

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

Bijlage A17:

**Afschermingsberekeningen
Röntgentoestellen**

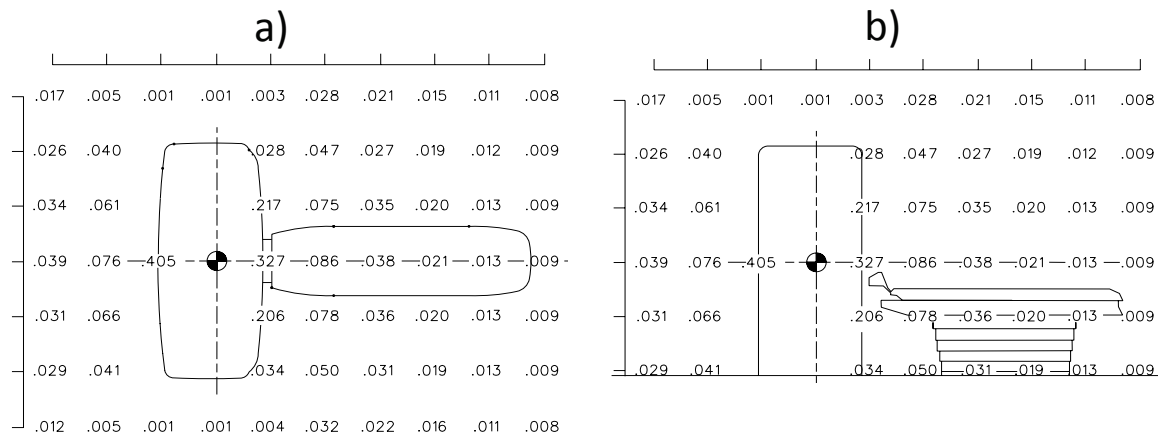
Afschermingsberekeningen CT

Deze bijlage heeft betrekking op de aanvraag van vier CT-scanners voor klinisch gebruik van beeldvorming binnen HollandPTC. Belangrijk algemene feiten zijn:

- Het imaging block van HollandPTC is zeer waarschijnlijk niet de definitieve layout van dit blok. Exacte locaties en afmetingen van ruimtes worden nog afgestemd.
- Voor alle CT-scanners beschreven in deze bijlage geldt dat de leverancier en het exacte type nog gekozen moeten worden. Ook de precieze locatie van de scanners in de betreffende ruimtes is nog niet exact bekend. Berekeningen in deze bijlage zijn dan ook indicatief, met de doeldosis als belangrijkste gegeven.
- Voor alle CT-scanners is gerekend met een **doeldosis van 0.1 mSv** per jaar op enig punt buiten de ruimte waar de CT-scanner staat.
- Voor de afschermingsberekeningen van alle CT-scanners is gebruik gemaakt van de door Philips aangeleverde dosis map van hun Brilliance Big Bore CT. Deze is enkele jaren geleden geïnstalleerd bij het LUMC, één van de klinische partners van HollandPTC.
- De vloerdiktes van het imaging blok naar de eerste verdieping zijn 30 cm beton.

CT-scanner en verstrooiingsprofielen:

De effectieve dosis ten gevolg van de secundaire straling bij gebruik van de Philips Brilliance Big Bore CT is gegeven door de fabrikant voor de maximale buisspanning van 140 kV (zie figuur 1). Aangezien het typische radiologische onderzoek met 125 kV plaats vindt, leidt dit tot een overschatting van de benodigde afscherming.



Figuur 1: Strooistralingsmappen in a) het horizontale en b) verticale vlak voor de Philips Brilliance Big Bore CT. Data in $\mu\text{Sv/mAs}$, voor een buisspanning van 140 kV en een maximale collimatoropening van $16 \times 1.5 = 24$ mm. Een standaard CTDI body-fantoom, met een diameter van 32 cm en een lengte van 15 cm, is hiervoor gebruikt.

De effectieve dosis op grotere afstand dan gegeven in figuur 1 is met behulp van de kwadratenwet geschaald, met de waarde op en afstand tot de rand van de figuur als referentie voor extrapolatie.

Halfwaardedikten

Sutton en Williams geven [ref 1] een empirische formule (4.1) waarmee de transmissie van X-rays door (afscherdings)materiaal berekend kan worden voor een brede bundel geometrie. De parameters (α , β , γ) voor secundaire straling worden voor meerdere materialen gegeven in [ref 2], tabel A.1. Voor deze berekeningen gebruiken we de parameters voor 150 kV. Dit leidt tot een overschatting van de equivalente dosis achter het afscherdingsmateriaal, aangezien de typische hoogspanning voor radiodiagnostiek minder dan 125 kV is.

Doel van de berekeningen in deze bijlage is om voor ieder punt de minimum afschermdikte in millimeters lood te bepalen voldaan wordt aan de eis om onder de doeldosis (van 0.1 mSv) te blijven. In de uiteindelijke situatie kan de afscherming met lood plaatsvinden, of met een equivalente dikte van beton of enig ander materiaal. Voor de volledigheid is per CT-scanner en per berekeningspunt ook de equivalente dikte van beton gegeven.

Het gebruik van de halfwaardedikte (HVL) van $\ln(2)/\alpha$ geeft ook voor grote dikte een aanzienlijke overschatting van de transmissie. Voor lood is de overschatting een factor 10, voor beton een factor 3. In de afschermingberekeningen wordt deze benadering daarom niet gebruikt.

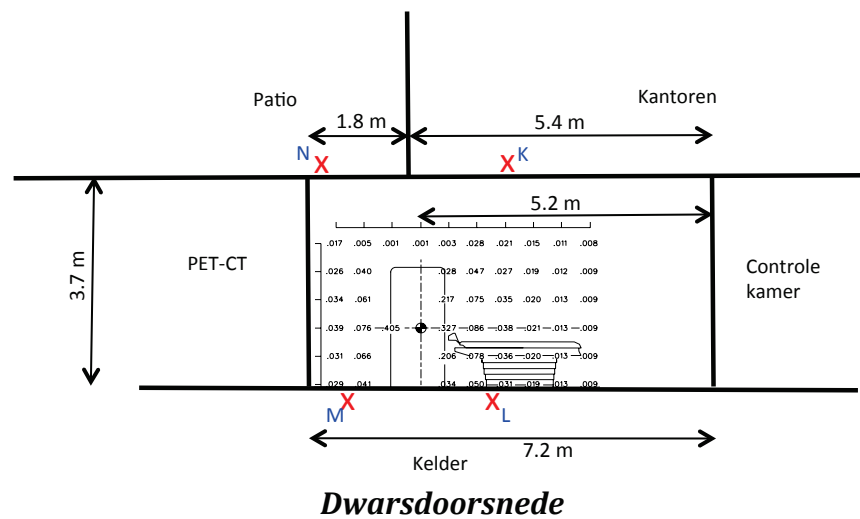
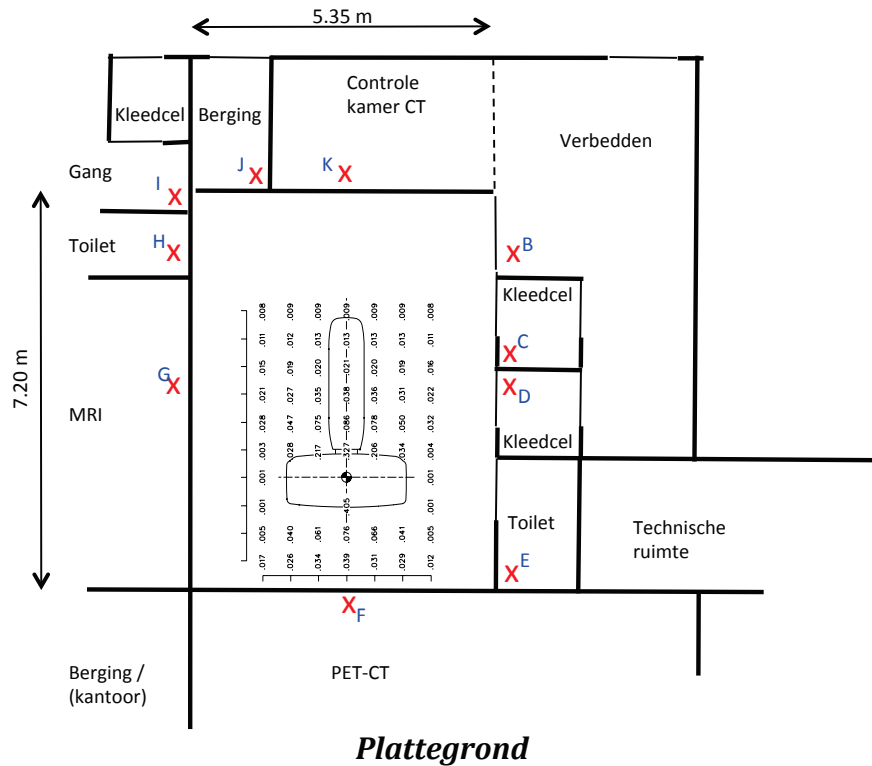
Tertiaire straling

Wanneer de secundaire straling op de muren, vloeren of het plafond valt, kan worden aangenomen dat een procent van de invallende straling verstrooid wordt [ref 1]. In de afschermingberekening wordt de hoek van inval gelijk genomen aan de hoek van de uittreding. Ook voor tertiaire straling worden de halfwaardedikte parameters voor 150 kV uit tabel A.1 gebruikt [ref 2]. Deze aanname leidt tot een overschatting van de tertiaire straling.

De gezamenlijke bijdrage aan de tertiaire straling op enig punt via de vloer, het plafond en de muren, zijn kleiner dan een paar procent van de secundaire straling. De tertiaire straling is daarom niet meegenomen in de berekening.

Diagnostische CT-scanner

Hieronder de situatieschetsen en de berekening. Aanname is dat deze ruimte met lood afgeschermd zal worden. Met uitzondering van de de afscherming richting de PET-CT ruimte (Punt F) is de benodigde afscherming rond of kleiner dan de typische waarde van 2 mm lood. De afscherming van de PET-ruimte zelf zal vanwege echter al ruim boven het equivalent van 2 mm lood liggen.



De scan lengte komt overeen met de isodosen zoals door Philips aangeleverd
 Klinische workload: verwacht gebruik

Referentie scan	Klinisch gebruik	
140	125 kV	
2.4	30.00 cm	
	250.00 mAs	
Hoogspanning	16.00 per day	
Scan lengte (typisch)	2.00 factor	
Stroomsterkte	0.30 fractie	
Aantal examinaties per dag	5.00 factor	
Factor meten zonder contrast	1.00 per seconde	
Fractie 4D scans		
Belasting 4D versus 3D		
Aantal scanlengtes per seconde		

Aantal scan seconden per week 4400
 Doelvoorschrift 0.1 mSv

$$\text{dikte Lood (mm)} = 1 / ((\alpha \cdot r)^{\gamma}) \cdot \ln((\text{transmissie}^{\alpha} + \beta / \alpha) / (1 + \beta / \alpha))$$

$$\text{dikte Beton (cm)} = 1 / ((\alpha \cdot r)^{\gamma}) \cdot \ln((\text{transmissie}^{\alpha} + \beta / \alpha) / (1 + \beta / \alpha)) / 10$$

NCRP 147			
Lood	150 kV	125 kV	150 kV
2.2190	1.7570	0.0350	0.0324
7.9230	5.1770	0.0711	0.0660
0.5386	0.3156	0.6974	4.4670

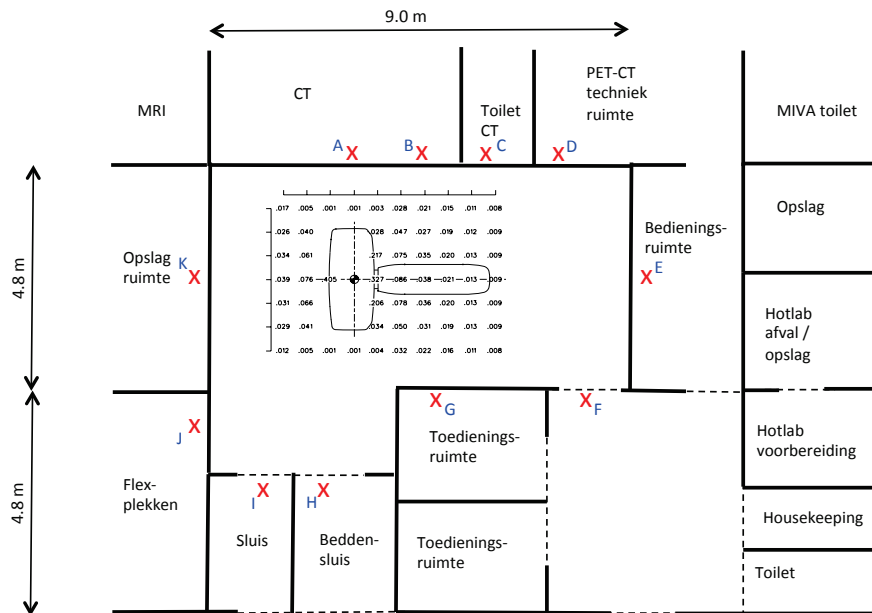
Fit parameters, secundaire straling
 alpha
 beta
 gamma

Ervaring Radiologie van het LUMC: metingen wijzen uit dat de uitgangswaarden voor de berekeningen conservatief zijn gekozen
 De gemeten dosis is richting de controlekamer slechts een kwart van de dosis waarmee werd gerekend (model)

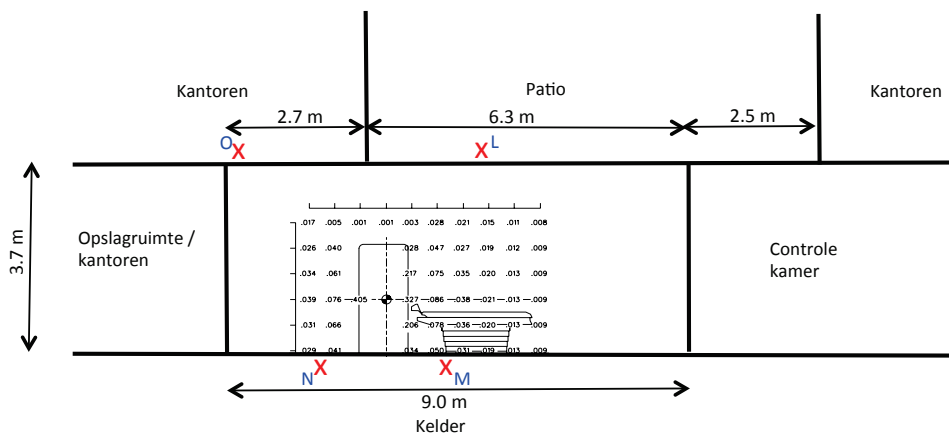
Locatie	Code	'rand'waarde	x	y	afstand tot 'rand' (m)	x	y	afstand tot meetpunt (m)	kwadratenwet factor	Dosis per mAs	Dosis @ "D5" (mSv)	Dosis per week (mSv)	Verbijfs-factor	Transmissie, maximaal toegestaan	Verwiste dikte Lood (mm)	
Controle kamer CT Verbeden Kieedcel Kieedcel Toilet PET-CT MRI Toilet Gang Bergling	A	0.009	0.0	3.0	3.00	0.0	5.5	5.50	0.30	0.00268	0.67	2.945	1	0.001	2.2	
	B	0.016	1.5	2.0	2.50	3.0	4.0	5.00	0.25	0.00400	1.00	4.400	0.2	0.002	1.7	
	C	0.032	1.5	0.9	1.75	2.9	1.6	3.31	0.28	0.00893	2.23	9.819	0.2	0.001	2.0	
	D	0.032	1.5	1.2	1.92	2.9	2.3	3.70	0.27	0.00862	2.15	9.481	0.2	0.001	2.0	
	E	0.005	1.5	-0.9	1.75	3.0	-1.8	3.50	0.25	0.00125	0.31	1.375	0.05	0.028	0.8	
	F	0.039	0.0	-1.5	1.50	1.50	0.0	-2.4	2.40	0.39	0.01523	3.81	16.758	1	0.000	3.0
	G	0.028	-1.5	0.8	1.70	1.70	-3.1	1.6	3.49	0.24	0.00665	1.66	7.314	1	0.000	2.6
	H	0.015	-1.5	2.0	2.50	2.50	-3.0	4.0	5.00	0.25	0.00375	0.94	4.125	0.05	0.009	1.1
	I	0.011	-1.5	2.5	2.92	2.92	-3.0	5.1	5.92	0.24	0.00267	0.67	2.988	0.2	0.003	1.5
	J	0.009	-0.9	3.0	3.13	3.13	-1.6	5.4	5.63	0.31	0.00278	0.70	3.062	0.2	0.003	1.5
Kantoren Kelder Kelder Patis	K	0.020	0.8	1.5	1.70	1.5	2.9	3.26	0.27	0.00542	1.36	5.964	1	0.000	2.5	
	L	0.050	1.0	-1.0	1.41	1.3	-1.3	1.84	0.59	0.02959	7.40	32.544	0.025	0.002	1.6	
	M	0.041	-1.0	-1.0	1.41	1.91	-1.4	1.91	0.55	0.02247	5.62	24.712	0.025	0.003	1.5	
	N	0.050	-1.0	1.5	1.80	-1.8	2.9	3.41	0.28	0.01395	3.49	15.343	0.2	0.001	2.2	

CT (behorende bij PET)

Hieronder de situatieschetsen en de berekening. Aanname is dat de PET-CT ruimte met Robaliet afgeschermd wordt. Voor het FDG gebruik zal de afscherming van deze ruimte minstens 6 cm Robaliet bedragen, wat equivalent is aan 6 mm lood. Op enkele plekken is de benodigde afscherming voor het CT-gebruik groter dan de typische waarde van 2 mm lood. Dit is ruim onder de aanwezige afscherming voor FDG gebruik waardoor de bijdrage van de CT aan de jaardosis buiten de ruimte minimaal is.



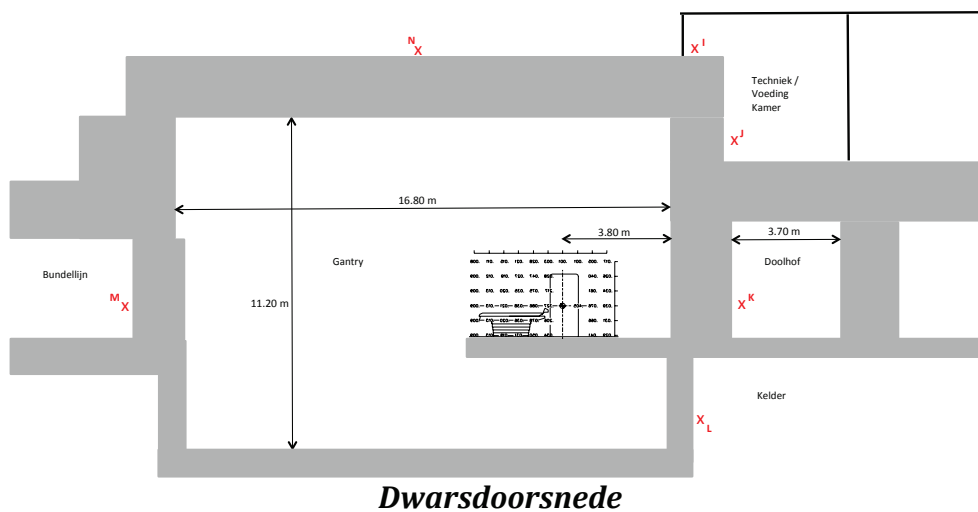
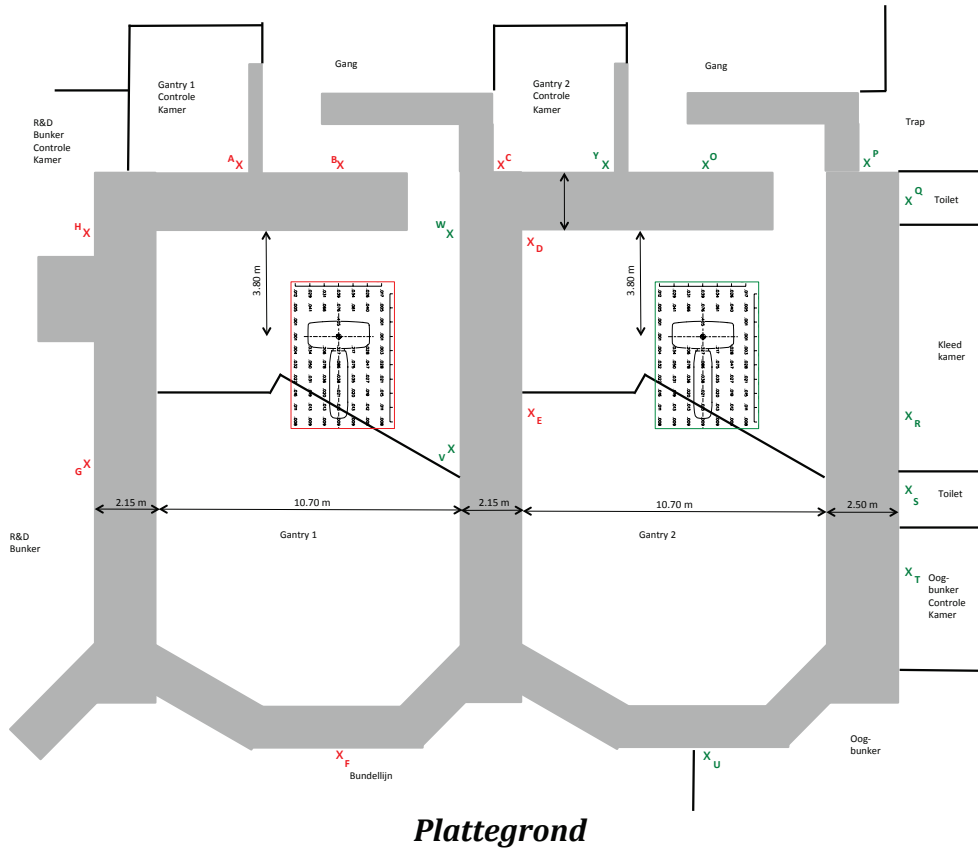
Plattegrond



Dwarsdoorsnede

In-room CT's (beide gantries)

De gantry bunkers worden met beton afgeschermd. De benodigde afscherming in beton om aan de doellimiet van 0.1 mSv per jaar te voldoen is 26 cm en is daarmee veel lager dan de betondikte van de gantry bunkers. De minimum dikte hiervan is 150 cm (richting de oogbunker).



De scan lengte komt overeen met de isodosen zoals door Philips aangeleverd
 Klinische workload: verwacht gebruik

Hoogspanning	Referentie scan	Klinisch gebruik
Scan lengte (typisch)	140	125 kV
Stroomsterkte	2.4	30.00 cm
Aantal examinaties per dag		250.00 mAs
Factor met en zonder contrast		64.00 per day
Fractie 4D scans		2.00 fractie
Belasting 4D versus 3D		0.30 factor
Aantal scantlengtes per seconde		5.00 factor
		1.00 per seconde

Aantal scan seconden per week: 21120
 Doelvoorschrift: 0.1 mSv

dikte Lood (mm) = $1/((\alpha_{\text{Pb}})^{\text{In}}((\text{transmissie}^{-\text{t}} + \beta(\alpha)) / (1 + \beta(\alpha)))$
 dikte Beton (cm) = $1/((\alpha_{\text{Bt}})^{\text{In}}((\text{transmissie}^{-\text{t}} + \beta(\alpha)) / (1 + \beta(\alpha))) / 10$

NCRP 147		
Lood	125 kV	150 kV
alpha	2.2190	1.7570
beta	7.9230	5.1770
gamma	0.5386	0.3156

Fit parameters, secundaire straling

Ervaring Radiologie: metingen wijzen uit dat de uitgangswaarden voor de berekeningen conservatief zijn gekozen
 De gemeten dosis is richting de controlekamer slechts een kwart van de dosis waarmee werd gerekend (model)

Use	Code	rand/waarde	x	y	afstand tot 'rand' (cm)	x	y	afstand tot meetpunt (cm)	kwadratenwet factor	Dosis per mAs	Dosis @ "D5" mAs	Dosis per week (mSv)	Gebruiksfactor	Transmissie, maximaal toegestaan	Vereiste dikte Beton (cm)
Controle kamer Gantry 1	A	0.029	-1.0	1.5	1.80	-3.5	6.0	6.95	0.07	0.00195	0.49	10.314	1	0.000	25.6
Doelhof Gantry 1	B	0.039	0.0	1.5	1.50	0.0	6.1	6.10	0.06	0.00236	0.59	12.451	0.05	0.003	16.9
Controle kamer Gantry 2	C	0.017	1.5	1.5	2.12	5.7	6.0	8.28	0.07	0.00112	0.28	5.898	1	0.000	23.9
Gantry 2 bunker	D	0.003	1.5	0.7	1.66	6.8	3.4	7.60	0.05	0.00014	0.04	0.751	1	0.003	17.5
Gantry 2 bunker Bundelijn	E	0.015	1.5	-0.7	1.66	6.8	-2.7	7.32	0.05	0.00077	0.19	4.054	1	0.000	22.7
R&D Bunker	G	0.009	0.0	-3.0	3.00	0.0	-14.8	14.80	0.04	0.00037	0.09	1.953	0.025	0.039	9.1
Controle kamer R&D bunker	H	0.032	-1.5	-1.0	1.80	-8.9	-4.5	9.97	0.03	0.00105	0.26	5.521	1	0.000	23.7
Techniekruimte	I / I	0.003	0.8	1.5	1.70	-8.9	3.5	9.56	0.03	0.00009	0.02	0.475	1	0.004	16.1
Techniekruimte	J / J	0.022	1.5	1.3	1.98	5.7	5.5	7.92	0.06	0.00138	0.35	7.295	0.025	0.011	13.2
Doelhof Gantry	K / K	0.039	1.5	0.0	1.50	6.0	0.0	6.00	0.06	0.00244	0.61	12.870	0.05	0.003	17.0
Keider	L / L	0.038	1.2	-1.0	1.56	4.6	-3.8	5.97	0.07	0.00260	0.65	13.752	0.025	0.006	15.1
Bundelijn	M / M	0.009	-3.0	0.0	3.00	-14.7	0.0	14.70	0.04	0.00037	0.09	1.979	0.025	0.039	9.1
Dak	N / N	0.028	-0.8	1.5	1.70	-4.9	8.7	9.98	0.03	0.00081	0.20	4.285	0.025	0.018	11.5
Doelhof Gantry 2	O	0.039	0.0	1.5	1.50	0.0	6.0	6.00	0.06	0.00244	0.61	12.870	0.05	0.003	17.0
Trap	P	0.017	1.5	1.5	2.12	5.7	6.0	8.28	0.07	0.00112	0.28	5.898	0.025	0.013	12.5
Toilet	Q	0.005	1.5	1.0	1.80	7.2	4.8	8.65	0.04	0.00022	0.05	1.146	0.05	0.034	9.6
Kleedkamer	R	0.015	1.5	-0.7	1.66	6.8	-2.7	7.32	0.05	0.00077	0.19	4.054	0.2	0.002	17.8
Toilet	S	0.026	1.5	-1.2	1.92	7.3	-5.5	9.14	0.04	0.00115	0.29	6.064	0.05	0.006	14.7
Controle kamer oogbunker	T	0.018	1.5	-1.7	2.27	7.3	-8.3	11.05	0.04	0.00076	0.19	3.998	1	0.000	22.7
Oogbunker	U	0.009	0.0	-3.0	3.00	0.0	-14.8	14.80	0.04	0.00037	0.09	1.953	1	0.001	20.5
Gantry 1	V	0.020	-1.5	-0.8	1.68	-8.9	-4.0	9.76	0.03	0.00059	0.15	3.119	1	0.001	21.9
Gantry 1	W	0.003	-1.5	0.7	1.66	-8.9	3.5	9.56	0.03	0.00009	0.02	0.475	1	0.004	16.1
Controle kamer Gantry 2	Y	0.029	-1.0	1.5	1.80	-3.5	6.0	6.95	0.07	0.00195	0.49	10.314	1	0.000	25.6

Afschermingsberekeningen overige Röntgentoestellen

De overige Röntgentoestellen (6 stuks, maximaal hoogspanning 150 kV) worden gebruikt voor orthogonale beeldvorming in de behandelbunkers (de twee gantries en de oogbunker), ten behoeve van positieverificatie van de patient in relatie tot de protonetherapie bundel(s). Verwacht gebruik op HollandPTC is 2-3 keer een set van orthogonale beelden per patient per fractie (van 25 minuten). Deze beelden worden van buiten de bestralingsbunker gemaakt. Typische afscherming van deze apparatuur (in een diagnostische setting) is een paar millimeter lood of het afschermingsequivalent daarvan aan beton. De benodigde afscherming is van vergelijkbare orde als voor afscherming van de in-room CT-scanners. De diktes van de bunkerwanden (typische waarden van 1.5 tot 2 meter) is vele malen groter. Voor deze Röntgentoestellen voor positieverificatie in de bunkers zijn dan ook geen aparte afschermingsberekeningen gedaan.

Referenties

[1] Radiation shielding for diagnostic X-rays, report of joint BIR/IPEM working party, D. G. Sutton and J. R. Williams, British institute of radiology (2000).

[2] NCRP Report 147: Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities (2004).

[3] AAPM report no. 96: The measurement, reporting and management of radiation dose in CT, report of AAPM task group 23 of the Diagnostic imaging council CT committee (2008).