

RISICOANALYSE PROTONENTHERAPIE (ZON-CCT-V1)

1 INLEIDING

Voor aanvang van de handelingen met bronnen van ioniserende straling, dienen de risico's die daarmee gepaard gaan voor de betrokken werknemers en de omgeving te worden vastgelegd in een risicoanalyse. Deze risicoanalyse dient inzicht te geven in zowel de blootstelling die als gevolg van reguliere bedrijfsomstandigheden wordt ontvangen, alsook de potentiële blootstelling; 'Voorziene Onbedoelde Gebeurtenissen' (VOG).

De onderstaande risicoanalyse voor het toepassen van protonentherapie is uitgevoerd conform de systematiek die is uiteengezet in de 'Leidraad risicoanalyse stralingstoepassingen' van het RIVM¹.

De risicoanalyse geeft per blootstellingspad een schatting van de stralingsbelasting die hiermee gepaard gaat. Aan het einde van dit document wordt de blootstelling van werknemers naar functie bepaald.

De gegevens van de CBCT en van Mevion dienen beschouwd te worden als vertrouwelijk en mogen niet verspreid worden aan derden.

GEDEFINIEERDE BLOOTSTELLINGSPADEN:

- (reguliere) externe blootstelling ten gevolge van protonen in de omgeving van de bestralingsbunker;
- (reguliere) blootstelling ten gevolge van luchtactivatie in de bestralingsbunker na afloop van behandelingen;
- (reguliere) externe blootstelling ten gevolge van röntgenstraling in de bestralingsruimte, afkomstig van het toestel Medphoton Imaging Ring; het betreft een ConeBeam CT (CBCT) met een maximale buisspanning van 150 kV;
- (reguliere) externe blootstelling ten gevolge van röntgenstraling in de bestralingsruimte, afkomstig van het röntgentoestel Varian CPI Indico 100 Rad series, dat 2 röntgenbuizen met een maximale hoogspanning van 150 kV bevat;
- (potentiële) blootstelling ten gevolge van een VOG.

¹ Rapport 620850001/2010, S. Bader

CONTENTS

Risicoanalyse protonetherapie (ZON-CCT-v1).....	1
1 Inleiding.....	1
Gedefinieerde Blootstellingspaden:.....	1
2 Externe blootstelling door protonenstraling	3
3 Blootstelling ten gevolge van luchtactivatie	5
4 Externe blootstelling ten gevolge van de ConeBeam-CT	8
5 Externe blootstelling ten gevolge van het röntgentoestel Varian	10
6 Voorziene Onbedoelde Gebeurtenissen (VOG)	12
Cone Beam CT	12
Röntgentoestel.....	13
7 Gesommeerde blootstelling en conclusies	14
Categorie indeling ruimten ZON-PTC.....	18
Verificatie berekeningen en dosimetrie.....	19
Bijlage 1 onderbouwing workload protonenversneller	20
Bijlage 2 Locatieaanduiding berekende dosispunten.....	21
Bijlage 3 Berekening stroostraling cbct.....	26

2 EXTERNE BLOOTSTELLING DOOR PROTONENSTRALING

Voor de bepaling van de externe blootstelling ten gevolge van protonen, is gebruik gemaakt van voor dit doel uitgevoerde Monte Carlo berekeningen, waarmee dosisniveaus op verschillende plekken in en buiten het MAASTRO gebouw zijn bepaald. Deze berekeningen zijn uitgevoerd door J.V. Siebers op vraag van ZON-PTC. Dit document, met de resultaten van deze berekeningen, is toegevoegd ter informatie². Figuur 4, 5 en 6 en Tabel 5 in dit document geven informatie over weekdoses in ruimten waarin medewerkers werkzaamheden uitvoeren.

De voorliggende berekeningen geven een prognose van de dosisniveaus in de omgeving van de met beton afgeschermdde bestralingsbunker. De berekeningen zijn uitgevoerd uitgaande van de workload van ZON-PTC, zijnde 1000 Gy/week (nadere uitleg voor het bepalen van de workload is terug te vinden in *bijlage 1*). Het verblijf in de voor medewerkers meest relevante ruimten is het uitgangspunt voor de bepaling van de blootstelling. Hierbij worden steeds conservatieve aannames gedaan.

In *Tabel 1* van deze risicoanalyse wordt een overzicht gegeven van de handelingen die medewerkers uitvoeren, de ruimten waarin deze plaatsvinden, en de tijdsduur die ermee gepaard gaat. *Tabel 2* toont een jaardosis bij aanwezigheid of verblijf in ruimten die van belang zijn voor de dosis van niet-blootgestelde medewerkers en bezoekers van de campus Randwyck. In alle gevallen is gekozen voor de meest ongunstige waarden, hetgeen impliceert dat de dosis op alle andere punten lager is dan de hier getoonde. De bewuste locaties van de berekende doses worden aangeduid op plattegronden (*Bijlage 2*).

De dosis per handeling of naar aanleiding van verblijf in ruimten van de protonenfaciliteit is afgeleid uit het document van Siebers², voor de verblijfstijden is NCRP147 de referentie geweest, en de jaardosis is berekend door vermenigvuldiging met een factor 50.

De berekening van de jaardosis is een weergave van de dosis die één medewerker ontvangt indien deze alle handelingen in een jaar zou uitvoeren, en daarmee een forse overschatting.

In het rapport van Siebers² wordt er ook onderscheid gemaakt tussen de bijdrage aan de dosis enkel afkomstig van neutronen en de dosis afkomstig van neutronen en gamma's. In de hier getoonde berekeningen is met alle bijdragen rekening gehouden; de bijdrage van neutronen is dus inclusief. Voor meer details wordt verwezen naar het betreffende document.

² Vertaling van 'Monte Carlo verification of the radiation shielding design of the MAASTRO Mevion 250 MeV proton therapy treatment room', J.V. Siebers, juli 2016, geïnccludeerd in *Bijlage 12.10* van de aanvraag *Complexvergunning*

Tabel 1: dosispunten relevant voor de blootstelling van medewerkers ZON-PTC

Dosispunt	Dosis ten gevolge van gamma straling en neutronen [$\mu\text{Sv}/\text{week}$]	Verblijfsfactor	Jaardosis [$\mu\text{Sv}/\text{jaar}$]
ingang labyrint (4.12)	1.6	0.05	4
bedieningsruimte (4.13)	0.7	1	35
gang / wachtkamer (4.14)	0.3	0.2	3
bunker 7 (4.5) ³	0.7	1	35

Tabel 2: dosispunten relevant voor de (externe) blootstelling van niet-blootgestelde medewerkers en bezoekers

Dosispunt	Dosis ten gevolge van gamma straling en neutronen [$\mu\text{Sv}/\text{week}$]	Verblijfsfactor	Jaardosis [$\mu\text{Sv}/\text{jaar}$]
Dak protonenbunker (1.4)	3.7	0.05	9
Loopbrug azm-MAASTRO (3.3)	2.8	0.2	28
Kantoor NG (4.3)	1.0	1	50

³ In Tabel 2.8.3 in het document van Siebers³ is de beschrijving van punten 4.4 en 4.5 verwisseld. Conform Figuur 5 representeert punt 4.4 de buitenzijde van de bunker die gericht is naar Nucleaire Geneeskunde azM, en punt 4.5 de aangrenzende bunker bij MAASTRO Clinic. De bij punt 4.4 genoemde dosis wordt toegeschreven aan de aangrenzende bunker MAASTRO en vice versa.

3 BLOOTSTELLING TEN GEVOLGE VAN LUCHTACTIVATIE

De blootstelling ten gevolge van luchtactivatie in de bunker, is afgeleid van berekeningen die bij een toepassing in Lausanne⁴, Zwitserland, zijn gedaan voor dit doel. De omstandigheden aldaar zijn een op een te vergelijken met de Maastrichtse situatie, aangezien voor inrichting en gebruik van de Mevion protonenversneller vaste condities gelden. Het betreffende document geeft informatie over hoeveelheden activiteit van radioactieve elementen die in de bestralingsbunker ontstaan als gevolg van luchtactivatie tijdens bestraling met protonen.

De gegevens voor de berekening van de effectieve inhalatie en immersie dosis in een jaar (ID_{inh} , berekend conform Bijlage 1.5 van de 'Uitvoeringsregeling stralingsbescherming EZ'), zijn afgeleid van het document 'Simulations Monte Carlo des futurs bunkers proton du CHUV'⁵, meer specifiek uit Figuur 65 van dit betreffende document. In dit document werden Monte Carlo simulaties uitgevoerd voor de berekening van onder meer de afscherming van een Mevion protonenversneller in Lausanne, Zwitserland.

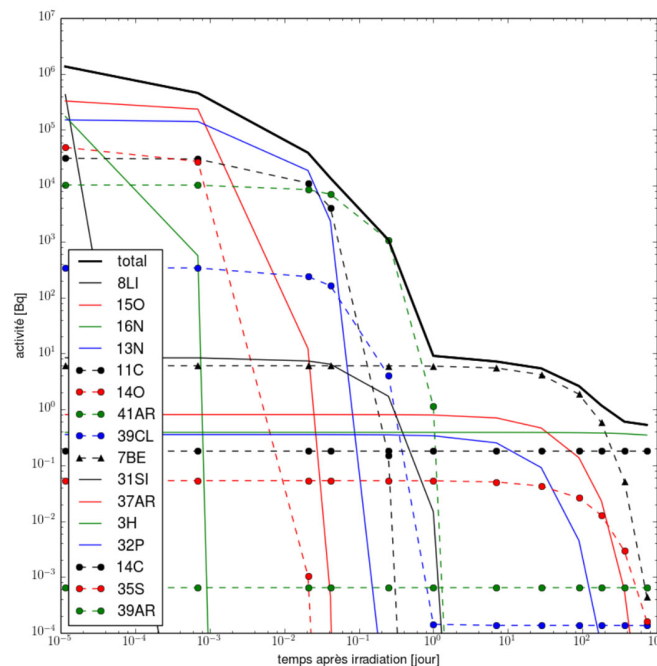
Het document bevat eveneens berekeningen en prognoses voor de activatie van lucht en beton als gevolg van de werking van dit 250 MeV cyclotron.

Aangezien het cyclotron in Lausanne identiek is aan dat in Maastricht bij ZON-PTC wordt geplaatst en de afmetingen en samenstelling van het beton van de bestralingsbunker vergelijkbaar zijn met de bunker die bij ZON-PTC wordt gerealiseerd, kunnen de resultaten uit deze simulaties gebruikt worden voor het inschatten van de activatie van lucht in het Maastrichtse. Dit wordt in de volgende paragrafen in meer detail beschreven.

Figuur 65 uit het Lausanne-document⁴ is in deze risicoanalyse opgenomen als *Figuur 1*. Uit deze figuur zijn de luchtconcentraties afgelezen van de nucliden die zijn ontstaan onder invloed van de protonenbestraling, en wel 1 minuut nadat de bestraling is afgelopen. Dit is het moment waarop medewerkers de bunker doorgaans betreden om de patiënt te begeleiden, dan wel om handelingen in het kader van wetenschappelijk onderzoek te verrichten. Deze waarden zijn gebaseerd op een dagdosis van 200 Gy; en er is geen rekening gehouden met ventilatie van de ruimte die van invloed is op de luchtconcentratie van de aanwezige nucliden, waarmee dit een zeer conservatieve aanname is.

⁴ Vertaalde samenvatting van 'Simulation Monte Carlo bunkers proton du CHUV', L. Desorgher, februari 2016

⁵ Document en in het Nederlands vertaalde samenvatting daarvan als onderliggende documentatie bijgevoegd in Bijlage 12.10 van de aanvraag Complexvergunning



Figuur 1 Berekening van het verval van de meest radioactieve isotopen in de lucht in de bestralingsbunker, ontstaan na een bestraling van 200 Gy verdeeld over 8 uren. In deze berekening was de bundel gericht naar het plafond.

Voor de vaststelling van de effectieve jaardosis bij permanent verblijf in de bunker zijn de volgende aannames gedaan:

- het volume van de geactiveerde lucht wordt verondersteld 125 m³ te zijn; waarbij wordt aangenomen dat de aanwezige activiteit homogeen over dit volume is verdeeld;
- het ademdebiet van medewerkers wordt gesteld op 1.5 m³/uur;
- de tijd dat men in een jaar (voltijds) werkzaam is wordt gesteld op 2000 uur;
- de waarden voor de dosiscoëfficiënt voor inhalatie zijn betrokken van bijlage 1.4 van de 'Uitvoeringsregeling stralingsbescherming EZ'.

Voor enkele nucliden, namelijk die van zuurstof (O) en stikstof (N) konden géén waarden voor de dosiscoëfficiënt worden gevonden, ook niet in ICRP publicatie 119 (annex A). Voor een conservatieve schatting is om die reden de dosiscoëfficiënt voor inhalatie van positronemitter F-18 (halveringstijd 110 minuten) toegekend aan deze nucliden. De halveringstijden van deze nucliden zijn kort en variëren tussen 7 seconden en 10 minuten. In Tabel 3 is voor de overige nucliden weergegeven welke bijdrage zij leveren aan de inhalatiedosis in een jaar.

De effectieve dosis ten gevolge van blootstelling aan edelgassen (submersie) is eveneens berekend conform de methodiek uit Bijlage 1.4 van de 'Uitvoeringsregeling Stralingsbescherming EZ'. Luchtconcentraties voor edelgas Argon is afgelezen uit Figuur 2.1. (Figuur 65 van het eerder genoemde

document), correctiefactoren voor beperkt volume van de ruimte zijn afgeleid uit ICRP 30⁶. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in Tabel 4.

Tabel 3: Effectieve inhalatiedosis in een jaar als gevolg van verblijf in de protonenbunker na bestraling

Nuclide	Activiteit na 1 min [Bq]	Luchtconcentratie [Bq/m ³]	e _{inh} [Sv/Bq]	ademdebiet [m ³ /uur]	verblijfs-factor	tijd/jaar [h]	ID _{inh} [mSv/jaar]
C-11	1 E+05	800	3.2 E-12	1.5	1	2000	7.68 E-03
N-13 ⁶	1 E+05	800	9.3 E-11	1.5	1	2000	2.24 E-01
O-15 ⁷	1 E+05	800	9.3 E-11	1.5	1	2000	2.24 E-01
Cl-39	1 E+03	800	7.6 E-11	1.5	1	2000	1.82 E-03
Be-7	1 E+01	0.08	5.2 E-11	1.5	1	2000	1.25 E-05
Si-31	1 E+01	0.08	1.1 E-10	1.5	1	2000	2.64 E-05
H-3	1 E+00	0.008	4.1 E-11	1.5	1	2000	9.84 E-07
P-32	1 E+01	0.08	3.2 E-09	1.5	1	2000	7.68 E-04
C-14	1 E+00	0.008	5.8 E-10	1.5	1	2000	1.39 E-05
S-35	1 E-01	0.0008	1.3 E-09	1.5	1	2000	3.12 E-06
Totaal							4.58 E-01

Tabel 4: Effectieve submersie dosis in een jaar als gevolg van verblijf in de protonenbunker na bestraling

Nuclide	Activiteit na 1 min [Bq]	Correctiefactor beperkt volume ⁸	Concentratie in lucht C _l [Bq/m ³]	verblijfs-factor	tijd/jaar [h]	e _{sub} [Sv.m ³ /Bq.d]	ID _{sub} [mSv/jaar]
Ar-37	1 E+00	1	0.008	1	2000	4.1 E-15	6.6 E-11
Ar-39	1 E-03	1	0.000008	1	2000	1.1 E-11	1.8 E-10
Ar-41	1 E+04	0.05	80	1	2000	5.3 E-09	4.2 E-02
Totaal							4.2 E-02

⁶ Wegens het niet voorhanden zijn van de e_{inh} waarde van dit nuclide, is de waarde van positronemitter F-18 gebruikt

⁷ Wegens het niet voorhanden zijn van de e_{inh} waarde van dit nuclide, is de waarde van positronemitter F-18 gebruikt

⁸ Correctiefactoren voor Argon-41 voor beperkt volume van de ruimte werden afgeleid uit ICRP 30 sup. Part2

Berekening dikte van gebruikte loodafscherming:

Op 3m afstand van het isocentrum, 1.2 m boven de grond:

($<$) $10 \mu\text{Sv/CBCT} \times 288 \text{ CBCT/week} = 2880 \mu\text{Sv/week} = 2.9 \text{ mSv/week}$

Volgens de kwadratenwet is dat op 4m afstand van het isocentrum:

$2.9 \text{ mSv/week} \times 32/42 = 1.7 \text{ mSv/week}$ (dit impliceert een dosis per opname van $5.7 \mu\text{Sv}$ zonder afscherming).

A. TRANSMISSION DATA / 123

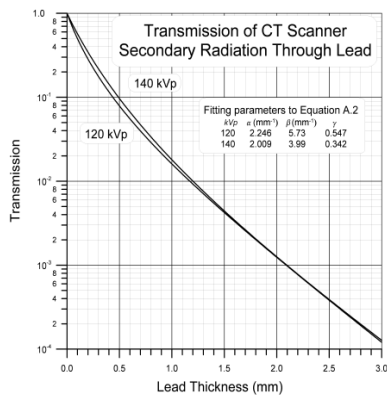


Fig. A.2. Transmission through lead of secondary radiation from CT scanners [data of Simpkin (1991) fitted to Equation A.2].

*Figuur 3 Transmissie door lood van secundaire straling afkomstig van een CT scanner.
[bron: NCRP 147]*

Indien men een Pb afscherming gebruikt met dikte 2mm, heeft men een transmissie factor van 0.0015 voor 120 kVp. [NCRP 147 en Figuur. 3 hier weergegeven uit deze publicatie]

Het toepassen van een loodafscherming met een dikte van 2 mm reduceert de dosis ter plekke van de bediening tot:

$1.7 \text{ mSv/week} \times 0.0015 = 2.6 \mu\text{Sv/week}$; dit impliceert een blootstelling van 8.6 nSv/opname bij toepassen van de afscherming van 2 mm lood.

Dit komt overeen met een maximale blootstelling als gevolg van het maken van reguliere opnamen achter het loodscherp van 0.128 mSv/jaar .

Om goed zicht te kunnen houden op de patiënt, zal in de loden afscherming worden voorzien in een raam waarin 2.1 mm loodequivalent is verwerkt.

Bijdrage stroostraling

De bijdrage van stroostraling aan de wanden van de ruimte aan de blootstelling van de medewerker wordt nader uitgewerkt in *bijlage 3*. Deze wordt als verwaarloosbaar beschouwd.

5 EXTERNE BLOOTSTELLING TEN GEVOLGE VAN HET RÖNTGENTOESTEL VARIAN

In de betreffende bunker voor protontherapie is additioneel aan het cyclotron en de ConeBeam (CB) CT en röntgentoestel geplaatst. Het betreft een toestel van fabrikant Varian, type CPI Indico 100 Rad Series, dat twee röntgenbuizen met een maximale buisspanning van 150 kV bevat. De opnamen met dit toestel vinden, evenals de CBCT-opnamen, plaats in de bunker voorafgaand aan de bestraling en worden uitgevoerd door 2 laboranten die zich achter een loden afscherming bevinden, dan wel door twee onderzoekers in het kader van wetenschappelijk onderzoek. Het toestel is gefixeerd in de bestralingsruimte en maakt onlosmakelijk deel uit van de protonentoepassing.

Technische specificaties Varian Indico 100 RAD series X-ray generator:

- 2 röntgenbuizen met een maximale hoogspanning van 150 kV
- 0.5 mm Al filter

Gegevens en aannames voor de opgestelde risicoanalyse:

- opnames in het hoofd-hals gebied bij een buisspanning van 80 kV resulteren in een patiëntdosis van 0.180 mSv (PA) en 0.053 mSv (LAT)
- opnames in het bekkengebied bij een buisspanning van 150 kV resulteren in een patiëntdosis van 1.89 mSv (zowel PA als LAT)
- workload ZON-PTC: gebaseerd op 12.000 fracties voor 400 patiënten, waarbij mag worden aangenomen dat er per fractie 1 opnames wordt gemaakt (12.000 opnames/jaar)
- 1 opname per patiënt, waarbij wordt aangenomen dat deze gelijkelijk zijn verdeeld over beide opnamegebieden en oriëntaties (PA en LAT), waarmee van iedere opnamegebied, per oriëntatie 3000 opnames per jaar worden gemaakt;
- loodafscherming wordt op ongeveer 4 m afstand van het **isocentrum** geplaatst in de bunker van ZON-PTC (voor een plattegrond van de situatie ter plekke wordt verwezen naar *Figuur 2* in dit document)

Blootstellingsberekening als gevolg van de röntgenopnames:

Voor het berekenen van de fractie verstrooide straling die ontstaat als gevolg van het maken van opnames van patiënten, si gebruik gemaakt van de methodiek die is beschreven in de BIR-uitgave '*Radiation shielding for diagnostic radiology*', meer specifiek § 2.2.2, formule 2.2.

Daarbij is, gebaseerd op de positie van röntgentoestel en loodafscherming/bedieningsconsole, uitgegaan van een verstrooiingshoek van 90°.

Voor de afscherming van secundaire straling in lood is eveneens uitgegaan van bovengenoemde BIR-uitgave, meer specifiek § 4.3, tabel 4.3. Als gemiddelde waarde voor de buisspanning wordt uitgegaan van 120 kV, aangezien het grootste deel van de opnames wordt gemaakt bij 80, resp. 120 kV. Voor deze buisspanning bedraagt voor de secundaire straling de halveringsdikte in lood 0.31 mm. De dikte van het loodscherm bedraagt 2 mm.

Dit resulteert in onderstaande berekening voor de reguliere blootstelling als gevolg van het maken van röntgenopnames:

Tabel 5: Gesommeerde blootstelling ten gevolge van het maken van röntgenopnames in de bestralingsruimte

Opname gebied	Oriëntatie	Buisspanning	Dosis per opname [µSv]	Aantal opnames per jaar	Scatterfractie	Afstand [m]	Transmissie factor	Dosis als gevolg van de handelingen [µSv/jaar]
hoofd-hals	PA	80	180,3	3000	5.3 E-03	4	0.011	2.04
	LAT	80	53,3	3000	5.3 E-03	4	0.011	0.60
bekken	PA	150	1894	3000	5.3 E-03	4	0.011	21.40
	LAT	120	1894	3000	5.3 E-03	4	0.011	21.40
Totale blootstelling als gevolg van de gesommeerde handelingen								45.45

Bijdrage stroostraling

De bijdrage van stroostraling aan de wanden van de ruimte aan de blootstelling van de medewerker wordt als verwaarloosbaar beschouwd.

6 VOORZIENE ONBEDOELDE GEBEURTENISSEN (VOG)

Voor het bepalen van de potentiële blootstelling zijn, waar mogelijk, voorziene onbedoelde gebeurtenis (-sen) (VOG) geformuleerd, waarbij onbedoelde blootstelling kan ontstaan.

Voor de eerstgenoemde blootstellingspaden, externe blootstelling ten gevolge van bestraling met protonen en blootstelling ten gevolge van luchtactivatie, zijn geen VOG geformuleerd. De reden daarvan is, dat de frequentie van voorkomen door het aanbrengen van beveiligingsmiddelen zodanig laag wordt ingeschat, dat het falen van deze voorzieningen als een incident wordt ingeschaald.

Deze beveiligingsmiddelen betreffen het volgende: in de bunker waar zich het cyclotron bevindt, zijn maatregelen getroffen om aanwezigheid van personen, anders dan de patiënt, te voorkomen. Dit wordt gerealiseerd door het gebruik van een lichtsluis-vrijgavesysteem. Dit systeem bestaat uit twee schakelaars die in de juiste volgorde bediend moeten worden: eerst de schakelaar in de bestralingsruimte en dan de schakelaar aan de ingang van het labirint. Zo wordt verzekerd dat degene die de schakelaars activeert naar buiten gelopen is, en dus niet meer aanwezig is in de bestralingsruimte. Slechts dan is het mogelijk de (deeltjes)bundel te activeren. In het labirint zijn ook lichtsluizen aangebracht die ervoor zorgen dat zodra het labirint betreden wordt terwijl de bundel aanstaat deze meteen afgeschakeld wordt. Bij stroomuitval functioneert dit systeem door middel van een separaat noodaggregaat. Deze methode van beveiligen is zeer gangbaar bij de fotonen radiotherapie en is gebleken veilig te zijn. Daarnaast is de ruimte voorzien van meerdere noodknoppen en is er additioneel cameratoezicht op de bestralingsruimte vanuit de bedieningsruimte. De frequentie van voorkomen van het falen van deze voorzieningen wordt om die redenen als onmogelijk ingeschat.

CONE BEAM CT

Een mogelijke voorziene gebeurtenis is de situatie waarin laborant 1 een CBCT-opname maakt, terwijl laborant 2 zich (nog) niet achter de loodafscherming bevindt. Indien verondersteld wordt dat de laborant zich op dat moment op 3 meter van het isocentrum van de CBCT bevindt, en één opname aanleiding geeft tot een dosis van minder dan $10 \mu\text{Sv}$ op 3 meter afstand, zal één gebeurtenis leiden tot een potentiële blootstelling (effectieve dosis) van:

$$10 \mu\text{Sv} * \frac{3^2}{3^2} = 10 \mu\text{Sv}.$$

Indien wordt verondersteld dat deze gebeurtenis zich voordoet met een waarschijnlijkheid van 1 op 1.000, dan moet bij een totaal aantal opnamen van 12.000 per jaar, gecorrigeerd worden met een factor $12.000 / 1.000 = 12$ voor de totale potentiële blootstelling per jaar:

$$10 \mu\text{Sv} * 12 = 120 \mu\text{Sv} \text{ op jaarbasis.}$$

Fine-Kinney berekening:

De waarschijnlijkheidsfactor (W) wordt ingeschat op 1 op 1.000 handelingen; $W=1$ (onwaarschijnlijk).

De belastingsfactor (B) is 10; deze handeling wordt continu uitgevoerd.

De effectfactor (E) is 5; de effectieve dosis ligt tussen de 0,1 – 0,5 mSv.

De risicofactor (R) is dan $W * B * E = 1 * 10 * 5 = 50$.

De werkzaamheden zijn zodanig ingericht, dat alle mogelijke maatregelen zijn genomen om het vóórkomen van deze gebeurtenis zo veel als mogelijk te beperken. De frequentie van voorkomen zal zorgvuldig worden gemonitord, op basis waarvan eventuele extra maatregelen worden getroffen.

RÖNTGENTOESTEL

Voor het gebruik van het röntgentoestel kan een soortgelijke VOG worden verondersteld als beschreven bij het gebruik van de CBCT, namelijk dat 1 medewerker zich niet achter het loodschermbekleidingsmiddel bevindt terwijl een andere medewerker een opname maakt.

Verondersteld wordt een afstand van de persoon tot het isocentrum van het röntgentoestel van 1 meter en het maken van de opname met de hoogste stralingsbelasting (bekkenopname), die op één meter afstand aanleiding geeft tot een dosis van 10 µSv. Eén gebeurtenis zal dan leiden tot een potentiële blootstelling (effectieve dosis) van eveneens 10 µSv.

Indien wordt verondersteld dat deze gebeurtenis zich voordoet met een waarschijnlijkheid van 1 op 1.000, dan moet bij een totaal aantal opnamen van 12.000 per jaar, gecorrigeerd worden met een factor $12.000 / 1.000 = 12$ voor de totale potentiële blootstelling per jaar:

$10 \mu\text{Sv} * 12 = 120 \mu\text{Sv}$ op jaarbasis.

Fine-Kinney berekening:

De waarschijnlijkheidsfactor (W) wordt ingeschat op 1 op 1.000 handelingen; $W=1$ (onwaarschijnlijk).

De belastingsfactor (B) is 10; deze handeling wordt continu uitgevoerd.

De effectfactor (E) is 5; de effectieve dosis ligt tussen de 0,1 – 0,5 mSv.

De risicofactor (R) is dan $W * B * E = 1 * 10 * 5 = 50$.

De werkzaamheden zijn zodanig ingericht, dat alle mogelijke maatregelen zijn genomen om het vóórkomen van deze gebeurtenis zo veel als mogelijk te beperken. De frequentie van voorkomen zal zorgvuldig worden gemonitord, op basis waarvan eventuele extra maatregelen worden getroffen.

7 GESOMMEERDE BLOOTSTELLING EN CONCLUSIES

In deze risicoanalyse is per blootstellingspad een berekening getoond van de bijdrage aan de beroepsmatige blootstelling van medewerkers die werkzaamheden verrichten bij ZON-PTC ten behoeve van medische therapie met protonen. Het betreft medewerkers die door ZON-PTC worden ingehuurd van MAASTRO CLINIC.

In *Tabel 6* worden de handelingen beschreven die in het kader van medische therapie, medische diagnostiek en wetenschappelijk onderzoek met protonen worden uitgevoerd door medewerkers die worden ingehuurd bij MAASTRO CLINIC, inclusief het bijbehorende blootstellingspad en een berekening van de dosis die als gevolg daarvan te verwachten is.

Tabel 7 geeft een overzicht van het aantal van deze handelingen dat per fte, per functie wordt uitgevoerd en de effectieve jaardosis per handeling als gevolg hiervan.

De aannames die zijn gedaan bij het berekenen van de effectieve jaardoses voor de medewerkers die worden ingehuurd bij MAASTRO CLINIC zijn:

- de handelingen zoals beschreven in *Tabel 6* zijn voor alle functionarissen gelijk van aard, maar niet van aantal; (dat betekent dat de handelingen die worden uitgevoerd in het kader van therapie niet afwijken van de handelingen die worden uitgevoerd in het kader van wetenschappelijk onderzoek)
- de uitvoering van de handelingen is homogeen verdeeld over de per functie beschikbare fte's;
- het totaal aan alle bestralingen en daaraan aanverwante handelingen die in de protonenfaciliteit jaarlijks worden uitgevoerd wordt verondersteld 12.000⁽⁹⁾ te bedragen.
- Het aantal röntgenopnames wordt (conservatief) voor beide toestellen (CBCT en röntgentoestel) het maximale aantal van 12.000 te bedragen. In de praktijk zal een keuze worden gemaakt voor de meest geschikte opname, waardoor dit een overschatting is.
- het aantal bestralingen dat wordt uitgevoerd ten behoeve van medische therapie en -diagnostiek is goed voor 90% van het totale aantal en bedraagt daarmee 10.800⁽⁹⁾;
- Voor de medische toepassing wordt verondersteld dat laboranten bij alle handelingen zijn betrokken (100%, dus 10.800 in aantal), terwijl artsen en klinisch fysici slechts bij 10% (dus 1080 handelingen) hiervan worden betrokken. Onderzoekers hebben geen betrokkenheid bij de medische toepassing.
- het totaal aan handelingen dat wordt uitgevoerd in het kader van wetenschappelijk onderwijs en onderzoek bedraagt 1.200⁽⁹⁾, en vertegenwoordigt 10% van de workload in de protonenfaciliteit.
- het aantal werkuren per jaar bij fulltime dienstverband wordt gesteld op 2000.

Voor laboranten wordt de zeer conservatieve schatting gemaakt dat zij fulltime worden ingezet voor werkzaamheden gerelateerd aan protonentherapie, waarmee zij permanent aanwezig zullen zijn in de protonenfaciliteit. In de praktijk zullen ze planningswerkzaamheden elders uitvoeren, waar er geen blootstelling plaatsvindt. Artsen, klinisch fysici en onderzoekers zullen slechts een deel van hun tijd werkzaamheden uitvoeren die een relatie met protonentherapie hebben en daarmee ook slechts een deel van hun tijd aanwezig zijn in de faciliteit; het hoofdbestanddeel van hun tijd verrichten zij andere werkzaamheden binnen de ruimten van MAASTRO CLINIC.

⁹ De workload per jaar is conservatief geschat op 50.000 Gy. Deze wordt verondersteld te zijn onderverdeeld in 12.000 fracties, waarvan 90% zal worden toegediend in het kader van patiëntenzorg, te weten 10.800 fracties voor 400 patiënten. De overige 1200 fracties worden verondersteld te worden ingezet ten behoeve van wetenschappelijk onderwijs en onderzoek.

Tabel 6: Handelingen en bijbehorende blootstelling in het kader van medische therapie, medische diagnostiek en wetenschappelijk onderzoek

Handeling	Ruimte waar de handeling wordt uitgevoerd	Aanduiding dosispunt in rapport Siebers	Blootstellings pad	Tijdsduur per handeling [min]	Dosis als gevolg van de handeling [nSv]
begeleiden patiënt (of fantoom) van kleedruimte naar behandelruimte en vice versa	labyrint / bestralingsbunker		inhalatie / immersie geactiveerde lucht (bunker)	0.5	2.1 ⁽¹⁰⁾
CBCT opname en positioneren patiënt (of fantoom)	bestralingsbunker		externe bestraling t.g.v. CBCT ----- inhalatie / immersie geactiveerde lucht	3	8.5 ⁽¹¹⁾ ----- 12.5 ⁽¹²⁾
Röntgenopname en positioneren patiënt (of fantoom)	bestralingsbunker		externe bestraling t.g.v. röntgentoestel ----- inhalatie / immersie geactiveerde lucht	3	3.8 ⁽¹³⁾ ----- 12.5 ⁽¹⁴⁾
bestraling patiënt (of fantoom)	bedieningsruimte	4.13	externe bestraling	5	1.5 ⁽¹⁵⁾
potentiële blootstelling t.g.v. CBCT opname zonder gebruik loodschermb (VOG)	bestralingsbunker		externe bestraling t.g.v. CBCT		10 E+03

¹⁰ 500 µSv/jaar bij permanent verblijf (tabel 3 en 4)

¹¹ 5,7 µSv/opname met een verzwakking door lood van 0.0015 (Hoofdstuk 4)

¹² 500 µSv/jaar bij permanent verblijf (Tabel 3 en 4)

¹³ Gemiddelde bepaald uit waarden in Hoofdstuk 5

¹⁴ 500 µSv/jaar bij permanent verblijf (Tabel 3 en 4)

¹⁵ 35 µSv/jaar bij permanent verblijf (Tabel 1)

Tabel 7: Jaardosis en categorie-indeling van medewerkers werkzaam bij MAASTRO CLINIC, gebaseerd op gesommeerde blootstelling

Functie	FTE per functie	Handeling	Toepassing	Dosis per handeling ⁽¹⁶⁾ [nSv]	Aantal handelingen per jaar en per fte	Effectieve jaardosis a.g.v. de handeling [µSv]	Totale effectieve jaardosis [mSv]
Laborant	16	begeleiden patiënt van kleedruimte naar behandelruimte en vice versa	medische diagnostiek en -therapie	2.1	1.350	2.8	0.041
		CBCT opname en positioneren patiënt		21	675	14.2	
		röntgenopname en positioneren patiënt		3.8	675	2.6	
		bestraling patiënt		1.5	675	1.0	
		potentiële blootstelling t.g.v. CT- en röntgenopname		10E+03	2	20	
Arts (-assistent)	15	CBCT opname en positioneren patiënt	medische diagnostiek en -therapie	21	80	1.7	0.022
		röntgenopname en positioneren patiënt		3.8	80	0.3	
		bestraling patiënt		1.5	80	0.1	
		potentiële blootstelling t.g.v. CT- en röntgenopname ¹⁷		10E+03	2	20	
Klinisch Fysicus	10	CBCT opname en positioneren patiënt	medische diagnostiek en -therapie	21	120	2.5	0.023
		röntgenopname en positioneren patiënt		3.8	120	0.5	
		bestraling patiënt		1.5	120	0.2	
		potentiële blootstelling t.g.v. CT- en röntgenopname		10E+03	2	20	
Klinisch Fysisch Medewerker	8	CBCT opname en positioneren patiënt	medische diagnostiek en -therapie	21	150	3.2	0.024
		röntgenopname en positioneren patiënt		3.8	150	0.6	
		bestraling patiënt		1.5	150	0.2	
		potentiële blootstelling t.g.v. CT- en röntgenopname		10E+03	2	20	
Onderzoeker	5	transport fantoom van bergplaats naar behandelruimte en vice versa	research	2.1	480	1.0	0.027
		CBCT opname fantoom		21	240	5.0	
		röntgenopname fantoom		3.8	240	0.9	
		bestraling fantoom		1.5	240	0.4	
		potentiële blootstelling t.g.v. CT- en röntgenopname		10E+03	2	20	

¹⁶ ontleend aan Tabel 5 en 6

¹⁷ aangezien de handelingen waarbij artsen betrokken zijn in totaal meer dan duizend bedragen, is het aannemelijk dat één arts betrokken is bij één VOG per jaar. Om die reden wordt deze component hier bij de blootstelling per fte geïnccludeerd. Dit geldt evenzo voor klinisch fysici en onderzoekers.

Zoals gezegd worden er voor het uitvoeren van de protontherapie medewerkers ingehuurd van MAASTRO CLINIC. Deze medewerkers zijn ook betrokken bij werkzaamheden in het kader van medische therapie en –diagnostiek die plaatsvinden bij MAASTRO CLINIC. Onderstaande *Tabel 8* toont het totaaloverzicht van de handelingen waarbij zij blootgesteld worden aan ioniserende straling, de omvang van de blootstelling en de bijbehorende categorie-indeling.

Tabel 8: Effectieve jaardosis per functie en per fte, voor medewerkers betrokken bij de protontherapie toepassing

Functie	Toepassing	Instituut	Equivalente	Effectieve	Gesommeerde	Gesommeerde	Categorie indeling
			huiddosis/fte	dosis/fte	equivalente dosis	effectieve dosis	
			[mSv/jaar]	[mSv/jaar]	[mSv/jaar]	[mSv/jaar]	
Laborant	PET-CT	MAASTRO	0.43	1.12	17.7	4.2	B
	Fotontherapie incl. CT		-	0.04			
HDR brachy	-		0.03				
LDR brachy-prostaat	4.6		1.27				
	Ingekapselde bronnen		12.66	1.72			
	Protonen therapie	ZON-PTC	-	0.041			
Arts (-assistent)	PET-CT	MAASTRO	-	0.12	15.7	5.0	B
	Fotontherapie incl. CT		-	0.004			
HDR brachy	-		0.003				
LDR brachy-prostaat	15.73		4.89				
	Protonen therapie	ZON-PTC	-	0.022			
Klinisch Fysicus (in opleiding)	PET-CT	MAASTRO	-	0.12	1.1	0.4	geen
	Fotontherapie incl. CT		-	0.012			
HDR brachy	-		0.003				
LDR brachy-prostaat	1.05		0.26				
	Protonen therapie	ZON-PTC	-	0.023			
Klinisch Fysisch Medewerker	PET-CT	MAASTRO	-	0.15	-	0.5	geen
	Fotontherapie incl. CT		-	0.015			
HDR brachy	-		0.004				
LDR brachy-prostaat	-		0.33				
	Protonen therapie	ZON-PTC	-	0.024			
Onderzoeker	Research fotonen	MAASTRO	-	0.02	-	0.5	geen
	Research protonen	ZON-PTC	-	0.027			

VERIFICATIE BEREKENINGEN EN DOSIMETRIE

Voor deze nieuwe toepassing protonen-therapie zullen alle aannames die gemaakt werden in het kader van deze risicoanalyse retrospectief gecontroleerd worden.

Op het moment dat de eerste bundel gegenereerd wordt, zal direct een dosimetrisch onderzoek starten, waarbij de dosistempi op verschillende kritische punten wordt gemeten. Hiervoor zullen Bonner Sphere detectors gebruikt worden die geschikt zijn voor het meten van neutronen. De dosistempi worden onder worst-case condities gemeten (maximale veldgrootte, maximaal bestraald volume (10 l)), en indien relevant aan de buitenkant op de plaats waar de bundel de afscherming aan de binnenkant zou treffen. De kritische punten zijn benoemd in het al eerder genoemde rapport van Siebers.

De werknemers worden voorzien van persoonlijke dosimeters die ook geschikt zijn voor het detecteren van neutronen middels een PADC-dosimeter (naast de reguliere TL dosimeter), zoals deze door het NRG verstrekt worden. Hiermee zal de ontvangen dosis van de werknemers gemonitord worden.

De TLD/PADC persoonsdosimeters zullen ook ingezet worden voor een langdurige (3 maanden) dosismeting op dezelfde kritische plaatsen als eerder beschreven. Aangezien de eerste tijd de faciliteit nog in een aanloop fase verkeert en nog niet op volle capaciteit is, zal deze meting worden geschaald van de productie in deze 3 maanden naar de verwachte productie wanneer de faciliteit volledig in bedrijf is.

Jaarlijks zal er met besmettingsmonitoren gemeten worden of er sprake is van activering van onderdelen/bouwdelen.

BIJLAGE 1 ONDERBOUWING WORKLOAD PROTONENVERSNELLER

Reguliere patiëntenzorg:

In de afschermingsberekeningen zoals deze zijn uitgevoerd door J. Siebers¹⁸, is uitgegaan van een workload van 1000 Gy/week op een te bestralen volume van 10 liter.

Dit betekent dat er $5 * 10^4$ Gy/jaar wordt toegediend aan 10 liter weefsel (= 10 kg), wat overeenkomt met $5 * 10^4$ Gy/jaar * 10 kg = $5 * 10^5$ J/jaar.

ZON PTC zal conform vergunning maximaal 400 patiënten gaan behandelen, wat betekent dat in de aannames voor de afschermingsberekeningen rekening is gehouden met een dosis van $5 * 10^4 / 400 = 125$ Gy per volume eenheid per patiënt, waarbij wordt aangenomen dat het te bestralen volume per patiënt 10 liter bedraagt (in totaal 10 kg/l * 125 Gy = 1250 J per patiënt).

Dit is een zeer conservatieve aanname: de gemiddelde patiënt wordt slechts tot een dosis van ongeveer 70 Gy per volume eenheid bestraald, en het bestraalde volume zal meestal niet boven 1 liter uitstijgen. Dit betekent dat er in de berekeningen ten behoeve van het ontwerp van de benodigde afscherming, een overschatting van ten minste een factor 10 is gemaakt voor wat betreft de blootstelling aan straling buiten de bunker door de aannames die gemaakt zijn.

Een meer reële schatting van de totale hoeveelheid toegediende energie ten behoeve van patiëntenzorg is:

$$400 \text{ patiënten/jaar} * 70 \text{ Gy/patiënt} * 1 \text{ liter} * 1 \text{ kg/liter} * 1.05 = 3.0 * 10^4 \text{ J/jaar.}$$

De factor 1.05 in bovenstaande vergelijking is gebruikt om de kwaliteitscontrole, die voor ieder bestralingsplan wordt uitgevoerd, en die maximaal 5% aan de toe te dienen dosis zal toevoegen, te incorporeren.

Wetenschappelijk onderzoek:

Additioneel zal er ook worden gestraald ten behoeve van wetenschappelijk onderzoek. De schatting hiervoor is, dat er per week 4 uur wordt gestraald met een maximaal dosistempo van 2 Gy/(minuut liter) op een volume van 1 liter. Dat geeft een afgegeven energie van:

$$4 \text{ uur/week} * 50 \text{ weken/jaar} * 60 \text{ min/uur} * 2 \text{ Gy/liter} * 1 \text{ liter} * 1 \text{ kg/liter} = 2.4 * 10^4 \text{ J/jaar.}$$

De totale jaardosis op basis van de inschattingen voor patiëntdoses en dosis als gevolg van wetenschappelijk onderzoek komt daarmee op:

$$3.0 * 10^4 \text{ J} + 2.4 * 10^4 \text{ J} = 5.4 * 10^4 \text{ J.}$$

Dit betreft $(5.4 * 10^4 / 5 * 10^5) * 100\% = 10.8\%$ van de workload die als uitgangspunt dient voor de berekeningen.

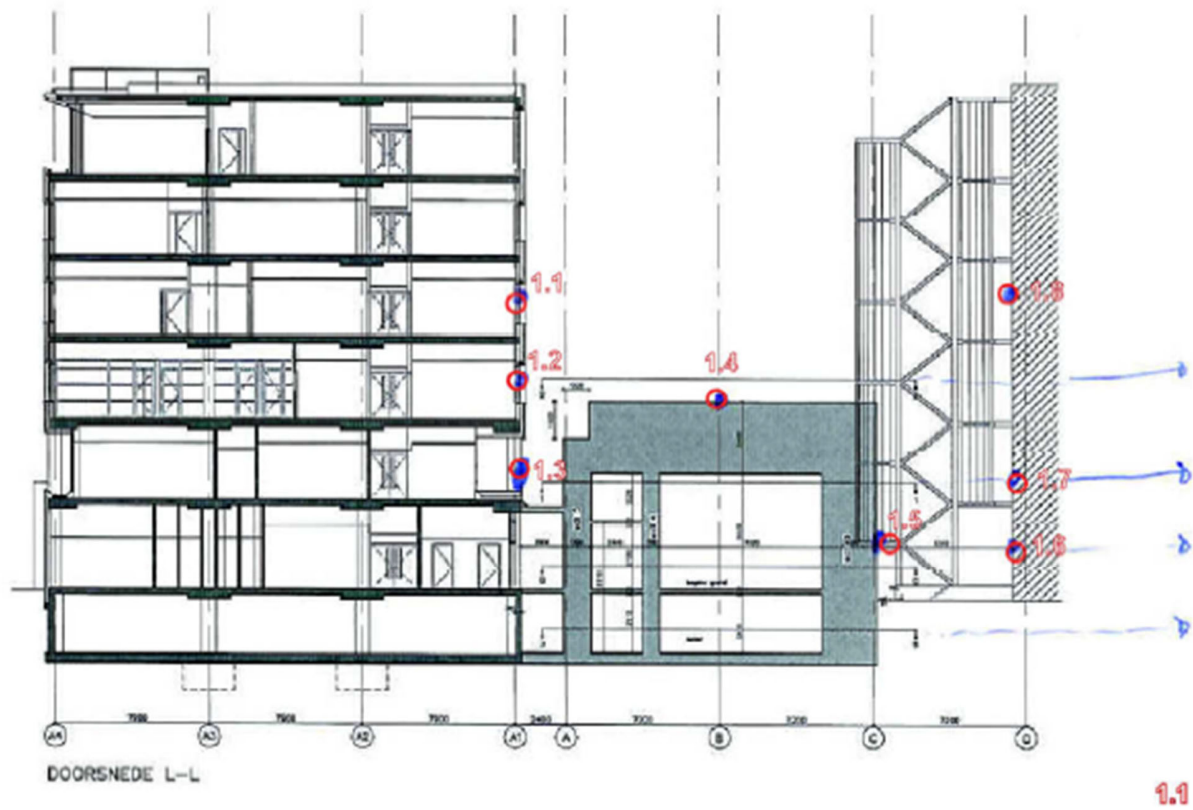
Kwaliteitscontrole

De schatting is, dat er wekelijks een workload van 100 Gy zal worden gebruikt ten behoeve van kwaliteitscontroles aan het cyclotron.

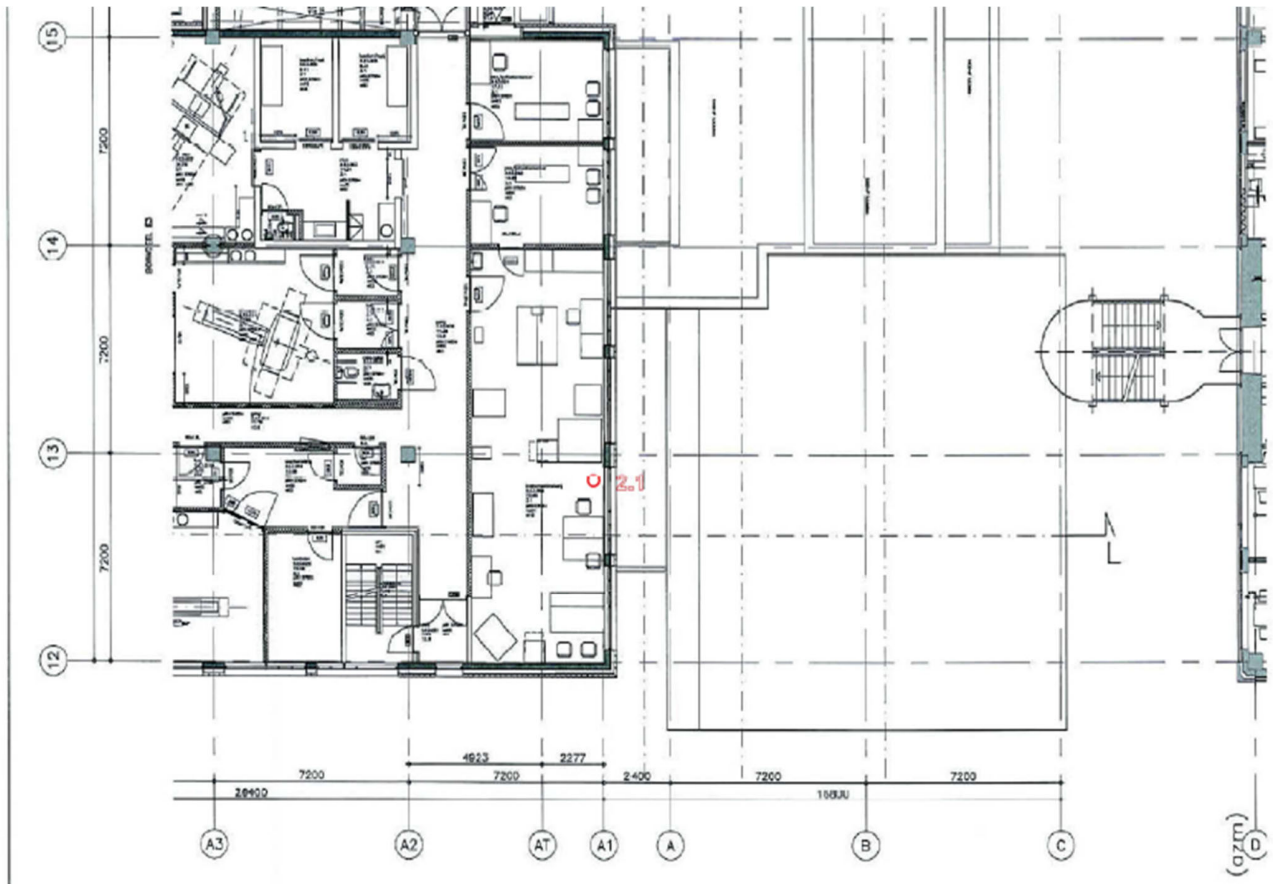
¹⁸ Vertaling van 'Monte Carlo verification of the radiation shielding design of the MAASTRO Mevion 250 MeV proton therapy treatment room', J.V. Siebers, juli 201, geïncludeerd in Bijlage 12.10 van de aanvraag Complexvergunning

BIJLAGE 2 LOCATIEAANDUIDING BEREKENDE DOSISPUNTEN

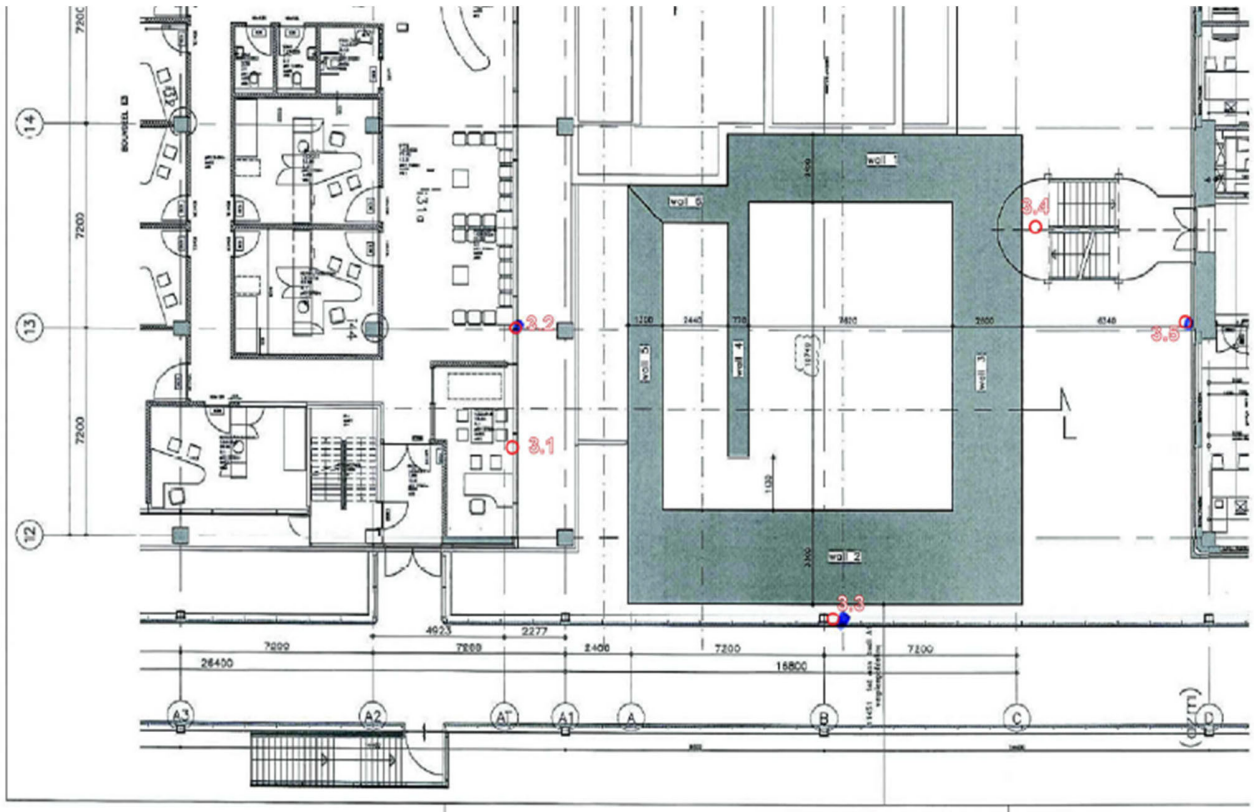
Figuur 1.1 Gedeelte van de plattegrond van het gelijkvloers van MAASTRO Clinic/ ZON-PTC met aanduiding dosispunten. (technische tekening van Architecten aan de Maas)



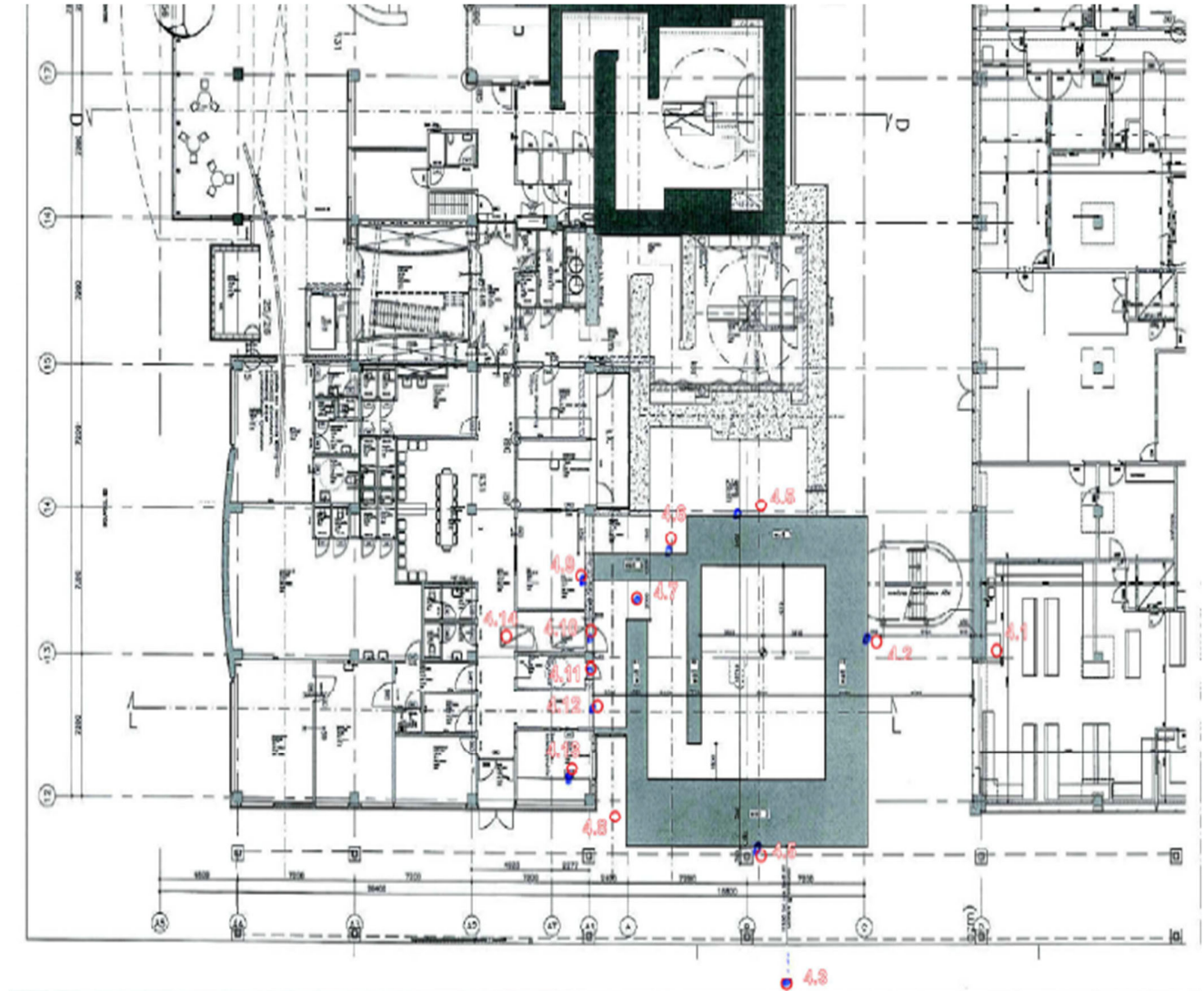
Figuur 1.2 Gedeelte van de plattegrond van de eerste verdieping van MAASTRO Clinic/ ZON-PTC met aanduiding dosispunten. (technische tekening van Architecten aan de Maas)



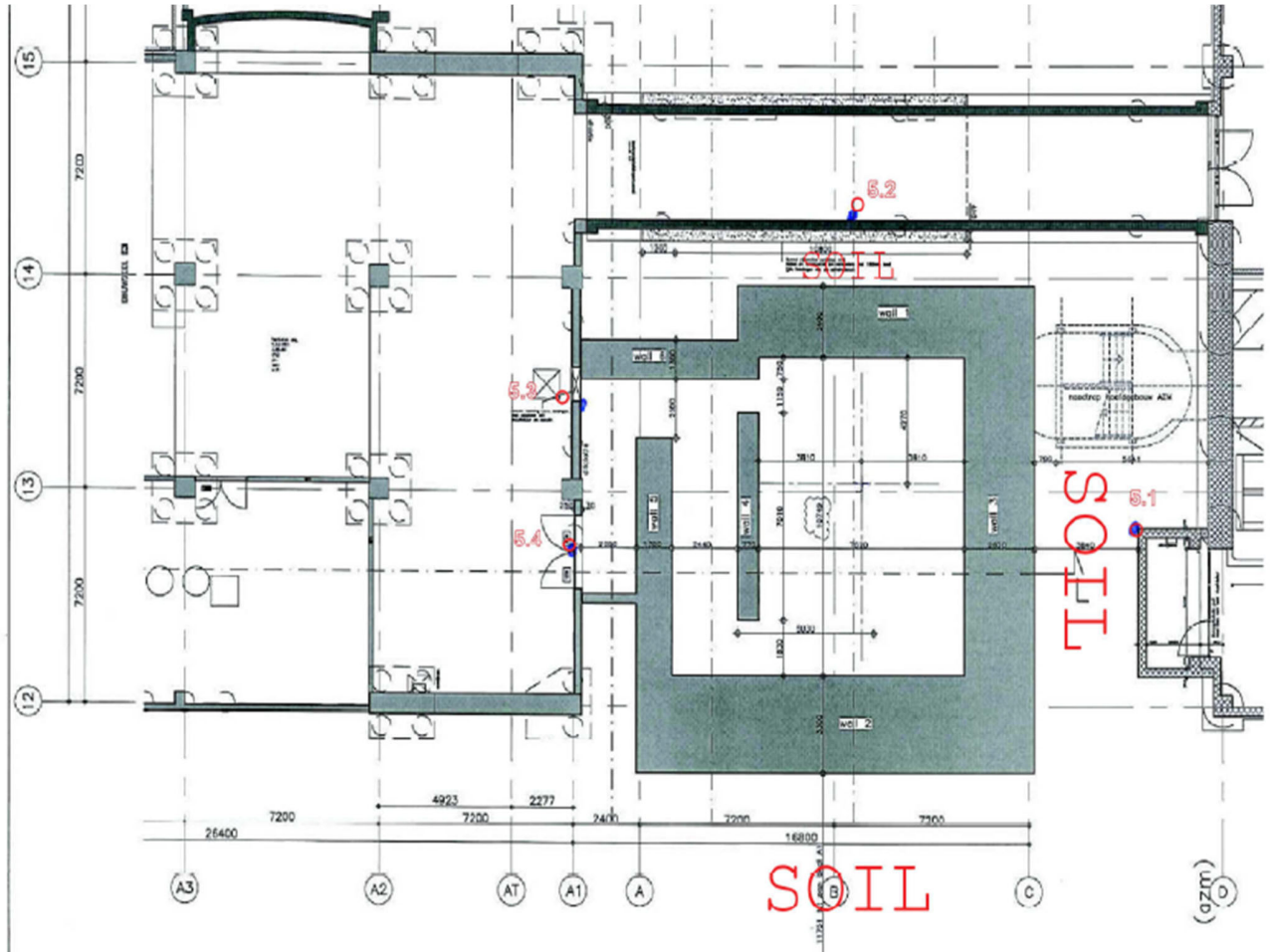
Figuur 1.3 Gedeelte van de plattegrond van de tweede verdieping van MAASTRO Clinic/ ZON-PTC met aanduiding dosispunten. (technische tekening van Architecten aan de Maas)



Figuur 1.4 Gedeelte van de plattegrond van de derde verdieping van MAASTRO Clinic/ ZON-PTC met aanduiding dosispunten. (technische tekening van Architecten aan de Maas)



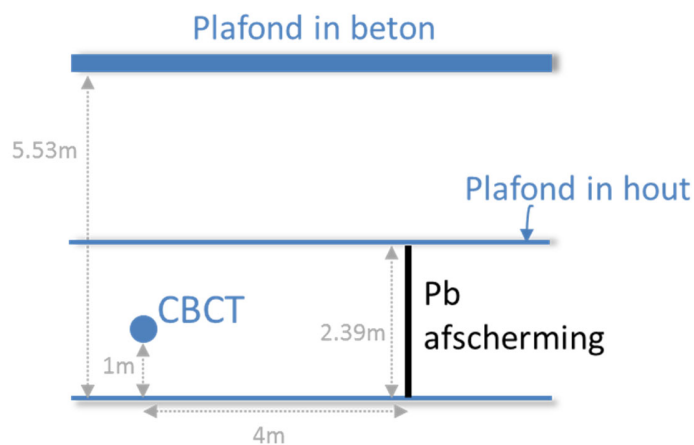
Figuur 1.5 Gedeelte van de plattegrond van de kelder verdieping van MAASTRO Clinic/ ZON-PTC met aanduiding dosispunten. (technische tekening van Architecten aan de Maas)



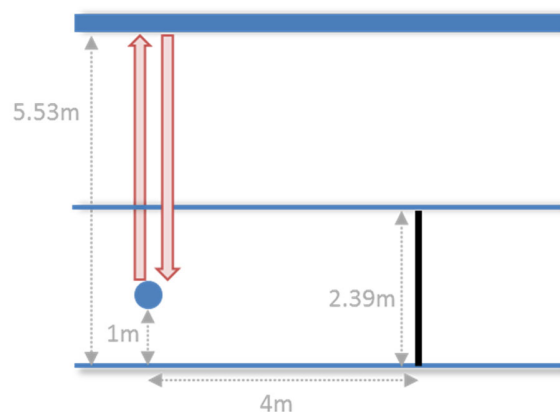
BIJLAGE 3 BEREKENING STROOISTRALING CBCT

Aanvullend op de blootstelling ten gevolge van de aanwezigheid van de CBCT, zijn strooistralingsberekeningen uitgevoerd. Hierbij is gebruik gemaakt van "Verstrooiingspatronen voor divergente bundels röntgen straling bij loodrechte inval op een vlakke betonmuur" uit het boek van A.J.J. Bos, *Inleiding tot de stralingshygiëne*, 2007. Bij deze berekeningen is er van uitgegaan dat er 100% transmissie plaatsvindt door het eerste houten plafond, waarmee de aannames conservatief zijn: de reële verstrooiingsbijdragen zullen kleiner zijn.

Bijdrage strooistraling aan het plafond:



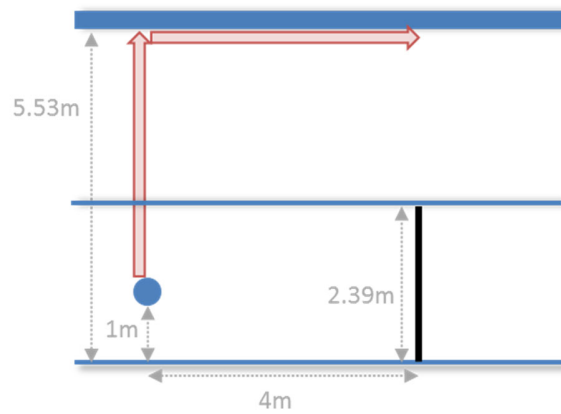
a. Situatie 1 (maximale bijdrage)



- 1) Kwadratenwet: $2.9 \text{ mSv/week} \times 3^2/4.53^2 = 1.3 \text{ mSv/week}$
- 2) Op 1m afstand van het verstrooiingspunt meet men fractie 0.072 % van de invallende straling = $0.94 \text{ } \mu\text{Sv/week}$ (hoek 180°)

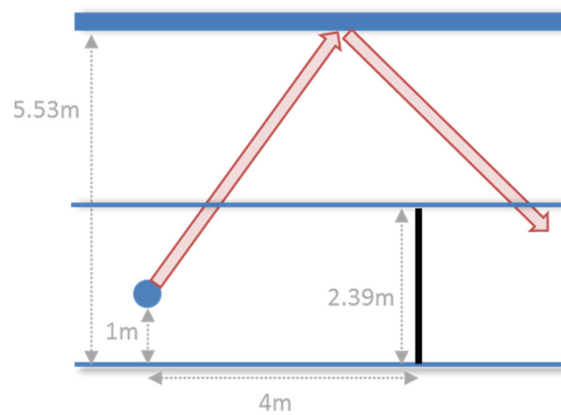
- 3) Op 4.53m afstand van het verstrooiingspunt (kwadratenwet):
 $0.94 \mu\text{Sv/week} \times 1/4.53^2 = 0.046 \mu\text{Sv/week}$ (2.3 $\mu\text{Sv/jaar}$)

b. Situatie 2



- 1) Kwadratenwet: $2.9 \text{ mSv/week} \times 3^2/4.53^2 = 1.3 \text{ mSv/week}$
- 4) Op 1m afstand van het verstrooiingspunt meet men fractie 0.020 % van de invallende straling = $0.26 \mu\text{Sv/week}$ (hoek 90°)
- 2) Op 4m afstand van het verstrooiingspunt (kwadratenwet):
 $0.26 \mu\text{Sv/week} \times 1/4^2 = 0.016 \mu\text{Sv/week}$ (0.8 $\mu\text{Sv/jaar}$)

c. Situatie 3



Vergelijkbaar met situatie 2, circa $0.02 \mu\text{Sv/week}$

Conclusie:

De bijdragen van stroostraling worden als verwaarloosbaar beschouwd.