

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

**Bijlage A16:**

**Afschermingsberekeningen  
protonen**

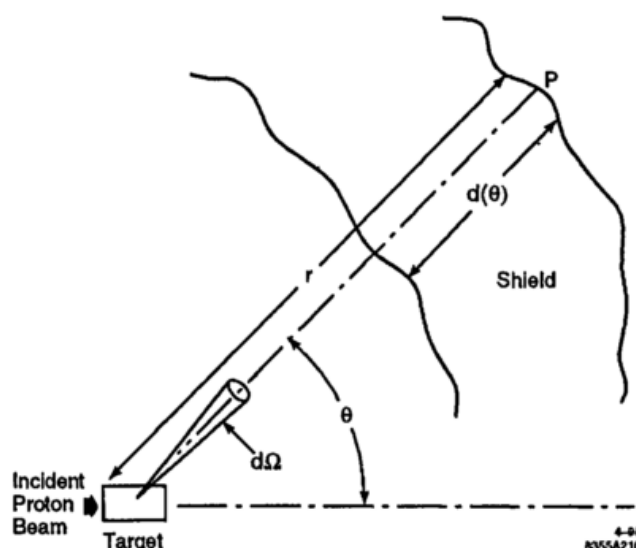
### Ten geleide

HollandPTC heeft van IBA, als leverancier van de protonentherapie-technologie, berekeningen en aanbevelingen ontvangen m.b.t. de afscherming van protonen. De gekozen betondiktes op basis van de analyse van IBA zijn vervolgens onafhankelijk gecontroleerd via berekeningen, die hieronder toegelicht worden. De eigen berekeningen bevestigen de aanbevelingen van IBA.

### 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.1. 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]:

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



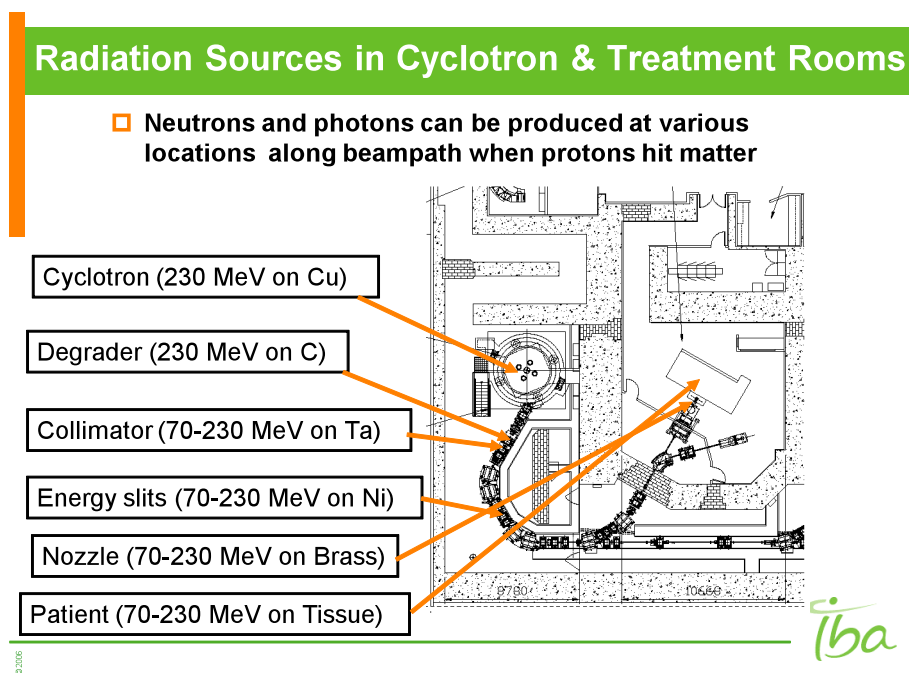
**Fig. 1:** Weergave van de Point Kernel Methode [Chao 1999].

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

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

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.

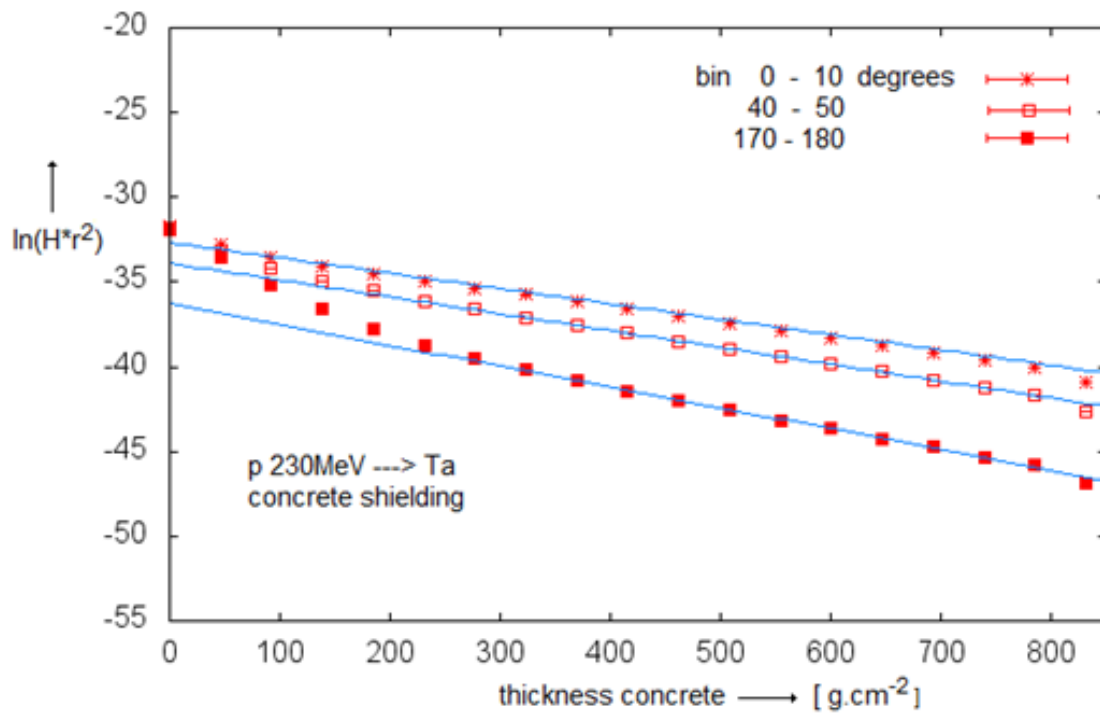
Berekeningen met MCNPX zijn gedaan voor verschillende materialen langs de bundellijn van het cyclotron waar protonen mee in aanraking kunnen komen en aanleiding geven tot secundaire neutronen. De leverancier van de protonentherapie apparatuur (IBA) heeft gedetailleerde informatie aangeleverd betreffende de bundelverliezen en materialen waarin deze bundelverliezen optreden. Fig. 2 geeft een voorbeeld hiervan voor het cyclotron en de R&D bunker. Voor protonen in de energierange 70 - 230 MeV werden simulaties gedaan voor 70, 100, 150, 180 en 230 MeV.



**Fig. 2:** Materialen waar protonen mee in aanraking kunnen komen en aanleiding geven tot secundaire neutronen. Afkomstig uit presentatiemateriaal IBA.

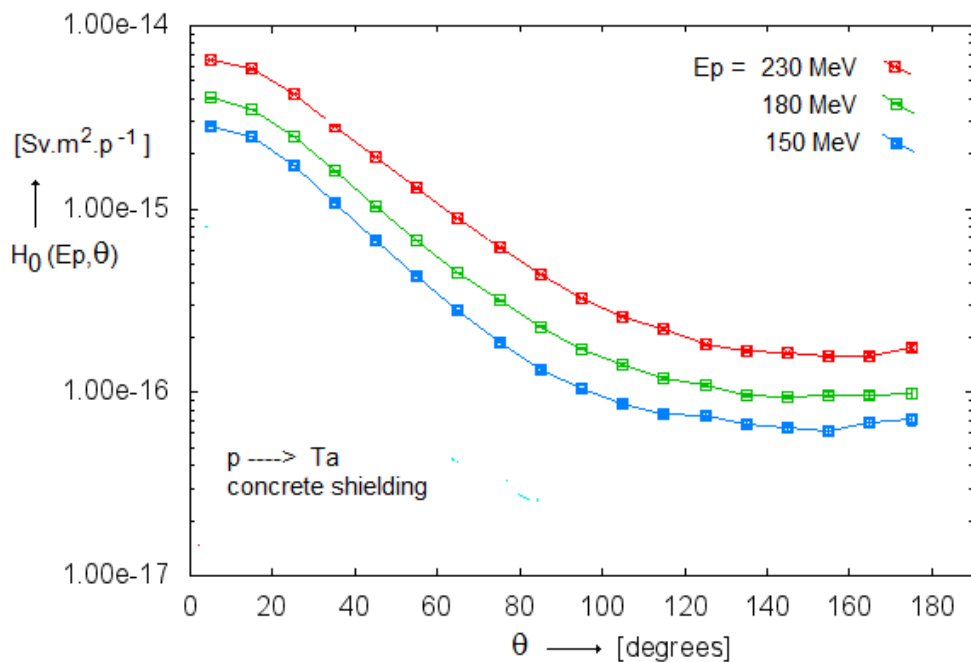
Voor elk van deze simulaties werd de neutronen flux op verschillende diepten in de betonafscherming bepaald voor verschillende hoeken  $\theta$ . Voor de transformatie van flux naar dosis werden de fluxen gevouwen met  $H^*(10)$ , Ambient dose equivalent ( $\text{pSv.cm}^2$ ), uit tabel A.42 van de ICRP-74. De waarden voor de parameters  $H_0(E_p, \theta)$  en  $\lambda(E_p, \theta)$  volgden uit fits aan deze gesimuleerde

dosispunten, zie Fig. 3. Zoals uit Fig. 3 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.

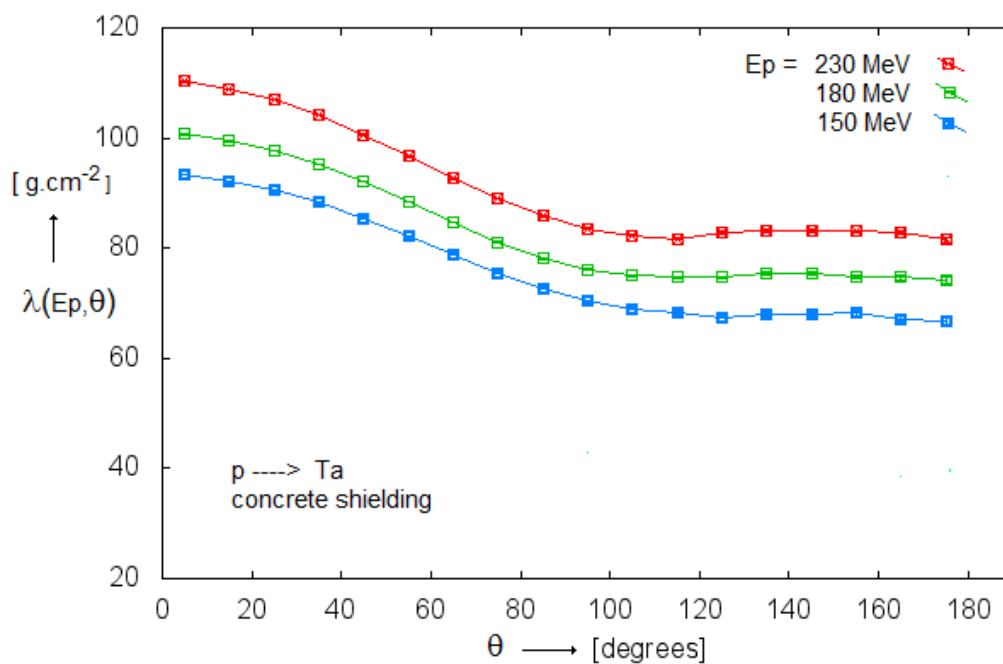


**Fig. 3:** Fits aan de neutronen dosispunten op verschillende diepten in betonafscherming voor verschillende hoeken  $\theta$ .

Fig. 4 en 5 laat de hoekafhankelijkheid zien van  $H_0(E_p, \theta)$  en  $\lambda(E_p, \theta)$  voor verschillende energieën  $E_p$ .



**Fig. 4:** De hoekafhankelijkheid van  $H_0(E_p, \theta)$  voor verschillende protonenergieën op een Ta-target.



**Fig. 5:** De hoekafhankelijkheid van  $\lambda(E_p, \theta)$  voor verschillende protonenergieën op een Ta-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 230 MeV protonen op een Ta-target. In onderstaande tabel zijn de totale doses geven voor voorwaartse richting, 0 - 10 graden, en voor achterwaartse richting, 170-180 graden. De doses zijn geven 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*.

bin	protonendosis $\text{pSv.cm}^2.\text{p}^{-1}$		fotonendosis $\text{pGy.cm}^2.\text{p}^{-1}$
0-10 gr. 0m beton	$1.7 \cdot 10^{-14}$		$2.0 \cdot 10^{-16}$
0-10 gr. 1m beton	$1.9 \cdot 10^{-16}$		$4.3 \cdot 10^{-18}$
170-180 gr. 0m beton	$1.4 \cdot 10^{-14}$		$1.7 \cdot 10^{-16}$
170-180 gr. 1m beton	$3.6 \cdot 10^{-18}$		$3.3 \cdot 10^{-19}$

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.

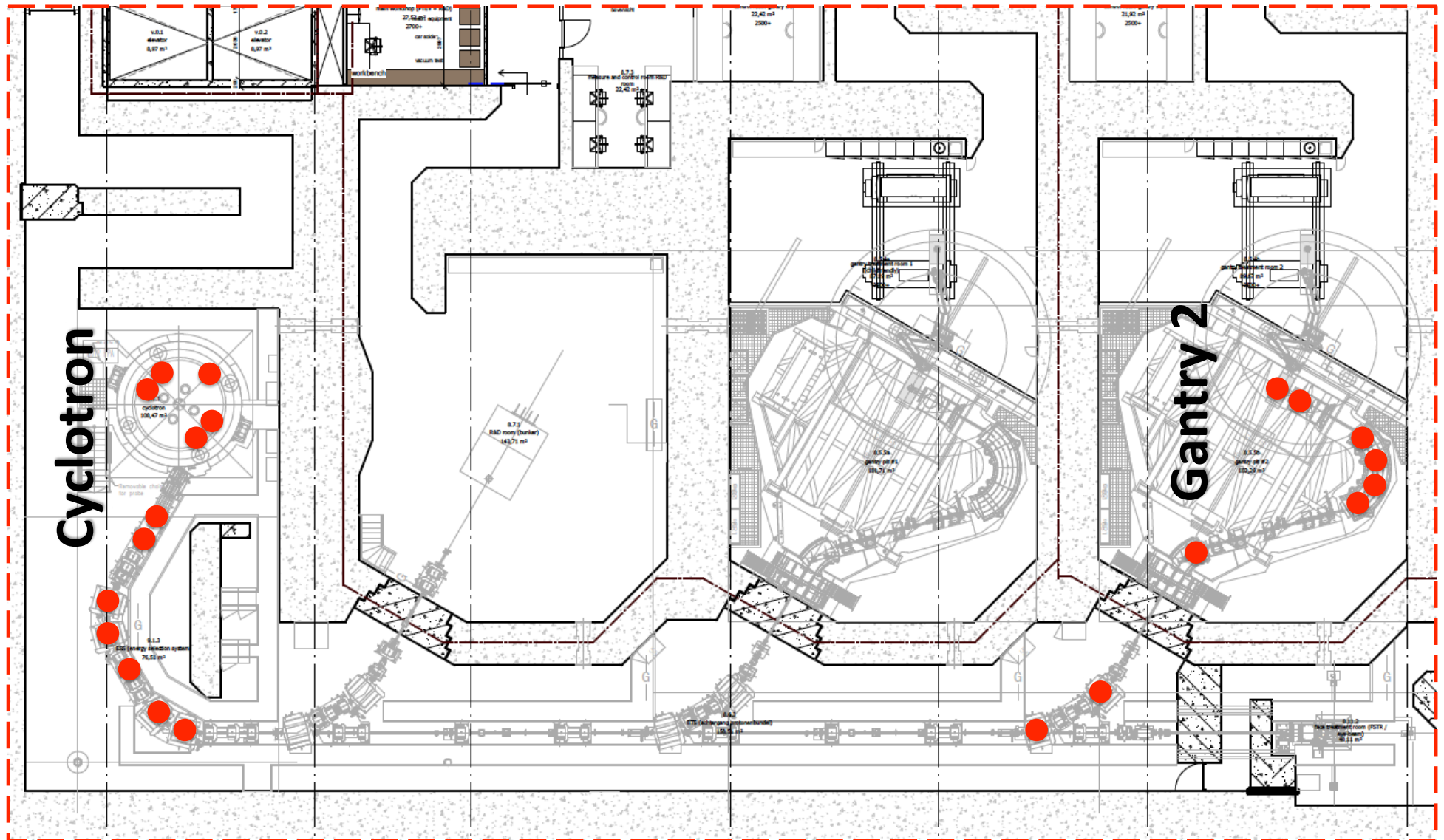
Voor de fotonen is er weinig tot geen verschil in voorwaartse of achterwaartse richting omdat de fotonen een meer homogene wolk vormen. De dosis t.g.v. achterwaartse fotonen is een factor 10 kleiner dan die van de neutronen.

### Modelering van (sub)bronnen

Bundelverliezen in het cyclotron, in de patiënt en tijdens transport van het cyclotron naar de patiënt zijn gemodelleerd als (sub)bronnen.

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 230 MeV protonen Cu raken, passeren de 1m dikke cyclotron wand van 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 1m Fe zijn anders dan voor beton alleen. De volgorde van verschillende afschermingsmaterialen is van belang.

Een andere factor van belang is de samenstelling van de betonafscherming. In de simulaties is beton gebruikt met 1 gewichtsprocent H. Bij beton met slechts 0.5 gewichtsprocent H kan de dosis 37% hoger uitvallen.



**Fig. 6:** Schematische weergave van de gemodelleerde bronnen in geval van een patiëntbestraling in gantry 2. De rode punten geven de locaties van de 21 (sub)bronnen weer.

1	HollandPTC 20/04/2013 v9				Alleen gele vlakken zijn input waarden.	
2	Run			Gantry hoek	Vetgedrukte waarden zijn input waarden voor andere tabbladen	
3	<b>Bedrijfmodus</b>	<b>GTR2 150</b>	<b>90</b>	degree	<b>Rode</b> waarden van Installatiekamer	
4						
5	<b>Protonenstroom</b>					
6			<b>Instelwaarde</b>			
7		keuze	[nA]			Selectie
8	Input	0	2,5	stroom (uit cyclotron)		Bedrijfmodi
9	Output	1	0,2	stroom (op patient)		Energie
10						
11						
12	<b>Bronnen</b>	Energie op target	IBA verlies	Targetmateriaal	Stralingssoort	verlies
13	(bundelverliespunten)	[MeV]	% totaal		Ep / Ey	eventuele Waarschuwing
14						% lokaal
15	Cyclotron 1/5 Cyc.d1	230	5	Cu	Ep	5,00
16	Cyclotron 2/5 Cyc.d2	230	5	Cu	Ep	5,26
17	Cyclotron 3/5 Cyc.d3	230	5	Cu	Ep	5,56
18	Cyclotron 4/5 Cyc.d4	230	5	Cu	Ep	5,88
19	Cyclotron 5/5 Cyc.S	230	40	Cu	Ep	50,00
20			60			
21	Degrader	230	19,7	C	Ep	19,70
22	Collimator	150	69,34	Ta	Ep	86,35
23	Dipool 1 col-en	150	0,012	Cu	Ep	0,11
24	Dipool 2 col-en	150	0,012	Cu	Ep	0,11
25	Energy slits	150	8,03	Ni	Ep	73,43
26	Dipool 3 en-	150	0,012	Cu	Ep	0,41
27	Dipool 4 en-	150	0,012	Cu	Ep	0,41
28	Dipool 5 -RenD/GTR	150	0,012	Cu	Ep	0,42
29	Dipool 6 -RenD/GTR	150	0,012	Cu	Ep	0,42
30	Dipool 1 45 GTR	150	0,012	Cu	Ep	0,42
31	Dipool 2 45 GTR	150	0,012	Cu	Ep	0,42
32	Dipool 3 GTR	150	0,012	Cu	Ep	0,42
33	Dipool 4 GTR	150	0,012	Cu	Ep	0,43
34	Dipool 5 GTR	150	0,012	Cu	Ep	0,43
35	Nozzle	150	0,012	Brass	Ep	0,43
36	Patient	150	2,786	Tissue	Ep	100,00
37			100			

**Fig. 7:** Bundelverliezen en targetmateriaal op de 21 locaties overeenkomstig Fig. 6. Tezamen met de energie van de protonenbundel dient dit als input voor berekening van de brontermen op die locaties ten gevolge van het bestralingsprogramma in gantry 2.

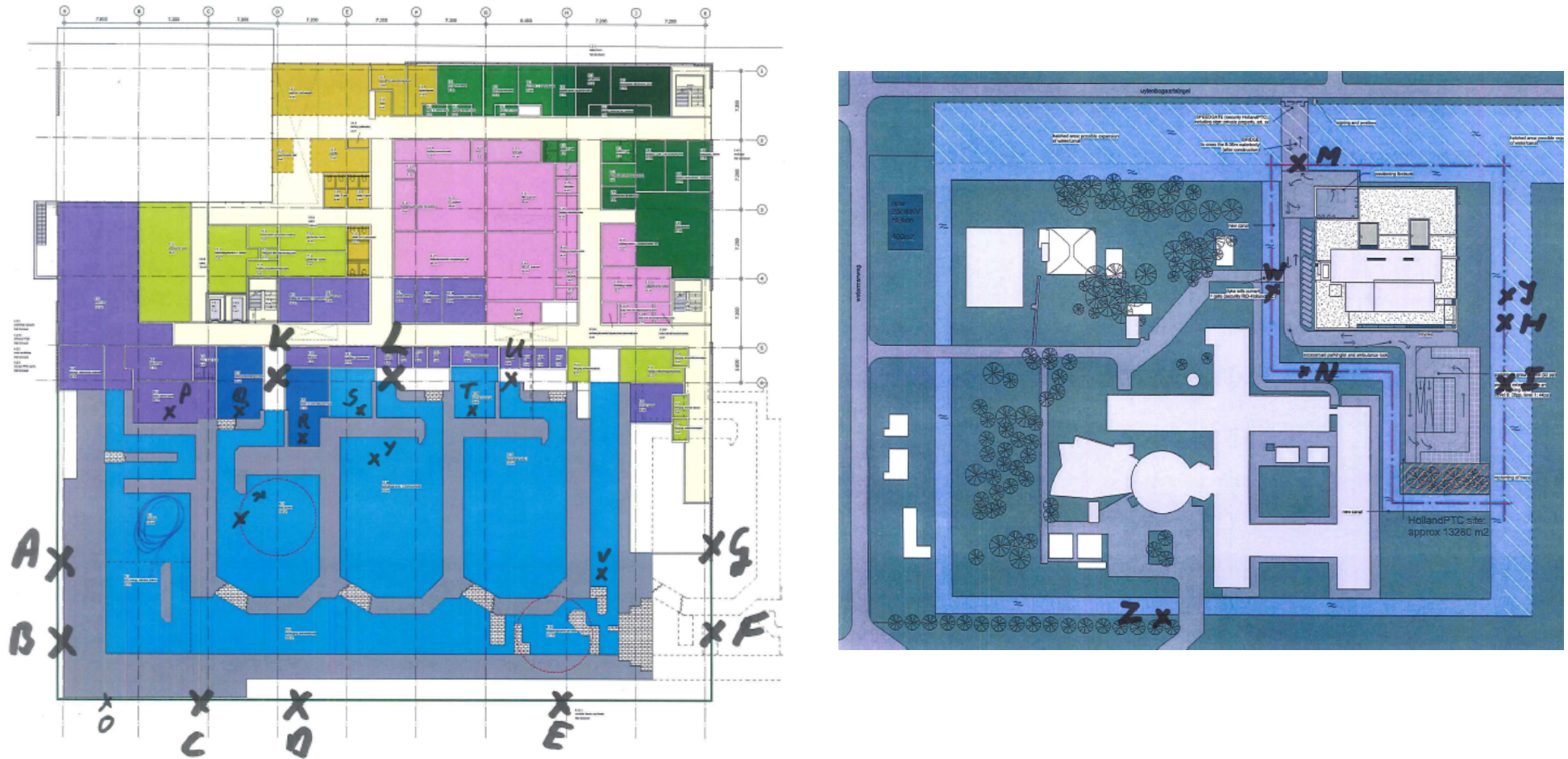


Afschermingsdikten sectienr. volgens tek.	Beginpunt a				Eindpunt b				factor:		1
	tek x [mm]	tek y [mm]	x (a) [m]	y (a) [m]	tek x [mm]	tek y [mm]	x (b) [m]	y (b) [m]	Dikte beton [m]		
1	0	0	-5,30	-13,44	0	86	-5,30	4,65	2,200	2,200	
2	0	86	-5,30	4,65	0	99	-5,30	7,38	4,75	0,998	
3	0	99	-5,30	7,38	0	130	-5,30	13,90	2,50	0,525	
4	-21	-20	-9,71	-17,64	-21	86	-9,71	4,65	2,200	2,200	
5	-9,5	86	-7,29	4,65	-9,5	99	-7,29	7,38	4,75	0,998	
6	-5	99	-6,35	7,38	-5	130	-6,35	13,90	2,50	0,525	
7	0	0	-5,30	-13,44	70	0	9,42	-13,44	2,100	2,100	
8	70	0	9,42	-13,44	209	0	38,63	-13,44	1,000	1,000	
9	209	-2,5	38,63	-13,96	252,5	-2,5	47,77	-13,96	0,750	0,750	
10	-21	-20	-9,71	-17,64	70	-20	9,42	-17,64	2,100	2,100	
11	70	-10	9,42	-15,54	209	-10	38,63	-15,54	1,000	1,000	
12	209	-10	38,63	-15,54	260	-10	49,35	-15,54	0,750	0,750	
13	27	18	0,38	-9,65	27	42	0,38	-4,61	0,535	0,535	
14	32,3	15,5	1,49	-10,18	32,3	45,5	1,49	-3,87	0,535	0,535	
15	189	5	34,43	-12,39	189	22	34,43	-8,81	7,20	1,513	
16	202	0	37,16	-13,44	202	15	37,16	-10,28	7,20	1,513	
17	233	15	43,67	-10,28	233	25	43,67	-8,18	8,50	1,786	
18	241	0	45,36	-13,44	241	16,5	45,36	-9,97	5,00	1,051	
19	252,5	-2,5	47,77	-13,96	252,5	33,5	47,77	-6,39	0,750	0,750	
20	260	-10	49,35	-15,54	260	33,5	49,35	-6,39	0,750	0,750	
21	42	28	3,53	-7,55	42	80	3,53	3,39	1,620	1,620	
22	55	38	6,26	-5,45	55	111	6,26	9,91	1,130	1,130	
23	9	80	-3,40	3,39	42	80	3,53	3,39	1,410	1,410	
24	44	80	3,95	3,39	44	108	3,95	9,27	1,130	1,130	
25	0	95	-5,30	6,54	9	95	-3,40	6,54	6,00	1,261	
26	9	95	-3,40	6,54	35,5	95	2,16	6,54	0,935	0,935	
27	9	108	-3,40	9,27	44	108	3,95	9,27	0,615	0,615	
28	9	108	-3,40	9,27	9	130	-3,40	13,90	2,50	0,525	
29	14	114	-2,35	10,54	14	130	-2,35	13,90	2,50	0,525	
30	14	114	-2,35	10,54	45	114	4,16	10,54	0,615	0,615	
31	45	114	4,16	10,54	79	114	11,31	10,54	0,573	0,573	
32	55	111	6,26	9,91	75	111	10,47	9,91	0,573	0,573	
33	64	103	8,15	8,22	106	103	16,98	8,22	1,500	1,500	
34	60	88	6,24	5,07	106	88	16,98	5,07	1,500	1,500	

Fig. 8: Modelling van betondiktes.

Bij een protonenbundellijn met gantry zijn naast de in Fig. 3 aangegeven plaatsen waar er protonverliezen optreden ook alle andere bundel elementen, zoals afbuigmagneten, ‘bronnen’ van secundaire neutronen die in een afschermingsberekening beschouwt dienen te worden. Bij het ontwerp voor HollandPTC leidt dit bij het gebruik van een gantry tot 21 (sub)bronnen gedistribueerd langs de bundellijn. Deze locaties, de bundelverliezen aldaar, alsmede de materialen waarin deze bundelverliezen optreden zijn weergegeven in Fig. 6 en Fig. 7. Deze distributie van bronnen is opgenomen in een spreadsheet waarin tevens de betonnen afschermingscontouren zijn gemodelleerd, zie Fig. 8. In eerste instantie zijn berekeningen van de jaardosis uitgevoerd voor 26 punten verdeeld over het HollandPTC gebouw en het RID terrein, zoals weergegeven in Fig. 9. De uiteindelijke berekeningen zijn in 2D gedaan. Voor een gegeven punt A buiten de afscherming wordt bij elk bronpunt voor een

beschikbare protonenenergie en protonenstroom de richting van het punt ten opzichte van de protonenbundel, de parameters  $H_0(E_p, \theta)$  en  $\lambda(E_p, \theta)$  alsmede de afstand en de effectieve betondikte langs de verbindinglijn van bron naar A bepaald, zie Fig. 10 en Fig. 11.



**Fig. 9:** Initiële locaties van dosisberekeningen. De uiteindelijke dosisberekeningen zijn in 2D uitgevoerd (zie Fig. 15)

				hoek $\alpha$ = hoek protonvector draait naar richting 'dosispunt' (linksom is positief, rechtsom negatief)					
				↓	H0				
Dosispunten	x-coördinaat	y-coördinaat	hoek $\alpha$	source term	att. length	att. length	Tot. dikte Beton	Tot. dikte IJzer	
Dp [m]	[m]	[m]	[deg]	[Sv m <sup>2</sup> p-1]	NB [m]	Fe [m]	[m]	[m]	
A	-9,98	-3,1	-70,7	6,04E-16	0,39	0,00	4,48	0,00	
B	-9,98	-13,45	-15,2	9,52E-15	0,45	0,00	6,20	0,00	
C	3,5	-18	49,7	2,00E-15	0,42	0,00	6,05	0,00	
D	17,28	-18	84,4	2,73E-16	0,37	0,00	4,75	0,00	
E	43,01	-18	103,3	1,02E-16	0,34	0,00	12,40	0,00	
F	58,03	-11,48	113,5	6,30E-17	0,33	0,00	32,64	0,00	
G	58,03	-2,9	121,8	4,36E-17	0,33	0,00	10,65	0,00	
H	78,66	-11,38	115,3	5,74E-17	0,33	0,00	32,16	0,00	
I	78,66	-41,38	95,4	1,48E-16	0,35	0,00	11,36	0,00	
J	78,66	1,675	124,6	3,78E-17	0,33	0,00	10,68	0,00	
K	12,55	14,9	175,0	8,46E-18	0,35	0,00	6,19	0,00	
L	24,08	14,9	157,8	1,24E-17	0,33	0,00	13,28	0,00	
M	-16,325	54,625	-135,7	2,26E-17	0,33	0,00	4,89	0,00	
N	-14,325	-37,375	8,1	9,88E-15	0,46	0,00	4,53	0,00	
O	-5,35	-18	12,7	9,67E-15	0,45	0,00	4,40	0,00	
P	1,03	11,38	-158,0	1,23E-17	0,33	0,00	3,61	0,00	
Q	8,44	12	-180,0	8,45E-18	0,35	0,00	7,47	0,00	
R	15,43	8,69	158,9	1,21E-17	0,33	0,00	9,67	0,00	
S	21,4	11,38	155,5	1,30E-17	0,33	0,00	12,18	0,00	
T	33,75	11,38	144,8	1,58E-17	0,33	0,00	9,50	0,00	
U	37,04	14,9	147,2	1,51E-17	0,33	0,00	9,96	0,00	
V	46,71	-4,76	120,0	4,74E-17	0,33	0,00	10,64	0,00	
W	-28,33	0,01	-70,0	6,31E-16	0,39	0,00	4,47	0,00	
X	9,05	-0,62	141,9	1,80E-17	0,33	0,00	3,49	0,00	
Y	22,63	19,86	165,9	1,02E-17	0,34	0,00	7,51	0,00	
Z	14,85	8,58	159,7	1,19E-17	0,34	0,00	9,65	0,00	

**Fig. 10:** Bepaling van de bronterm als functie van de hoek van het dosispunt t.o.v. de inkomende bundel op de (sub)bron.



Oorsprong (0,0) coördinatenstelsel is centrum cyclotron			dose	dose	dose	dose	dose	dose	dose	dose
Dosispunten	x-coördinaat	y-coördinaat	Totaal	Cyclotron	Degrader	Collimator	Dipool 1 col-en	Dipool 2 col-en	Energy slits	Dipool 3 en-
Dp [m]	[m]	[m]	[mikroSv/h]	[mikroSv/h]	[mikroSv/h]	[mikroSv/h]	[mikroSv/h]	[mikroSv/h]	[mikroSv/h]	[mikroSv/h]
A	-9,98	-3,1	2,91E-03	1,70E-04	2,46E-03	2,77E-04	8,40E-10	5,37E-11	6,57E-08	2,49E-12
B	-9,98	-13,45	2,38E-03	1,93E-07	2,21E-03	1,72E-04	3,60E-08	3,51E-09	1,10E-06	9,88E-10
C	3,5	-18	1,34E-03	6,99E-04	1,84E-04	9,75E-06	1,76E-07	1,02E-06	4,43E-04	2,05E-06
D	17,28	-18	4,74E-05	4,11E-09	4,27E-05	4,70E-06	3,31E-13	2,99E-12	3,34E-08	1,53E-11
E	43,01	-18	6,96E-04	1,10E-12	3,38E-16	1,02E-18	1,49E-17	8,31E-17	1,17E-13	1,49E-17
F	58,03	-11,48	5,96E-03	1,04E-14	1,90E-43	4,55E-50	1,61E-65	5,82E-33	6,96E-09	7,59E-10
G	58,03	-2,9	1,60E-02	9,41E-11	3,21E-15	1,00E-16	1,01E-22	7,72E-43	3,45E-25	1,23E-27
H	78,66	-11,38	3,68E-03	9,36E-12	2,59E-43	1,07E-49	4,14E-47	3,67E-17	3,66E-09	4,07E-10
I	78,66	-41,38	4,61E-07	2,90E-12	7,69E-15	2,15E-17	5,98E-13	1,31E-11	1,45E-10	5,78E-13
J	78,66	1,68	2,58E-03	6,40E-11	1,17E-15	4,34E-17	7,46E-21	3,86E-21	7,93E-22	1,10E-21
K	12,55	14,9	4,51E-07	4,39E-07	8,79E-09	2,93E-09	1,44E-13	4,77E-18	3,79E-18	2,16E-22
L	24,08	14,9	1,65E-08	7,57E-11	2,09E-18	2,85E-20	3,76E-23	7,53E-25	1,18E-21	1,60E-18
M	-16,325	54,625	4,41E-04	4,40E-04	6,73E-08	6,49E-08	2,64E-15	8,74E-16	3,68E-11	1,16E-13
N	-14,325	-37,375	1,50E-02	3,64E-05	1,29E-02	2,10E-03	4,77E-07	9,31E-08	1,27E-05	2,14E-09
O	-5,35	-18	1,16E-01	2,37E-04	9,96E-02	1,63E-02	6,20E-06	2,11E-06	1,95E-04	6,25E-09
P	1,03	11,38	1,98E-03	1,87E-03	3,00E-05	7,68E-05	2,83E-09	3,38E-09	1,46E-06	3,98E-09
Q	8,44	12	4,98E-07	4,97E-07	3,40E-10	4,46E-11	2,15E-15	3,05E-18	2,17E-15	7,73E-21
R	15,43	8,69	1,03E-07	1,03E-07	2,40E-13	2,09E-14	1,72E-18	3,12E-19	1,64E-16	9,29E-18
S	21,4	11,38	1,07E-08	6,59E-12	6,17E-17	2,03E-18	1,18E-20	3,02E-20	4,12E-17	1,51E-21
T	33,75	11,38	4,66E-03	1,01E-15	1,49E-13	1,38E-14	9,71E-20	7,27E-19	4,31E-15	4,58E-17
U	37,04	14,9	2,96E-03	5,41E-14	2,81E-14	2,22E-15	1,50E-21	7,23E-20	8,54E-19	7,33E-18
V	46,71	-4,76	3,07E-02	1,62E-10	6,05E-15	1,70E-16	3,18E-24	4,81E-51	1,39E-14	4,31E-28
W	-28,33	0,01	3,57E-04	3,79E-05	2,87E-04	3,24E-05	7,72E-10	9,28E-11	1,67E-08	2,80E-11
X	9,05	-0,62	4,72E-02	4,68E-02	1,29E-04	2,72E-04	9,53E-11	8,35E-10	2,86E-07	1,23E-09
Y	22,63	19,86	1,78E-07	1,67E-07	7,42E-11	1,42E-11	8,17E-16	2,47E-21	4,59E-20	1,13E-19
Z	14,85	8,58	1,15E-07	1,15E-07	2,81E-13	2,32E-14	1,79E-18	2,97E-19	1,26E-16	5,28E-19

**Fig. 12:** Sommering van de dosisbijdrage van alle subbronnen naar verschillende dosispunten.

In een tweede spreadsheet worden deze gegevens gebruikt om per behandelingstype met de daarbij behorende stroom, duur en bundelenergieën de totale dosisverwachting een punt te berekenen. Hierbij wordt rekening gehouden met het geplande behandelingen en typen therapieën, resulterend in de totale te verwachte dosis per jaar, zie Fig. 13 en Fig. 14.

Indicatie	Aantal/jaar	Behandeldosis [Gy]	Dosis/jaar	Doelvolumen [liter]	Diepteversdeling				Behandelskamer				
					0-7,5 cm 100 MeV	7,5-15 cm 150 MeV	15-21 cm 180 MeV	21-32 cm 230 MeV	R&D	GTR1	GTR2	Eye	
					32 [%]	10,24 [%]	11,16 [%]	13,64 [%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
Children CSI	60	60	3600	1		90	10				50	50	
Head & Neck	290	70	20300	0,25		70	30				50	50	
Lung conven.	100	60	6000	0,5		30	50	20			50	50	
Liver and Lung SBRT	50	50	2500	0,25		40	60				50	50	
Breast	100	54	5400	0,1		100					50	50	
Gastrointestinal	100	50	5000	2		10	30	60			50	50	
Sarcomas	50	50	2500	1,5			60	40			50	50	
Prostate	100	70	7000	0,5			30	70			50	50	
Other	100	50	5000	0,5			70	30			50	50	
R&D			35000	1		40	30	30	90		5	5	
Eyes extra	50	70	3500		100								100
Eyes	50	70	3500		100								100

**Fig. 13:** Gegevens betreffende het bestralingsprogramma, uitgesplitst naar tumor-indicatie, en naar het gebruik van de verschillende bestralingsbunkers.



Tevens is een 2-dimensionale map gecreëerd van de jaardosis in enig punt in en om HollandPTC. Onderstaande figuur representeert deze uitkomst met een kleurcodering (de getallen in de legenda zijn in  $\mu\text{Sv}$  per jaar). In de **Bijlage “Jaardosis personen”** 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 “MR Analyse Gevolgen Ioniserende Straling”**.

### Modelering in verticale richting

Zie hoofdstuk ‘Modelering in verticale richting’ in de Bijlage ‘Jaardosis personen’.

### 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, leverancier van de protontherapie apparatuur, en de stralingsbeschermings experts van HollandPTC. Hierbij is o.a. gelet op dat er niet een veelheid van doorvoeren ‘parallel’ liggen en daarmee de afschermende 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 polytheenkorrels of dichtgestort. Indien nodig worden ook gebruikte doorvoeren opgevuld met polytheenkorrels.





Fig. 15: Jaardosis in en rond het bunkergedeelte van HollandPTC. De getallen in de legenda zijn in  $\mu\text{Sv}$  per jaar.

## Referenties

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

[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.

[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.