

R. Berekeningen en overzicht van omgevingsdosisequivalent, ID, MID en AID aan de terreingrens

1. Inleiding

In deze bijlage wordt het omgevingsdosisequivalent op diverse punten op de terreingrens gepresenteerd. In principe volgen de getallen uit de risicoanalyses die door de afdelingen zijn opgesteld. Daar waar de risicoanalyse te conservatief is, of wanneer meer uitleg nodig is, worden onderdelen van de berekeningen eruit gelicht. Het betreft:

- a. Lineaire versnellers Maastricht (zie § R-2.1)
- b. Bijdrage aan de terreingrens als gevolg van radionuclidentherapie (zie § R-0)
- c. Lineaire versnellers Maastricht Venlo (zie hoofdstuk 4)
- d. Annadal Kliniek (zie hoofdstuk 5)

In hoofdstuk R-0 worden de gebruikte formules en rekenmethodes gepresenteerd, waarbij in § 2.1 voor de versnellers op de locatie complex Randwyck het rekenvoorbeeld aan de hand van één versneller, de "Amsterdam", wordt uitgewerkt. § 0 gaat dieper in op de ~~aan~~ berekening van het omgevingsdosisequivalent als gevolg van de therapeutische toepassingen met open bronnen. Hoofdstuk R-3, R-4, R-5, en R-6 geven het omgevingsdosisequivalent op de terreingrenzen van de diverse locaties, respectievelijk de locaties Complex Randwyck, Maastricht Venlo, Annadal Kliniek en UM-FSE.

2. Gebruikte formules, literatuur

In dit hoofdstuk volgt per stralingsbron een overzicht van de gebruikte formules voor de bepaling van het omgevingsdosisequivalent. Omdat er gebruik wordt gemaakt van stukken tekst die zijn overgenomen uit ander documenten, volgt de nummering voor de formules in dit hoofdstuk niet de standaard opmaak, maar verschilt per type stralingsbron. Dit geldt ook voor de nummering van de figuren.

Radioactieve stoffen

$$H^*_{(10)} = \sum_{toepassing} h_{10} \times A \times \frac{r^2}{l^2} \times T \times t \quad (\text{formule 1})$$

met

$H^*_{(10)}$	=	Omgevingsdosisequivalent op een diepte van 10 mm [mSv/jaar]
$h_{(10)}$	=	dosisequivalenttempo in $\mu\text{Sv/h}$ op 1 meter per MBq op een diepte in weefsel van 10 mm, Literatuur o.a. N. Petoussi et. Al. (1993)
r	=	afstand tussen stralingsbron en gegeven afstand op punt van h_{10}
l	=	afstand van stralingsbron tot terreingrens
T	=	Transmissie
t	=	uren/jaar

$$T = e^{\frac{-\ln 2 \times d}{d_{1/2}}} \quad (\text{formule 2})$$

met

$d_{1/2}$	=	halveringsdikte voor betreffende nuclide en afscherming [cm^{-1}], literatuur Mathlab: De halveringsdikte van lood in mm, referentie Delacroix et al. Radiat.Prot.Dosim. 76 (1998) en IAEA TECDOC-1162, IAEA, Vienna (2000)
d	=	dikte van de afscherming [cm]

Röntgentoestellen

Voor röntgentoestellen worden de formules gebruikt voor de verschillende toepassingen volgens de berekeningsmethodiek beschreven in het British Institute of Radiology, zoals deze ook worden gebruikt voor de risicoanalyses. Op de volgende pagina zijn screenshots opgenomen van deze formules.

BIR Formules



BIR Formule 2.1

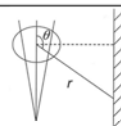
$$S = K_s / KAP \quad K_s = S \times KAP$$

S	Scatterfactor for scattering angles between 30° and 150° and tube potentials between 50kV and 125kV [$\mu\text{Gy}(\text{Gy}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$]
K_s	Scatter air kerma at distance of 1m [μGy]
KAP	Kerma Area Product = DAP / Dosis Area Product [$\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$]

BIR Formule 2.2

$$S = (a\theta^4 + b\theta^3 + c\theta^2 + d\theta + e) \times [(kV - 85) \times f + 1]$$

S	Scatterfactor for scattering angles between 30° and 150° and tube potentials between 50kV and 125kV [$\mu\text{Gy}(\text{Gy}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$]
a t/m f	Fitting parameters table 2.4
θ	Angle of scatter [°]
kV	Tube potential [kV]



BIR Formule 2.3

$$S_{\text{max}} = [(0.031 \times kV) + 2.5]$$

S_{max}	Maximum scatter kerma at a wall 1m from the patient [$\mu\text{Gy}(\text{Gy}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$]
kV	Tube potential [kV]

BIR Formule 4.1

$$B = [(1 + (\beta / \alpha)) \exp(\alpha \cdot \gamma \cdot x) - (\beta / \alpha)]^{-1/\gamma}$$

B	Broad beam transmission factor
$\alpha / \beta / \gamma$	Fitting parameters material
x	thickness of material [mm]

BIR Formule 7.1 en 7.2

$$S_{\text{ceiling}} = (C_{KAP} - m_{KAP} \times b) \times KAP \quad (\text{Formule 7.1})$$

$$b = (C_{KAP} - S_{\text{ceiling}} / KAP) / m_{KAP} \quad (\text{Formule 7.2})$$

S_{ceiling}	Tertiary scatter ceiling [μGy]
C_{KAP}	Fitting parameter table 2.5 [$\mu\text{Gy}(\text{Gy}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$]
m_{KAP}	Fitting parameter table 2.5 [$(\mu\text{Gy}(\text{Gy}\cdot\text{cm}^2)^{-1})\text{m}^{-1}$]
b	Height barrier [m]
KAP	Workload Kerma Area Product = DAP / Dosis Area Product [$\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$]

NOTE Indien isocentrum patient niet 3 meter tot afscherming bediening/regieruimte bedraagt " $\times 3/d_{\text{pat}}$ " toevoegen aan formule 7.3 zoals in Martin et al (2012)

d_{pat}	Patient to barrier distance [m]
------------------	---------------------------------

BIR Formule 7.3

$$S_{\text{wall}} = 0.058 \times (\alpha_{\text{KAP}}) \times e^{-0.56 \cdot d}$$

S_{wall}	Tertiary scatter from a wall adjacent to an unshielded entrance, isocentre patient 3m from operator's console and tube potential 85kV
0.058	Constant α_{KAP} for tube potential 85kV and lead
KAP	Workload Kerma Area Product = DAP / Dosis Area Product [$\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$]
d	Distance of the isocentre from the wall adjacent to the door (= scattering wall)

NOTE Indien isocentrum patient niet 3 meter tot afscherming bediening/regieruimte bedraagt " $x \cdot 3/d_{\text{pat}}$ " toevoegen aan formule 7.3 zoals in Martin et al (2012)

NOTE Indien afscherming niet uit lood bestaat α_{KAP} "0.058" vervangen voor correcte α_{KAP} zoals in tabel 4 Martin et al (2012)

d_{pat}	Patient to barrier distance [m]
α_{KAP}	Fitting parameter table 4 Martin et al (2012) [$\mu\text{Gy}(\text{Gy} \cdot \text{cm}^2)^{-1}$]

BIR Formule 7.4

$$K_{\text{inc}} = (S_{\text{max}} \times \text{KAP}) / d^2$$

K_{inc}	Weekly or annual air kerma incident on the wall
S_{max}	Maximum scatter kerma at a wall 1m from the patient [$\mu\text{Gy}(\text{Gy} \cdot \text{cm}^2)^{-1}$] maximum value was shown to occur at 117° between 50 and 125 kV
KAP	Workload Kerma Area Product = DAP / Dosis Area Product [$\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$]
d	Distance from the patient

BIR Formule 7.5

$$B = D_c / (K_{\text{inc}} \times T)$$

B	Broad beam transmission factor
D_c	Dose constraint
K_{inc}	Weekly or annual air kerma incident on the wall
T	Occupancy factor

Lineaire interpolatie

$$y = y_1 + (x - x_1) \times ((y_2 - y_1) / (x_2 - x_1))$$

Lineaire versnellers

Bij de lineaire versnellers worden dezelfde berekeningen uitgevoerd als bij de oorspronkelijk aanvraag. Onderstaand zijn algemene aannames en opmerkingen opgenomen en volgt een voorbeeld voor de versneller met de naam "Amsterdam".

Algemene aannames/opmerkingen:

- Voor de risicoanalyses en de terreingrensdosisberekeningen is het RIAS-model van de NCS (Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie) als leidraad gebruikt¹. Dit RIAS-model baseert zich op publicaties van de NCRP² en de IAEA³. Het RIAS-model biedt een overzicht van de beschikbare waarden uit de literatuur. De parameterwaarden moeten zo worden gekozen dat ze kenmerkend zijn voor de betreffende situatie, in dit geval de versnellers van locatie Maastricht.
- In het model kan worden gerekend met de IMRT (intensity modulated radiotherapy) en kan worden gekozen voor bundels met (FF) of zonder flattening filter (FFF).
- Om tot een goede afschatting van de parameterwaarden te komen die ingevuld dienen te worden in de RIAS-RT, is een vergelijking gemaakt met de destijds uitgevoerde berekening van ██████████ die in 2011 gemaakt is in opdracht van Maastricht Clinic, bij de installatie van nieuwe versnellers in van de betreffende bunkers⁴.
- In opdracht van de SBE Randwyck, heeft Maastricht Clinic, met behulp van bovengenoemde documenten, een realistisch model trachten te maken, dat de huidige situatie rondom de radiotherapie ruimten van Maastricht, locatie Maastricht, goed beschrijft. De aannames die gemaakt zijn voor de juiste invoer van de benodigde parameters staan beschreven in dit document.
- De geschatte verhouding van 10 MeV versus 6 MeV is 50-50% voor alle toestellen. De verhouding FFF en FF is gezet op 20% en 80%. Voor de versnellers "Dublin" en "Evian" is alleen de optie 6FFF mogelijk.
- De geschatte verhouding van conventioneel en VMAT/IMRT is 10-90% voor alle toestellen.
- IMRT factor correctie is gelijk aan 2,5.
- De TVT1 (eerste tienwaardedikte), TVTe (Evenwichtstienwaardedikte; primaire bundel) en TVT_{lek} zijn afkomstig uit NCRP151². De gemaakt aannames van het NRG rapport uit 2010 zijn niet afkomstig uit deze publicatie.
- Ook de reflectiecoëfficiënten en patiëntenscatterfactoren zijn afkomstig uit NCRP151.
- In het RIAS model wordt rekening gehouden met zowel bijdragen door een (verzwakte) primaire bundel, een bijdrage door lekstraling én een bijdrage door strooistraling of straling van de (verzwakte) directe bundel via het labrynt.
- Bouwtechnische afscherming in de vorm van betonnen muren, worden meegenomen in de berekening.

¹ RIAS-RT, Format voor risicoanalyse in de radiotherapie, NCS, 2014

² Structural shielding design and evaluation for Megavoltage X- and Gamma-ray radiotherapy facilities, NCRP Report No. 151, NCRP, 2005

³ Radiation Protection in the design of radiotherapy facilities, IAEA Safety report series no. 47, 2006

⁴ Bunkerberekening voor een therapeutische megavolt lineaire versneller; ██████████, 2 september 2011

Dimensies

- Binnen afmetingen bunker bedragen 800 x 630 cm.
- De plafondhoogte (h) is 320 cm.
- Maximale bundelgrootte is 40 x 40 cm in het isocentrum.
- Afstand van target tot isocentrum is 1 m.
- Het isocentrum ligt op 400 cm van beide zijwanden, 323 cm van de achterwand en op 129,5 cm hoogte.
- De dikte van de achterwand van de bunker (w) is 130 cm.
- De zijwanden hebben een dikte (z) van 225 cm (behalve 30 cm van rechterzijwand heeft een dikte van 120 cm).
- Een deel van het plafond boven de bundelstop heeft een dikte van 200 cm, de rest heeft een dikte van 120 cm.
- De bunker is gemaakt van standaard beton met een dichtheid van 2350 kg m⁻³.

Aanpassingen rekensheet

Maastro heeft in alle bunkers een labyrint met 3 bochten. De berekening van de lekstraling in de rekensheet is gebaseerd op het labyrint afgebeeld in Figuur 1. Hier onder is de gebruikte formule gegeven.

$$Hls = \frac{W \cdot Fl \cdot Fe \cdot (Fc + Fi \cdot Ci)}{dl1^2} \cdot \frac{A4 \cdot \alpha4}{dz4^2} \cdot \frac{A5 \cdot \alpha5}{dz5^2} \quad (1.1)$$

Doordat de straling in het labyrint verstrooid wordt via niet 2, maar 3 bochten, moeten er extra scatterfactoren worden toegevoegd. De aangepaste berekening staat hieronder. Figuur 2 geeft de nieuwe situatie aan.

$$Hls = \frac{W \cdot Fl \cdot Fe \cdot (Fc + Fi \cdot Ci)}{dl1^2} \cdot \frac{A4 \cdot \alpha4}{dz4^2} \cdot \frac{A5 \cdot \alpha5}{dz5^2} \cdot \frac{A6 \cdot \alpha6}{dz6^2} \cdot \frac{A7 \cdot \alpha7}{dz7^2} \quad (1.2)$$

W = workload maximaal (Gy/week)

Fl = lekstraling (Dlek/Dprimair) = 0,001

Fe = fractie toegepast = 0,25

Fc = fractie conventioneel = 0,1

Fi = fractie IMRT = 0,9

Ci = IMRT factor = 2,5

α4 = 0,0064 (6MV); 0,0051 (10MV); 0,0083 (6MV FFF); 0,0073 (10MV FFF)

α5 = 0,0080 (0,5MV)

Reflectiecoëfficiënten (inval op betonwand)

Benaming	hoek van inval	reflectiehoek	Energie (MV)				
			0,5	6	10	6 FFF	10 FFF
α1	loodrecht	30		0,0052	0,0041	0,0065	0,0065
α2	loodrecht	75		0,0027	0,0021	0,0035	0,0033
α3	45	0	0,0220				
α4	45	0	0,0220	0,0064	0,0051	0,0083	0,0073
α5	loodrecht	75	0,0080				

Tabel 1: Reflectiecoëfficiënten (inval op betonwand); IAEA 47, tabel 14.

Hiernaast zijn extra patiënt strooihoeken toegevoegd van 90 en 135 graden. (NCRP 151, Formule 2.11) Hierbij is gebruik gemaakt van tabel 2. Ook in deze formule zijn extra scatter factoren toegevoegd (1.4).

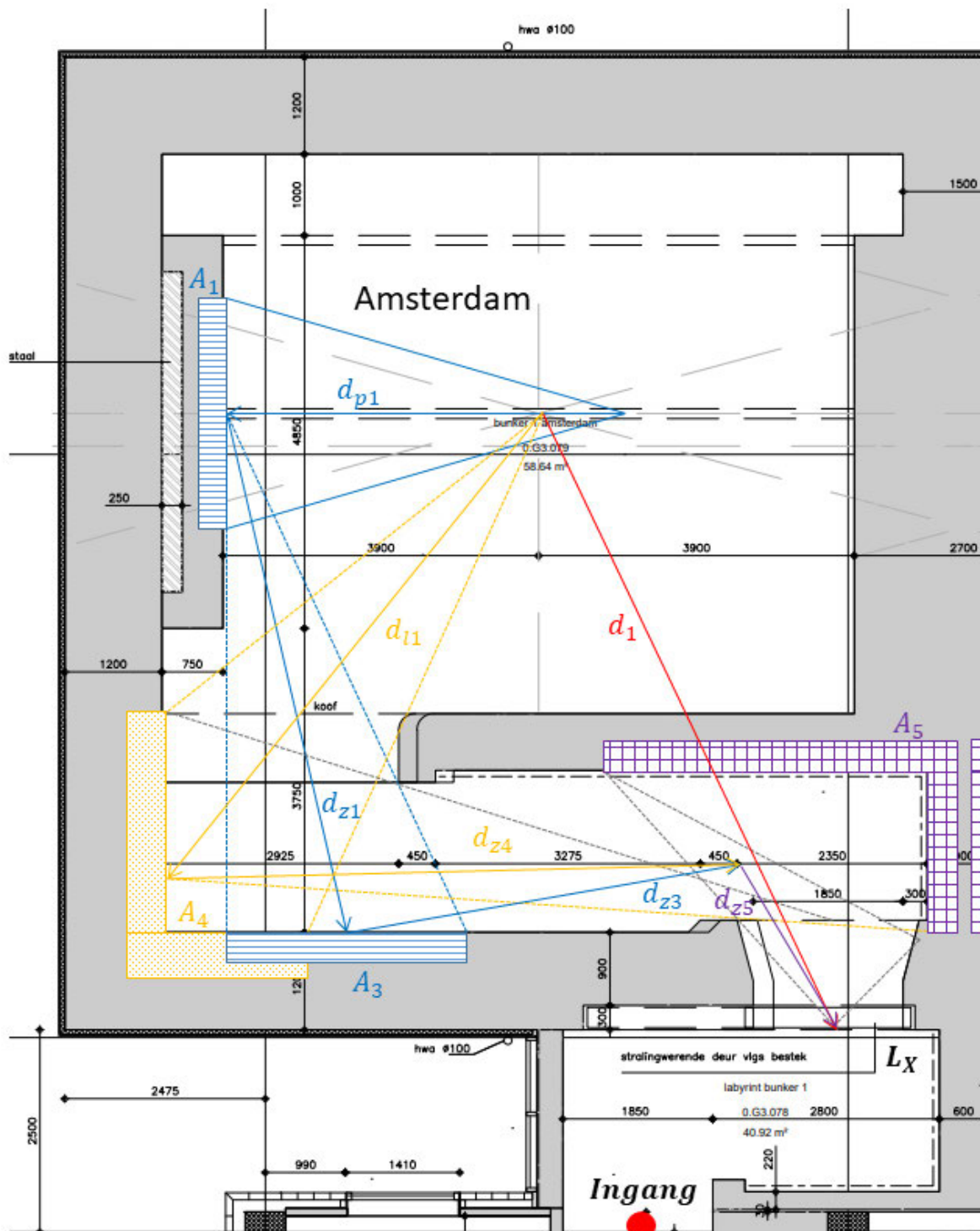
$$Hps = \frac{\alpha(\theta)WU(\frac{F}{400})\alpha_1A_1}{(d_{sca}d_{sec}d_{zz})^2} \quad (1.3)$$

$$Hps = \frac{\alpha(\theta)WU(\frac{F}{400})\alpha_1A_1}{(d_{sca}d_{sec}d_{zz})^2} * \frac{A6 \cdot \alpha6}{dz6^2} \cdot \frac{A7 \cdot \alpha7}{dz7^2} \quad (1.4)$$

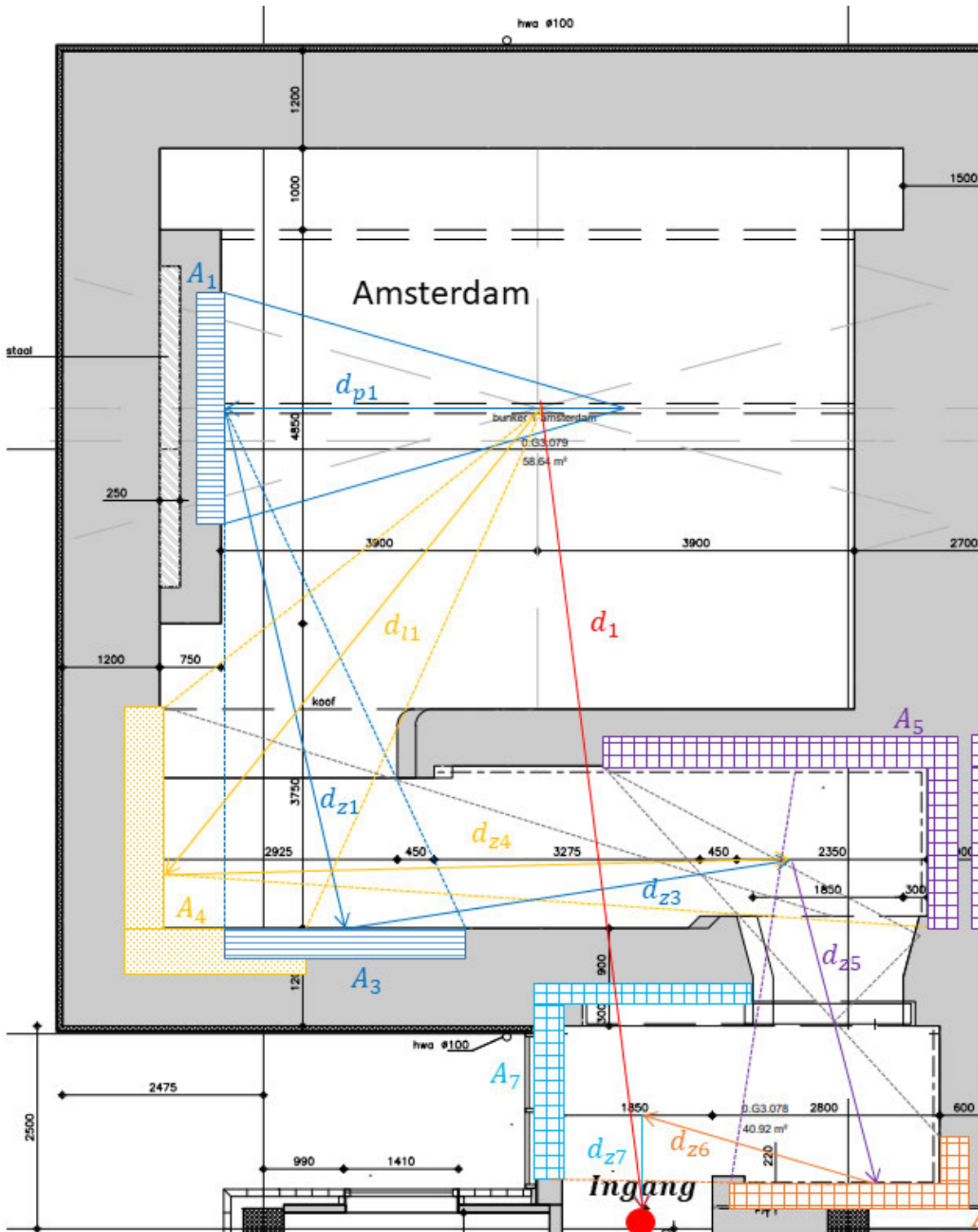
Patient-scatter factoren op 1 m, voor veldgrootte 400 cm² voor afstand focus patient van 1 m.

Energie (MV)	Scatterhoek (t.o.v. centale as)							
	10	20	30	45	60	90	135	150
6	0,0104	0,0067	0,0028	0,0014	0,0008	0,0004	0,0003	0,0003
10	0,0166	0,0058	0,0032	0,0014	0,0007	0,0004	0,0003	0,0003
18	0,0142	0,0054	0,0025	0,0009	0,0004	0,0002	0,0001	0,0001
24	0,0178	0,0063	0,0027	0,0008	0,0004	0,0002	0,0001	0,0001

Tabel 2: NCRP 151, tabel B.4



Figuur 1; originele labyrint berekening.



Figuur 2; extra scatter-factors toegevoegd.

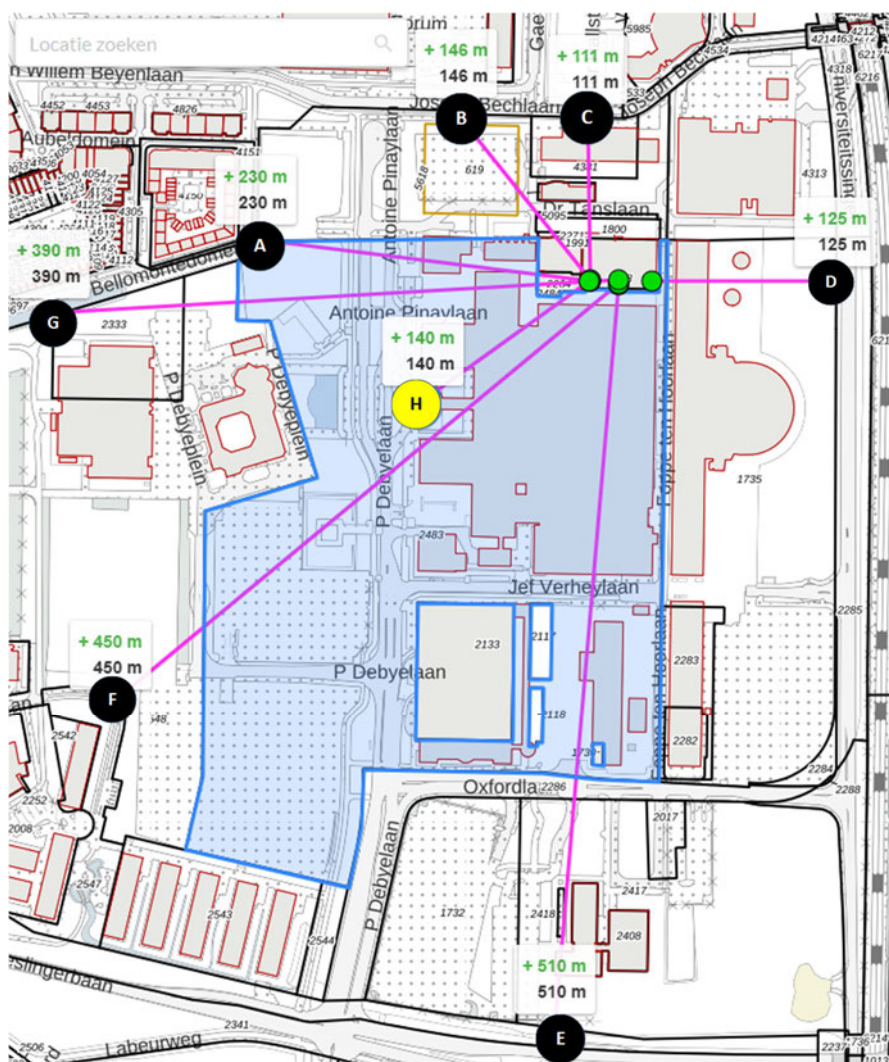
Reguliere handelingen:

- De workload per week (Gy/week) is afgeschat van de betreffende workload van de afgelopen jaren. Deze originele gegevens zijn afkomstig van Maastrou. Echter in deze aantallen zijn geen kwaliteitscontroles én pretreatment metingen meegenomen. De aantallen zijn daarom met 10% opgehoogd om hieraan te kunnen voldoen (90% is patiënten dosis).
- Dit resulteert:
 - Amsterdam is maximaal 325 Gy/week
 - Berlijn is maximaal 810 Gy/week
 - Cambridge is maximaal 575 Gy/week
 - Dublin is maximaal 770 Gy/week
 - Evian is maximaal 770 Gy/week
- Voor het bepalen van de blootstelling voor medewerkers en milieu wordt in de RIAS op verschillende punten rond de bunker, in de bedieningsruimte én in het labrynt, berekeningen gemaakt op basis van gemaakte aannames. Voor het bepalen van de blootstelling van de medewerker, wordt enkel gekeken naar de blootstelling in de bedieningsruimte. Voor de bepalen van de dosis aan de terreingrens worden de andere punten gebruikt. In de volgende paragraaf wordt de bijdrage van de versnellers uitgewerkt op de terreingrens van de locatie complex Randwyck.

2.1. Omgevingsdosisequivalent op diverse punten op de terreingrens van het complex Randwyck als gevolg van de lineaire versnellers te Maastricht

De terreingrens ligt aan alle kanten minimaal 110 meter van Maastro. Voornamelijk is gekeken naar punten A, C en D omdat deze posities ook in vorige aanvragen werden beschouwd. Daarnaast is ook punt H, bij de hoofdingang van het MUMC+ beschouwd. Dit is een punt dat binnen de terreingrenzen ligt, maar waar een openbaar toegankelijke weg doorheen loopt.

Figuur R- 1 Afstanden van de versnellers tot punten op de terreingrenzen



Om de afstanden te bepalen is gebruik gemaakt van een automatische tool van het kadaster. Hiertoe kan echter slechts 1 kadastraal nummer worden gekozen (het nu automatisch blauw gemarkeerde gebied). Het totale terrein bestaat echter uit vele kadastrale nummers (zie bijlage F_0 voor een overzicht van de kadastrale nummers).

Het berekende omgevingsdosisequivalent op de relevante punten, A, C, D en H, als gevolg van de 5 deeltjesversnellers, wordt in onderstaande tabel gepresenteerd. Op de overige punten op de terreingrens is het omgevingsdosisequivalent $< 0,01 \mu\text{Sv/jaar}$. De waarden die in **Tabel R-1** in de laatste kolom worden gepresenteerd en groen gekleurd zijn, zijn ook terug te vinden in hoofdstuk 3, **Tabel R-6**, het overzicht van de bijdragen van alle bronnen aan het omgevingsdosisequivalent op de terreingrens van de locatie "complex Randwyck".

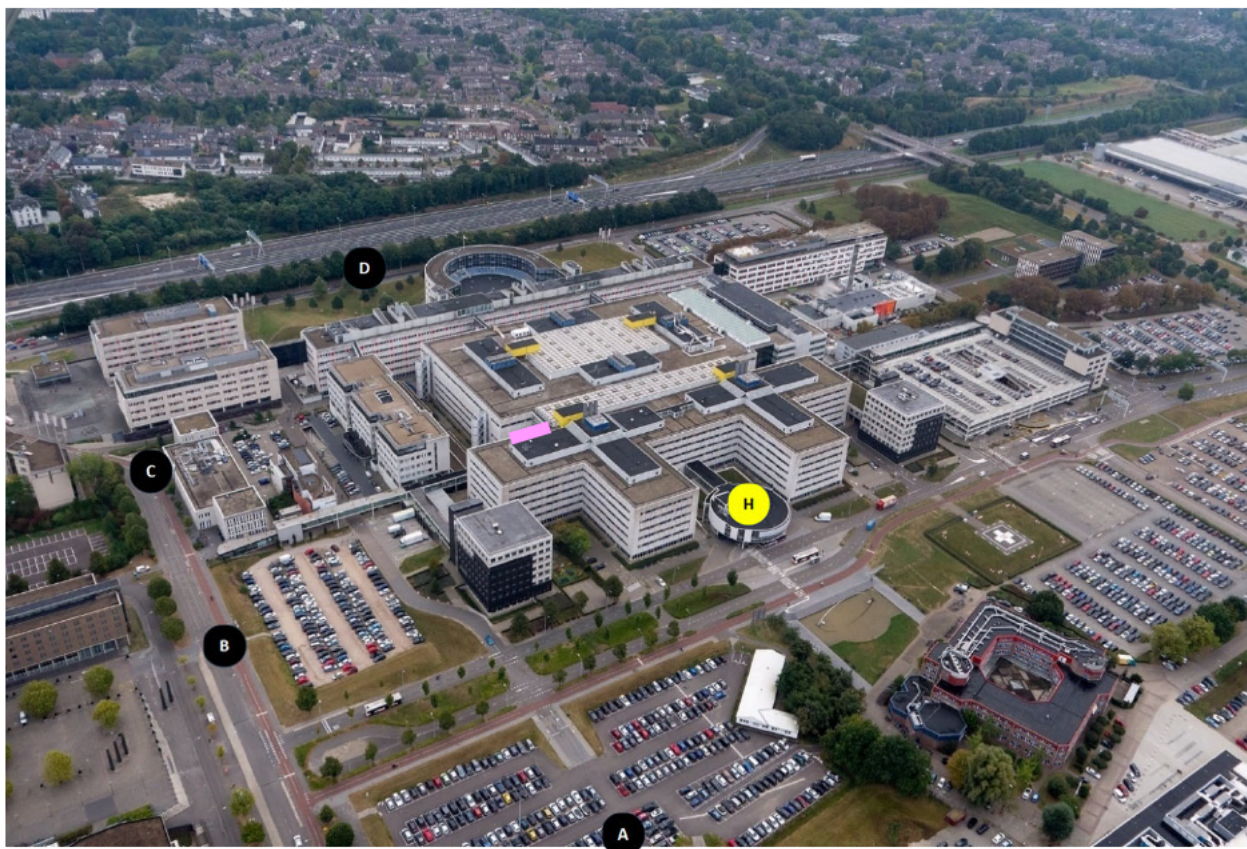
Tabel R-1 Omgevingsdosisequivalent als gevolg van versnellers op diverse punten op de terreingrens van de locatie complex Randwyck.

		Omgevingsdosisequivalent per punt		
Punt	lineaire versnellers	per versneller	Totaal [mSv/jaar]	Totaal [$\mu\text{Sv/jaar}$]
A	Amsterdam	3,22E-06		
	Berlijn	8,02E-06		
	Cambridge	5,69E-06		
	Dublin	1,97E-06		
	Evian	1,97E-06		
			2,09E-05	0,02
C	Amsterdam	9,12E-05		
	Berlijn	2,90E-05		
	Cambridge	1,89E-05		
	Dublin	5,89E-06		
	Evian	9,70E-06		
			1,55E-04	0,16
D	Amsterdam	8,16E-07		
	Berlijn	1,85E-05		
	Cambridge	1,32E-05		
	Dublin	4,55E-06		
	Evian	4,55E-06		
			4,16E-05	0,04
H	Amsterdam	8,16E-07		
	Berlijn	1,85E-05		
	Cambridge	1,32E-05		
	Dublin	4,55E-06		
	Evian	4,55E-06		
			4,16E-05	0,04
Overige punten				$< 0,01$

2.2. Omgevingsdosisequivalent als gevolg van radionuclidentherapie

Het omgevingsdosisequivalent als gevolg van radionuclidentherapie wordt voornamelijk bepaald door de aanwezigheid van ^{131}I -therapiepatiënten op de verpleegkamers A1 en door de restactiviteit ^{131}I in de verval tanks. Uit de huidige risicoanalyse volgt een zeer conservatieve schatting, omdat er niet wordt gecorrigeerd voor meerdere muren die tussen de bron (patiënt en verval tanks) en de terreingrens liggen. Dit leidt tot een zeer ruime overschatting van het omgevingsdosisequivalent op de terreingrens van de locatie complex Randwyck. In deze paragraaf wordt een meer realistischere berekening gepresenteerd voor de bijdrage van de radionuclidentherapie aan het omgevingsdosisequivalent op de terreingrens. Hierbij ligt de focus op de verpleegafdeling A1 en op de verval tanks. De verpleegafdeling is gesitueerd op de 1^e verdieping en de verval tanks zijn geplaatst in het souterrain. De afstanden tot de terreingrens zijn opgenomen in Tabel F-1 van Bijlage F onder #4 "Therapie". Op onderstaande luchtfoto is in roze de positie van de therapiekamers op de 1e verdieping en de verval tanks in het souterrain weergegeven. De posities op de terreingrens (A t/m H) zijn daar waar mogelijk ook aangegeven. Op deze luchtfoto is te zien dat er tussen de kamers en de punten op de terreingrens meerdere buitenmuren liggen die eveneens voor afscherming zorgen. Bij de geplande verbouwing van de therapiekamers zullen op diverse punten om de kamers en op de terreingrens nieuwe berekeningen voor de nieuwe situatie worden uitgevoerd, middels een rekenprogramma worden uitgevoerd. Voor nu wordt gerekend met een eenvoudige aanvullende transmissie (T_{extra}) door de overige muren. Daarmee zijn de uitgerekende waarden nog steeds conservatief, maar benaderen de werkelijk waarde wel beter.

Figuur R- 2 Ligging therapiekamers en verval tanks ten opzichte van de punten op de terreingrens



Het uitgangspunt bij de aanvullende berekeningen is het berekende omgevingsdosisequivalent op 1 meter dat volgt uit de risicoanalyse. Omdat de risicoanalyse meerdere doelen dient, is deze zo geconfigureerd dat standaard het omgevingsdosisequivalent op 1 meter wordt uitgerekend, waarbij de eerste bronafscherming direct rond de bron wordt verondersteld. In veel gevallen is dat een werkbare aanname. Zo ook voor de berekening van het omgevingsdosisequivalent als gevolg van de afvaltanks in de tankruimte. Hierbij moet worden opgemerkt dat de feitelijke afscherming verder van de bron af staat dan de standaard aanname, voor de berekening van het omgevingsdosisequivalent op de terreingrens maakt dat echter geen verschil. De tankruimte wordt afgeschermd door 32 cm beton, hetgeen overeen komt met een loodequivalent van 18 mm.

Voor de berekening van het omgevingsdosisequivalent op een punt op de terreingrens is de boven beschreven methodiek slechts correct als de bronafscherming rondom hetzelfde is. Voor de therapiekamers is dat niet het geval.

De patiëntkamers worden in de meeste richtingen afgeschermd door robalithsteen met een minimale transmissie van 0,035. Hiermee is in de standaard risicoberekening dan ook gerekend. In de richting van punt D bevindt zich echter geen robalith, maar ramen in de kamers, waardoor in die richting dus niet mag worden gerekend met een transmissie door robalith van 0,035. Daarom is het stralingsniveau op 1 meter in de richting van punt D een factor 1/0,035 hoger dan in de richting van de overige punten op de terreingrens (zie **Tabel R-2**). Er wordt niet gecorrigeerd voor transmissie door vensterglas.

Tabel R-2 Omgevingsdosisequivalent op 1 meter als gevolg van ¹³¹I-therapie, waarbij de transmissie door de aanwezige afscherming als is verwerkt.

Richting punt	Omgevingsdosisequivalent op 1 meter [μSv/jaar]		
	Tankruimte	Patiëntkamers	Totaal
D	2,73 ^{E4}	2,36 ^{E5}	2,63 ^{E5}
overige punten	2,73 ^{E4}	8,24 ^{E3}	3,55 ^{E4}

Voor de punten op de terreingrens geldt het volgende:

$$H^*_{terreingrens} = H^*_{1m} \times T_{extra} \times \left(\frac{1}{\text{Afstand punt}} \right)^2$$

$$T_{extra} = 0,5 \left(\frac{d}{d_{1/2}} \right)$$

d = dikte van de tussenliggende extra muren (1-steensmuur is 21 cm)

d_{1/2, I-131, steen} = 18,9 cm. (afgeleid uit d_{1/2, I-131, beton} = 11,8 cm, Nucleonica)

De uitgangspunten van **Tabel R-2** en bovenstaande vergelijkingen leiden tot de waarden op de terreingrens zoals gepresenteerd in **Tabel R-3**.

Tabel R-3 Omgevingsdosisequivalent op diverse punten op de terreingrens als gevolg van ¹³¹I-therapie, klinisch.

Punt op terreingrens	Afstand [m]	Extra muren	T _{extra}	H* [μSv/jaar]	
				Op 1 meter (uit Tabel R-2)	Extra afgeschermd op terreingrens
A	170	3	0,125	3,55E+04	0,15
B	120	geen	1,000	3,55E+04	2,47

Punt op terreingrens	Afstand [m]	Extra muren	T _{extra}	H* [μSv/jaar]	
				Op 1 meter (uit Tabel R-2)	Extra afgeschermd op terreingrens
C	150	geen	1,000	3,55E+04	1,58
D	230	4	0,063	2,63E+05	0,31
E	520	2	0,250	3,55E+04	0,03
F	380	3	0,125	3,55E+04	0,03
G	340	3	0,125	3,55E+04	0,04
H	95	3	0,125	3,55E+04	0,49

Tabel R-4 Omgevingsdosisequivalent op diverse punten op de terreingrens als gevolg van overige therapieën.

Punt op terreingrens	Afstand [m]	Extra muren	T _{extra}	H* [μSv/jaar]	
				Op 1 meter (uit rias)	op terreingrenspunt
A	170	geen	1	2,10E+03	0,07
B	120	geen	1	2,10E+03	0,15
C	150	geen	1	2,10E+03	0,09
D	230	geen	1	2,10E+03	0,04
E	520	geen	1	2,10E+03	0,01
F	380	geen	1	2,10E+03	0,01
G	340	geen	1	2,10E+03	0,02
H	95	geen	1	2,10E+03	0,23

Tabel R-5 Omgevingsdosisequivalent op diverse punten op de terreingrens als gevolg van radionuclidentherapie.

Punt op terreingrens	H* [μSv/jaar]		
	¹³¹ I, klinisch	Overige therapieën	Totaal
A	0,2	0,07	0,23
B	2,5	0,15	2,61
C	1,6	0,09	1,67
D	0,3	0,04	0,35
E	0,03	0,01	0,04
F	0,03	0,01	0,05
G	0,04	0,02	0,06
H	0,5	0,23	0,72

2.2.1. Omgevingsdosisequivalent op de loopbrug a.g.v. ¹³¹I-therapie, klinisch

Naast het omgevingsdosisequivalent op de terreingrens, is ook aandacht besteed aan het omgevingsdosisequivalent op de loopbrug. Dit is het dichtstbijzijnde betreedbare punt en

bevindt zich op tenminste 10 meter afstand. Het omgevingsdosisequivalent op de loopbrug bedraagt $2,63 \times 10^3 \mu\text{Sv}/\text{jaar}$. Met een verblijfsfactor van 0,2 voor gangen (NCRP147), kan worden vastgesteld dat de effectieve dosis voor personen die zich door de loopbrug begeven niet meer bedraagt dan 0,53 mSv/jaar. De feitelijke blootstelling is veel lager omdat het omgevingsdosisequivalent wordt bepaald doordat de patiënten, maar ook de restactiviteit in de tanks de volledige 24 uur van een dag aanwezig is. De gangen worden echter slechts overdag gebruikt. Een verblijfsfactor van 0,04 (1 uur verblijven op de loopbrug) is nog steeds zeer conservatief en leidt tot een maximale blootstelling op de loopbrug van 0,1 mSv per jaar.

3. Omgevingsdosisequivalent op diverse punten op de terreingrens van locatie Complex Randwyck

Overzicht van de bijdrage van de diverse bronnen en het totaal aan het omgevingsdosisequivalent op de terreingrens. Groen gekleurde waarden zijn afkomstig uit het vorige hoofdstuk. De overige waarden zijn overgenomen uit de risicoanalyses van de afdelingen.

Tabel R-6 Omgevingsdosisequivalent op diverse punten op de terreingrens als gevolg van de diverse stralingsbronnen

	Bijdrage omgevingsdosisequivalent op locatiepunt in $\mu\text{Sv}/\text{jaar}$							
	PUNT A	PUNT B	PUNT C	PUNT D	PUNT E	PUNT F	PUNT G	PUNT H
azM								
Ingekapselde bronnen	0,43	0,28	0,12	0,02	0,04	0,05	0,22	0,69
Ingekapselde bronnen lokalisatie	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Open stoffen diagnostiek	0,20	0,40	0,25	0,11	0,02	0,04	0,05	0,64
Open stoffen Therapie	0,23	2,61	1,67	0,35	0,04	0,05	0,06	0,72
Toestellen	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
CDL	0,01	0,02	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03
HKK	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
MKA	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Overige toestellen	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Subtotaal azM	0,87	3,31	2,05	0,48	0,10	0,14	0,33	2,08
UM								
Overige toestellen	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
RNL-VRS	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
RNL-IB	<0,01	0,02	0,02	0,07	<0,02	<0,02	<0,02	<0,01
Waste	<0,01	0,03	0,03	0,01	<0,03	<0,03	<0,03	<0,01
Subtotaal UM	0,00	0,05	0,05	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
Maastro Clinic								
HDR	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
LDR	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Lineaire versnellers	0,02	<0,01	0,16	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	0,04
Toestellen	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Subtotaal Maastro	0,00	0,10	0,16	0,04	0,00	0,00	0,00	0,04
Maastro protonetherapie								
Protonen	0,01	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
Mevion	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Subtotaal Maastro protonen	0,01	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
Totaal H*max = ID extern	0,88	3,39	2,29	0,61	0,10	0,14	0,33	2,13
MID extern locatie Randwyck	0,22	0,85	0,57	0,15	0,03	0,04	0,08	0,53

4. Omgevingsdosisequivalent op diverse punten op de terreingrens van locatie Maastru Venlo

Het omgevingsdosisequivalent aan de terreingrens op de locatie Venlo wordt uitsluitend bepaald door het gebruik van 2 lineaire versnellers voor radiotherapie en de röntgentoestellen (met een buisspanning van 140 kV) die daarin geïntegreerd zijn. De omvang van het gebruik van deze toestellen is nagenoeg constant, hetgeen resulteert in een eveneens weinig variabele belasting aan de terreingrens. Voor de locatie Venlo is een zestal punten van belang; 5 punten aan de terreingrens van Maastru:

- T1: Tegelseweg;
- T2: Parkeerplaats;
- T3: Parkeerplaats;
- T4: Groenvoorziening
- T5: Groenvoorziening

En 1 intern punt aan de gemeenschappelijke terreingrens met VieCuri:

- TG: wachtkamer grenzend aan gebouw VieCuri.

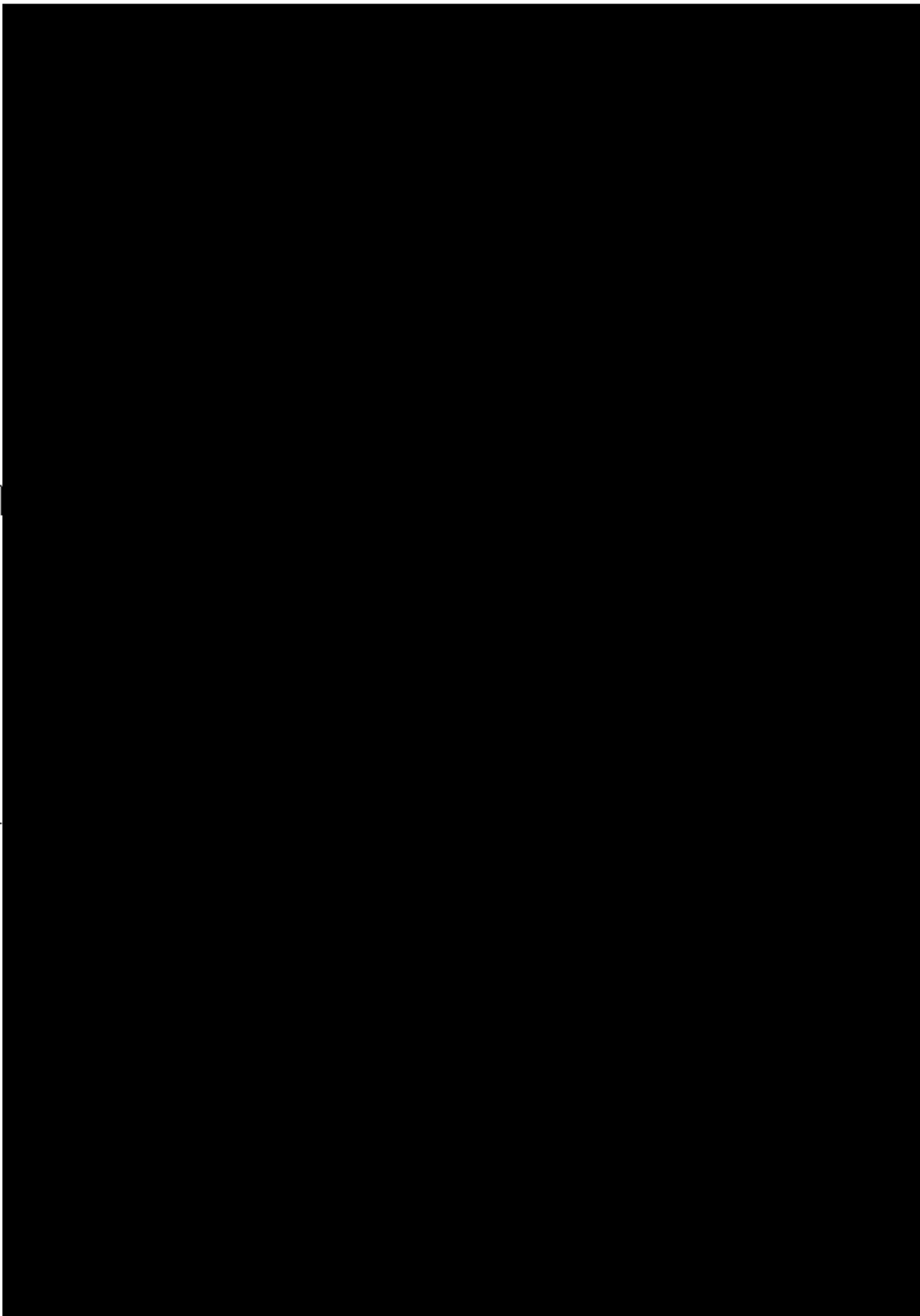
Het maximale omgevingsdosisequivalent is berekend aan de hand van het maximale (en reële) gebruik van de toestellen. In 2025 zijn de toestellen vervangen. De nieuwe toestellen worden alleen nog maar gebruikt in de modus 6 MV FFF. Omdat het secundair niveau op basis van de MID wordt overschreden, is een nadere analyse uitgevoerd en zijn, conform de 'Rekenregels Analyse Gevolgen Ioniserende Straling', Bijlage 10 van de ANVS-verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming, ABC-factoren zijn toegepast.

In het verleden (2017) is een vergunning aangevraagd waarbij de terreingrens enkele meters buiten het gebouw is getrokken (ergens in het gras, variërend van 2,1 m tot 9,1 m). Uitgaande van voortschrijdend inzicht kiezen we er nu voor om de terreingrenzen direct aan de buitengevel van het gebouw waarin de bunkers zijn gesitueerd, te leggen. De stralingsbelasting op de oude terreingrens zou afnemen door de nieuwe toestellen. Door echter de terreingrenzen te verleggen en ook nog rekening te houden met mogelijke bebouwing in de toekomst neemt de aangevraagde AID toe van 3,3 naar 43,3 μ Sv/jaar. In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** zijn de oude punten aangegeven als de punten **T1 t/m T5 en TG**. De nieuwe punten zijn aangegeven als **T1_N t/m T5_N**

Op basis van onderstaande informatie over afstanden van isocentrum naar muur en dikten van muren en breedte van het labyrint zijn de afstanden van de versnellers PORTO en OSLO tot de punten op de terreingrens bepaald. De in de gegevens gebruikte coderingen zijn opgenomen in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..** In **Tabel R-7** zijn de afstanden tot de oude, vergunde, terreingrens en de afstanden tot de nieuwe te vergunnen terreingrens opgenomen. De berekende omgevingsdosisequivalentwaarden voor de nieuwe situatie zijn opgenomen in **Tabel R-10**.

Codering	Afstand [mm]	Codering	Afstand [mm]
TM	2200	BL (Breedte Labyrint)	2400
BM ₁	1000	ET1 (afstand T1 _N tot T1)	2100
BM ₂	1000	ET2 (afstand T2 _N tot T2)	9100
LM	1200	ET3 (afstand T3 _N tot T3)	9100
ILM (Isoc – LM)	4550	ET4 (afstand T4 _N tot T4)	11400
ITM (Isoc – TM)	4550	ET5 (afstand T5 _N tot T5)	4000
IBM ₁	7940 (838+7102)	Py _N $\sqrt{[8940^2+(4550+4550+2200)^2]}$	14410
IT5	13300	Py _o $\sqrt{[18040^2+(4550+4550+2200)^2]}$	21286
		PY _{N5} $\sqrt{[(13300)^2+(4550+4550+2200)^2]}$	17450

$$P_{yos} \sqrt{[(13300+4000)^2+(4550+4550+2200)^2]} \quad 20660$$



T3

T2

Tabel R-7 Afstanden tot de diverse punten op de terreingrens van de locatie Maastro Venlo

PORTO (oude afstanden [mm])													Totaal	Totaal
	TM	BM ₁	BM ₂	LM	ILM	ITM	IBM ₁	BL	PY _O	ET	IT5	PY _{O5}	Oude grens [mm]	Oude grens [m]
T1 _{PO}			1000	1200	4550			2400		2100			11250	11,3
T2 _{PO}		1000					7940			9100			18040	18,0
T3 _{PO}									21286				21286	21,3
T4 _{PO}	2200		1000	1200	4550	9100		2400		11400			31850	31,9
T5 _{PO}										4000	13300		17300	17,3
TG _{PO}										NVT			31600	31,6
PORTO (nieuwe afstanden [mm])													Totaal	Totaal
	TM	BM ₁	BM ₂	LM	ILM	ITM	IBM ₁	BL	PY _N	ET	IT5	PY _{N5}	Nieuwe grens [mm]	Nieuwe grens [m]
T1 _{PN}			1000	1200	4550			2400		NVT			9150	9,2
T2 _{PN}		1000					7940			NVT			8940	8,9
T3 _{PN}									14410	NVT			14410	14,4
T4 _{PN}	2200		1000	1200	4550	9100		2400		NVT			20450	20,5
T5 _{PN}										NVT	13300		13300	13,3
TG _{PN}										NVT			31600	31,6
OSLO (oude afstanden [mm])													Totaal	Totaal
	TM	BM ₁	BM ₂	LM	ILM	ITM	IBM ₁	BL	PY _O	ET	IT5	PY _{O5}	Oude grens [mm]	Oude grens [m]
T1 _{OO}	2200		1000	1200	4550	9100		2400		2100			22550	22,6
T2 _{OO}									21286				21286	21,3
T3 _{OO}		1000					7940			9100			18040	18,0
T4 _{OO}			1000	1200	4550			2400		11400			20550	20,6
T5 _{OO}												20660	20660	20,7
TG _{OO}										NVT			22600	22,6
OSLO (nieuwe afstanden [mm])													Totaal	Totaal
	TM	BM ₁	BM ₂	LM	ILM	ITM	IBM ₁	BL	PY _N	ET	IT5	PY _{N5}	Nieuwe grens [mm]	Nieuwe grens [m]
T1 _{ON}	2200		1000	1200	4550	9100		2400		NVT			20450	20,5
T2 _{ON}									14410	NVT			14410	14,4
T3 _{ON}		1000					7940			NVT			8940	8,9
T4 _{ON}			1000	1200	4550			2400		NVT			9150	9,2
T5 _{ON}										NVT		17450	17450	17,5
TG _{ON}										NVT			22600	22,6

Tabel R- 8 Omgevingsdosisequivalent op diverse punten op de terreingrens van de locatie Maastru Venlo in de oude situatie

					Berekende ID, MID en AID met oude terreingrenskeuzes; enkele meters buiten de muur							
					ID (µSv/j)		MID (µSv/j)			AID (µSv/j)		
Punt	Beschrijving	Functie	abc-factor	Factor afscherming	6 FFF	6 FFF	6 FFF	6 FFF	Totaal	6 FFF	6 FFF	Totaal
T1 _o	zuid-oost, thv Porto, richting Tegelseweg	parkeerplaats	0,01	0,25	1,60E-01	1,31E+00	4,00E-02	3,29E-01	0,37	1,60E-03	1,31E-02	0,0
T2 _o	zuid-west, thv Porto	parkeerplaats	0,01	0,25	1,09E+02	1,53E+02	2,73E+01	3,83E+01	65,62	1,09E+00	1,53E+00	2,6
T3 _o	zuid-west, thv Oslo	parkeerplaats	0,01	0,25	1,53E+02	1,09E+02	3,83E+01	2,73E+01	65,62	1,53E+00	1,09E+00	2,6
T4 _o	noord-west, thv Oslo, richting ziekenhuis	parkeerplaats	0,01	0,25	4,03E-01	8,02E-02	1,01E-01	2,01E-02	0,12	4,03E-03	8,02E-04	0,0
T5 _o	Noord-oost	Gras	0,01	0,25	2,57E+01	3,68E+01	2,57E+01	3,68E+01	62,56	2,57E-01	3,68E-01	0,6
TG	noord, thv Oslo, wachtruimte VieCuri	belendende industrie	0,2	0,25	1,01E+01	3,15E-07	1,01E+01	3,15E-07	10,07	2,01E+00	6,31E-08	0,5

Tabel R-9 Omgevingsdosisequivalent op diverse punten op de terreingrens van de locatie Maastru Venlo in de nieuwe situatie, zonder rekening te houden met toekomstige bebouwing

					Berekende ID, MID en AID met nieuwe terreingrens: <u>direct aan de buitenmuur</u>							
					ID (µSv/j)		MID (µSv/j)			AID (µSv/j)		
Punt	Beschrijving	Functie	abc-factor	Factor afscherming	Oslo	Porto	Oslo	Porto	Totaal	Oslo	Porto	Totaal
T1 _N	zuid-oost, thv Porto, richting Tegelseweg	parkeerplaats	0,01	0,25	1,94E-01	1,92E+00	4,86E-02	4,79E-01	0,5	1,94E-03	1,92E-02	0,0
T2 _N	zuid-west, thv Porto	parkeerplaats	0,01	0,25	2,39E+02	6,26E+02	5,98E+01	1,57E+02	216,4	2,39E+00	6,26E+00	8,7
T3 _N	zuid-west, thv Oslo	parkeerplaats	0,01	0,25	6,26E+02	2,39E+02	1,57E+02	5,98E+01	216,4	6,26E+00	2,39E+00	8,7
T4 _N	noord-west, thv Oslo, richting ziekenhuis	parkeerplaats	0,01	0,25	1,92E+00	1,94E-01	4,79E-01	4,86E-02	0,5	1,92E-02	1,94E-03	0,0
T5 _N	Noord-oost	Gras	0,01	0,25	3,60E+01	6,23E+01	3,60E+01	6,23E+01	98,3	3,60E-01	6,23E-01	1,0
TG	noord, thv Oslo, wachtruimte VieCuri	belendende industrie	0,2	0,25	1,01E+01	3,15E-07	1,01E+01	3,15E-07	10,1	2,01E+00	6,31E-08	0,5

Tabel R-10 Omgevingsdosisequivalent op diverse punten op de terreingrens van de locatie Maastru Venlo in de nieuwe situatie, rekenend houdend met eventuele bebouwing op het terrein van Viecuri.

Berekende ID, MID en AID met terreingrens direct aan de buitenmuur, rekening houdend bebouwing door VieCuri aan de punten T2 en T3												
Punt	Beschrijving	Functie	abc-factor	Factor afscherming	ID ($\mu\text{Sv}/\text{j}$)		MID ($\mu\text{Sv}/\text{j}$)			AID ($\mu\text{Sv}/\text{j}$)		
					Oslo	Porto	Oslo	Porto	Totaal	Oslo	Porto	Totaal
T1N	zuid-oost, thv Porto, richting Tegelseweg	parkeerplaats	0,01	0,25	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt
T2N	zuid-west, thv Porto	belendende industrie	0,2	0,25	2,39E+02	6,26E+02	5,98E+01	1,57E+02	216,4	1,20E+01	3,13E+01	43,3
T3N	zuid-west, thv Oslo	belendende industrie	0,2	0,25	6,26E+02	2,39E+02	1,57E+02	5,98E+01	216,4	3,13E+01	1,20E+01	43,3
T4N	noord-west, thv Oslo, richting ziekenhuis	parkeerplaats	0,01	0,25	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt
T5N	Noord-oost	Gras	0,01	0,25	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt
TG	noord, thv Oslo, wachtruimte Vie Curi	belendende industrie	0,2	0,25	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt	Nvt

Omdat alleen op de punten T2 en T3 bebouwing kan plaatsvinden, is de AID alleen voor die punten uitgerekend. Deze punten zijn bepalend voor de hoogte van de AID.

5. Omgevingsdosisequivalent op diverse punten op de terreingrens Annadal

Bij de inrichting van de ruimten wordt ervoor gezorgd dat de effectieve dosis voor personen buiten de ruimten niet meer dan 1 mSv per jaar bedraagt en dat de MID_{extern} minder dan 10 μSv per jaar bedraagt (Bijlage R1 en R2). Indien nodig worden bouwkundige aanpassingen uitgevoerd bij de inrichting van de kamers bestemd voor MKA.

6. Omgevingsdosisequivalent op diverse punten op de terreingrens van de locatie UM-FSE

Bij de inrichting van de ruimten wordt ervoor gezorgd dat de effectieve dosis voor personen buiten de ruimten niet meer dan 1 mSv per jaar bedraagt en dat de MID_{extern} minder dan 10 μSv per jaar bedraagt. Indien nodig worden bouwkundige aanpassingen uitgevoerd.

7. Overzicht Omgevingsdosisequivalent, ID, MID en AID per locatie als gevolg van externe blootstelling

Tabel R-11 Maximale dosisbijdrage aan de terreingrens als gevolg van externe blootstelling.

Locatie	H*extern [$\mu\text{Sv}/\text{jaar}$]	ID _{extern} [$\mu\text{Sv}/\text{jaar}$]	MID _{extern} [$\mu\text{Sv}/\text{jaar}$]	AID _{extern} [$\mu\text{Sv}/\text{jaar}$]
Complex Randwyck	3,39	3,39	0,85	n.v.t.
Maastro Venlo	865	865	216,4	43,3
Annadal Kliniek	0,8	0,8	0,2	n.v.t.
UM-FSE	onbekend	onbekend	onbekend	n.v.t.

In de aanvraag wordt voor de externe blootstellingspad het volgende opgenomen in Tabel 4-5 (MID) en Tabel 4-6 (AID):

Tabel R-12 MID_{extern} per locatie.

Locatie	MID _{extern} [$\mu\text{Sv}/\text{jaar}$]
Complex Randwyck	0,85
Maastro Venlo	216,4
Annadal Kliniek	0,2
UM-FSE	onbekend

Tabel R-13 AID_{extern} per locatie.

Locatie	AID _{extern} [$\mu\text{Sv}/\text{jaar}$]
Complex Randwyck	n.v.t.
Maastro Venlo	43,3
Annadal Kliniek	n.v.t.
UM-FSE	n.v.t.