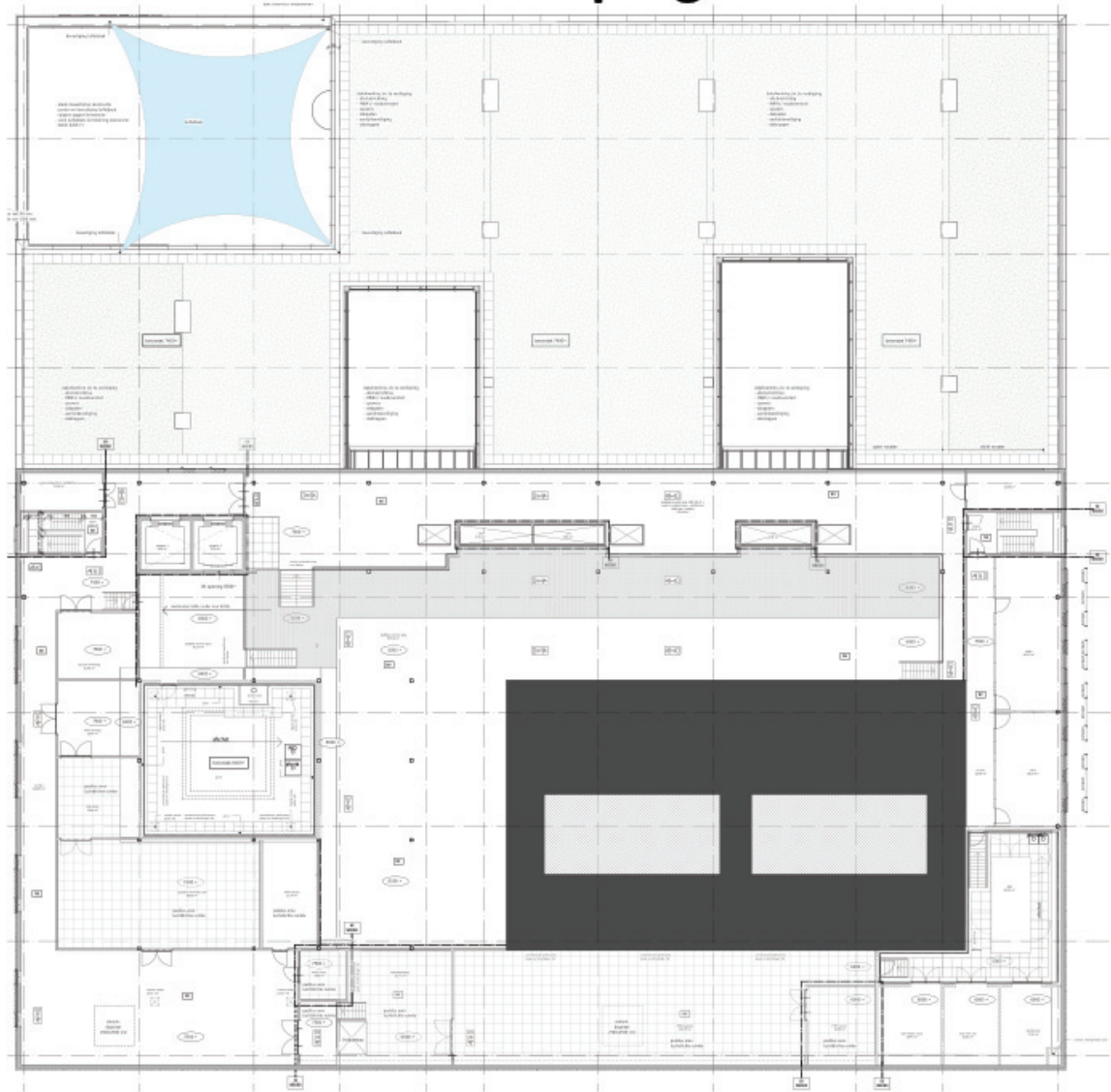


Fig. 3: Plattegrond van de tweede verdieping van HollandPTC

Verblijfsfactoren

De berekening van door medewerkers en overige aanwezigen mogelijk op te lopen dosis (op jaarbasis) dient ook rekening te houden met verblijfsfactoren. Hiervoor gebruiken wij de aanpak zoals voorgeschreven door de NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) in hun rapport 151 ("Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-ray Radiotherapy Facilities), zie .

Location	Occupancy Factor (T)
Full occupancy areas (areas occupied full-time by an individual), e.g., administrative or clerical offices; treatment planning areas, treatment control rooms, nurse stations, receptionist areas, attended waiting rooms, occupied space in nearby building	1
Adjacent treatment room, patient examination room adjacent to shielded vault	1/2
Corridors, employee lounges, staff rest rooms	1/5
Treatment vault doors ^b	1/8
Public toilets, unattended vending rooms, storage areas, outdoor areas with seating, unattended waiting rooms, patient holding areas, attics, janitors' closets	1/20
Outdoor areas with only transient pedestrian or vehicular traffic, unattended parking lots, vehicular drop off areas (unattended), stairways, unattended elevators	1/40

Fig. 4: Verblijfsfactoren uit NCRP rapport 151.

De berekeningen in de Bijlage A16 "Afschermingsberekeningen Protonen", die ten grondslag liggen aan de analyse in dit document, gaan uit van het volledige klinische programma van 88 uur per week, met daarnaast 20 uur per week aan R&D bundeltijd. Aangezien een typische werkweek 40 uur betreft, zijn de verblijfsfactoren (met waarden 1, 1/2, 1/5 en 1/8) met een factor 2 verlaagd. De verblijfsfactoren 1/20 en 1/40 hebben we niet verlaagd. Daarnaast zijn specifiek de verblijfsfactoren voor de bunkers, en de controlekamers van deze bunkers, aangepast aan de realiteit, te weten:

R&D bunker:

Gebruik van de R&D bunker is 20 uur per week op tijden die niet overlappen met het klinische programma. Op deze momenten bevindt het personeel zich danwel in de controle kamer, danwel in de R&D bunker (waarbij dan uiteraard daar niet gestraald wordt). Voorbereidingen voor experimenten zullen hoofdzakelijk plaatsvinden in de laboratoria op de eerste verdieping van HollandPTC, in de werkruimte vóór de R&D bunker, en extern. Aannee is dat R&D personeel op de dag dat zij bundeltijd hebben ter voorbereiding van de experimenten maximaal 8 uur bij de R&D bunker doorbrengt ten tijde van het klinische programma. Vandaar een verblijfsfactor van **0,2** (2x8 uur gedeeld door 88 uur klinisch programma), voor zowel de controlekamer als de bunker.

Gantry bunkers:

- Slechts een deel van de gantry bunkers is toegankelijk voor personeel ('bovenste deel', dichtste bij het doolhof, in Fig. 5).
- Personeel bevindt zich tijdens klinische uren alleen in de bunker voor het begeleiden van de patiënt. Voor beeldvorming en tijdens de bestraling (gezamenlijk goed voor meer dan de helft van de tijd) bevindt het personeel zich in de controlekamer. We gaan uit van een verblijfsfactor van 0,5 (40 uur/88 uur), voor zowel de controlekamer als de bunker.
- Individuele patiënten bevinden zich slechts zeer kort in de bunker.

Oogbunker:

Het klinische programma van de oogbunker is zeer beperkt. De maximaal 100 patiënten per jaar vergen gemiddeld 1 uur per dag aan bestralingstijd. Daarnaast nog gemiddeld 1 uur per dag voor kwaliteitscontrole. We gaan er niet langer vanuit dat er onderzoek zal plaatsvinden in de oogbunker zodat de verblijfsfactoren puur gebaseerd zijn op het klinische programma (10 uur per week). Tijdens al deze activiteiten zal het personeel zich ofwel in de controlekamer ofwel in de bunker bevinden. Individuele patiënten bevinden zich slechts zeer kort in de bunker. Verblijfsfactor: 0,125 (10 uur/88 uur), voor zowel de controlekamer als de bunker.

Workshop:

De workshops op de begane grond, bij de ingang naar de R&D bunker zijn gedurende de dag voor maximaal de helft in gebruik. Verblijfsfactor: 0,25 (40 uur/88 uur, waarvan maar de helft in gebruik).

Overige bunkerzones:

Het onderhoud aan de protonentherapie apparatuur vindt plaats buiten het klinische programma om. Voor zones die alleen toegankelijk zijn voor onderhoudspersoneel van de leverancier van de protonentherapie apparatuur (cyclotron, bundelgang) is de verblijfsfactor nul omdat dit personeel zich tijdens actief gebruik van de protonentherapie apparatuur niet op deze locaties bevinden. Verblijfsfactor 0. Zeer sporadisch kan het voorkomen dat het onderhoudspersoneel zich tijdens het klinische programma binnen een bunker bevindt, in het achterste bunkergedeelte. Deze verblijfsfactor is daarom op 1/32 gezet, wat overeenkomt met gemiddeld een half uur per dag.



Fig. 5: Verblijfsfactoren begane grond HollandPTC. De maximale waarde is 0.5 (zie toelichting in de tekst).

Jaardosis medische beeldvorming en RID

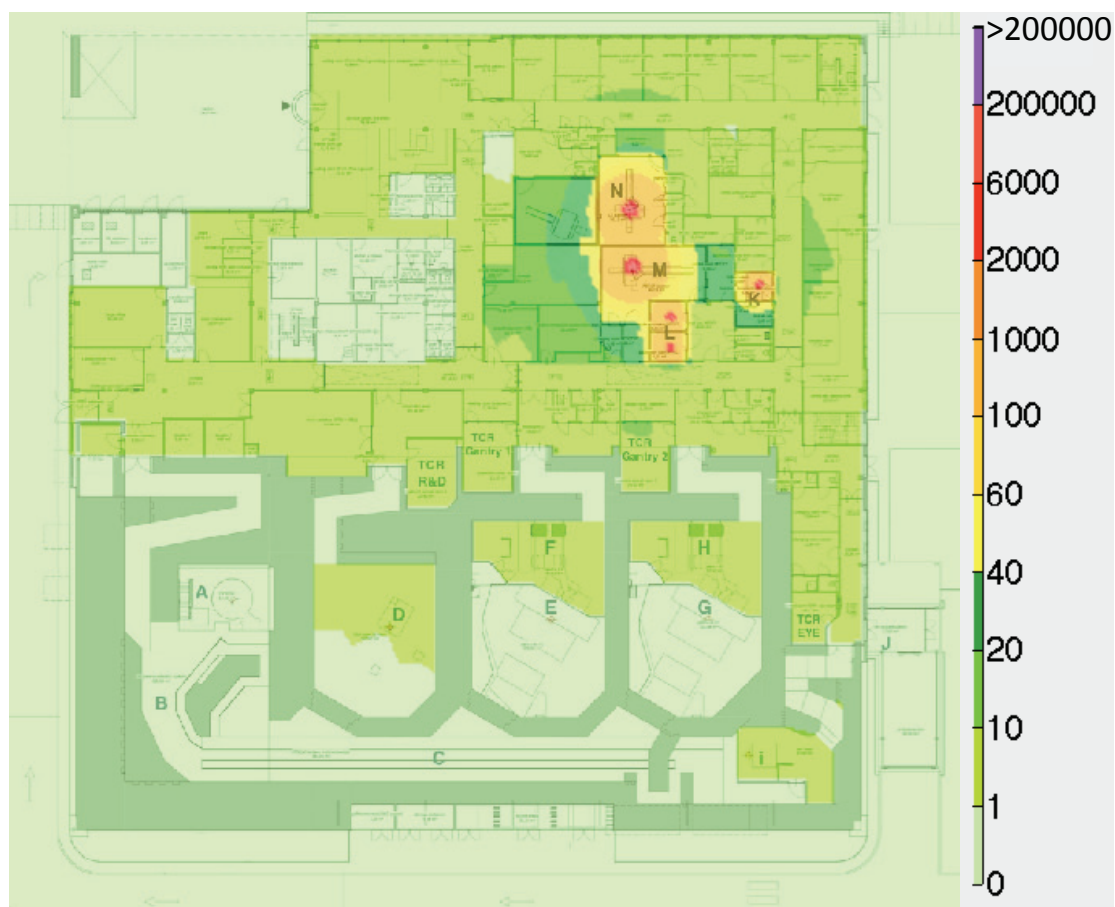


Fig. 6: Totale jaardosis als gevolg van handelingen in het beeldvormingsblok, inclusief bijdrage van het RID. Dosis in μSv per jaar. De bijdrage van de protonentherapie apparatuur staat in deze figuur op nul.

Het beeldvormingsblok is alleen overdag in gebruik. Fig. 6 geeft de jaardosis weer voor personen die overdag werken. De jaardosis buiten de ruimtes voor de beeldvormingsmodaliteiten CT en PET-CT is lager dan de operationele grenswaarde van 0.1 mSv per jaar (100 μSv per jaar). De jaardosis bijdrage van de CT aan de PET-CT ruimte, en vice versa, is ook lager dan deze grenswaarde. Dit is niet in deze figuur zichtbaar. Dit is wel meegenomen in Bijlage A14 "Risico Analyse Handelingen Protonentherapie en Medische Beeldvorming".

De bijdrage van het RID aan de jaardosis op het gebied van HollandPTC is 10 μSv per jaar.

In de rest van dit document gaan we in op de jaardosis ten gevolge van de protonentherapie apparatuur. We laten hierbij de bijdrage van de beeldvorming en van het RID verder buiten beschouwing.

Jaardosis buiten de protonentherapie bunkers

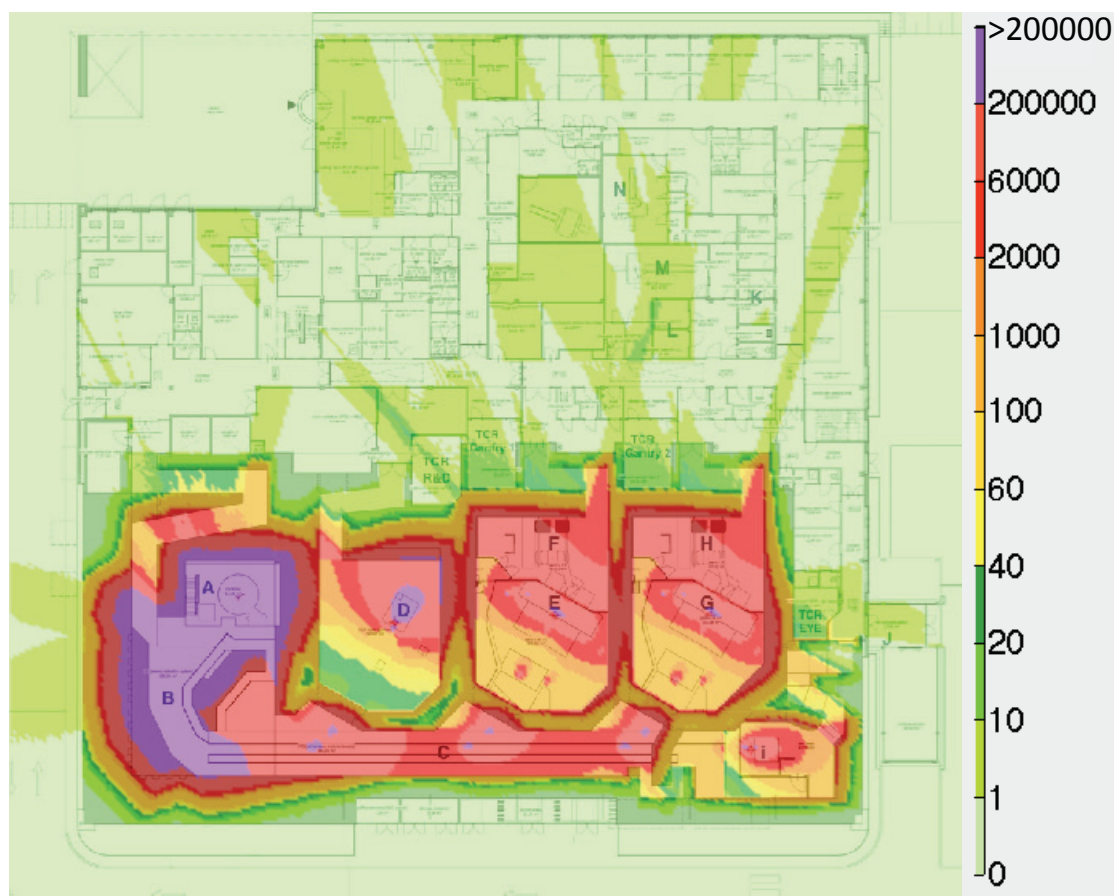


Fig. 7: Totale jaardosis in en rond HollandPTC door de protonentherapie apparatuur. Dosis in μSv per jaar. Puur voor de inzichtelijkheid is de verblijfsfactor bij het cyclotron (A), energie selectie systeem (B) en bundelgang (C), voor alle doelhoven naar de bunkers, en voor alle betonwanden in dit figuur op 1 gezet, ter begeleiding van het oog. In werkelijkheid is de verblijfsfactor voor deze onderdelen van het gebouw 0. Verder gelden de verblijfsfactoren zoals weergegeven in Fig. 5. De bijdrage van de medische beeldvorming buiten de bunkers, alsmede de bijdrage van het RID is in deze figuur op nul gezet.

Fig. 7 betreft alleen de dosisbijdrage van de protonentherapie apparatuur. Ter begeleiding van het oog zijn de verblijfsfactoren van de bunkers, van de doelhoven naar de bunkers en van de betonnen muren van de bunkers alléén voor deze figuur op 1 gezet. In werkelijkheid is die verblijfsfactor uiteraard 0. De jaardosis buiten de protonentherapie bunkers (d.w.z. buiten de bunkerruimtes, de doelhoven naar de bunkers, en de bunkermuren) is lager dan de operationele grenswaarde van 0.1 mSv per jaar (100 μSv per jaar).

In Fig. 8 is dezelfde informatie weergegeven, maar nu met gebruik van de werkelijke verblijfsfactoren. Aangezien bijvoorbeeld de bunkermuren en de cyclotronruimte een verblijfsfactor 0 hebben, komt hier geen dosis. In hierop volgende secties kijken we in detail naar de jaardosis **binnen** de bunkers, met Fig. 8 als basis (dus met meenemen van de werkelijke verblijfsfactoren).

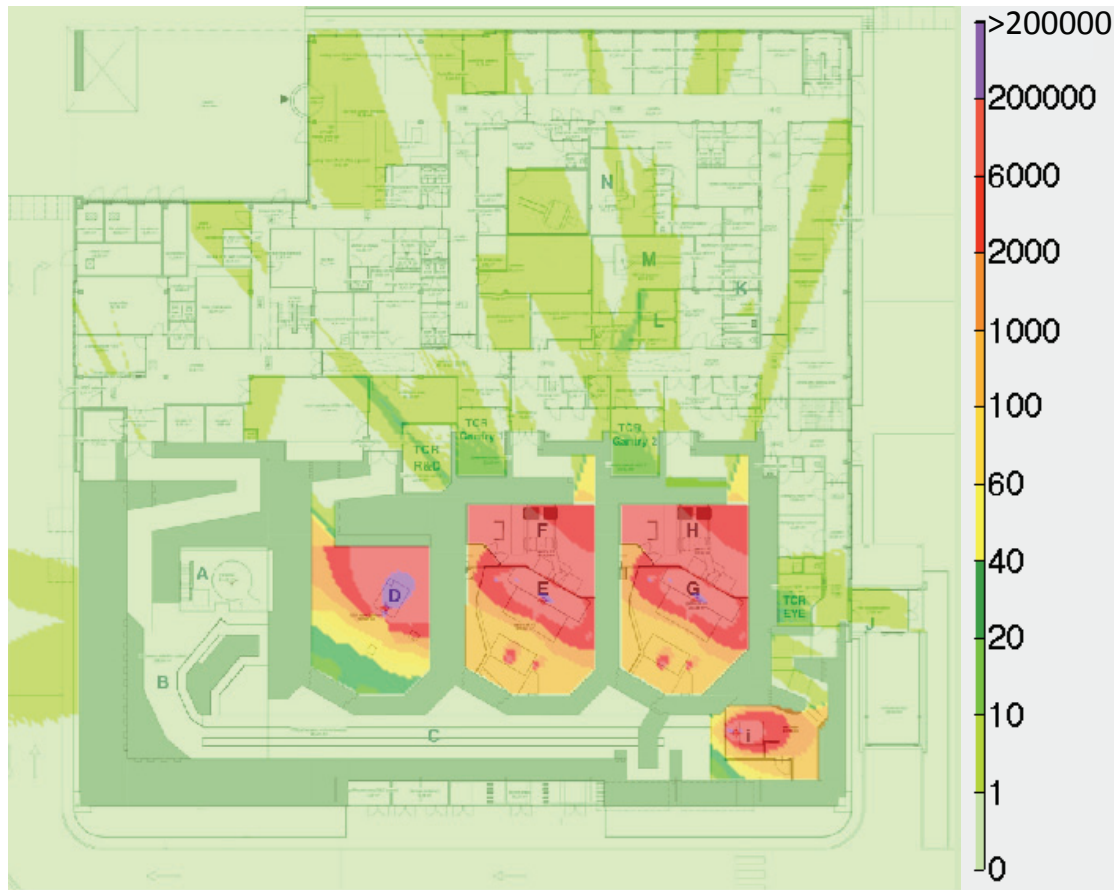


Fig. 8. Zelfde als Fig. 7, maar nu met gebruik van de werkelijke verblijfsfactoren (zie Fig. 5). De dosis in cyclotron en bundelgang is 'nul' omdat de verblijfsfactor daar nul is. De bijdrage van de medische beeldvorming buiten de bunkers, alsmede de bijdrage van het RID zijn in deze figuur op nul gezet.

Jaardosis binnen de R&D bunker

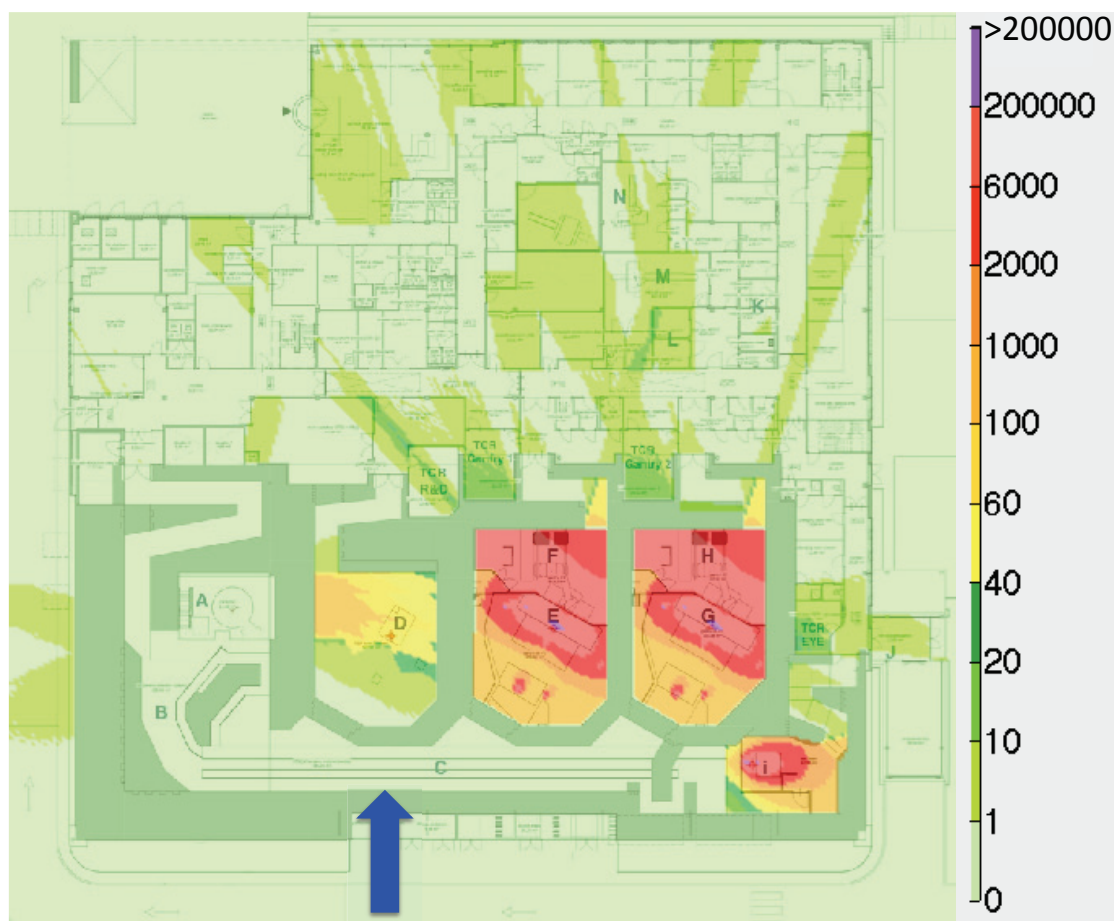


Fig. 9: Totale jaardosis in de R&D bunker met gebruik van de werkelijke verblijfsfactoren. De dosis in cyclotron en bundelgang is 'nul' omdat de verblijfsfactor daar nul is. Dosis in μSv per jaar. De blauwe pijl geeft de R&D bunker aan. De bijdrage van de medische beeldvorming buiten de bunkers, alsmede de bijdrage van het RID zijn in deze figuur op nul gezet.

De jaardosis **binnen** de R&D bunker is lager dan de operationele grenswaarde van 1.0 mSv per jaar. Het maximum is 0.37 mSv. Dit is een dosisbijdrage die hoofdzakelijk van het cyclotron komt.

Uit het oogpunt van ALARA nemen we extra maatregelen.

Persoonsdosimetrie:

- Al het personeel binnen HollandPTC draagt persoonsdosimetrie in de vorm van badges. Met deze badges wordt ook de straling t.g.v. neutronen geregistreerd. Deze badges worden gedurende het jaar regelmatig uitgelezen en vervangen.
- Bezoekende artsen, fysici, servicemonteurs, etc. dragen ook deze persoonsdosimetrie.
- Personen voor wie de cumulatieve jaardosis, gecorrigeerd voor de natuurlijke achtergrondstraling, boven de 0.5 mSv komt, worden onder verscherpt toezicht van de stralingsbeschermingsdienst geplaatst. Dit kan betekenen dat werkzaamheden in de R&D bunker voor deze persoon gelimiteerd worden.

Ruimtedosimetrie:

Op de muur van de R&D bunker naar het cyclotron, aan de zijde van de R&D bunker, zal een stralingsmonitor geplaatst worden die gevoelig is voor neutronen. De door deze monitor gemeten straling wordt vergeleken met de berekende jaardosis op die plek (zowel met als zonder correctie voor verblijfsfactoren).

Jaardosis binnen gantry 1

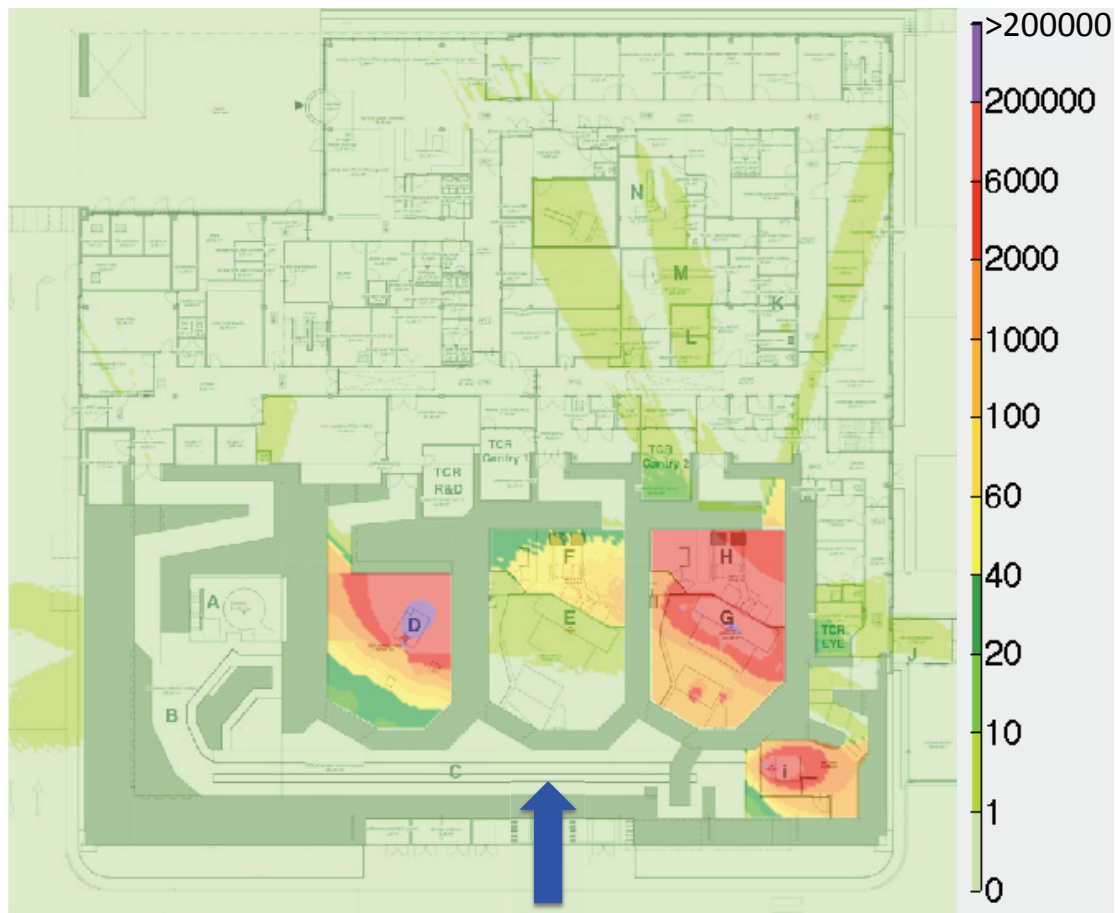


Fig. 10: Totale jaardosis in Gantry 1 met gebruik van de werkelijke verblijfsfactoren. De dosis in cyclotron en bundelgang is 'nul' omdat de verblijfsfactor daar nul is. Dosis in μSv per jaar. De blauwe pijl geeft de locatie van Gantry 1 aan. De bijdrage van de medische beeldvorming buiten de bunkers, alsmede de bijdrage van het RID zijn in deze figuur op nul gezet.

De jaardosis **binnen** de gantry bunker heeft een maximum van $140 \mu\text{Sv}$, wat ruim lager is dan de operationele grenswaarde van 1.0 mSv .

Jaardosis binnen gantry 2

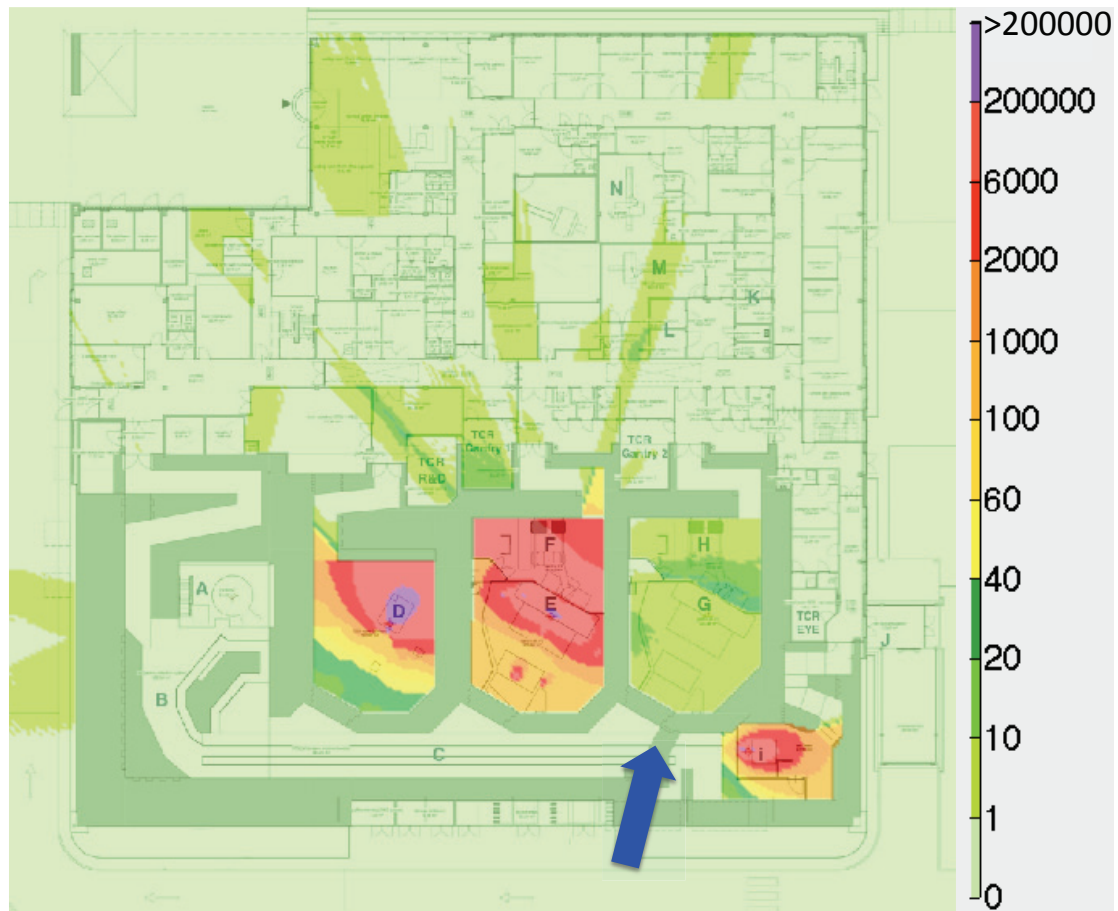


Fig. 11: Totale jaardosis in Gantry 2 met gebruik van de werkelijke verblijfsfactoren. De dosis in cyclotron en bundelgang is 'nul' omdat de verblijfsfactor daar nul is. Dosis in μSv per jaar. De blauwe pijl geeft de locatie van Gantry 1 aan. De bijdrage van de medische beeldvorming buiten de bunkers, alsmede de bijdrage van het RID zijn in deze figuur op nul gezet.

De jaardosis **binnen** de gantry bunker heeft een maximum van $25 \mu\text{Sv}$, wat ruim lager is dan de operationele grenswaarde van 1.0 mSv .

Jaardosis binnen de oogbunker

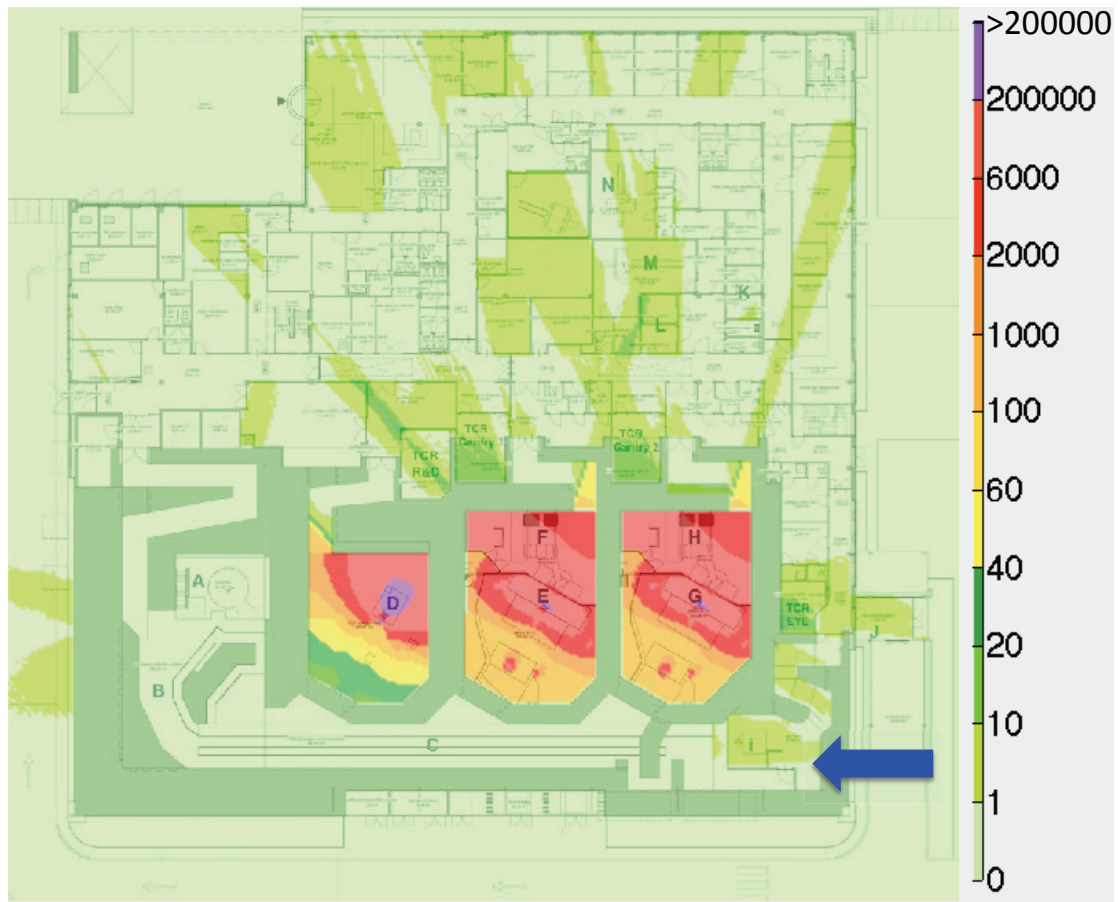


Fig. 12: Totale jaardosis in de oogbunker met gebruik van de werkelijke verblijfsfactoren. De dosis in cyclotron en bundelgang is 'nul' omdat de verblijfsfactor daar nul is. Dosis in μSv per jaar. De blauwe pijl geeft de locatie van de oogbunker aan. De bijdrage van de medische beeldvorming buiten de bunkers, alsmede de bijdrage van het RID zijn in deze figuur op nul gezet.

De jaardosis **binnen** de oogbunker heeft een maximum van $5 \mu\text{Sv}$, wat ruim lager is dan de operationele grenswaarde van 1.0 mSv .

Maximale uurdosis rondom opstellingen

We bekijken de maximumdosis per uur als gevolg van het klinische (en R&D) programma in elke protonenbunker afzonderlijk. Hierbij nemen we zowel de maximale uurdosis direct buiten die bunker mee als de maximale uurdosis buiten de cyclotronbunker als gevolg van het klinische programma. De protonenbundel kan maar aan één bunker tegelijk worden toegewezen. De maximale uurdoses dienen dan ook niet bij elkaar te worden opgeteld.

- **Oogbunker:** De maximum jaardosis buiten de oogbunker is $23 \mu\text{Sv}$, zie Fig. 13. Het oogprogramma vindt plaats in 10 uur per week = 520 uur per jaar. Gebruik van de bundel voor dit klinisch programma is evenredig verdeeld over deze uren, met als uitzondering dat er tijdens bepaalde kwaliteitscontroles (1 uur per week) uitschieters mogelijk zijn, ingeschat op maximaal 5 keer dit gemiddelde. Maximale dosis per jaar buiten de oogbunker is $(23 \mu\text{Sv} / 520 \text{ uur}) * 5 = 0.22 \mu\text{Sv}$ per uur. Buiten het cyclotron is de maximum jaardosis ten gevolge van het oogprogramma $80 \mu\text{Sv}$. De maximum uurdosis is dan $(80 \mu\text{Sv} / 520 \text{ uur}) * 5 = 0.77 \mu\text{Sv}$ per uur.
- **Gantries:** De maximum jaardosis buiten de gantries is $138 \mu\text{Sv}$, zie Fig. 13. Het gantryprogramma vindt plaats in 88 uur per week = 4600 uur per jaar. Gebruik van de bundel voor dit klinisch programma is evenredig verdeeld over deze uren, met als uitzondering dat er tijdens bepaalde kwaliteitscontroles (5 uur per week) uitschieters mogelijk zijn, ingeschat op maximaal 5 keer dit gemiddelde. Maximale dosis per jaar buiten de gantries is dan ook $(138 \mu\text{Sv} / 4600 \text{ uur}) * 5 = 0.15 \mu\text{Sv}$ per uur. Buiten het cyclotron is de maximum jaardosis ten gevolge van dit programma $102 \mu\text{Sv}$. De maximum uurdosis is dan $(102 \mu\text{Sv} / 4600 \text{ uur}) * 5 = 0.11 \mu\text{Sv}$.
- **R&D bunker:** De maximum jaardosis buiten de R&D bunker is $2 \mu\text{Sv}$, zie Fig. 13. Het R&D-programma vindt plaats in 20 uur per week = 1040 uur per jaar. We verwachten dat het bundelgebruik typisch evenredig verdeeld is over deze uren, maar gaan er voor de berekening van uit dat er een uitschieter mogelijk is (2 uur per week) van 5 keer het gemiddelde. Maximale dosis per jaar buiten de R&D-bunker is dan $(2 \mu\text{Sv} / 1040 \text{ uur}) * 5 = 0.01 \mu\text{Sv}$ per uur. Buiten het cyclotron is de maximum jaardosis ten gevolge van dit programma $82 \mu\text{Sv}$. De maximum uurdosis is dan $(82 \mu\text{Sv} / 1040 \text{ uur}) * 5 = 0.39 \mu\text{Sv}$.
- **CT en PET-CT:** De muren rond deze bronnen zijn zo ontworpen dat de bijdrage buiten deze ruimte maximaal $100 \mu\text{Sv}$ per jaar is. Gebruik van de CT en PET-CT zal op een continue basis zijn gedurende 8 uur per dag, 5 dagen per week voor een totaal van 2080 uur per jaar. Er zijn geen uitschieters in exceptioneel extra gebruik van deze beeldvormingsmodaliteiten. De maximum uurdosis is dan ook $100 \mu\text{Sv} / 2080 \text{ uur} = 0.05 \mu\text{Sv}$.
- **Overige opstellingen:** Voor opstellingen in de laboratoria op de eerste verdieping van HollandPTC, wordt de limiet van $1 \mu\text{Sv}$ per uur gehandhaafd.

De uurdosis rondom alle opstellingen is daarmee kleiner dan $1 \mu\text{Sv}$.

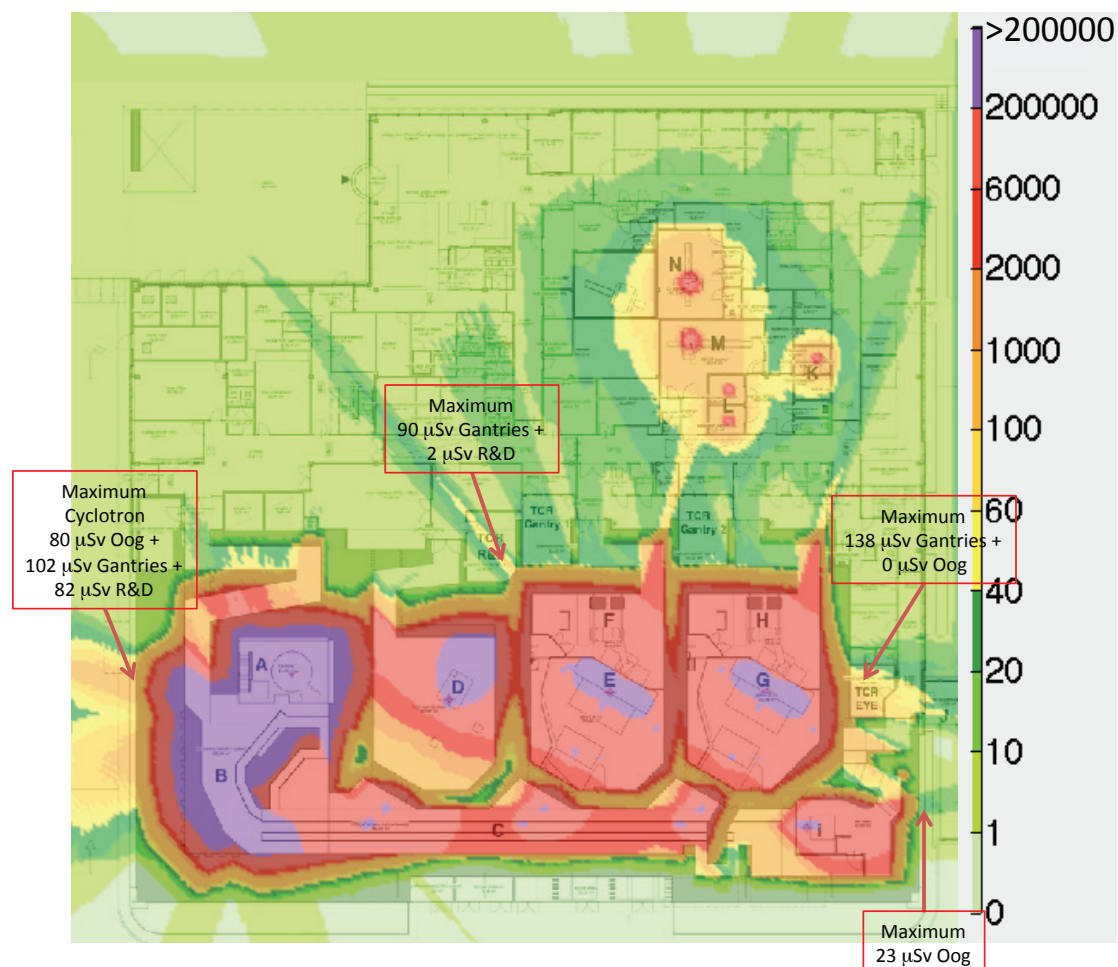


Fig. 13: Totale jaardosis rond de 'opstellingen' van HollandPTC. De verblijfsfactor is voor deze plot overal op 1 gezet, ter begeleiding van het oog. Dosis in μSv per jaar.

Totale jaardosis

Voor de volledigheid geven wij in Fig. 14 de totale jaardosis in en rond HollandPTC weer. Dit betreft de bijdragen van:

- De protonentherapie apparatuur.
- De beeldvormende apparatuur buiten de protonentherapie bunkers (CT en PET/CT).
- De bijdrage van het RID.

In dit figuur zijn ter begeleiding van het oog de verblijfsfactoren in het bunkerdeel (inclusief de muren) op 1 gezet.

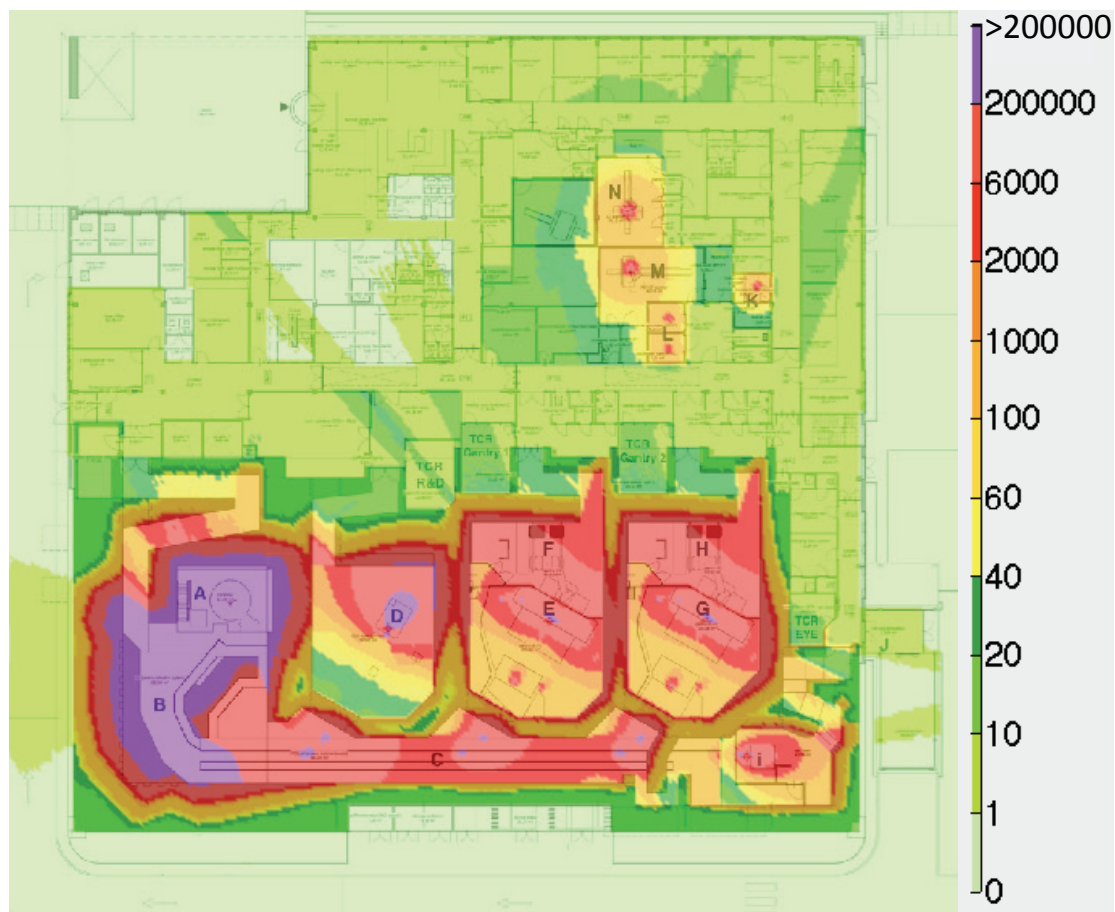


Fig. 14: Totale jaardosis in en rond HollandPTC door de protontherapie apparatuur, door de diagnostische beeldvorming, en inclusief bijdrage van het RID. Dosis in μSv per jaar. Voor deze plot is de verblijfsfactor bij het cyclotron (A), energie selectie systeem (B) en bundelgang (C), voor alle doelhoven naar de bunkers, en voor alle betonwanden op 1 gezet, ter begeleiding van het oog. In werkelijkheid is de verblijfsfactor voor deze delen van het gebouw 0. Verder gelden de verblijfsfactoren zoals weergegeven in Fig. 5.

Bijdragen in de totale jaardosis als gevolg van geactiveerde materialen binnen de protontherapie bunkers (toestelonderdelen e.d.) zijn vanwege de volgende overwegingen verwaarloosbaar ten opzichte van de dosis als gevolg van de therapiebundel:

- Wanden bevinden zich op afstanden van de bundel in de orde van enkele meters. Zoals in Bijlage A23 wordt aangetoond voor beton (het actuele wandmateriaal) is op die plaatsen de neutronenflux al zo laag dat activering hiervan niet leidt tot waarden boven de wettelijke vrijstellingsgrens.
- Het is lastig om voor de bundelonderdelen na het energiselectiegedeelte (de onderdelen na de degrader en collimator) een realistische afschatting te maken van de activering omdat deze veroorzaakt worden door de bundelverliezen in deze onderdelen en deze verliezen typisch zeer laag zijn. Ervaring met dergelijke onderdelen (zoals bijvoorbeeld een bundelcollimator in de oogbehandelruimte, waar wel verliezen in optreden) leert echter dat deze onderdelen weliswaar licht geactiveerd worden, doch dat het stralingsniveau dusdanig laag is dat zij direct manueel verplaatst kunnen worden.

- In het cyclotron en energieselectiesysteem zijn wel significante verliezen te verwachten. Onderzoek naar de activering hierdoor heeft aangetoond dat in deze onderdelen na drie jaar bedrijfstijd, stalingsniveaus van 6 mSv/h direct op het oppervlak geïnduceerd kunnen worden¹. Dit leidt tot een jaardosis op het oppervlak van 53 Sv/jaar. De jaardosis ten gevolge van de therapiebundel op die plaats bedraagt echter ongeveer 160 kSv/jaar, dus zo'n 3000 maal hoger (plaatselijk; in Figuur 14 aangegeven met een paarse kleur > 200 microSv/jaar).

Hoewel deze onderdelen zo actief kunnen worden dat zij alleen onder stralingshygiënisch toezicht (incidenteel) bewerkt kunnen worden, is de jaardosisverwachting ervan minstens 3 ordes van grootte lager dan in Figuur 14 is aangegeven en dragen zij dus niet significant bij aan deze dosis binnen en buiten de afschermingsbunker.

¹ Zie bijvoorbeeld G. Steen et al., *Activation of a 250 MeV SC-cyclotron for proton therapy*, MOPCP014. Proc. of CYLCOTRONS 2010, Lanzhou, China, p72-74

Modellering in verticale richting

In verticale richting zijn geen detailberekeningen daar de vectoren niet in één vlak liggen. Hieronder voeren we een worst-case berekening uit op basis van dezelfde formule als gebruikt voor de gedetailleerde afschermingsberekeningen in het horizontale vlak:

$$D = H_0 \cdot N \cdot \exp\left(\frac{-B\rho}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{1}{d^2}\right)$$

Met:

- D De jaardosis, in mSv jr⁻¹
- H₀ De bronterm, in mSv m² p⁻¹
- N Het aantal protonen dat stopt in de bron
- B De betondikte tussen bron en meetpunt, in m
- ρ De dichtheid van beton, in kg m⁻³
- λ De attenuatielengte (bij die energie en hoek), in m² kg⁻¹
- d De afstand tussen bron en meetpunt, in m

Ter verduidelijking benadrukken wij dat in deze formule geen build-up factor zit. Dit komt door de gevolgde aanpak in bijlage “A16 Afschermingsberekeningen Protonen”. Figuur 4 in die bijlage geeft aan dat de build-up is verdisconteerd in de manier waarop wij de verzwakking door beton, en de bronterm die daar bij hoort, hebben gemodelleerd.

De modelering in verticale richting is hetzelfde als gebruikt in bijlage A16. Met dien verstande dat voor parameter *N* de sommatie van alle protonen van de 4 verschillende energieën (100 MeV, 150 MeV, 180 MeV en 250 MeV) genomen is, en dat we aannemen dat al deze protonen een energie van 250 MeV hebben (worst case).

We presenteren vervolgens doorsnedes door elk van de bunkers en één of meerdere karakteristieke punten waarvoor we de jaardosis berekenen.

Tabel 1 hieronder geeft de muurdiktes in het horizontale vlak en verticale vlak weer. Fig. 15 geeft een overzichtsplattegrond van de gepresenteerde doorsnedes.

Tabel 1: Muur- en plafonddiktes (in meters) van het bunkergedeelte HollandPTC. Richting 'noord' is gedefinieerd als 'naar boven' in fig. 2 t/m fig. 6, dus richting het doolhof van de bunkers.

Locatie	Richting	Dikte
Cyclotron	Maze tot.	4.1
	Noord	4.1
	Oost	3.75
	West	4.0 - 5.4
	Zuid	4.0
	Dak	3.0
Dak ESS		4.0
		4.0
		4.0
		4.0
Beamline	Noord	1.7
	Oost	1.7
	Zuid	1.9
	Dak	2.0
R&D room	Maze noord muur	1.15
	Noord	4.0
	Oost	3.0
	Zuid	1.7
	West	3.75
	Dak	1.9
Gantry	Maze noord muur	1.15
	Noord	2.2
	Oost, gantry 1	2.0
	Oost, gantry 2	1.9 - 2.4
	Zuid bg	1.65
	Zuid 1e vrdp	2.4
	West, gantry 1	3.0
	West, gantry 2	2.0
	Dak	2.0
Oogbunker	Maze	nvt
	Noord	1.5+
	Oost	1.5 - 2.4
	Zuid	2.15
	Dak	2.0

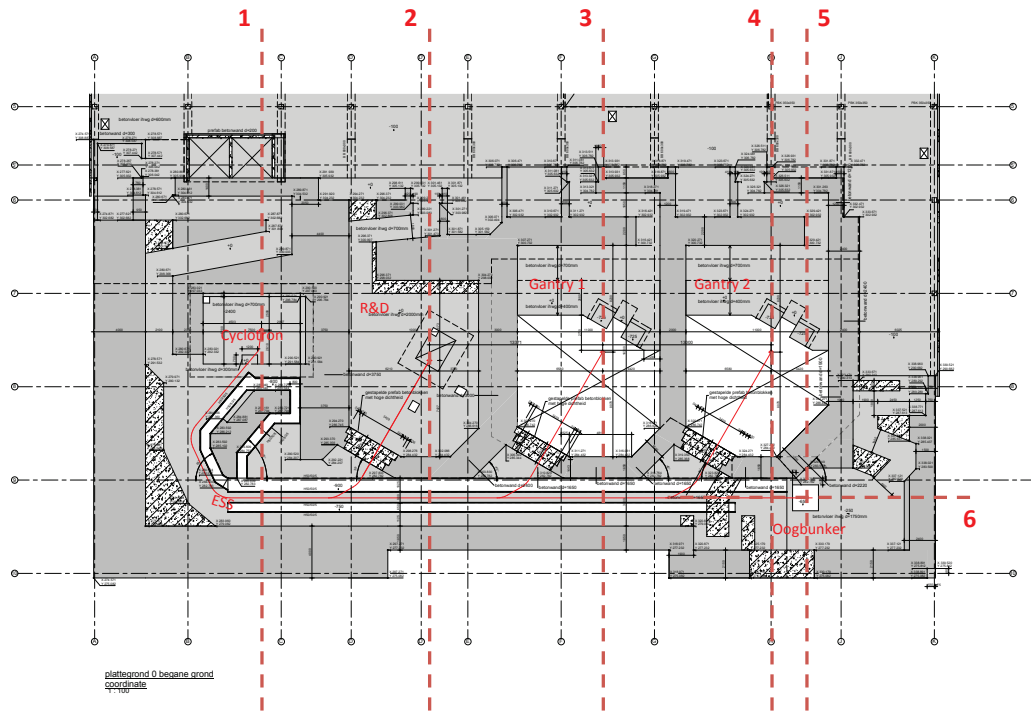


Fig. 15: Overzichtsplattegrond doorsnedes HollandPTC. Doorsnedes 5 en 6 hebben betrekking op de oogbunker.

Cyclotron en ESS:

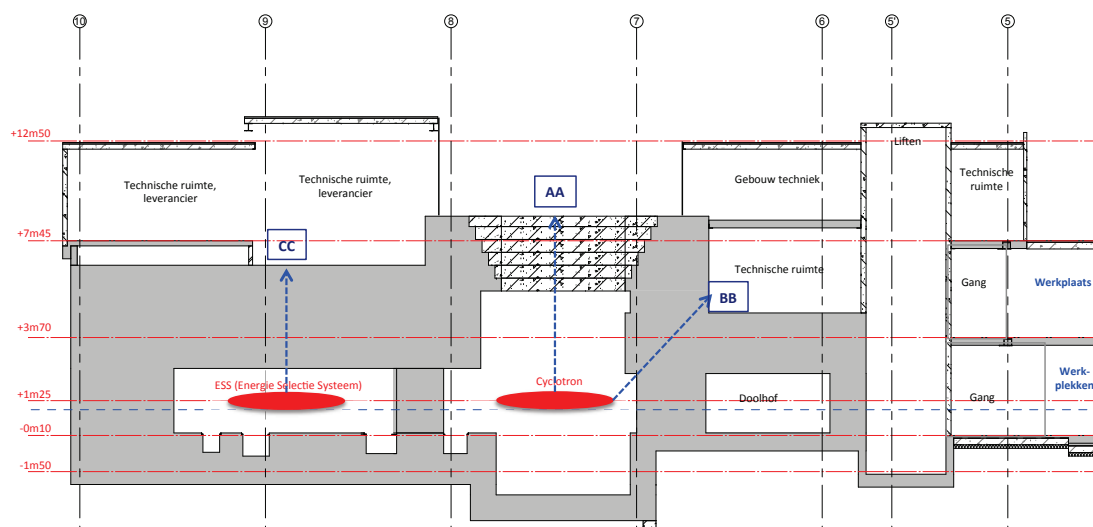


Fig. 16: Dwarsdoorsnede door cyclotron en ESS (doorsnede 1 in Fig. 15). De linker en rechter rode stip geven respectievelijk de locatie van het energie selectie systeem en het cyclotron aan.

Punt	Materiaal	Hoek graden	Proton energie MeV	Attenuatie			Betondikte B m	Betondichtheid ρ kg m ⁻³	Afstand d m	Punt dosis D mSv jr ⁻¹
				Bronterm H0 mSv m ² p ⁻¹	Attenuatie lengte λ m ² kg ⁻¹	p bij bron N #				
AA	Ijzer	90	250	6.20E-13	6.28E+02	5.64E+16	3.0	2.40E+03	6.8	0.01
BB	Ijzer	45	250	3.30E-12	9.29E+02	5.64E+16	4.0	2.40E+03	5.6	0.19
CC	Ijzer	90	250	6.20E-13	6.28E+02	4.64E+17	4.0	2.40E+03	4.9	0.00

We zijn er bij deze berekening van uit gegaan dat alle protonen die in het cyclotron en ESS verloren gaan de maximale energie hebben van 250 MeV. Dit is een worst-case benadering. De jaardosis is, zonder correctie voor verblijfsfactoren, alleen in punt BB hoger dan de operationele grenswaarde van 0.1 mSv (namelijk; 0.19 mSv). Deze technische ruimte zal zeer infrequent betreden worden. Met meenemen van de verblijfsfactor van 1/20 is hier de jaardosis 0.01 mSv en daarmee lager dan de operationele grenswaarde van 0.1 mSv. De jaardosis op het dak is met 0.01 mSv zeer laag en nog niet gecorrigeerd voor een verblijfsfactor van 1/20. Bovendien is deze verblijfsfactor van 1/20 voor op het dak een flinke overschatting ten opzichte van de praktijk.

Bovendien:

- Overige werkplekken en technische ruimtes bevinden zich op grotere afstand en/of achter meer beton. De extra afstand en attenuatie verlaagd de jaardosis.
- Niet meegenomen in deze berekening is de zelfafscherming van het cyclotron. De neutronendosis zal door minstens 30 cm ijzer (equivalent aan de afscherming van tenminste 50 cm beton) flink worden verminderd.

R&D bunker

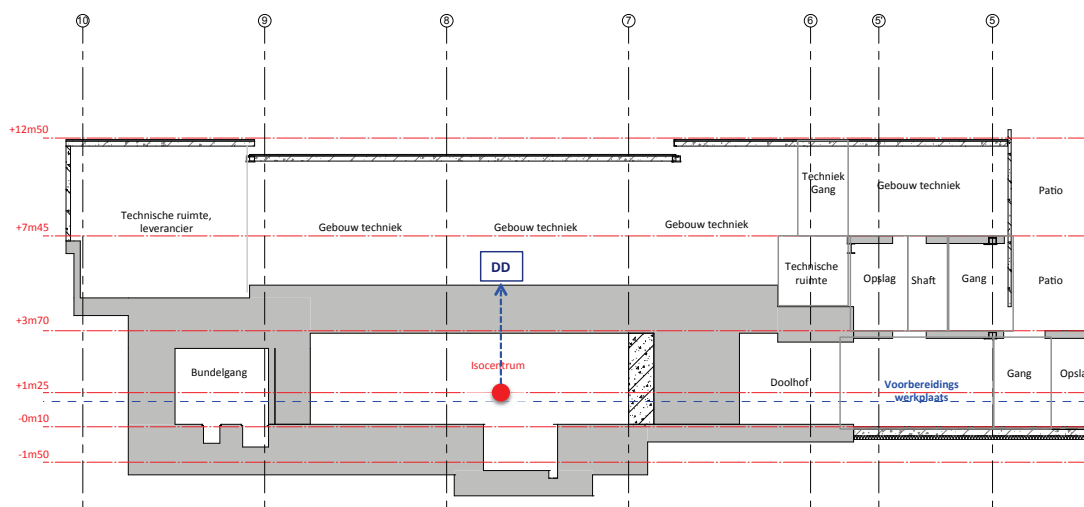


Fig. 17: Dwarsdoorsnede door de R&D bunker (doorsnede 2 in Fig. 15)

Punt	Materiaal	Hoek graden	Proton energie MeV	Bronterm H0 mSv m ² p-1	Attenuatie lengte λ m ² kg ⁻¹	p bij bron N #	Betondikte B m	Betondichtheid ρ kg m ⁻³	Afstand d m	Punt dosis D mSv jr ⁻¹
DD	ijzer	90	250	6.20E-13	6.28E+02	2.30E+15	1.9	2.40E+03	4	0.06

Het betreft hier een horizontale bundellijn. We zijn er van uit gegaan dat alle protonen de maximale protonenenergie hebben. Dit is een worst-case benadering. De verwachte jaardosis boven het dak van de R&D bunker is minder dan de operationele grenswaarde van 0.1 mSv. Met meenemen van een verblijfsfactor van ten hoogste 1/20 (zie sectie “cyclotron en ESS” hierboven) is de verwachte jaardosis nog veel lager.

Bovendien: overige werkplekken en technische ruimtes bevinden zich op grotere afstand en/of achter meer beton. De extra afstand en attenuatie verlaagt de jaardosis.

Gantries

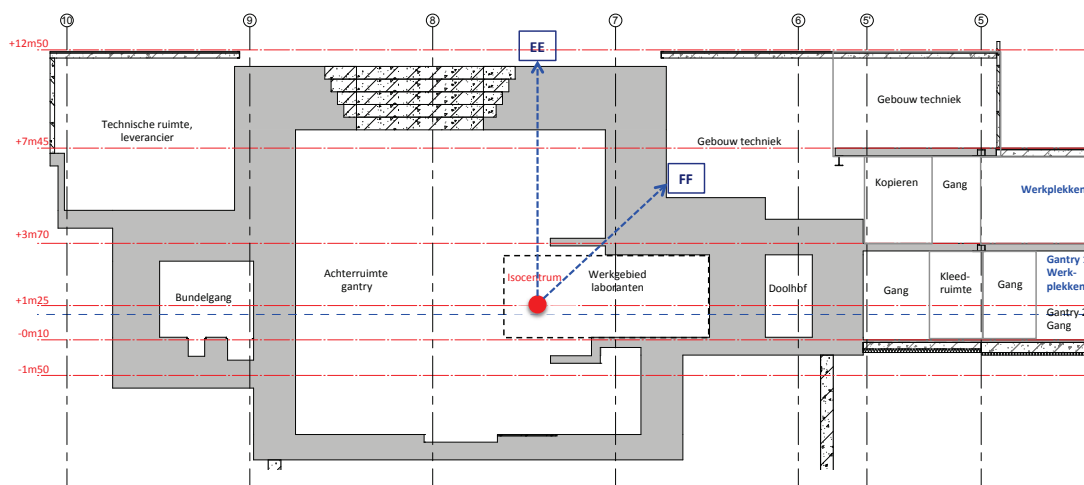


Fig. 18: Dwarsdoorsnede door de gantry bunker (doorsnede 3 in Fig. 15). De rode stip geeft de locatie van het isocentrum aan, waar de protonen in de patiënt stoppen.

Punt	Materiaal	Hoek graden	Proton energie MeV	Attenuatie			Betondikte B m	Betondichtheid ρ kg m-3	Afstand d m	Puntdosis D mSv jr-1
				Bronterm H0 mSv m2 p-1	Attenuatie lengte λ m2 kg-1	p bij bron N #				
EE	Ijzer	0	250	9.00E-12	1.09E+03	4.67E+14	2.0	2.40E+03	9.2	0.61
EE'	Ijzer	90	250	6.20E-13	6.28E+02	9.33E+14	2.0	2.40E+03	9.2	0.00
FF	Ijzer	45	250	3.30E-12	9.29E+02	1.40E+15	3.5	2.40E+03	6.5	0.01

Het betreft een gantry. We zijn er van uit gegaan dat alle protonen de maximale protonenenergie hebben. Dit is een worst-case benadering. Voor punt EE gaan we ervan uit dat de bundel een kwart van de tijd recht omhoog straalt. De overige tijd straalt de bundel in het horizontale vlak of naar beneden (EE'). De totale jaardosis in punt EE is dan 0.15 mSv $((0.61+0.00+0.00+0.00) / 4)$. Met correctie voor de verblijfsfactor ($< 1/20$ voor punt EE, zie sectie "cyclotron en ESS" hierboven) is de jaardosis overal ruim lager dan de operationele grenswaarde van 0.1 mSv.

Bovendien: overige werkplekken en technische ruimtes bevinden zich op grotere afstand en/of achter meer beton. De extra afstand en attenuatie verlaagt de jaardosis.

Oogbunker

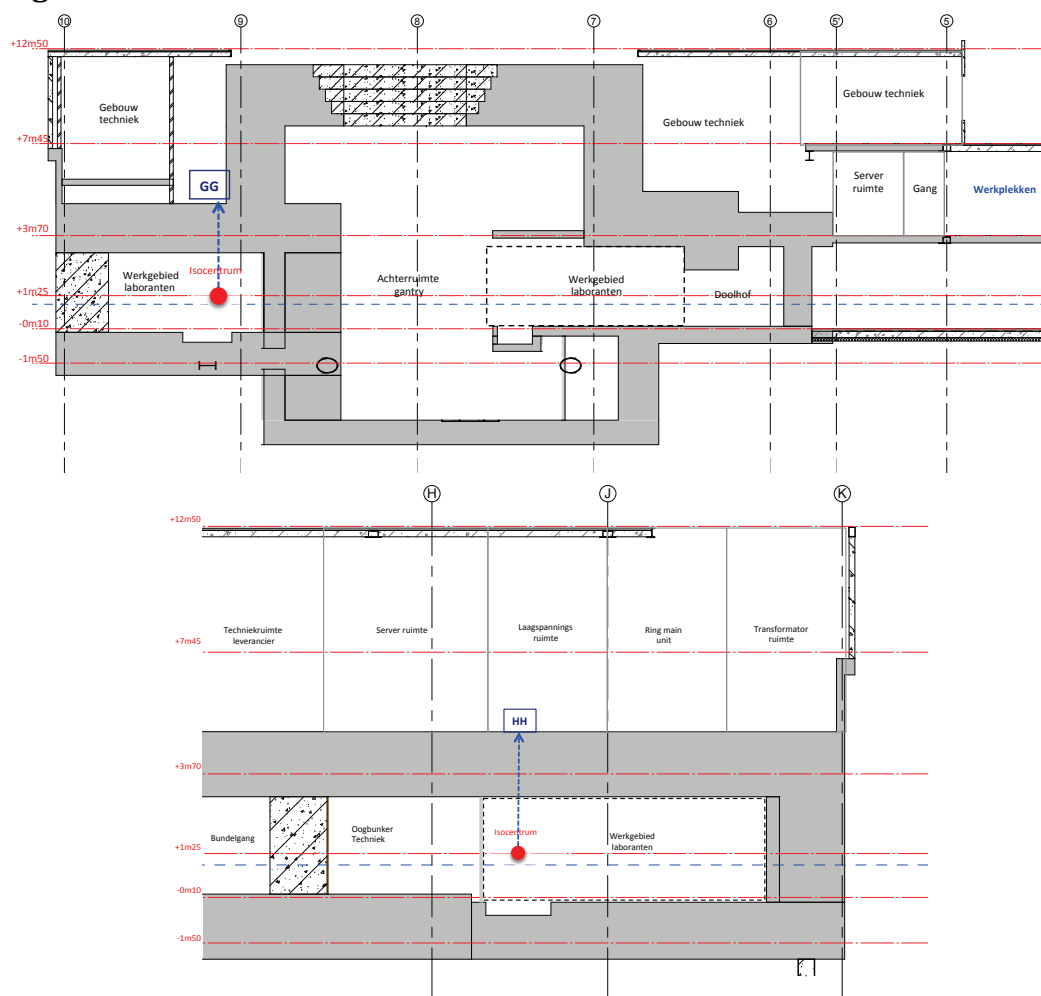


Fig. 19: Dwarsdoorsnede door de oogbunker (doorsnedes 5 en 6 in Fig. 15). De rode stip geeft de locatie aan waar de protonen in de patiënt stoppen.

Punt	Materiaal	Hoek graden	Proton energie MeV	Attenuatie			Betondikte B m	Betondichtheid ρ kg m ⁻³	Afstand d m	Punt dosis D mSv jr ⁻¹
				Bronterm H0 mSv m ² p ⁻¹	Attenuatie lengte λ m ² kg ⁻¹	p bij bron N #				
GG	ijzer	90	70	2.04E-14	4.63E+02	3.10E+14	2.0	2.40E+03	3.5	0.00
HH	ijzer	90	70	2.04E-14	4.63E+02	3.10E+14	2.0	2.40E+03	3.5	0.00

Het betreft hier een horizontale bundellijn. De jaardosis boven de oogbunker is minder dan de operationele grenswaarde van 0.1 mSv per jaar. Voor de technische ruimtes boven de oogbunker geldt een verblijfsfactor van 1/20 die waarmee de jaardosis nog lager is.

Bovendien:

- Overige werkplekken en technische ruimtes bevinden zich op grotere afstand en/of achter meer beton. De extra afstand en attenuatie verlaagd de jaardosis
- Het dak boven de oogbunker ligt verder verwijderd dan punten GG en HH. De jaardosis is daar dus nog lager. Bovendien dient deze nog gecorrigeerd te worden voor een verblijfsfactor van 1/20, zie sectie "cyclotron en ESS" hierboven)

Ruimteclassificaties HollandPTC

Het Besluit stralingsbescherming, artikel 83, bepaalt dat:

1. De ondernemer zorgt ervoor dat, indien dat nodig is met het oog op de bescherming tegen ioniserende straling:

a. een ruimte wordt aangemerkt als gecontroleerde zone, indien:

1°. de mogelijkheid door een werknemer in de ruimte te ontvangen dosis gelijk is aan een effectieve dosis die hoger is dan 6 mSv in een kalenderjaar of een equivalente dosis die hoger is dan drie tiende van de dosis, genoemd in artikel 77, eerste lid, onder b, of

2°. er een mogelijkheid is van verspreiding van radioactieve stoffen vanuit de ruimte zodanig dat personen een dosis hoger dan een effectieve of equivalente dosis, genoemd in artikel 76, kunnen ontvangen;

b. een ruimte wordt aangemerkt als bewaakte zone, indien de mogelijkheid door een werknemer in de ruimte te ontvangen effectieve dosis hoger is dan 1 mSv in een kalenderjaar en lager dan 6 mSv in een kalenderjaar of de equivalente dosis hoger is dan die genoemd in artikel 76, onder b, en lager dan die genoemd onder a, ten eerste.

De ruimteclassificaties van HollandPTC voldoen hier aan. Dit betekent voor de zonering van HollandPTC het volgende:

Cyclotron en bundelgang

Conform artikel 2.B.1 van de huidige KEW vergunning van de TU Delft staat het cyclotron in een gecontroleerde zone. Ook de bundelgang is gecontroleerde zone.

Protonentherapie bunkers

Conform artikel 84 van het Besluit Stralingsbescherming, inclusief toelichting, zijn versnellerruimtes gecontroleerde zones. Dit geldt voor de vier protonentherapie bunkers, te weten de R&D bunker, twee gantries en de oogbunker.

Diagnostische CT (in beeldvormingsblok)

Alleen binnen de CT-ruimte is het mogelijk een dosis hoger dan 1 mSv per jaar op te lopen. Deze wordt gekwalificeerd als bewaakte zone. Voor de nevenruimtes geldt dit niet.

PET-CT

Conform artikel II.A.15 van de huidige KEW vergunning van de TU Delft zijn de PET-CT ruimte, de toedieningsruimtes en de nevenruimtes geclassificeerd als bewaakte zones. Het hotlab is alleen in gebruik voor de tijdelijke opslag van voorverpakte radiofarmaca en is van klasse C. Het is daarmee, conform de Bijlage Radionucliden-laboratoria, een bewaakte zone.

Overige Radionucliden-laboratoria

De twee radionucliden laboratoria op de eerste verdieping van HollandPTC zijn van klasse C. Dit zijn, conform de Bijlage Radionucliden-laboratoria, bewaakte zones.

Opslagruimte

Bij de ingang van het doolhof naar het cyclotron bevindt zich een ruimte voor de eventuele opslag van materiaal dat geactiveerd wordt als onderdeel van de protonetherapie behandeling. Dit is een bewaakte zone.

Overige ruimtes

Voor de overige ruimtes van HollandPTC geldt geen ruimteclassificatie. De leverancierskluis voor het geleverde F-18 (voor de PET-scanner) is geen ruimte waarin personen zich kunnen bevinden. De kluis is minstens 60 minuten brandwerend en heeft een afdoende afscherming opdat voor de ruimte waarin deze kluis staat geen ruimteclassificatie geldt.

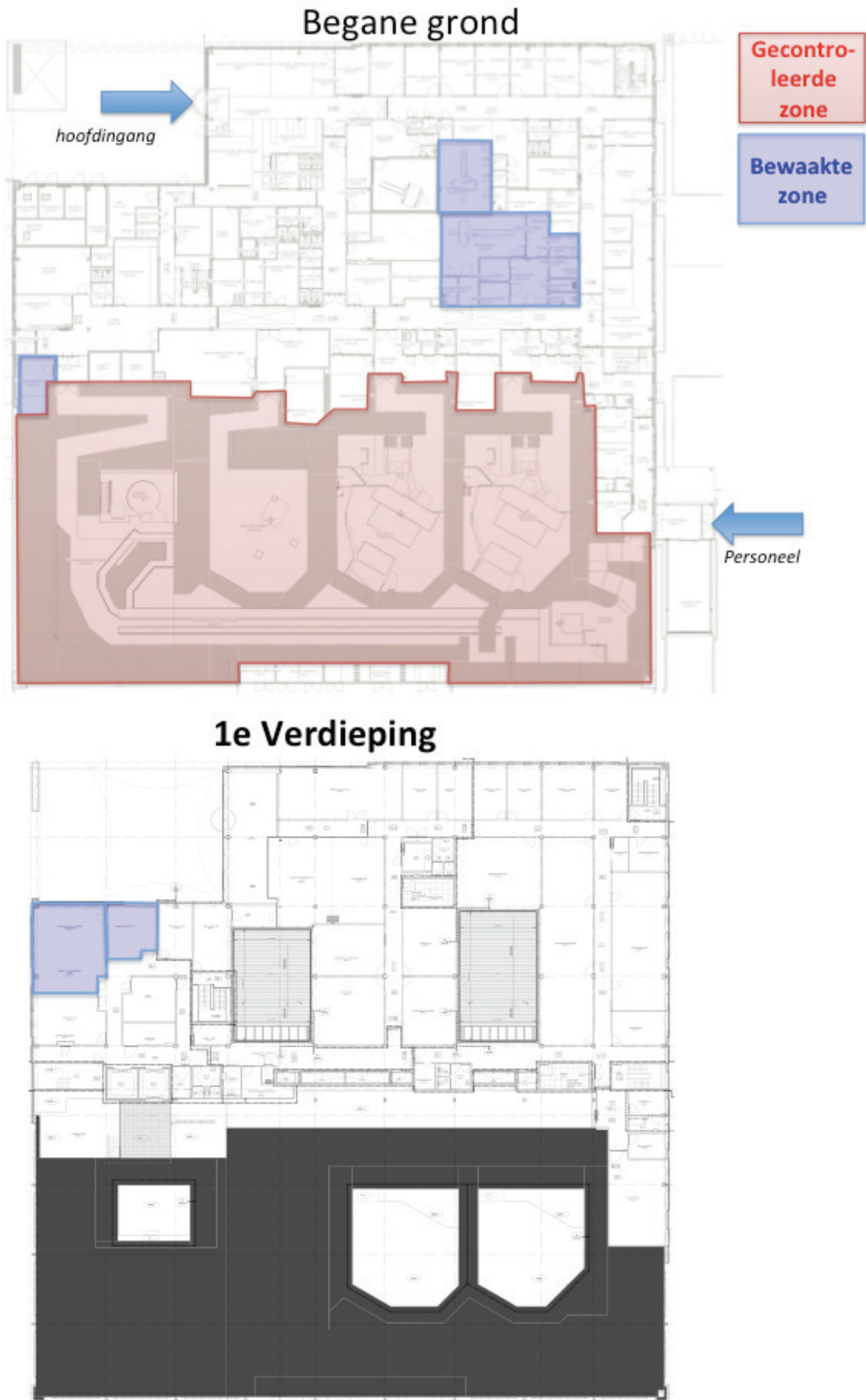


Fig. 20: Ruimteclassificaties HollandPTC vanuit stralingsbeschermingsoogpunt. Voor de tweede verdieping van HollandPTC geldt géén ruimteclassificatie.