

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

**Revisie van Bijlage A16:**

**Afschermingsberekeningen  
protonen**

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 gebouwwontwerp. Om deze reden was het nodig om alle (dosis)berekeningen opnieuw uit te voeren. Dit biedt tevens de gelegenheid om de nieuwste inzichten omtrent relevante parameters mee te nemen om zo tot realistischere schattingen te komen, alsmede om onvolkomenheden in de eerdere versie van deze bijlage te adresseren.

### Samenvatting van de wijzigingen

#### *Algemeen*

- Alle figuren zijn aangepast om de wijzigingen in het gebouwwontwerp te reflecteren.

#### *Bundelgebruik*

- Er is, anders dan in de vorige versie van deze bijlage, expliciet en in detail rekening gehouden met het bundelgebruik dat nodig is om het geplande klinische programma uit te kunnen voeren. De nieuwe gekozen protonentechnologie is met name gespecialiseerd in 'pencil-beam scanning' waarbij de werkelijke beam-on tijd aanzienlijk lager is dan de totale behandeltime. Dit komt neer op 300 uur/jaar beam-on tijd bij 1960 uur/jaar behandeltime voor de gantries en 20 uur/jaar beam-on tijd voor de oogbunker. Dit is in de bijlage nader toegelicht. Daarmee is de "worst case" benadering uit de eerdere vergunnings-aanvraag vervangen door een realistische schatting. Deze aanpassing is niet van toepassing op de oogbundellijn omdat hier geen pencil-beam scanning plaatsvindt.
- In onze vorige aanvraag pasten we in Bijlage A22 "Jaardosis Ruimten" zogenaamde correctiefactoren toe. Deze factoren hebben we omwille van de inzichtelijkheid nu naar voren gehaald en direct betrokken in deze bijlage bij de berekening van de jaardosis. Bovendien hebben we de factoren opnieuw tegen het licht gehouden:
- De **veiligheidsfactor** is vervallen. We gaan uit van het daadwerkelijk berekende stralingsniveau waardoor er geen extra veiligheidsmarge ingebouwd hoeft te worden. De gebruikte berekeningsmethode resulteert al in een overschatting van de jaardosis.
- De **aperturefactor** is vervallen. Nieuwe berekeningen (zie onder) geven namelijk aan dat het gebruik van apertures niet leidt tot een hogere dosis buiten de bunkers,
- De **overige factor** is vervallen: voor de R&D bundellijn op basis van nieuwe berekeningen (zie onder); voor de oogbunker omdat we er niet langer van uitgaan dat deze bundellijn voor onderzoek gebruikt zal worden.

#### *Bepaling brontermen*

- De brontermen zijn opnieuw berekend op basis van de technische specificaties van het nieuwe beoogde cyclotron en de nieuwe bundellijngeometrie.
- De invloed van de betonsamenstelling is nader gespecificeerd en expliciet berekend.
- Uitgelegd wordt waarom er niet meer gecorrigeerd wordt voor neutronen die het gevolg zijn van protonen die niet in de patiënt maar in meetapparatuur of fantomen gestopt worden. Deze correctie in de vorm van zowel 'aperturefactor' als 'overige factor' was onderdeel van de vorige versie van de Bijlage maar komt te vervallen.

**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 A16 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

HollandPTC heeft m.b.t. de afscherming van protonen de gekozen betondiktes (zie Fig. 1) gecontroleerd via berekeningen. Deze berekening bestaat uit de volgende stappen:

1. Bepaling workload in (het isocentrum van) elk van de behandelbunkers.
2. Terugrekenen naar bundelverliezen langs de bundellijn, van isocentrum terug naar het cyclotron. Elke locatie met verlies van protonen is een sub-bron.
3. Bepalen brontermen voor elk van deze sub-bronnen.
4. Berekenen dosisbijdrage van elke sub-bron in elk punt binnen en rond HollandPTC, rekening houdend met de afscherming.
5. Sommatie over alle sub-bronnen.

In de volgende secties lichten wij elk van deze stappen in detail toe.

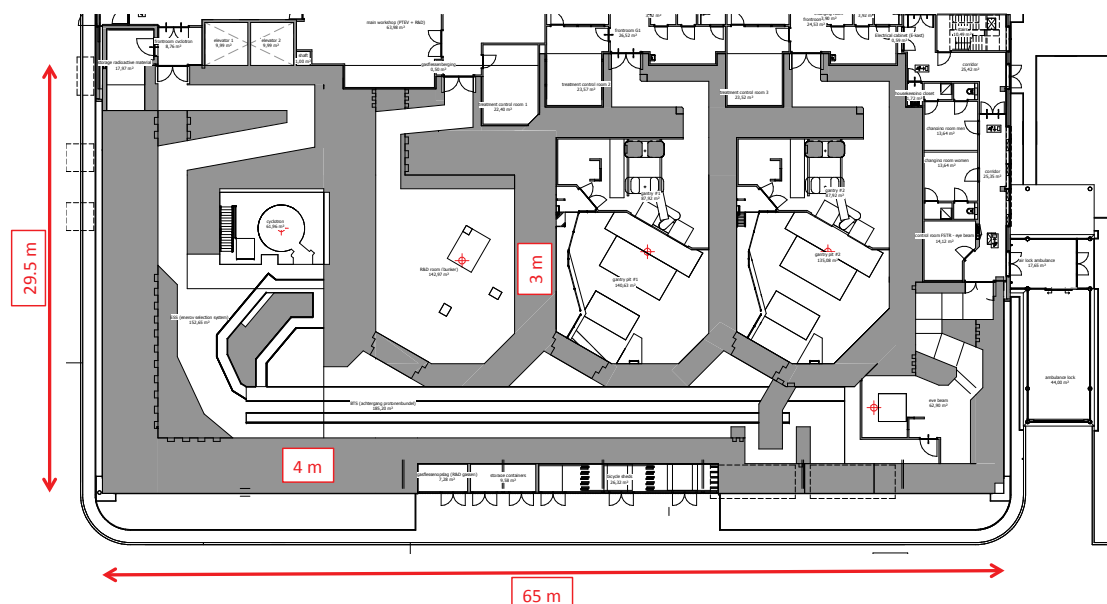


Fig. 1: Afmetingen bunkerdeel HollandPTC, inclusief twee muurdiktes.

## 1. Bepalen bundelgebruik

Tabel 1: Het klinisch en R&D programma van HollandPTC.

Patient Group	Description	# patients	Dose per patient (Gy)	Total dose (Gy)	Tumor volume (liter)	QA %	Hypo-fract. %	Workload Gy * liter / year	0-7.5	7.5-15	15-21	21-38	R&D %	GTR1 %	GTR2 %	Eye %
									100 MeV 32.00 %	150 MeV 10.24 %	180 MeV 11.16 %	250 MeV 13.64 %				
1	Children CSI + narcose	60	60	3600	1	25%	25%	5400		90%	10%			50%	50%	
2	Skull based / Head and Neck	290	70	20300	0.25	25%	25%	7613		70%	30%			50%	50%	
3	Lung conventional	100	60	6000	0.5	25%	25%	4500		30%	50%	20%		50%	50%	
4	Liver and Lung SBRT	50	50	2500	0.25	25%	25%	938		40%	60%			50%	50%	
5	Breast	100	54	5400	0.1	25%	25%	810		100%				50%	50%	
6	Gastrointestinal / pelvic / etc	100	50	5000	2	25%	25%	15000		10%	30%	60%		50%	50%	
7	Saromas	50	50	2500	1.5	25%	25%	5625			60%	40%		50%	50%	
8	Prostate	100	70	7000	0.5	25%	25%	5250			30%	70%		50%	50%	
9	Other	100	50	5000	0.5	25%	25%	3750			70%	30%		50%	50%	
10	R&D (4h continuous beam per week, single spot)		35000	35000	1	0%	0%	35000								
11	Eyes	50	70	3500	0.064	25%	0%	280	100%	40%	30%	30%	90%	5%	5%	100%
12	Eyes extra	50	70	3500	0.064	25%	0%	280	100%							100%

In overleg met de artsen en de onderzoekers is het bundelgebruik vastgesteld zoals weergegeven in Tabel 1. Per patiëntgroep is het aantal patiënten bepaald, alsmede de typische dosis, het typische volume dat bestraald dient te worden bepaald, en welk percentage van deze patiënten in welke bunker behandeld wordt. Bovendien is de typische energie van de protonenbundel gegeven. Dit is vertaald naar het totaal aantal protonen, van drie verschillende energieën, die per bunker op jaarbasis richting het isocentrum afgegeven worden (in nA\*h). Het gebruik van de bundel in de bunkers is gecorrigeerd voor kwaliteitscontrolemetingen (25% extra bundelgebruik in gantries en oogbunker), en voor een waarschijnlijke toename in hypofractionering in de gantries. Deze laatste factor is ook een 25% toename en heeft te maken met dat voor een deel van de patiënten het aantal af te geven fracties lager kan gaan worden, met daarbij een hogere dosis per fractie. Dit heeft geen effect op het totaal aantal fracties dat met de gantries afgegeven kan worden en leidt dus tot een hogere workload.

Het bundelgebruik van het klinisch programma en het onderzoeksprogramma is verdeeld over de verschillende bundelenergieën (100 MeV, 150 MeV, 180 MeV en 250 MeV) en over de verschillende bunkers.

De ontbrekende stap is het aantal protonen dat nodig is om een dosis van 1 Gy af te geven aan 1 liter ( $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ). Voor de gebruikte energieën staan deze getallen in Tabel 2. De waarden voor 100 MeV hebben betrekking op de ooglijn. Deze maakt gebruik van de passive-scattering methode voor protonentherapie, in plaats van pencil-beam scanning. Bij deze manier van protonen bestraling gaan meer protonen verloren.

Tabel 2: Aantal protonen ( $w$ ) benodigd om 1 Gy af te geven naar 1 liter.

Range (cm)	E (MeV)	$w(1 \text{ Gy/liter})$ (nC)
0 - 7.5	100	32.00
7.5 - 15	150	10.24
15 - 21	180	11.16
21 - 38	250	13.64

Hiermee is het bundelgebruik vertaald naar het totaal aantal protonen, van vier verschillende energieën, die per bunker op jaarbasis richting het isocentrum afgegeven worden (in nA\*h/jr). Deze staan in Tabel 3.

Tabel 3: Workload per bunker en per energie, in nA\*h/yr

	100 MeV	150 MeV	180 MeV	250 MeV
R&D	0	35.84	29.30	35.81
Gantry 1	0	22.22	29.08	34.10
Gantry 2	0	22.22	29.08	34.10
Eye	4.98	0	0	0

## Correctiefactoren

Workloadfactor: Zoals hierboven beschreven, betreft dit voor het klinisch bundelgebruik (gantries en oogbunker) een factor 1.25 voor kwaliteits-controlemetingen. We hebben met de artsen opnieuw het mogelijk gebruik van additionele hypo-fractionering tegen het licht gehouden. Voor de gantries resulteert dit ook in factor 1.25.

## 2. Verliezen langs de bundellijn

Voor afgifte van een homogene dosis aan het hierboven beschreven volume, zijn protonen van verschillende energieën nodig, om de zogenaamde spread-out Bragg peak te creëren. Voor de afschermingsberekening gaan we uit van de *worst case*. Oftewel, per energie-bin nemen we aan dat alle protonen de maximum energie hebben op het moment dat ze stoppen in de patiënt of als ze onderweg van het cyclotron naar het isocentrum verloren gaan in materiaal van de bundellijn. Dit leidt tot de grootste bronterm, en de laagste afschermende werking van beton.

Bundelverliezen in het cyclotron, in de patiënt en tijdens transport van het cyclotron naar de patiënt zijn gemodelleerd als sub-bronnen. De verliezen aan getransporteerde protonen (in afbuigmagneten, energie selectie systeem, etc.) zijn bekend. Het bundelgebruik in een bunker (in nA\*h/jaar) kan hiermee teruggerekend worden naar het totale bundelgebruik op enig punt langs de bundellijn en in het cyclotron (ook in nA\*h/jaar). Daarmee dient deze workload als basis voor de afschermingsberekeningen. Fig. 2 en Tabel 4 geven een voorbeeld van enkele van deze bronnen.

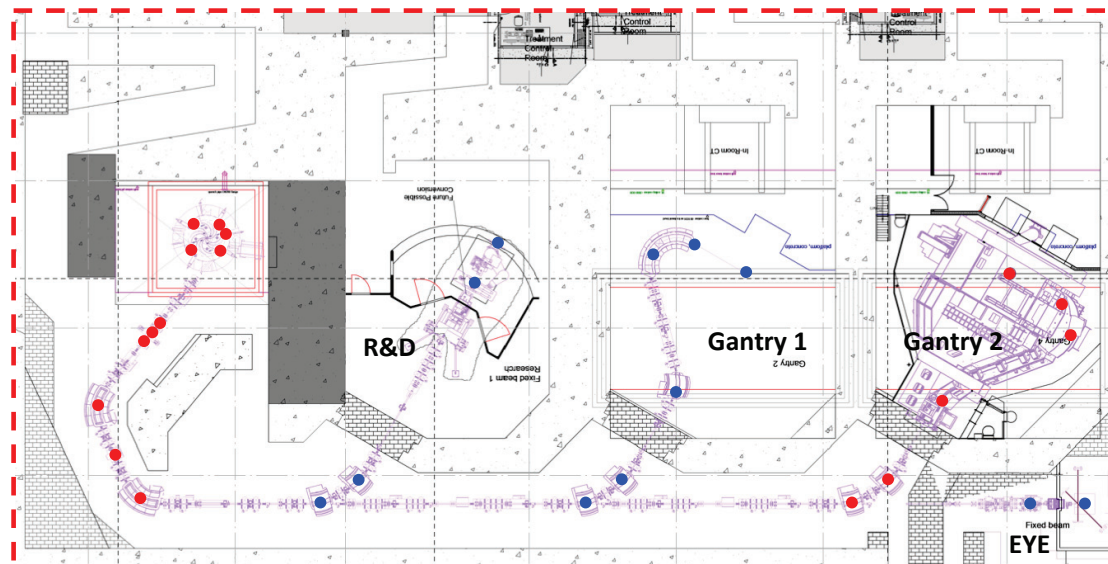


Fig. 2: Rode stippen: Posities van sub-bronnen voor gantry 2 voor een gantryhoek van 270 graden. Blauwe stippen: sub-bronnen voor de overige bunkers. Niet weergegeven zijn de posities van de sub-bronnen voor overige gantry-hoeken. De grootste verliezen treden op in het energie-selectie systeem, de zes rode stippen linksonder in de figuur.

Tabel 4: Een selectie van sub-sources voor het gebruik van gantry 2. De vierde kolom geeft de jaarlijkse workload weer, in het isocentrum, voor de gespecificeerde protonen energie. †De twee kolommen 'protons stopped at sub-source' en 'protons upstream of sub-source' geven een relatief aantal protonen; relatief t.o.v. de workload in het isocentrum. Bijvoorbeeld voor sub-source 156: Voor afgifte van 1 nA\*h/yr in het isocentrum (0.25 nA\*h/yr voor vier gantry richtingen) is er 7.73 nA\*h/yr upstream van de positioning collimator en gaat er 1.37 nA\*h/yr aan protonen verloren in deze positioning collimator.

Materials: 1 = Fe, 2 = C, 3 = Cu, 4 = Ta, 5 = Ni, 6 = Brass, 7 = Tissue													
Source (#)	Beamline	Proton energy at iso (MeV)	Workload at iso (nA*h/yr)	Description	Material	sub-source position, x (m)	sub-source position, y (m)	sub-source angle horizontal (degrees)	sub-source angle vertical (degrees)	Proton energy at sub-source (MeV)	protons stopped at sub-source†	Sub-source 'transparency' (fraction)	Protons upstream of sub-source†
133	Gantry 2	250	34.09	Patient at isocenter, gantry at 90	7	48.52	13.48	-30	0	250	2.50E-01	1.00E+00	2.50E-01
134				Nozzle, gantry at 90	3	45.98	15.00	-30	0	250	6.95E-04	9.97E-01	2.51E-01
135				Dipole 12 (135), gantry at 90	3	44.24	15.00	37.5	0	250	6.96E-04	9.97E-01	2.51E-01
136				Dipole 11 (45), gantry at 90	3	45.18	7.60	82.5	0	250	6.96E-04	9.97E-01	2.52E-01
137				Patient at isocenter, gantry at 180	7	48.52	13.48	60	90	250	2.50E-01	1.00E+00	2.50E-01
138				Nozzle, gantry at 180	3	48.52	13.48	60	90	250	6.95E-04	9.97E-01	2.51E-01
139				Dipole 12 (135), gantry at 180	3	47.52	11.80	60	0	250	6.96E-04	9.97E-01	2.51E-01
140				Dipole 11 (45), gantry at 180	3	45.18	7.60	60	0	250	6.96E-04	9.97E-01	2.52E-01
141				Patient at isocenter, gantry at 270	7	48.52	13.48	150	0	250	2.50E-01	1.00E+00	2.50E-01
142				Nozzle, gantry at 270	3	51.08	11.92	150	0	250	6.95E-04	9.97E-01	2.51E-01
143				Dipole 12 (135), gantry at 270	3	52.04	10.00	67.5	0	250	6.96E-04	9.97E-01	2.51E-01
144				Dipole 11 (45), gantry at 270	3	47.38	7.60	37.5	0	250	6.96E-04	9.97E-01	2.52E-01
145				Patient at isocenter, gantry at 0	7	48.52	13.48	60	-90	250	2.50E-01	1.00E+00	2.50E-01
146				Nozzle, gantry at 0	3	48.52	13.48	60	-90	250	6.95E-04	9.97E-01	2.51E-01
147				Dipole 12 (135), gantry at 0	3	47.52	11.80	60	0	250	6.96E-04	9.97E-01	2.51E-01
148				Dipole 11 (45), gantry at 0	3	45.18	7.60	60	0	250	6.96E-04	9.97E-01	2.52E-01
149				Dipole 10 (30)	3	42.56	3.34	45	0	250	2.78E-03	9.97E-01	1.01E+00
150				Dipole 9 (30)	3	40.80	2.20	15	0	250	2.78E-03	9.97E-01	1.01E+00
151				Dipole 2 (ESS out)	3	5.66	2.20	-30	0	250	1.16E-02	9.89E-01	1.03E+00
152				Energy slit	3	4.44	4.60	-65	0	250	7.04E-02	9.36E-01	1.10E+00
153				Dipole 1 (ESS in)	3	3.56	7.00	-90	0	250	1.16E-02	9.90E-01	1.11E+00
154				Divergence Collimator	3	5.60	10.00	-135	0	250	2.70E+00	2.91E-01	3.80E+00
155				Degrader	2	6.10	10.40	-135	0	250	2.55E+00	5.99E-01	6.35E+00
156				Positioning Collimator	3	6.50	10.84	-135	0	250	1.37E+00	8.22E-01	7.73E+00
157				Cyclotron Focussing bar M3	3	9.38	15.98	-31	0	250	1.16E+00	8.70E-01	8.89E+00
158				Cyclotron D4	3	9.84	15.46	-69	0	250	1.93E-01	9.79E-01	9.08E+00
159				Cyclotron D3	3	8.54	16.04	21	0	250	1.93E-01	9.79E-01	9.27E+00
160				Cyclotron D2	3	7.98	14.70	111	0	250	1.93E-01	9.80E-01	9.47E+00
161				Cyclotron D1	3	9.30	14.18	-159	0	250	1.93E-01	9.80E-01	9.66E+00
162		180	29.07	Patient at isocenter, gantry at 90	7	48.52	13.48	-30	0	180	2.50E-01	1.00E+00	2.50E-01
163				Nozzle, gantry at 90	3	45.98	15.00	-30	0	180	4.78E-03	9.81E-01	2.55E-01
164				Dipole 12 (135), gantry at 90	3	44.24	15.00	37.5	0	180	4.78E-03	9.82E-01	2.60E-01
165				Dipole 11 (45), gantry at 90	3	45.18	7.60	82.5	0	180	4.78E-03	9.82E-01	2.64E-01
166				Patient at isocenter, gantry at 180	7	48.52	13.48	60	90	180	2.50E-01	1.00E+00	2.50E-01
167				Nozzle, gantry at 180	3	48.52	13.48	60	90	180	4.78E-03	9.81E-01	2.55E-01
168				Dipole 12 (135), gantry at 180	3	47.52	11.80	60	0	180	4.78E-03	9.82E-01	2.60E-01
169				Dipole 11 (45), gantry at 180	3	45.18	7.60	60	0	180	4.78E-03	9.82E-01	2.64E-01

Voor de gantries hebben we de vier ordinale gantryhoeken gemodelleerd (0°, 90°, 180° en 270°). Fig. 2 geeft de bronposities weer voor een gantryhoek van 270 graden, waarbij de bundel dus naar "linksboven" in de tekening straalt.

Voor alle bunkers en energieën berekend hoeveel protonen van welke energie verloren gaan in de verschillende sub-bronnen. Van al deze sub-bronnen zijn zowel de locatie bekend als het materiaal waarin de protonen stoppen, als de richting waarin deze protonen stoppen.

### 3. Bepalen brontermen

De derde stap is het omzetten van de verliezen (aan protonen) naar brontermen en naar de daarbij behorende afschermende werking van beton.

#### Berekeningen

Basis van de afschermingsberekeningen is de Point Kernel Method die uitgaat van een effectieve puntbron van secundaire neutronen t.g.v. protonen met energie  $E_p$  op een dun target, zie Fig. 3. Voor de verzwakking van de secundaire neutronen in het afschermingsmateriaal kan op een diepte  $d$  cm in het materiaal onder een hoek  $\theta$  op  $r$  cm van de effectieve puntbron voor de dosis geschreven worden [Chao 1999]:

$$H(E_p, \Theta, d(\Theta)) = \frac{H_0(E_p, \Theta)}{r^2} \exp\left[-\frac{d(\Theta)}{\lambda(E_p, \Theta)}\right] \quad (1)$$

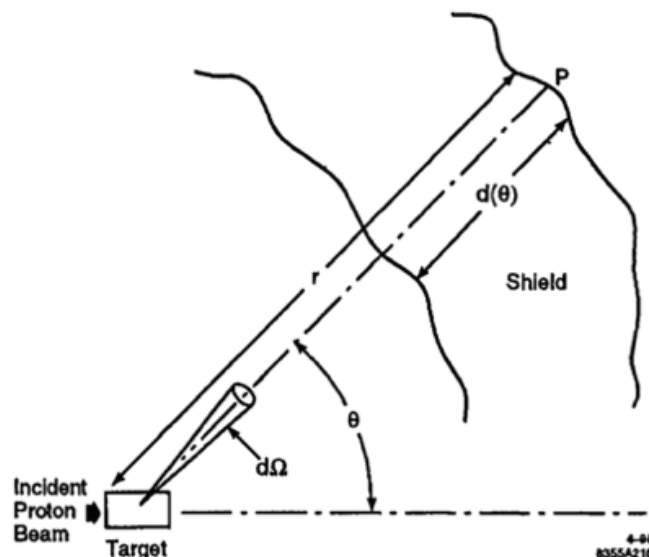


Fig. 3: Weergave van de Point Kernel Methode [Chao 1999].

Verschillende Monte Carlo programma's zijn beschikbaar om de parameters  $H_0(E_p, \theta)$  en  $\lambda(E_p, \theta)$  te bepalen voor verschillende targetmaterialen en bij verschillende protonenergieën. Agosteo et al. [Agosteo 1998, 2007] vergeleken twee van deze Monte Carlo programma's, FLUKA en LCS, met elkaar en in hoeverre de uitkomsten overeen kwamen met experimentele waarden uit de literatuur. Voor de afschermingsberekeningen gepresenteerd in dit rapport werd gebruik gemaakt van de Monte Carlo code MCNPX<sup>1</sup> van Los Alamos National Laboratory in de VS. In de literatuur zijn veel vergelijkingen te vinden tussen MCNPX en FLUKA. Als referentie voor onze aanpak met MCNPX werden de uitkomsten voor  $H_0(E_p, \theta)$  en  $\lambda(E_p, \theta)$  voor 250 MeV protonen op een Fe-target met beton afscherming vergeleken met de studies van Agosteo et al. [Agosteo 1998, 2007] en van Teichmann [Teichmann 2006], welke laatste gebruik maakte van MCNPX. Teichmann et al. [Teichmann 2007] heeft de voorspellingen van de Monte Carlo code MCNPX getoetst in een experimentele opstelling bij het cyclotron van het Paul Scherrer Institute te Villigen, Zwitserland. Voor neutronen valt de voorspelde dosis van MCNPX binnen de onzekerheid van de metingen, voor gamma's is de voorspelde dosis een factor 2-3 lager dan de gemeten dosis maar kleiner dan de neutronen dosis. Uit een eigen ijkingprocedure met MCNPX voor een Am-Be bron en verschillende merken neutronendetectors blijkt een goede overeenstemming te zijn tussen de voorspelde en de gemeten waarden. Hierbij dient opgemerkt te worden dat verschillende neutronendetectors onderling een verschil van een factor 2 kunnen vertonen, o.a. door de veranderde waarden van de kwaliteitsfactoren.

<sup>1</sup> Zie de website van MCNPX <http://mcnpx.lanl.gov/>



Berekeningen met MCNPX zijn gedaan voor verschillende materialen langs de bundellijn van het cyclotron waar protonen mee in aanraking kunnen komen en aanleiding geven tot secundaire neutronen. Hiervoor is gedetailleerde informatie gebruikt betreffende de bundelverliezen en materialen waarin deze bundelverliezen optreden. Voor protonen in de energierange 100 - 250 MeV werden simulaties gedaan voor 100, 150, 180 en 250 MeV.

Voor elk van deze simulaties werd de neutronen flux op verschillende diepten in de betonafscherming bepaald voor verschillende hoeken  $\theta$ . Voor de transformatie van flux naar dosis werden de fluxen gevouwen met  $H^*(10)$ , Ambient dose equivalent (pSv.cm<sup>2</sup>), uit tabel A.42 van de ICRP-74. De waarden voor de parameters  $H_0(E_p, \theta)$  en  $\lambda(E_p, \theta)$  volgden uit fits aan deze gesimuleerde dosispunten, zie Fig. 4. Zoals uit Fig. 4 blijkt vertoont de verzwakking van de neutronen flux verschillend exponentiële gedrag, in het begin van de betonafscherming is de verzwakking anders dan dieper in de afscherming (zie ook [Agosteo 2007]). Van belang is de fit aan de dosispunten dieper in de afscherming, na ongeveer 1m betonafscherming. Dit betekent dat de bovengenoemde formule  $H(E_p, \theta, d(\theta))$ , voor de gevonden (gefitte) parameters  $H_0(E_p, \theta)$  en  $\lambda(E_p, \theta)$ , zijn geldigheid heeft voor betondikten groter dan 1m. De bunkermuren van HollandPTC zijn minimaal 1 m dik.

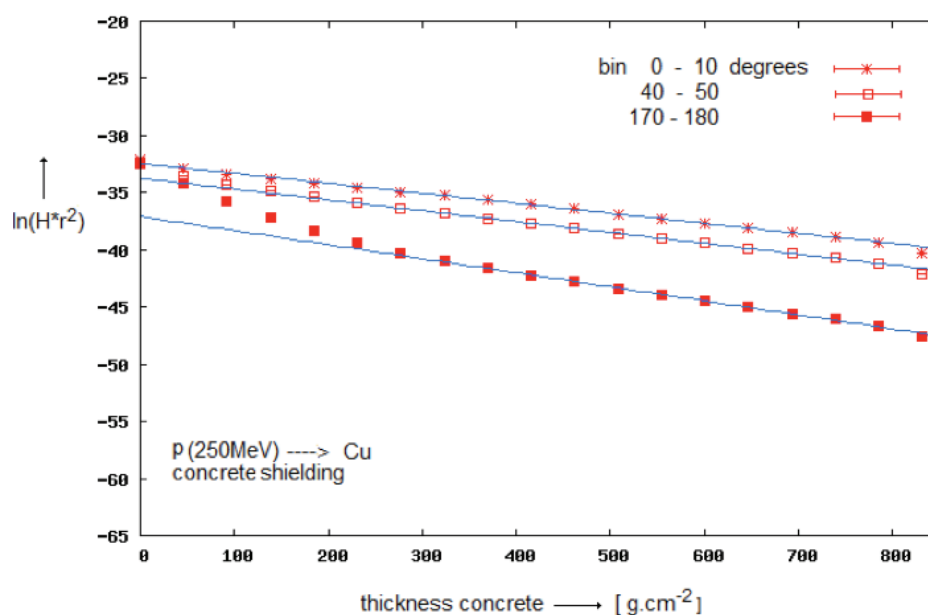


Fig. 4: Fits aan de neutronen dosispunten op verschillende diepten in betonafscherming voor verschillende hoeken  $\theta$ .

Fig. 5 en Fig. 6 laten de hoekafhankelijkheid zien van  $H_0(E_p, \theta)$  en  $\lambda(E_p, \theta)$  voor verschillende energieën  $E_p$ .

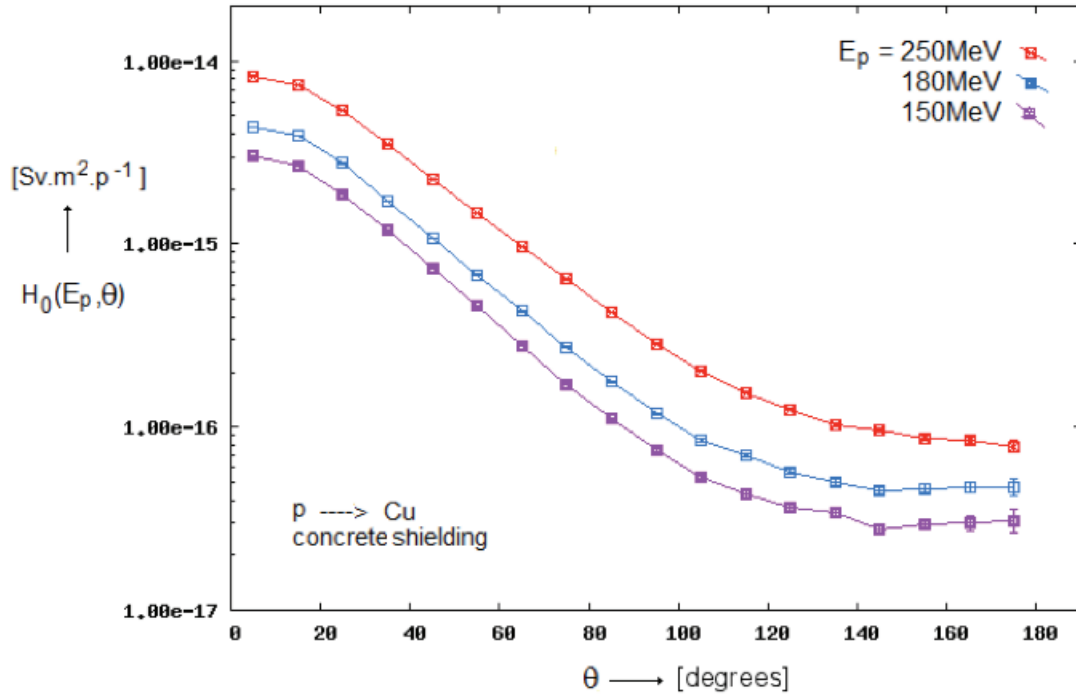


Fig. 5: De hoekafhankelijkheid van  $H_0(E_p, \theta)$  voor verschillende protonenergieën op een Cu-target.

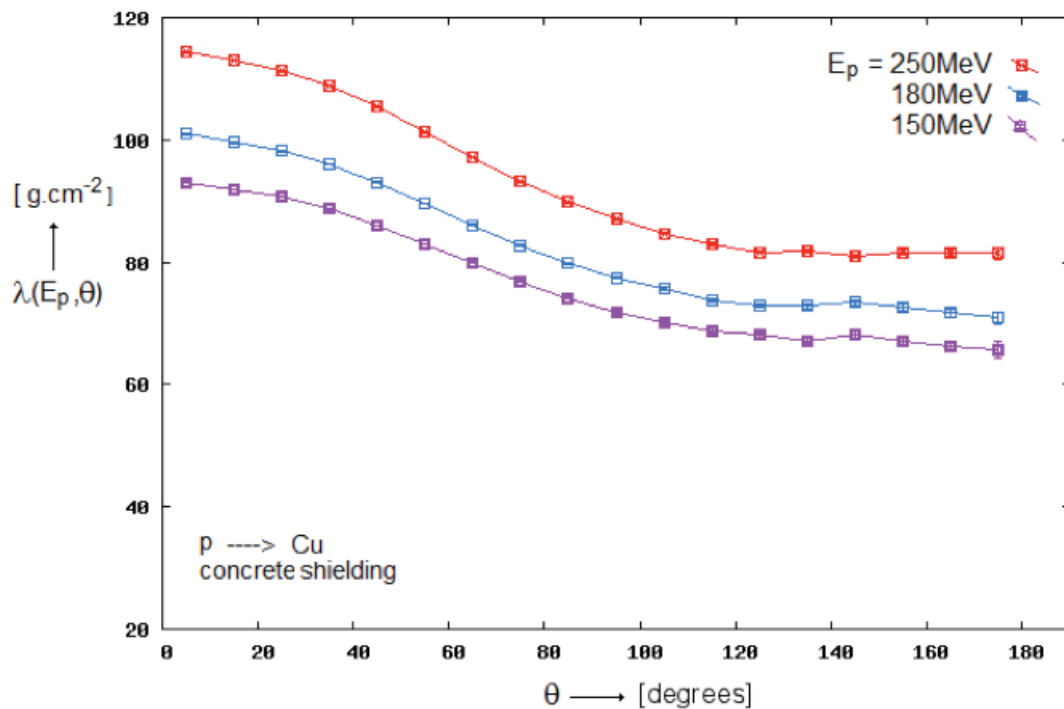


Fig. 6: De hoekafhankelijkheid van  $\lambda(E_p, \theta)$  voor verschillende protonenergieën op een Cu-target.

### Neutronendosis versus Fotonendosis

Behalve naar neutronen is ook gekeken naar fotonen. De dosis voor fotonen is voor achterwaartse hoeken ongeveer gelijk aan de neutronendosis, voor voorwaartse hoeken valt de bijdrage van fotonen in het niet vergeleken met de dosis t.g.v. neutronen, omdat deze hoofdzakelijk voorwaarts gericht zijn.

We geven de MCNPX-resultaten voor 250 MeV protonen op een Cu-target. In Tabel 5 zijn de totale doses gegeven voor voorwaartse richting, 0 - 10 graden, en voor achterwaartse richting, 170-180 graden. De doses zijn gegeven op 1m afstand van het target in lucht (0m beton) en op 2m afstand van het target na 1m beton. Voor neutronen zijn de energieën gevouwen met ICRP-74 Table A.42,  $H^*(10)$  Ambient dose equivalent, en voor fotonen zijn de energieën gevouwen met ICRP-74 Table A.1, Photon Data.

Tabel 5: Neutronendosis versus protonendosis.

bin	neutronendosis Sv.p <sup>-1</sup>		fotonendosis Gy.p <sup>-1</sup>
0-10 gr. 0m beton	1.1 10 <sup>-14</sup>		1.5 10 <sup>-16</sup>
0-10 gr. 1m beton	2.5 10 <sup>-16</sup>		5.5 10 <sup>-18</sup>
170-180 gr. 0m beton	7.8 10 <sup>-15</sup>		1.4 10 <sup>-16</sup>
170-180 gr. 1m beton	2.0 10 <sup>-18</sup>		2.0 10 <sup>-19</sup>

Voor de voorwaartse richting is de dosis t.g.v. fotonen twee orden van grootte kleiner dan de dosis t.g.v. neutronen. Wat de achterwaartse richting betreft is dosis van neutronen in lucht van dezelfde grootte als in de voorwaartse richting, echter de afname na 1m beton is in de achterwaartse richting veel groter. Dit komt doordat in de voorwaartse richting het neutronen spectrum veel meer neutronen bevat met hoge energie en het achterwaartse spectrum meer neutronen bevat van lagere energie. De achterwaartse neutronen met lagere energie worden sterker verzwakt in beton.

Voor de fotonen is er weinig tot geen verschil in voorwaartse of achterwaartse richting omdat de fotonen een meer homogene wolk vormen. De dosis t.g.v. achterwaartse fotonen is een factor 10 kleiner dan die van de neutronen.

#### Modellering van bronnen in het cyclotron

Speciale aandacht werd besteed aan de dosisbijdrage van het cyclotron omdat in dit geval sprake is van twee verschillende afschermingsmaterialen. De secundaire neutronen, die ontstaan doordat 250 MeV protonen Cu raken, passeren de cyclotron wand van minimaal 35 cm Fe en vervolgens de betonafscherming. In de simulaties is hiermee rekening gehouden, de waarden voor de parameters  $H_0(E_p, \theta)$  en  $\lambda(E_p, \theta)$  in beton met daaraan voorafgaand een bulk Fe zijn anders dan voor beton alleen. De volgorde van verschillende afschermingsmaterialen is van belang en dit is meegenomen in de berekeningen.

#### Invloed van betonsamenstelling

Een andere factor van belang is de samenstelling van de betonafscherming. In de simulaties is beton gebruikt met 1 gewichtsprocent H, een ondergrens voor gangbaar beton (zie [Kaplan 1989] Tabel 10.20, p. 233). Voor drie verschillende waarden voor het waterstofgehalte, 0.5, 1.0 en 2.0 gewichtsprocenten H, is de

neutronendosis bepaald in 1m beton op een afstand van 2m van een Cu-target voor 250 MeV protonen. In Fig. 7 en Fig. 8 zijn de waarden voor de gesimuleerde dosis weergegeven als functie van de gewichtsprocenten H van het beton, voor respectievelijk 0-10 graden en 170-180 graden t.o.v. de protonbundel.

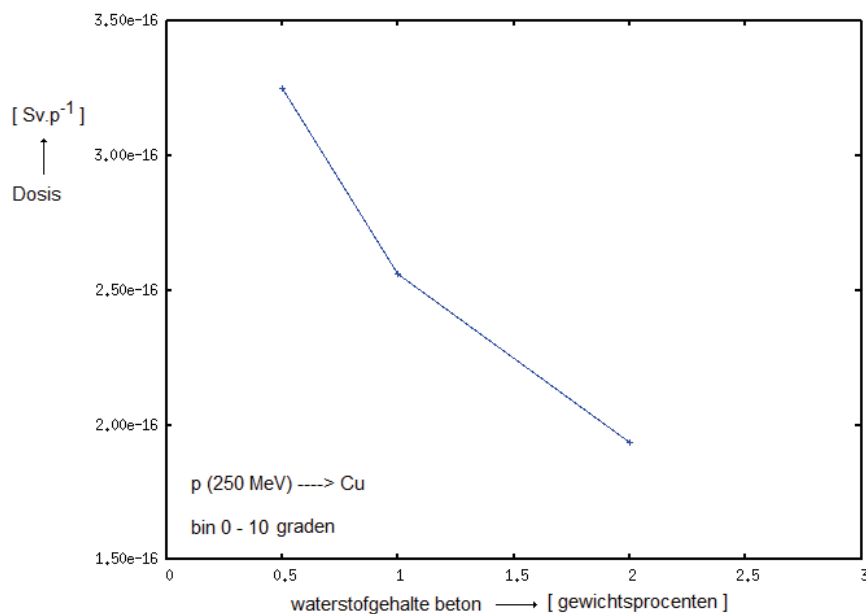


Fig. 7: De neutronendosis in 1m beton op 2m afstand van een Cu target en onder een hoek van 0-10 graden t.o.v. een protonen bundel van 250 MeV op het Cu-target, als functie van het waterstofgehalte van het beton.

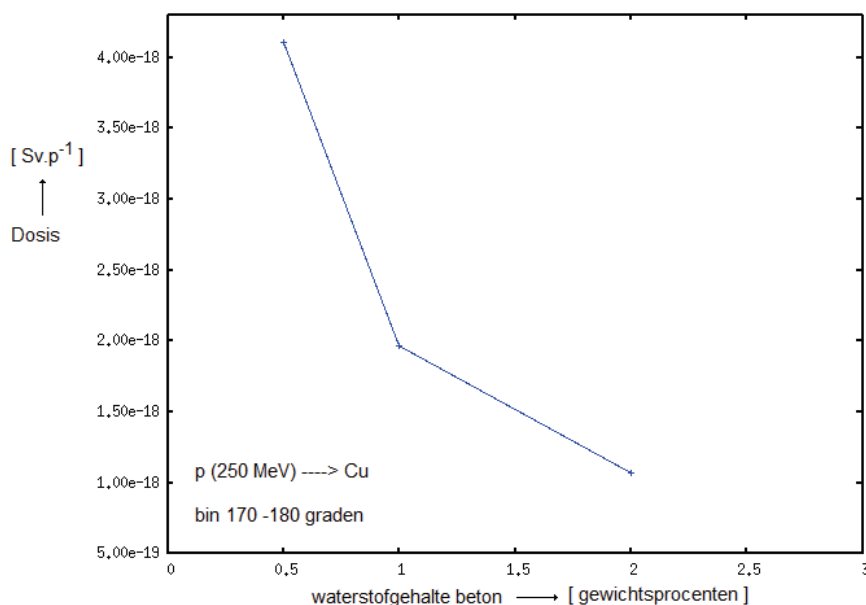


Fig. 8: De neutronendosis in 1m beton op 2m afstand van een Cu target en onder een hoek van 170-180 graden t.o.v. een protonen bundel van 250 MeV op het Cu-target, als functie van het waterstofgehalte van het beton.

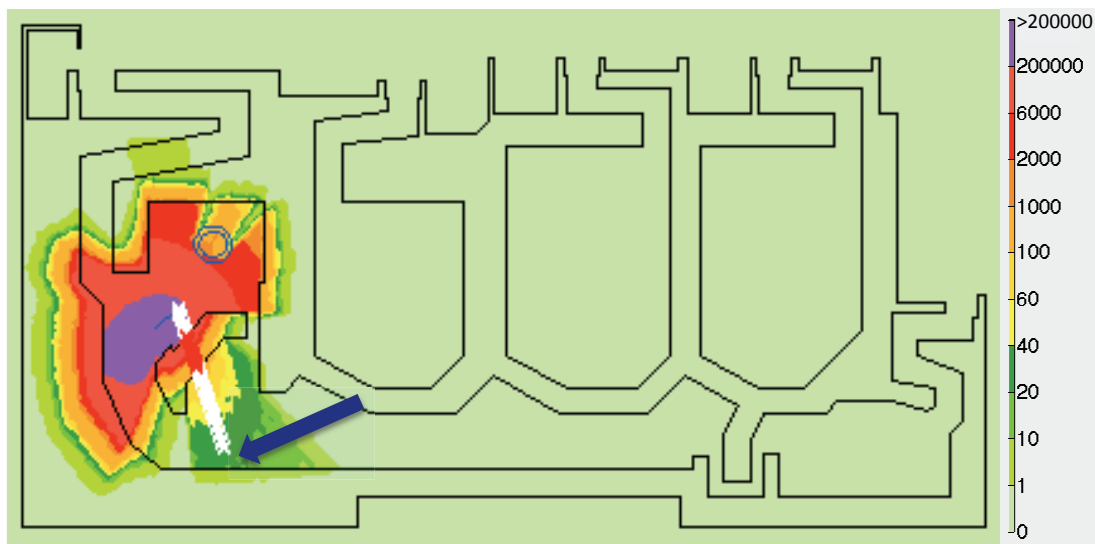
### Patiënt of hoge-Z fantoom

Voor een deel van het bundelgebruik van HollandPTC zullen de protonen niet in patiënten stoppen, maar in meetapparatuur. Dit betekent dat de protonen niet in tissue-equivalent materiaal stoppen (de patiënt), maar in polystyreen of zelfs in materiaal met een hoge Z-waarde. Stoppen in hoge-Z materiaal resulteert in tot wel een factor 10 meer neutronen per gestopt proton. Een nauwkeurige analyse aan de hand van Monte-Carlo berekeningen toont echter aan dat het aantal gevormde neutronen weliswaar veel hoger is (tot een factor 10), maar dat de dosis na 1 meter beton maximaal 10% hoger is dan wanneer de bundel in tissue zou zijn gestopt. Dit valt binnen de nauwkeurigheid van de berekeningen en hier corrigeren wij dan ook niet voor.

## 4. Jaardosisbijdrage per sub-bron

Van elke sub-bron kan de jaardosisbijdrage nu berekend en dit wordt vervolgens gesommeerd over alle sub-bronnen. Hiervoor is het een programma geschreven in Matlab. Dit programma gebruikt gigaprotonen per jaar in plaats van  $nA \cdot h/yr$ , wat een eenvoudige conversie is.

Met de bronpositie, bronrichting, bronterm en de verzwakkingsfactor  $\lambda$  bekend, voert dit programma een ray-trace uit tussen bron en elk punt. De hoeveelheid beton tussen bron en punt is een input in de Point Kernel Method zoals boven beschreven. Een voorbeeld voor de berekening van de jaardosis in een enkel punt van een enkele sub-bron is weergegeven in Fig. 9.

**Source info:**

Source description: Gantry 2, 250 MeV, Positioning Collimator  
 Source position (m): (6.50, 10.84)  
 Source direction horizontal (degrees): -135  
 Source direction vertical (degrees): 0  
 Source energy: 250 MeV  
 Source materialnumber: 3  
 Source material: Cu  
 Gigaprotons stopped in source per Gp at isocenter: 1.37E+00  
 Gigaprotons at isocenter: 7.67E+05  
 Gigaprotons in source: 1.05E+06

**Dose to point info:**

Point position (m): (9.80, 2.66)  
 Angle (degrees): -67.99  
 Relative angle, to source (degrees): 67.01  
 H0 used (Sv m<sup>2</sup> p<sup>-1</sup>): 9.08E-16  
 Lambda used(g cm<sup>-2</sup>): 9.63E+01  
 Distance to source (m): 8.82  
 Stepsize through walls (cm): 10  
 Distance through concrete (cm): 230  
 Concrete density (g cm<sup>-3</sup>): 2.40  
 Distance through iron (cm): 0  
 Iron density (g cm<sup>-3</sup>): 4.80  
 Hp per gP at iso: 5.21E-05  
 Hp uSv yr<sup>-1</sup>: 3.99E+01

**Dose at point:**

3.99E+01 uSv (TOTAL)

*Fig. 9: Voorbeeldberekening van de jaardosisbijdrage van 1 sub-bron naar 1 punt (weergegeven met de blauwe pijl) in HollandPTC. De kleurenplot geeft de dosis in  $\mu\text{Sv}$  per jaar. De rij witte en rode kruisjes geeft het raytracen weer door respectievelijk lucht en beton van de sub-bron naar het punt waar de jaardosis berekend wordt.*

## 5. Sommatie over alle sub-bronnen

Het matlab programma sommeert vervolgens de bijdragen van alle sub-bronnen naar alle punten in en om HollandPTC. Deze jaardosis is weergegeven in Fig. 10.

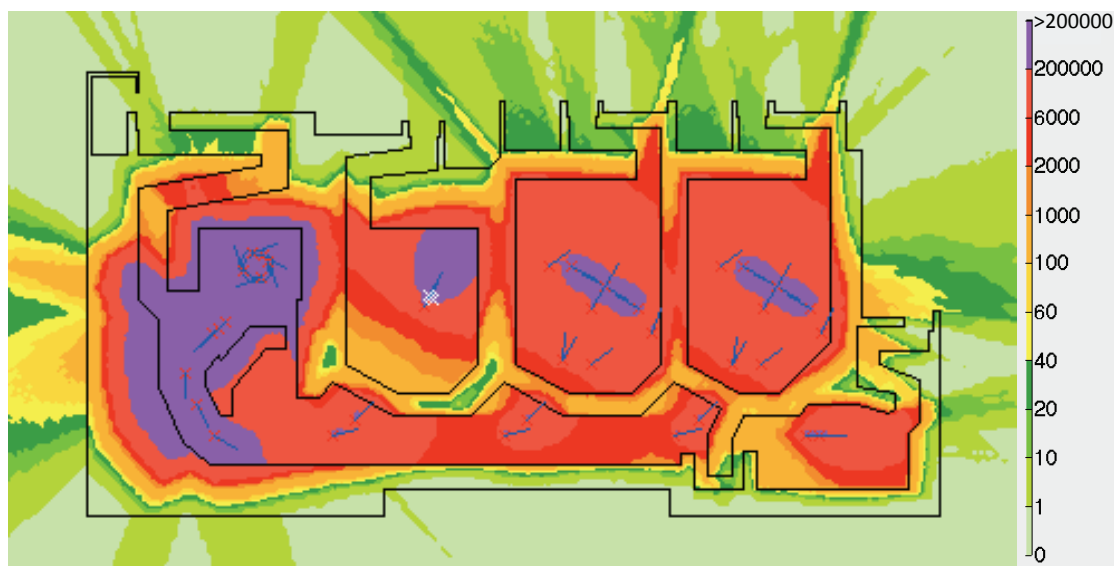


Fig. 10: Jaardosis in en rond het bunkerdeel van HollandPTC voor het volledige patiënten en onderzoeksprogramma. De eenheden zijn in  $\mu\text{Sv}$  per jaar. In bijlage "A22 jaardosis ruimten" wordt dit geëvalueerd met meenemen van verblijfsfactoren.

Fig. 10 representeert de uitkomst met een kleurcodering (de getallen in de legenda zijn in  $\mu\text{Sv}$  per jaar). In de **Bijlage A22 "Jaardosis ruimten"** worden deze waarden nog bijgesteld voor verblijfsfactoren per locatie. Deze 2D berekening resulteerde ook in dosisbijdragen op en aan de rand van het RID terrein wat is gebruikt als input voor de **Bijlage A24 "Analyse van de gevolgen ioniserende straling voor het milieu"**.

### Modelering in verticale richting

Zie hoofdstuk 'Modelering in verticale richting' in de **Bijlage A22 'Jaardosis ruimten'**.

### Bundeldoorvoeren

Voor alle bundeldoorvoeren in het bunkergedeelte is de BIM methode gebruikt (Bouw Informatie Modelling). Alle bundeldoorvoeren zijn daarna bekeken en goedgekeurd door de constructeur, architect en de stralingsbeschermings-experts van HollandPTC. Hierbij is o.a. gelet op dat er niet een veelheid van doorvoeren 'parallel' liggen en daarmee de afscherpende werking van de muren verlaagd.

Doorvoeren die van binnen naar buiten de bunker lopen voldoen in ieder geval aan de volgende voorwaarden:

- Geen doorvoeren die richting het isocentrum wijzen (de 'bron' in de bunker)
- Alle doorvoeren die van binnen de bunker naar buiten de bunker lopen hebben in ieder geval bochten van 90 graden.

- Niet-gebruikte doorvoeren worden gevuld met polytheenkorrrels of dichtgestort. Indien nodig worden ook gebruikte doorvoeren opgevuld met polytheenkorrrels.

Met deze voorzieningen verwachten wij geen extra dosisbijdrage aan de buitenkant van de bunker ten gevolge van deze doorvoeringen. Indien na inbedrijfname blijkt dat deze doorvoeringen toch een relevante dosisverhoging veroorzaken, dan voorzien wij extra afschermingsconstructies aan de binnenkant van de doorvoering (d.w.z. binnen de bunker).

### Totaal jaarlijks bundelgebruik

In deze sectie presenteren we het jaarlijkse totaal aan geproduceerde protonen in het cyclotron. Dit met name als input voor de activeringsberekeningen aan lucht, zie **Bijlage A23 “Activeringsberekeningen”**. Hiervoor dient het bundelgebruik in de bunker teruggerekend te worden naar het cyclotron.

Een voorbeeld is gegeven in Tabel 4. Bronnen 133 tot en met 161 hebben betrekking op het gebruik van 250 MeV protonen in Gantry 2. De laatste kolom in deze tabel geeft weer dat per proton in isocentrum (0.25 proton per gantry hoek, bronnen 133, 137, 141 en 145) er 9.66 protonen van 250 MeV in het cyclotron geproduceerd worden. Dit ronden we af op 10. Vanwege hogere verliezen langs de bundellijn is deze factor hoger bij een gebruik van lagere energieën in de behandelbunker. Een overzicht voor alle bunkers en energieën is weergegeven in Fig. 11.

Ter toelichting enkele observaties m.b.t. het overzicht in Fig. 11:

- Uit de berekening volgt een beam-on tijd voor gantries en R&D bunker van afgerond **300 uur/jaar**, bij een typische bundelstroom uit het cyclotron van 100 nA. Deze tijd is als volgt bepaald: 1960 uur is de behandeltime waarin de bundel is toegewezen aan de gantries en de R&D bunker. Maar de bundel staat dan niet continu aan. Bij pencil-beam scanning wordt een enkel bestralingsveld typisch in 1 minuut afgegeven. Hierbij wordt de bundel sequentieel op veel verschillende ‘spots’ gericht in de patiënt om zo de dosis in de tumor ‘in te kleuren’. Bij elke spot wordt de gewenste hoeveelheid protonen afgegeven waarna de bundel stopt, de magneten van de bundellijn zich in enkele milliseconden aanpassen, en de bundel weer even aan staat. Tussen afgifte van opeenvolgende spots staat de bundel uit en worden er géén protonen geproduceerd. Bij het aanpassen van de bundelenergie (om de dosis naar de tumor laagje voor laagje in te kleuren) staat de bundel bijna een seconde uit.
  - Met gemiddeld 25 fracties per patiënt, 3 velden per fractie en 475 patiënten per gantry, staat de bundel ongeveer 10 seconden aan gedurende de minuut dat een veld afgegeven wordt.
- De beam-on tijd voor de ogenlijn is afgerond **20 uur/jaar**, bij een typische bundelstroom uit het cyclotron van 800 nA. Bij de passive-scattering techniek van protonentherapie zoals gebruikt in deze bundellijn, staat de bundel wèl continu aan tijdens het afgeven van een bestralingsveld.



- Met 100 patiënten die ieder 5 fracties krijgen, staat de bundel ongeveer 2 minuten aan per veld.

		Workload at iso (nA*h/yr)	workload at iso to workload at cyclo	Workload at cyclo (nA*h/yr)	
<b>R&amp;D</b>	100 MeV	0.00			
	150 MeV	35.81	238	8523	
	180 MeV	29.30	107	3135	
	250 MeV	35.81	10	348	
				Sum	12005
			Typical current	100	nA
				h/yr	120
<b>Gantry 1</b>	100 MeV	0.00			
	150 MeV	22.22	240	5333	
	180 MeV	29.07	109	3169	
	250 MeV	34.09	10	341	
				Sum	8842
			Typical current	100	nA
				h/yr	88
<b>Gantry 2</b>	100 MeV	0.00			
	150 MeV	22.22	240	5333	
	180 MeV	29.07	109	3169	
	250 MeV	34.09	10	341	
				Sum	8842
			Typical current	100	nA
				h/yr	88
<b>EYE</b>	100 MeV	4.98	2980	14834	
	150 MeV	0.00			
	180 MeV	0.00			
	250 MeV	0.00			
				Sum	14834
			Typical current	800	nA
				h/yr	19
<b>TOTAAL (100 nA)</b>				<b>297</b>	
<b>TOTAAL (800 nA)</b>				<b>19</b>	

Fig. 11: Totale hoeveelheid protonen per jaar geproduceerd in het cyclotron, uitgesplitst per bunker, vertaald naar de beam-on-tijd. De grootste verliezen langs de bundellijn vinden plaats in het energieselectie systeem, en deze verliezen nemen scherp toe voor lagere protonen energieën. Per bunker kan de factor "workload at iso to workload at cyclo" nog wat verschillen afhankelijk van de verliezen in de "bestralingsnozzle" in de bunker zelf.

## Referenties

[Agosteo 1998] S. Agosteo, A. Fassò, A. Ferrari, P.R. Sala, M. Silari, P. Tabarelli de Fatis, Double differential distributions and attenuation in concrete for neutrons produced by 100-400 Mev protons on iron and tissue targets, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 114, 1996, pp. 70-80.

[Agosteo 2007] S. Agosteo, M. Magistris, A. Mereghetti, M. Salari, Z. Zajacova, Shielding data for 100-250 MeV proton accelerators: Double differential neutron distributions and attenuation in concrete, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 265, 2007, pp. 581-598.

[Chao 1999] Alexander Wu Chao and Maury Tigner, (Editors), Handbook of Physics and Engineering, World Scientific Publishing Co, 1999, Hfdst 8, pp. 613.

[Kaplan 1989] M.F. Kaplan, Concrete Radiation Shielding, Wiley, New York, 1989.

[Teichmann 2006] Sabine Teichmann, Shielding Parameters of Concrete and Polyethylene for the PSI Proton Accelerator Facilities, 8th workshop on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, Pohang , Republic of Korea, 22-24 May 2006.

[Teichmann 2007] S. Teichmann and B. Amrein, Measured and Calculated Dose Rates in an Entrance Maze at the new PSI Proton Therapy Facility, Accelerator Applications Conference AccApp 07, Pocatello, Idaho, USA, July 30 – Aug. 2, 2007.