

Bijlage 2

Arbo- en Milieudienst

Huispost 980

Postbus 9101

6500 HB Nijmegen

UMC St. Radboud Oost, route 986

Erasmuslaan 17

T (024) 361 26 81

F (024) 361 64 82

h.piest@amd.ru.nl

www.ru.nl/amd

Risico-analyse behorende bij: Gegevens aanvraag wijziging
KeW-vergunning No. 2009/1888-16

Stichting Katholieke Universiteit Nijmegen

Locatie Geert Grooteplein te Nijmegen

Auteurs: Dr. J.A. (Hans) Piest

Drs. Paul A.J. Jonkergouw (verantwoordelijk stralingsdeskundige)

Datum: 3 april 2012

Table of Contents

Risico-analyse bij Wijzigingsaanvraag.....	2
0. Samenvatting van resultaten.....	2
1. Inleiding.....	4
2. Gebruikte rekenmethode.....	4
2.1 Dosistempovelden.....	4
2.2 Activatie van lucht.....	6
3. Bronnen van remstralingsproductie.....	7
4 Resultaten.....	7
4.1 Dosistempovelden.....	10
4.1.1 niveau FEL-bunker.....	10
4.1.2 niveau FLARE-kantoren.....	14
4.1.3 niveau FELICE-laboratorium.....	17
4.1.3 niveau maaiveld.....	18
4.2 Extrapolatie naar de terreingrens.....	19
4.3 Wijziging bouwplannen ter reductie stralingslek: verzwaring beton en zwaarbeton gedeelte tussen FEL-bunker en trappenhuis.....	21
4.3 Activering van bestanddelen in de lucht.....	22
4.3.2 Buiten de FEL-bunker: verspreiding van ^{41}Ar	25
4.3.3 Buiten de FEL-bunker: geschatte jaarlijkse uitstoot van ^{41}Ar en ^{14}C activiteit.....	28
Referenties.....	30
Appendices.....	31
A Model van FEL-gebouw gebruikt ter berekening van dosistempovelden en activatie van lucht door middel van FLUKA	31
B Bronnen van remstraling- en neutronproductie gebruikt ter berekening van dosistempovelden en activatie van lucht door middel van FLUKA.....	35
C Plattegrond van de FEL-bunker met geprojecteerde elektronbundellijnen en bronnen remstraling- en neutronenproductie.....	41
D Jaardosisvelden, bezettingsgraden en expliciete doses in relevante horizontale vlakken van het FEL-gebouw	43
E Extrapolatie van de jaardosisvelden naar de terreingrens.....	53
F Voorgenomen aanpassingen ter verzwaring van de stralingsafscherming in de richting van de FLARE kantoren.....	55
G Activering van luchtbestanddelen in de FEL-bunker en gevolgen daarvan aan de terreingrens.....	57

Risico-analyse bij Wijzigingsaanvraag

0. Samenvatting van resultaten

Ten behoeve van een risico-inschatting met betrekking tot potentieel op te lopen doses voor werknemers en niet-werknemers als gevolg van bedrijf van de vrije-elektronenlasers bij het Nijmegen Centre for Advanced Spectroscopy (NCAS) is uitgebreid het jaardosisveld in en rond dit instituut in kaart gebracht. Dit wordt beschreven in de volgende paragrafen.

Samenvattend: de gemiddelde waarden vastgesteld voor het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ of van de effectieve dosis E , al naar gelang de gebruikte rekenmethode, die opgelopen kan worden bij een bepaalde verblijfsduur (rekenjaar) in geselecteerde ruimtes/niveau's in en rond het NCAS-gebouw zijn weergegeven in Tabel 0.1.

Op grond van de uitgevoerde risicoanalyse is op de terreingrens nergens de dosis groter dan het secundair (binnenshuis)niveau van 10 μSv per jaar en zijn geen problemen te verwachten voor de volksgezondheid van niet-werknemers op of buiten de terreingrens.

Binnen de terreingrens is de verwachting dat het stralingsrisico gering is. In één oogopslag is in Tabel 0.1 te zien dat (niet-)werknemers primair de grootste stralingsbelasting zouden kunnen oplopen in de gang naar het labirynth en in de FEL techniekruimte. Dit zijn tevens ruimtes waar met eenvoudige middelen dosisreductie teweeggebracht kan worden. Aangezien het hier om rekenresultaten gaat bepaald op grond van een FEL-bedrijf die over 2000 uur op grond van gebruikte versnelspanning en bundelstroom de hoogste doses (worst-case scenario) oplevert en het daarmee nog geen gemeten praktijkwaarden betreft, is het noodzakelijk dat een uitgebreide meetcampagne volgt om te kunnen inschatten in hoeverre de werkelijk op te lopen doses overeenkomen met de getabelleerde waarden. Uiteraard zal hier de aandacht worden gevestigd op die ruimtes waar de hogere waardes zijn getabelleerd. In ieder geval zijn de berekende doses niet dusdanig hoog dat ze met eenvoudige aanpassingen en ruimtelijke beperkingen onder controle gebracht zouden kunnen worden.

In verband met de hogere waarden voor de FLARE kantoren en het trappenhuis zijn al aanpassingen in de bouwtekeningen doorgevoerd die in de berekeningen nog niet zijn verwerkt. Het betreft essentieel een verzwaring van de afscherming tussen de FEL-bunker en dit kantoren-gedeelte en trappenhuis waardoor de dosis in deze gedeeltes naar alle waarschijnlijkheid met een factor tien of meer gereduceerd gaan worden. Tevens zal dit de maximale dosis die aan de terreingrens gemeten kan worden ten goede komen.

Tabel 0.1: Overzicht van berekende verwachte jaardoses, voor een FEL-combinatie die aanleiding geeft tot de hoogste dosistemp. De doses zijn bepaald per niveau/ruimte waarbij is gemiddeld over de vloeroppervlak van die ruimte. De dosis is berekend voor de tijdsduur die is aangegeven onder 'rekenjaar'.

werknemers in gebouw					
niveau	karakteriseert	ruimte	rekenjaar	E/H*(10)	opmerking
0 – 2 m	vloerniveau FEL-bunker	algemene techniekruimte	200 uur	33.5 µSv (2%)	
		FEL techniekruimte	200 uur	0.27 mSv (14%)	
		gang naar labyrint	500 uur	1.3 mSv (66 %)	extra (lood) afscherming voorgenomen
2½ – 4½ m	vloerniveau FLARE kantoren	FLARE kantoren	2000 uur	56.8 µSv (3%)	extra zwaarbeton afscherming voorgenomen
		trappenhuis	200 uur	64.3 µSv (3%)	
		corridor boven labyrint	100 uur	7.6 µSv (0%)	
5 – 7 m	vloerniveau FELICE laboratorium	FELICE laboratorium	2000 uur	18.3 µSv (1%)	
		boven FLARE kantoren	2000 uur	93.6 µSv (5%)	extra zwaarbeton afscherming voorgenomen
		over gehele gebouw	2000 uur	15.9 µSv (1%)	
6 – 8 m	maaiveld niveau	boven FLARE kantoren	2000 uur	66.9 µSv (3%)	extra zwaarbeton afscherming voorgenomen
		over gehele gebouw	2000 uur	11.4 µSv (1%)	
werknemer submersie ⁴¹ Ar					
0 – 2 m	vloerniveau FEL-bunker	FEL-bunker	2000 uur	25 µSv (1%)	bij FELs inoperatief
SOM			15200 uur	1.96 mSv (100%)	
bevolking terreingrens					
terreingrens			4000 uur	< 10 µSv	secundair niveau

1. Inleiding

Met betrekking tot de wijzigingsaanvraag, waaraan deze Bijlage verbonden is, is een risico-analyse doorgevoerd waarbij de stralingsbelasting als gevolg van het bedrijf van de toestellen in het FEL-laboratorium van NCAS aan de FNWI van de RU beoordeeld is en getoetst wordt aan wettelijke normen. Daartoe zijn dosistempovelden van het omgevingsdosisequivalent berekend bij gebruik verscheidene FEL-combinaties en bij versnelspanning (bundelstroom) van:

15 (70) en 18 (3.5) MV (μ A)

voor "FLARE",

25 (24), 27 (18), 30 (1.2) en 33 (1) MV (μ A),

voor "FEL-1" en:

45 (24), 50 (18), 55 (1.2) en 60 (1) MV (μ A)

voor beide "FEL-2" en "FELICE".

De cursief gedrukte spanningen/stromen betreffen hypothetische, in de praktijk niet gemeten en/of niet gehaalde, grenswaarden. Verder is de neutronenproductie bij de grootste bronnen van remstraling onderzocht en de gevolgen daarvan voor de activatie van bestanddelen van lucht. Er zijn acht bronnen bestudeerd, te weten vier notoire elektronenbundelverlies locaties en vier elektronenbundeldumps: In deze beknopte analyse wordt alleen ingegaan op die combinatie van FELs met die energieën en bundelstromen die van de mogelijke combinaties de hoogste stralingsbelasting opwekken. Een uitgebreide analyse gaat deel uitmaken van de Interne Toestemming ter regulering van de toepassing van de instrumenten.

2. Gebruikte rekenmethode

2.1 Dosistempovelden

Bij het berekenen van de dosistempovelden, gebruikt om de stralingsbelasting als gevolg van het bedrijf van de FELs te beoordelen, is gebruik gemaakt van het op Monte-Carlo-algorithmen gebaseerde pakket 'FLUKA' [FLUKA07,FLUKA05,FLURL]. FLUKA is in het begin van de '60-er jaren ontwikkeld en wordt sindsdien up-to-date gehouden door, in de laatste drie decennia, het Italiaanse 'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare'[INFN] en het 'Laboratoire européen pour la physique des particules'[CERN] meer bekend onder het verouderd acronym 'CERN'. FLUKA wordt tegenwoordig voor een breed scala van doeleinden toegepast waaronder hoge-energy fysica, afschermingberekeningen, detector en telescoop ontwerp, onderzoek van kosmische straling,

dosimetrie, medische fysica en radiobiologie. Middels de ingebouwde Monte Carlo algorithmen wordt door middel van het trekken van toevalsgetallen op statistische wijze gepoogd de fysische processen zo goed mogelijk te simuleren die optreden bij het transport van elementaire deeltjes. Onder deze deeltjes bevinden zich, naast tientallen meer exotische deeltjes, tevens de klassiekers fotonen, neutronen, protonen en elektronen.

Ter bepaling van de dosistempovelden zijn twee stappen te onderscheiden: stap 1) met behulp van de reken-software FLUKA is per bron van ioniserende straling van een groot aantal, te weten tweehonderd miljoen, elektronen het afgelegde traject door een rechthoekig parallellepipedum gevolgd. De interacties met de omgeving zijn bepaald. Secundaire deeltjes, ontstaan bij die interacties, zijn op hun beurt ook gevolgd en evenzo tertiaire en hogere orde resulterende deeltjes. Hoewel vrijwel uitsluitend elektronen, fotonen en neutronen als secundaire deeltjes ontstaan bij de gebruikte versnellschakelingen zijn alle door FLUKA getransporteerde deeltjes gevolgd en is hun bijdrage aan de dosis meegenomen. Uit de interacties van al deze deeltjes is de gemiddelde dosisbijdrage per primair elektron berekend. Met bekende bundelstroom laat zich uit deze berekening eenvoudig het dosistempo afleiden.

In totaal is het effect van acht bronnen afzonderlijk bepaald en zijn van 1.6 miljard primaire elektronen de interacties en secundaire deeltjes bepaald. Per primair elektron is rond .5 ms tijd gebruikt per CPU-core, bij gebruikmaking van een 3.2 GHz AMD Phenom™ II X4 840 Processor, dus in totaal zijn voor deze berekeningen ruim negen CPU-core-dagen geïnvesteerd.

Uit de primaire en secundaire deeltjesfluenties zijn in drie dimensies het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ bepaald per volume-element van $.5 \times .5 \times .5 \text{ m}^3$ en per primair elektron. Het vaststellen van $H^*(10)$ gebeurt in FLUKA softwarematig met inachtneming van ICRP74 [ICRP74] en ICRU57 [ICRU57] voor deeltjesenergieën lager dan 10 MeV. Bij hogere deeltjesenergieën worden de conversiecoëfficiënten als berekend door Pelliccioni[Pell] toegepast. Ook dit gebeurt softwarematig door FLUKA.

In het genoemde parallellepipedum, ter grootte $40 \times 40 \times 10 \text{ m}^3$, is een model van het gebouw, inclusief omliggende aarde en lucht neergelegd, waarbij de in werkelijkheid toegepaste materialen zo goed mogelijk zijn benaderd wat betreft elementaire samenstelling en wat betreft soortelijk gewicht. Wel zijn bij de implementatie van het gebouw alleen die ruimtes ingevoerd die hetzij direct aan de FEL-bunker grenzen danwel waar zich grote delen van de dag personen ophouden. In het algemeen zijn tussenwanden en dergelijke die niet direct als stralingsafschermende wanden zijn ontworpen of die niet als substantieel afschermend kunnen worden aangemerkt, weggelaten. Een overzicht van het gebruikte model, met doorsneden in het horizontale en in het verticale vlak, voor het gebouw is weergegeven in Afbeeldingen A.1 t/m A.3 van Appendix A. Een overzicht van de gemodelleerde bronnen is afgebeeld in Afbeeldingen B.1 t/m B.5 van Appendix B.

Het resultaat van de berekeningen levert door middeling over de 200 miljoen elektronen per bron het driedimensionele dosisveld als gevolg van één enkel primair elektron op. Door dit stralingsveld te vermenigvuldigen met het aantal elektronen dat per tijdseenheid bijdraagt aan het dosisveld wordt vervolgens het dosistempo veld *c.q.* de jaardosis berekend als gevolg van die specifieke bron. Uiteindelijk wordt het gezamenlijk dosistempoveld voor die combinaties van bronnen berekend die gelijktijdig actief kunnen zijn, uiteraard bij de eerder aangegeven combinaties van bundelenergieën en bundelstromen. De in deze Bijlage weergegeven dosistempovelden betrekken zich op de combinatie van FLARE op 15MV versnelspanning met 70 μA bundelstroom tesamen met FEL-2 op 45 MV versnelspanning met 24 μA bundelstroom en tesamen met FELICE eveneens op 45 MV versnelspanning met 24 μA bundelstroom. Dit omdat deze combinatie de hoogste stralingsbelasting op jaarbasis oplevert. Alle andere mogelijke combinaties leveren een lagere jaardosis. Daarmee wordt een overschatting van het jaarlijks op te lopen omgevingsdosisequivalent weergegeven in de volgende paragrafen van deze Bijlage.

2.2 Activatie van lucht

Als gevolg van interactie die optreedt tussen de bestanddelen van de omgeving van de bronnen en de primaire en secundaire stralingsdeeltjes kunnen neutronen vrijgemaakt worden. Deze neutronen kunnen ingevangen worden in de kernen van atomen van onderdelen van het toestel, van het gebouw en van de lucht in het gebouw en deze daarmee activeren. Waar de vaste delen van het gebouw en het toestel regelmatig gecontroleerd kunnen worden op activatie en eventueel verwijderd en opgeslagen of als afval afgevoerd kunnen worden, wordt de lucht door middel van een luchtverversingssysteem continu naar de vrije buitenlucht uitgestoten. In deze lucht kunnen sporen van de nucliden ^{41}Ar en ^{14}C bevinden.

Met gebruik van FLUKA zijn de activeringsreacties ($^{40}\text{Ar},n$) ($^{41}\text{Ar},\gamma$) en ($^{14}\text{N},n$) ($^{14}\text{C},p$), die mogelijk optreden in de FEL-bunker, in de berekeningen opgenomen. Hiertoe is het produktietempo van de voornoemde reacties berekend op basis van vijftig miljoen primaire elektronen per bron. In dit geval was de gemiddelde rektijd rond 25 ms per primair elektron en daarmee de investering een kleine vijftien CPU dagen. De berekeningen gaan een grootte orde trager dan de standaard transport berekeningen wegens het aanspreken van de FLUKA-module die neutronenvangst berekent. Er wordt uitgegaan van homogene produktie over het gehele volume van de FEL-bunker, inclusief het labyrint. Uit de berekende produktietempi laat zich met bekende fysische vervalconstanten en bekende tijdsafhankelijke ventilatievoud de activiteitsdichtheid en daarmee de totale hoeveelheid activiteit binnen de FEL-bunker op willekeurig tijdstip berekenen, alsmede het uitstoottempo van deze activiteit *c.q.* activiteit per uitgestoten massa lucht, naar de buitenlucht.

3. Bronnen van remstralingsproductie

De grootste bronnen van remstraling zijn de collimatoren die de elektronenbundelbreedte ruimtelijk en daarmee tevens in versnelenergie begrenzen en waar vooral bij de eerste maal dat de elektronenbundel van richting wordt veranderd (verder in deze Bijlage aangeduid als “de eerste bocht”) elektronenbundelverliezen optreden. Daarnaast wordt in de elektronendumps, waar de resterende elektronen in de bundel uiteindelijk terechtkomen, ook de nodige remstraling geproduceerd. Dit levert de acht principiële remstralingsbronnen binnen de FEL -bunker behorende bij de eerste bochten en de dumps van “FLARE”, “FEL-1”, “FEL-2” en “FELICE”.

Het model dat wordt gebruikt bij de berekening van remstraling die ontstaat in een eerste bocht is geschetst in Afbeelding B.1. Een 40 cm lange loden cylinder met buitendiameter van 32 cm en wanddikte van 10 cm is aangebracht rond een koperen halve kogel. Centraal op de vlakke zijde van deze kogel treft de elektronenbundel deze. Dit trefpunt bevindt zich op het zwaartepunt van de loden cylinder. Vanaf dit koperen target straalt de geproduceerde remstraling in overwegend voorwaartse richting en in mindere mate in achterwaartse richting. De zijwaartse richting is van minder belang wegens de dikke loden afscherming, maar wordt wel gewoon doorgerekend met FLUKA.

De vier dumps, afgebeeld voor FEL-1, FEL-2, FELICE en FLARE in respectievelijk Afbeelding B.2, B.3, B.4 en B.5, bestaan uit een trefvolume van hetzij aluminium (FLARE en FEL-1) danwel koolstof (FEL-2 en FELICE). Deze trefvolumes zijn afgeschermd met beton, zwaarbeton en aarde (FLARE), lood, polyethyleen, beton en aarde (FEL-1), aluminium, lood, polyethyleen, beton en aarde (FEL-2) en aluminium, lood en polyethyleen (FELICE). Het ontbreken van de polyethyleen afscherming bij de FLARE-dump heeft te maken met de slechts zeer geringe neutronen productie bij de gebruikte versnelspanning voor deze FEL.

4 Resultaten

Uit de berekende dosistempovelden per bron zijn twee combinaties van bronnen met bijbehorende bundelenergieën en stroomsterktes vastgesteld die tot gelijkwaardige en tevens tot de hoogste jaardoses leiden. Hierbij wordt een jaar weergegeven door 2000 bedrijfsuren dáár waar de dosis is berekend binnen de terreingrens van de locatie. Deze beide combinaties die tot de hoogste stralingsdoses leiden zijn: FEL-2, FELICE en FLARE op bundelenergieën en -stromen van respectievelijk 45 MeV/24 μ A, 45 MeV/24 μ A en 15 MeV/70 μ A (combinatie 1) en dezelfde combinatie met bundelenergieën en -stromen van respectievelijk 50 MeV/18 μ A, 50 MeV/18 μ A en 15 MeV/70 μ A (combinatie 2).

In vergelijking met combinatie 1 levert combinatie 2 weliswaar een hogere dosis per primair

elektron op maar door de lagere bundelstroom worden op jaarbasis evenredig minder elektronen versneld zodat de integrale dosis over een jaar vrijwel gelijk is voor beide combinaties. De overige combinaties, waarbij nog hogere bundelenergieën worden toegepast leveren duidelijk lagere jaardoses op als gevolg van de aanzienlijk lagere bundelstromen. In het licht van deze resultaten is voor de voorliggende risicoanalyse uitgegaan van de combinatie FEL-2, FELICE, FLARE bedreven met versnелspanningen van 45 MeV, 45 MeV, 15 MeV, één van beide combinaties die tot de hoogste berekende jaardosis leidt. De werkelijke jaardosis zal uiteindelijk lager uitvallen omdat binnen de bedrijfstijd van de FELs ook regelmatig met andere FEL-combinaties wordt gewerkt die tot lagere dosistempovelden leiden.

Voor een aantal geselecteerde ruimtes is de gemiddelde jaardosis berekend uit de dosistempovelden door het rekenkundig gemiddelde van de dosis over het oppervlakte van die ruimtes te bepalen. Deze waarden zijn weergegeven in de Afbeeldingen die in de volgende paragrafen zijn opgenomen. De geselecteerde ruimtes zijn: *algemene techniekruimte, FEL-techniekruimte, gang naar toegangsdeur van labyrinth, corridor boven labyrinth, FLARE kantoren, trappenhuis & voorportaal trappenhuis, FELICE-laboratorium, gehele gebouw op FELICE-laboratorium niveau, FLARE kantoren op FELICE-laboratorium niveau, gehele gebouw op maaiveld niveau, FLARE kantoren op maaiveld niveau.*

Met de gebruikte rekenmethode is óp de terreingrens en op maaiveldniveau geen dosis als gevolg van het bedrijf van de FELs te berekenen. De stralingsniveau's zijn daar lager dan de drempelwaarde voor de berekeningen van 0.1 μSv per jaar. Deze drempel kan weliswaar verlaagd worden maar dit vergt een onevenredig grote toename van het aantal primaire elektronen, en daarmee direct samenhangend een onevenredig grote toename van rekentijd. Wegens het statistisch karakter van de berekeningen zal een verlaging van de drempelwaarde tot een fractie α van 0.1 mSv per jaar ruwweg een factor α^{-2} meer elektronen en dus een factor α^{-2} meer rekentijd vergen: een halvering van de drempelwaarde komt zodoende neer op een verviervoudiging van de rekentijd.

Bij de berekeningen is steeds ervan uitgegaan dat een elektron hetzij straling levert bij de eerste bocht, danwel straling levert bij de dump. Voor FEL-2 en FELICE betekent dit dat 5 % van de bundelstroom ($= 0.05 \times 24 \mu\text{A}$) bij de eerste bocht wordt omgezet in straling en dat 95 % van de bundelstroom ($= 0.95 \times 24 \mu\text{A}$) in de dump wordt omgezet in straling. Bij FLARE zijn de percentages 10 en 90 voor respectievelijk de eerste bocht en de dump. Deze percentages zijn aangenomen van de uit de praktijk bekende percentages voor de lasers FEL-2 en FELICE en zijn verwachte, en daarom uit voorzorg wat hoger ingeschatte, percentages voor FLARE.

In Afbeelding C.1, in Appendix C, zijn de eerste-bochten en de dumps weergegeven voor gebruik van de combinatie FLARE, FEL-1 en FELICE. In Afbeelding C.2 van dezelfde Appendix is dit

weergegeven voor de combinatie van FLARE, FEL-2 en FELICE, waarop de voorliggende risicoanalyse zich op betreft. In beide tekeningen is de elektronenbundellijn met een rood gestreepte lijn weergegeven.

Tenslotte zijn uit de met FLUKA berekende productietempi voor de ^{41}Ar - en ^{14}C -activeringsreacties de tijdsafhankelijke argon- en koolstofactiviteitsdichtheden in de FEL-bunker berekend en uit deze waarde van de door het ventilatiesysteem naar de buitenlucht uitgestoten hoeveelheden activiteit voor deze beide radionucliden.

In de volgende paragrafen wordt kort ingegaan op de in onderstaande lijst opgenomen situaties:

niveau FEL-bunker) het vlak op 120 cm van de vloer van de FEL-bunker. Dit is het vlak waar de “eerste bochten”, de belangrijkste remstralingspunten zich bevinden. Tevens bevinden zich op dit niveau de dumps van FEL-2 en van FLARE. De dump van FELICE licht op ongeveer 80 cm boven dit niveau. Zie ook Appendix D, Afbeeldingen D.1 t/m D.3.

niveau FLARE-kantoren) het vlak op 375 cm van de vloer van de FEL-bunker, ongeveer 120 cm boven de vloer van de bestaande kantoren van FLARE. Dit niveau is relevant voor het daar werkende personeel en tevens het onderste niveau van het trappenhuis dat de verbinding vormt tussen de bestaande FLARE kantoren en de kantoren en user-stations van het nieuw te bouwen FELIX-FELICE laboratorium. Zie ook Appendix D, Afbeeldingen D.4 t/m D.7

niveau FELICEvloer) het vlak op 620 cm boven de vloer van de FEL-bunker, relevant voor personeel dat op de centrale werkvloer van het FELICE-laboratorium werkzaam is. Deze centrale werkvloer is de bovenkant van het zwaarbetonnen dak van de FEL-bunker. Zie ook Appendix D, Afbeelding D.8.

niveau maaiveld) het vlak op 720 cm oven de vloer van de FEL-bunker, relevant voor personeel dat werkzaam is in de user-stations en kantoren van het nieuw te bouwen FELICE-FELIX laboratorium. Tevens is dit niveau relevant voor overige bevolking dat zich buiten op het terrein rond de FEL-laboratoria begeeft. Zie ook Appendix D, Afbeelding D.9.

terreingrens) er is een afschatting gemaakt voor de jaardosis die kan worden opgelopen aan de terreingrens. Hierbij is een jaar aangenomen van 4000 bedrijfsuren en zijn de dosiswaarden berekend voor het niveau maaiveld geëxtrapoleerd naar de terreingrens. Zie ook Appendix E, Afbeelding E.1.

afschermingsverzwaring bij het trappenhuis) Als gevolg van de berekende jaardosesvelden in de Afbeeldingen D.1 t/m D.9 is besloten de afscherming bij het trappenhuis zwaarder te dimensioneren om met zekerheid de wettelijk gestelde jaardosislimiet nergens te overschrijden. De aanpassingen zijn zodanig genomen dat een extra factor 10 – 50 aan stralingsafscherming zal ontstaan in vergelijk met de in Afbeeldingen D.1 t/m D.9 voorgestelde velden. Natuurlijk geldt dit

alleen in de richting van de aangepaste afscherming. Zie ook Appendix F, Afbeelding F.1.

activering van bestanddelen in de lucht: uit de berekende produktietermen zijn met bekende vervalconstanten en bekend ventilatievoudverloop de activiteitsdichtheden in de FEL-bunker voor een wekelijkse cyclus van bedrijf van de bestudeerde FEL-combinatie berekend voor ^{41}Ar en ^{14}C . Uit deze gegevens is afgeleid wat de gevolgen van deze produktie zijn voor een werknemer die de FEL-bunker betreedt en voor de bevolking aan de terreingrens. Zie ook Appendix G, Afbeeldingen G.1 t/m G.3.

4.1 Dosistempovelden

De jaardosis $H(\mathbf{r})$ in millisievert op locatie $\mathbf{r}$ volgt uit gewogen sommatie van de zes berekende dosisvelden $h_i(\mathbf{r})$, uitgedrukt in picosievert per primair elektron, voor elke bron i , via de formule:

$$H(\mathbf{r}) = \sum_i h_i(\mathbf{r}) \times I_i \times B(\mathbf{r}) \times 4.5 \times 10^{10}. \quad (1)$$

De stroom I_i wordt per bron berekend en uitgedrukt in de eenheid microampère als het eerder genoemde percentage van de nominale bundelstroom voor de FEL in kwestie. Tot slot wordt gecorrigeerd voor de bezettingsgraad ter plekke van $\mathbf{r}$ weergegeven met $B(\mathbf{r})$.

4.1.1 niveau FEL-bunker

In Afbeelding D.1 zijn vier panelen weergegeven met daarin: linksonder: het dosistempoveld op het niveau van 120 cm boven de vloer van de FEL-bunker. Aangegeven zijn de posities van de zes actieve bronnen, te weten: de eerste bochten van FEL-2, FELICE en FLARE met de bundelrichting aangegeven met een pijltje, en: de drie dumps behorende bij deze FELs. De onderkant van de figuur is ruwweg het noorden, de linkerkant van de figuur is ruwweg het oosten. Rechts van de figuur is hetzelfde dosisveld weergegeven zij het met een vereenvoudigde kleurschaal. Uit de rechterfiguur is direct af te lezen in rood waar de berekende doses boven de 1 mSv per jaar (van tweeduizend uur) uitkomen en waar deze duidelijk onder de 1 mSv uitkomen (groen, < 0.9 mSv/jaar). De grens is aangeduid met geel: dit zijn de cellen waar de dosis is berekend in het bereik van 0.9 – 1.0 mSv op jaarbasis. Rechtsboven is aangegeven welke bezettingsgraad voor welk bereik is aangenomen bij de berekeningen. Er wordt van een bezettingsgraad van $B = 1$ uitgegaan behalve in de algemene techniekruimte en in de FEL-techniekruimte waar een graad van $B = 0.1$ wordt aangenomen. In de gang die leidt tot de toegangsdeur van de FEL-techniekruimte en tot de toegangsdeur van het labirynth wordt een bezettingsgraad aangehouden van $B = 0.25$.

De keuze voor deze bezettingsgraden volgt uit de overweging dat de bedoelde toegangsgang in principe alleen voor toegang tot de FEL-techniekruimte en tot het labirynth wordt gebruikt. Het labirynth is afgesloten tijdens bedrijf van de FEL terwijl de FEL-techniekruimte bij interne

toestemming slechts tweehonderd uur per jaar betreden mag worden. Desondanks kan het voorkomen dat personeel zich in de gang begeeft aangezien de gang verder niet is afgesloten van de FEL-gebruikersruimtes. De bezettingsgraad voor de algemene techniekruimte is ingegeven door het feit dat deze ruimte vrijwel niet betreden wordt. Hier bevindt zich naast het luchtventilatiesysteem de infrarood-bundeltransportlijn van FLARE, die sporadisch moet worden uitgelijnd. Deze ruimte is afgesloten en normaal niet toegankelijk.

In de grafiek linksboven is weergegeven de jaardosis zoals berekend langs de magenta stippellijn die is aangegeven in de dosistempovelden links- en rechtsonder. In Afbeelding D.1 is dit in de algemene techniekruimte langs de wand met de FEL-bunker, in Afbeelding D.2 is dit in de FEL-techniekruimte langs de wand met het labyrinth en in Afbeelding D.3 is dit in de gang naar het labyrinth ter hoogte van het labyrinth.

In het algemeen volgt bij inspectie van de individuele bronnen dat de dumps vrijwel niet bijdragen aan het stralingsveld buiten de gecontroleerde zone op plaatsen die voor personeel en bevolking toegankelijk zijn. De bijdrages aan het dosisveld van de eerste bochten van deze drie lasersystemen zijn twee tot drie ordes groter. Het blijkt dat de dumps voor hun functie goed ontworpen zijn. De eerste bochten zijn alle omgeven door een 10 cm dikke cilindrische loodmantel van 40 cm lengte zodat effectief slechts sprake is van voorwaartse verstrooiing en van achterwaartse verstrooiing. De laterale verstrooiing wordt sterk afgezwakt door de loodmantel. Het effect van deze eerste bochten is merkbaar buiten de gecontroleerde zone. Om die reden is het van belang om goede afscherming rond deze punten te waarborgen en tevens de elektronenbundel uitlijning goed te bewaken bijvoorbeeld door ongecontroleerde verliezen van de elektronenbundel bij voortdurend proberen te detecteren en terug te koppelen naar een beveiligingssysteem dat de FEL op gereduceerd vermogen laat draaien of uitschakelt wanneer bundelverliezen hoger zijn dan een vooraf in te stellen drempelwaarde.

De algemene techniekruimte D.1:

In de algemene techniekruimte is af te lezen dat de jaardosis vrijwel langs de gehele wand beneden de drempelwaarde van $0.1 \mu\text{Sv}$ ligt. Slechts op twee locaties tussen $Y = -150 \text{ cm}$ en $Y = -50 \text{ cm}$ en tussen de $Y = 150 \text{ cm}$ en $Y = 250 \text{ cm}$ zijn de jaardoses hoger dan deze waarde berekend. Op deze locaties bevinden zich openingen in respectievelijk de wand (op circa twee meter hoogte) en onder de vloer naar de FEL-bunker om kabels, leidingen en de infrarode FEL-laserbundel door te leiden. Vooral aan het einde, aan de noordzijde, van de bunker is het dosisniveau hoog, lokaal zelfs hoger dan 1 mSv op jaarbasis. Te zien in de afbeelding is dat de straling snel divergeert waardoor de lokale dosis evenredig afneemt. De stralingslekken vormen bij benadering puntbronnen op respectievelijk 2 m hoogte en op het vloerniveau. Voor een persoon

die zich in de algemene techniekruimte beweegt wordt verwacht dat deze slechts een fractie van zijn aanwezigheid in het achterste deel van de techniekruimte bevindt waar het stralingsniveau aanzienlijk is. De gemiddeld op te lopen dosis in deze ruimte zal dan ook onder de 1 mSv op jaarbasis blijven. Wel zijn extra maatregelen voorzien om onnodige blootstelling in het achterste deel van deze ruimte te voorkomen in de vorm van een lichte afzetting met waarschuwing ter hoogte van ongeveer $Y = 500$ cm, zodat personeel zich niet ondoordacht en onnodig door het stralingsveld beweegt. Bij interne toestemming wordt het verrichten van werkzaamheden tijdens bedrijf van de FELs in deze ruimte gelimiteerd tot het hoogstnoodzakelijke en wordt tevens het dragen TLD's en elektronische persoonsdosimeters verplicht gesteld. Verder zal in het kader van ALARA worden gestreefd naar een situatie waar alleen in de algemene techniekruimte wordt gewerkt wanneer de FELs buiten bedrijf zijn. De aangenomen bezettingsgraad van 10% wordt in het kader van deze analyse en het verwachte patroon van werkzaamheden in deze ruimte als ruime bovengrens ingeschat. De algemene techniekruimte heeft een oppervlakte ter grootte van: $2.06 \times 10^2 \text{ m}^2$. Het gemiddelde omgevingsdosisequivalent over de oppervlakte in deze ruimte bedraagt op jaarbasis $H^*(10) = 33.5 \text{ } \mu\text{Sv}$ bij een bezettingsgraad van 10% (200 uur op jaarbasis).

De FEL-techniekruimte D.2:

In de FEL-techniekruimte wordt in vrijwel de gehele ruimte de dosislimiet van 1 mSv op jaarbasis niet overschreden. In het dosisveld linksonder (en tevens rechtsonder in het vereenvoudigd plaatje) zijn een aantal sporen waar te nemen van individuele stralingsdeeltjes die duiden op mogelijke lokale overschrijding van de dosislimiet. Bij nadere inspectie zijn deze sporen veroorzaakt door secundaire deeltjes als gevolg van achterwaartse verstrooiing bij eerste bochten van FLARE en FEL-2. Geen van de drie dumps gebruikt bij de samenstelling van dit dosistempoveld draagt bij aan straling in de FEL-techniekruimte.

De jaardosis wordt echter slechts dán overschreden wanneer personen zich gedurende de volle tweeduizend uur bedrijfstijd op deze specifieke positie bevinden. Gezien de smalle spoorbreedte duidt dit op een onwaarschijnlijk bewegingspatroon binnen de FEL-techniekruimte waar alleen wordt gewerkt wanneer strikt noodzakelijk en daarbij de aard en locatie van de werkzaamheden sterk variëren. Hierdoor draagt slechts een geringe fractie van het berekende lokale dosismaximum bij aan de op te lopen jaardosis. Anders gezegd: de berekende sporen zouden uitgesmeerd moeten worden over de gehele oppervlakte van de de FEL-techniekruimte om zo een realistisch op te lopen dosis als gevolg van het werk- en bewegingspatroon te simuleren. Zodoende zal het gemiddelde stralingsniveau in deze ruimte ruim beneden de dosislimiet van 1 mSv op jaarbasis blijven, dit gezien de oppervlakte van de FEL-techniekruimte en de constatering dat op een groot deel van dit oppervlak het stralingsniveau onder de rekendrempel van $0.1 \text{ } \mu\text{Sv}$

per jaar blijft. Uit een stralingsmeetprogramma na ingebruikname van FEL-2 en FELICE zal moeten blijken of eventueel nog extra loodafscherming in de FEL-bunker moet worden geplaatst om de dosislimiet te waarborgen. De FEL-techniekrimte heeft een oppervlakte van: $1.42 \times 10^2 \text{ m}^2$. Het gemiddelde omgevingsdosisequivalent over de oppervlakte in deze ruimte bedraagt op jaarbasis $H^*(10) = 0.27 \text{ mSv}$ bij een bezettingsgraad van 10% (200 uur op jaarbasis). Gezien de wat hogere waarde verdient het aanbeveling om extra afscherming te plaatsen om de terugverstrooiing van de FLARE eerste bocht te reduceren.

De toegangsdeur van de gang naar het labirynth D.3:

Door het ontbreken van de dubbele betonafscherming ter hoogte van de toegangsdeur wordt duidelijk een hogere jaardosis berekend buiten de gecontroleerde zone dan bijvoorbeeld in de FEL-techniekrimte. De betonwand tussen FEL-bunker en labirynth tesamen met de betonwand tussen labirynth en FEL-techniekrimte schermen de FEL-techniekrimte af. De laatste betonwand ontbreekt ter hoogte van de toegangsdeur. Om deze reden is ter hoogte van de toegangsdeur een zwaar-betonnen wand in plaats van een normaal betonnen wand als afscherming tussen bunker en gang aangebracht. De zwaarbetonnen wand heeft een dichtheid van $\rho = 3600 \text{ kg}$ per kuub in de berekeningen waar voor normaal beton een dichtheid van $\rho = 2350 \text{ kg}$ per kuub is aangenomen.

Hoewel de jaardosis gemiddeld over de breedte van de gang van twee meter nog wel onder de limiet van 1 mSv blijft is de verhoging een punt van zorg. De bijdrage aan de jaardosis op dit punt is voornamelijk afkomstig van de eerste bocht van FELICE. Dit is de FEL-component die in principe altijd in bedrijf is, hetzij in combinatie met FEL-1 danwel in combinatie met FEL-2. Het stralingsniveau is echter wél zodanig dat het redelijk eenvoudig onder controle gekregen kan worden.

Op deze locatie is een bezettingsgraad van 25% aangehouden omdat de gang in directe verbinding met de rest van het gebouw staat en altijd betreden kan worden, óók wanneer personeel zich niet specifiek naar de FEL-techniekrimte, met een bezettingsgraad van 10%, beweegt. Door een extra deur met toegangscontrole éérder in de gang aan te brengen kan bijvoorbeeld de aangenomen bezettingsgraad teruggebracht worden van 25% naar gegarandeerd 10% of lager. Maatregelen ter reductie van het stralingsniveau zijn op deze locatie dan ook redelijk eenvoudig aan te brengen. Te denken valt aan een extra loodafscherming op de toegangsdeur naar het labirynth van bijvoorbeeld twee millimeter aan de binnenzijde en twee millimeter aan de buitenzijde, over de volle breedte van de deur en gang en tot een hoogte van $2\frac{1}{2} \text{ m}$, zodat personeel dat zich in de gang begeeft extra afgeschermd wordt. Deze vier millimeter loodafscherming zou al een lichte verlaging van de dosis teweeg moeten brengen, in ieder geval zodanig dat de over de gangbreedte gemiddelde dosis onder de 1 mSv jaarlijks blijft. Andere

mogelijkheden zijn een loodschermbank in de FEL-bunker tussen de eerste bocht en de toegangsdeur, of een verdikking middels zwaarbetonnen stenen van 10 – 20 cm van het zwaarbetonnen gedeelte van de scheidingsmuur tussen FEL-bunker en labirynth. Een meetcampagne zal moeten uitwijzen of daarnaast nog extra afscherming nodig is in de vorm van een loodschermbank in de FEL-bunker tussen de eerste bocht van FELICE en de toegangsdeur naar het labirynth. Ook zo'n loodschermbank kan vrij eenvoudig worden aangebracht. Een scherm van 5 cm dikte zou de straling makkelijk met een factor 5 – 10 reduceren. De gang naar de toegangsdeur van het labirynth heeft een oppervlakte ter grootte van: 16.6 m². Over deze oppervlakte bedraagt het gemiddelde omgevingsdosis-equivalent in deze ruimte op jaarbasis $H^*(10) = 1.3$ mSv bij een bezettingsgraad van 25% (500 uur op jaarbasis). Gezien deze waarde, die boven de de jaardosislimiet van 1 mSv uitkomt, en de eenvoud waarmee extra afscherming kan worden aangebracht wordt er een dringende aanbeveling gedaan op deze plaats de jaardosis te reduceren.

4.1.2 niveau FLARE-kantoren

In de Afbeeldingen D.4 t/m D.7 volgen wederom jaardoses op plaatsen grenzend aan de gecontroleerde zone. Op dit niveau zijn dit de FEL-bunker en het labirynth en gemeten op een hoogte van 375 cm boven de vloer van de FEL-bunker. Dit is ongeveer 120 cm boven de vloer van de bestaande FLARE kantoren, waar in principe niet-geclassificeerde medewerkers hun dagelijks werk verrichten. De aangrenzende ruimtes zijn de algemene techniekruimte, de corridor met luchtverversings-kanalen boven het labirynth, de gang naar de toegangsdeur tot het labirynth, het trappenhuis van de FLARE-kantoren naar de gebruikersruimtes en kantoren boven het maaiveld en boven de FEL-bunker, het voorportaal van dit trappenhuis, en de FLARE-kantoren zelf. Van deze ruimtes zijn de algemene techniekruimte en de gang naar de toegangsdeur van het labirynth buiten beschouwing gelaten omdat de vloer in deze ruimtes op gelijke hoogte ligt met de vloer in de FEL-bunker en dus het stralingsniveau hoog boven het hoofd, op 375 cm, is berekend. Dit is een niveau waar zich in deze ruimtes vrijwel nooit personen begeven. De aangenomen bezettingsgraden bij de berekende jaardoses zijn: 5% voor de corridor boven het labirynth, 10% voor de algemene techniekruimte (en FEL-techniekruimte), 10% voor het trappenhuis, 25% voor het voorportaal naar het trappenhuis en 100% elders. Bij deze bezettingsgraden is op de vereenvoudigde afbeelding van het dosisveld, weergegeven in groen, geel en rood rechtsonder in de figuren D.4 t/m D.7, af te lezen dat op een enkele hotspot na, de berekende jaardosis onder de 1 mSv limiet blijft.

De corridor met luchtverversingskanalen D.4:

In eerste instantie zou de ruimte boven het labirynth tot ongeveer maaiveldniveau met aarde opgevuld blijven. Aangezien dit onhandig lijkt met het oog op 1) onderhoud aan de kanalen van het

luchtverversingssysteem die daar liggen, en 2) de mogelijkheid in de toekomst nog overige leidingen aan te brengen, is onderzocht of een deel van de ruimte toch niet open gehouden kan worden. In de berekeningen is daarom slechts de helft aan de zijde van de FEL-bunker opgevuld met aarde (zoals bijvoorbeeld goed te zien in Afbeelding A.1, bovenste twee van de drie dwarsdoorsneden). De aarde wordt afgegrensd door een wand van twintig centimeter beton zodat uiteindelijk een looppad van ruim één meter breed open blijft waar eventueel gewerkt kan worden, mocht de noodzaak zich voordoen. In de berekeningen is aarde met een dichtheid van ongeveer 1600 kg per kuub aangenomen en verder met dezelfde samenstelling als beton: voornamelijk silicium en zuurstof, de hoofdbestanddelen van zand en grint. Het eventueel geheel opvullen van deze ruimte zal daarmee een betere afscherming opleveren maar de eenvoudige toegang naar de luchtverversingskanalen beperken. Bij volledige opvulling is verder de dosisberekening voor deze corridor irrelevant omdat die daarmee niet langer toegankelijk is terwijl in dit geval met name de FEL-techniekrimte en de kantoren boven deze ruimte extra afgeschermd zullen zijn tegen straling in vergelijking met de situatie met open corridor zoals gebruikt in de berekening. De corridor is verder niet vrij toegankelijk en zal in principe afgesloten blijven. De 5% bezetting is naar verwachting een zéér ruime overschatting van de gemiddelde tijd dat zich personeel in dit gedeelte bevindt tijdens de bedrijfsuren het FEL-systeem. Het stralingsniveau blijft over de volle lengte van de corridor ruim beneden de dosislimiet van 1 mSv per jaar, zoals weergegeven in de grafiek linksboven in Afbeelding D.4. De vrije corridor boven het labirynth heeft een oppervlakte ter grootte van: 26.4 m². Het gemiddelde omgevingsdosisequivalent over de oppervlakte in deze ruimte bedraagt op jaarbasis $H^*(10) = 7.6 \mu\text{Sv}$ bij een bezettingsgraad van 5% (100 uur op jaarbasis).

FLARE-kantoren: vergaderruimte en FLARE-bedieningsruimte D.5:

Het stralingsniveau in deze ruimtes is aan de hand van de jaardosisvelden onderaan Afbeelding D.5 en aan de hand van de grafiek linksboven in deze Afbeelding en op grond van een 100% bezettingsgraad als afdoende zwak in te schatten. Hoewel er straling 'lekt' via de vloer van het trappenhuis en via de hoek van de FEL-bunker blijft het niveau ruim beneden de dosislimiet van 1 mSv op jaarbasis.

Op deze stralings'lekken' en de daarbij voorgenomen wijzigingen in de constructie van het trappenhuis wordt in de volgende paragraaf en in paragraaf 4.3 uitgebreider ingegaan. In het kort wordt de betonnen/zwaarbetonnen afscherming in drie dimensies vergroot in vergelijking met de situatie zoals gebruikt bij deze berekeningen, zoals weergegeven in Afbeelding F.1. De betonnen afscherming wordt: dikker (naar het trappenhuis toe) om de afscherming in het algemeen te verbeteren, langer (richting kantoren) om de 'lekkende' hoek beter af te schermen en hoger (dieper in de grond) om 'lekkende' straling via de vloer van het trappenhuis meer af te schermen. De FLARE kantoorruimtes hebben een gezamenlijke oppervlakte ter grootte van: $1.80 \times 10^2 \text{ m}^2$.

Het gemiddelde omgevingsdosisequivalent, in de situatie zonder voorgenomen verzwaring van de scheidingsmuur met de FEL-bunker, over de oppervlakte in deze ruimtes bedraagt op jaarbasis $H^*(10) = 56.8 \mu\text{Sv}$ bij een bezettingsgraad van 100% (2000 uur op jaarbasis).

Trappenhuis en deel voorportaal D.6:

Als gevolg van de constructie van een trappenhuis direct achter de wand van de FEL-bunker waar de voorwaartse verstrooiing vanuit de eerste bocht van FELICE op de wand van deze bunker valt zijn extra maatregelen genomen om het stralingsniveau in dit trappenhuis, dat verder geen geclassificeerde ruimte is, te reduceren. In de voorliggende resultaten is een gelaagde beton-zwaarbeton-beton wand aangebracht tegen de al bestaande betondwand van 40 cm en lokaal 70 cm dikte. Deze extra betonwand is opgebouwd uit een 40 cm dik betonnen omhulsel gevuld met zwaarbeton, aan de uiteinden 70 cm dik en in het middendeel 40 cm dik. Zie hiertoe Afbeeldingen A.2 en in meer detail F.1 (paneel linksboven onder kopje “oud”). Desalniettemin is er een waaier van straling waarneembaar komend van onder de vloer van het trappenhuis en vanuit de hoek van de FEL-bunker. Hoewel de jaardosis vrijwel overal onder de 1 mSv op jaarbasis blijft is toch besloten de afscherming te verzwaren. Deze maatregelen worden verderop in paragraaf 4.3 besproken.

In de grafiek, linksboven Afbeelding D.6, is te zien dat in het algemeen de jaardosis in het trappenhuis en het voorportaal onder de 1 mSv per jaar blijft. Het trappenhuis heeft hier een bezettingsgraad van 10% terwijl het voorportaal een bezettingsgraad van 25% is toegewezen. Gezien het aantal personeelsleden van om en nabij de twintig dat zich regelmatig van de FLARE kantoren via het trappenhuis naar de FELIX-nieuwbouw en terug zal bewegen en het te overbruggen hoogteverschil en daarmee de tijdsduur van het trappenlopen, komt 10 % neer op ongeveer zes minuten per uur een medewerker in het trappenhuis. Als het hoogteverschil van ongeveer drie meter wordt overbrugd in tien seconden dan zijn er zesendertig bewegingen op de trap per uur, oftewel er loopt gemiddeld iets vaker dan iedere twee minuten een personeelslid de trap op of af. Dit lijkt een overschatting te zijn van het werkelijke aantal bewegingen over de trap, uitgaande van de genoemde twintig personen die daarnaast nog hun gewone dagelijkse werk uit te voeren hebben. Voor het voorportaal is een ruimere bezettingsgraad aangenomen: het kan hier gemakkelijk gebeuren dat men bijvoorbeeld even stil staat om nog wat te praten of af te spreken voordat men de trap oploopt. Dit gebeurt dan eerder in het voorportaal dan op de trap zelf. Zoals gemeld: door de betonnen afscherming te verzwaren worden de hotspots vermeden en het algemeen stralingsniveau teruggebracht zodat op deze plek elke discussie vermeden kan worden rondom de op te lopen dosis in verband met de wettelijke dosislimiet. Door de ligging van het trappenhuis direct achter de wand van de FEL-bunker zal een intensief en langdurig meetprogramma worden ingesteld waarmee de op te lopen doses tevens in de praktijk zullen worden bepaald. Het trappenhuis met voorportaal tot de kantoorruimtes hebben een gezamenlijke

oppervlakte ter grootte van: 31.7 m². Het gemiddelde omgevingsdosisequivalent, in de situatie zonder voorgenomen verzwaring van de scheidingsmuur met de FEL-bunker, over de oppervlakte in deze ruimtes bedraagt op jaarbasis $H^*(10) = 56.8 \mu\text{Sv}$ bij bezettingsgraden van 10% (trappenhuis; 200 uur op jaarbasis) en 25% (voorportaal; 500 uur op jaarbasis).

Overgang voorportaal naar FLARE-kantoorruimtes D.7:

Op dit deel geldt vrijwel dezelfde discussie als voorgaand zij het dat het voorportaal een bezettingsgraad kent van 25% in plaats van de 10% die is toegewezen aan het trappenhuis zelf en dat de kantoorruimtes een bezettingsgraad van 100% toegewezen hebben gekregen. In de grafiek linksboven van Afbeelding D.7 is te zien dat op de hotspot de jaardosis tot bijna anderhalf maal de toegestane limiet van 1 mSv reikt. Dit betreft dan wel slechts een geringe oppervlakte (in deze berekeningen) van slechts één vierkante meter waar deze dosis optreedt. Door de voorgenomen verzwaring van de betonafscherming zoals beschreven in paragraaf 4.3 zal het stralingsniveau zodanig omlaag bijgesteld worden dat ook in het FLARE kantoren bereik geen discussie over het stralingsniveau kan ontstaan voor wat betreft de wettelijke dosislimiet van 1 mSv op jaarbasis. Uiteraard zal ook in dit gedeelte van het gebouw een langdurig en intensief meetprogramma worden opgestart om de jaardoses in de praktijk te bepalen.

4.1.3 niveau FELICE-laboratorium

In Afbeelding D.8 is de situatie voor het FELICE-laboratorium weergegeven. Het FELICE-laboratorium bevindt zich vrijwel geheel boven het zwaarbetonnen gedeelte van het dak van de FEL-bunker, zie bijvoorbeeld Afbeelding A.3. Het jaardosisveld is berekend op een hoogte van 620 cm boven de vloer van de FEL-bunker, dat is ongeveer 120 cm boven de vloer van het FELICE-laboratorium. Deze vloer is essentieel de bovenkant van het zwaarbetonnen dak van de FEL-bunker. Er is een bezettingsgraad van 100% op deze hoogte aangenomen behalve voor het trappenhuis (10%) en het voorportaal trappenhuis (25%). Deze laatste twee waarden zijn bediscussieerd in paragraaf 4.1.2.

Hoewel ook op dit niveau een waaier van straling is waar te nemen ter hoogte van de FLARE kantoren, is op deze hoogte het dak van deze kantoren ingericht. Hier bevindt zich dan ook géén personeel en daarmee is de berekende stralingspluim weinig relevant binnen de context van deze paragraaf.

Voor het voorportaal en het trappenhuis is op te merken dat de stralingsniveau's lager zijn dan in Afbeeldingen D.4 t/m D.7. Met de voorgenomen extra afschermingsmaatregelen, beschreven in paragraaf 4.3, is bij het trappenhuis en voorportaal geen probleem met de jaardosislimiet te verwachten. In de grafiek linksboven in Afbeelding D.8 zijn voor drie lijnen over het FELICE-

laboratorium de jaardoses bepaald. Hoewel het jaardosisveld (links- en rechtsonder) laat zien dat er hotspots kunnen optreden zijn er grote delen waar het stralingsniveau niet boven de rekendrempel van $0.1 \mu\text{Sv}$ per jaar uitkomt. De versnipperde plaatsen waar de dosis boven de rekendrempel uitkomt zijn slechts één tot maximaal enkele rekencellen in de FLUKA-berekening groot en worden door incidenteel door het zwaarbetonnen dak van de FEL-bunker dringende individuele stralingsdeeltjes veroorzaakt. Het zwaartepunt van de versnipperde cellen met doses hoger dan de rekendrempel ligt in het geval van deze berekeningen, niet onverwacht, boven de eerste bochten van FEL-2, FELICE en in mindere mate boven de eerste bocht van FLARE. Bij het inrichten van het FELICE-laboratorium zal daarmee rekening gehouden worden zodat tijdens het werk in mindere mate in het gedeelte van het laboratorium gewerkt hoeft te worden waar de jaardosis ietsje hoger kan uitvallen.

Op ongeveer dezelfde hoogte boven de FEL-bunkervloer als de vloer van het FELICE-laboratorium liggen de nieuw te bouwen gebruikersruimtes/-laboratoria van de FEL-1 en FEL-2 lasersystemen en de kantoren van de FELIX-FELICE staf en tijdelijke gebruikers. Deze worden ongeveer 40 cm hoger gebouwd dan de vloer van het FELICE-laboratorium zoals die zoeven beschreven is. Dit hoogteverschil van 40 cm zal bewerkstelligd worden door een laag van 40 cm beton, die daarmee een extra afscherming van een factor 5 – 10 oplevert voor het personeel in de gebruikersruimtes en in de kantoren. Deze extra 40 cm beton is in de berekeningen nog niet meegenomen. Die leveren daarmee dan ook een overschatting op van de werkelijk te verwachten op te lopen jaardosis.

Gemiddeld over de gehele vloeroppervlakte van het FELICE-laboratorium en de omliggende kantoren en gebruikersruimtes op een 40 cm hoger en extra afgeschermd niveau, blijft de te verwachten op te lopen jaardosis slechts een fractie van de wettelijke jaardosislimiet van 1 mSv . Ook op dit niveau zullen na het installeren van de FEL-systemen intensief en regelmatig stralingsdoses gemeten worden. Het gemiddelde omgevingsdosisequivalent over de oppervlakte van $2.4 \times 10^2 \text{ m}^2$ van deze ruimte bedraagt op jaarbasis $H^*(10) = 18.3 \mu\text{Sv}$ bij een bezettingsgraad van 100% (2000 uur op jaarbasis). Tevens is het omgevingsdosisequivalent gemiddeld over de oppervlakte van de FLARE kantoren bepaald op dit niveau. De aan het dak van de FLARE kantoren ontwikkende pluim stralingveroorzaakt hier een dosis van $H^*(10) = 93.6 \mu\text{Sv}$ gerekend over een oppervlakte als aangegeven in de paragraaf “FLARE kantoren; D.5” en tevens bij een 100% bezettingsgraad. Tot slot is op dit niveau over het hele oppervlakte van $1.6 \times 10^3 \text{ m}^2$ het in FLUKA gemodelleerde gebouw het gemiddelde omgevingsdosisequivalent bepaald: $H^*(10) = 15.9 \mu\text{Sv}$. Dit omvat dan tevens de gebruikersruimtes en kantoorruimtes van de FELIX-FELICE-nieuwbouw. Ook hier is de bezettingsgraad 100% genomen.

4.1.3 niveau maaiveld

In Afbeelding D.9 is tenslotte de situatie voor het maaiveldniveau weergegeven. Hier betreft het niveau van de berekeningen een hoogte van 120 cm boven het maaiveld (ongeveer 720 cm boven de vloer van de FEL-bunker). Van de 'lekkende' straling rond het trappenhuis en boven de FLARE kantoren is nog een lichte pluim waarneembaar, die, zeker bij middeling over de sector van uitstraling, lokaal doses van ruim beneden de 1 mSv op jaarbasis oplevert. Deze pluim is diagonaal opwaarts gericht met een stijging van ongeveer één meter verticaal op vier meter horizontaal en maakt zich op die manier los van het maaiveld niveau. Deze opwaartse richting is het gevolg van de bron van straling, de eerste bocht van het FELICE FEL-systeem ongeveer 6 m lager dan het niveau van de in Afbeelding D.9 weergegeven waarden. Deze eerste bocht ligt horizontaal op een afstand van 20 – 25 meter van het zwaartepunt van de uit de grond tredende stralingsdeeltjes.

Daarnaast is nog lichte straling berekend boven de FEL-bunker ter hoogte van het FELICE-laboratorium. Deze straling bevindt zich op deze plek binnenshuis en is omhoog gericht. Het aantal hotspots is afgenomen in vergelijking met het niveau 120 cm boven de vloer van het FELICE-laboratorium. Dit laatste niveau is slechts ongeveer 1 m onder het in deze paragraaf beschouwde maaiveld niveau, waaruit geconcludeerd kan worden dat de dosis boven de vloer van het FELICE-laboratorium in verticale richting snel uitdooft.

Gezien de zeer grote oppervlakte waar geen dosis boven de rekendrempel van $0.1 \mu\text{Sv}$ uitkomt is het onwaarschijnlijk dat ergens de dosislimiet van 1 mSv op jaarbasis werkelijk gehaald wordt bij een realistisch bewegingspatroon van personeel. In bijvoorbeeld het vereenvoudigde dosisveld, weergegeven in groen-geel-rood, in het paneel rechtsonder bestrijkt iedere cel waar de dosis is berekend een oppervlakte van $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$: een persoon zou dan tweeduizend uur moeten blijven staan bij gedurende dezelfde tijdsduur ongewijzigde instellingen van het FEL-systeem om de bij deze cel behorende dosis op te lopen. Normaalgesproken zal door middeling over alle bezochte locaties de jaardosis per persoon ver onder de limiet van 1 mSv blijven en zijn geen problemen te verwachten met de wettelijke dosislimiet. Daar komt verder nog bij dat de afscherming van de FEL-bunker rond de eerder geconstateerde 'lekken' wordt verzwaaard, zoals in paragraaf 4.3 wordt beschreven, en daarmee de te verwachten jaardosis nog slechts een fractie zal bedragen van de doses die de hier gepresenteerde resultaten suggereren. Het gemiddelde omgevingsdosisequivalent over de oppervlakte ter hoogte van het maaiveld bedraagt op jaarbasis $H^*(10) = 11.4 \mu\text{Sv}$ bij een bezettingsgraad van 100% (2000 uur op jaarbasis). Tevens is het omgevingsdosisequivalent gemiddeld over de oppervlakte van de FLARE kantoren bepaald op dit niveau. De aan het dak van de FLARE kantoren ontwijkende pluim stralingveroorzaakt hier een dosis van $H^*(10) = 66.9 \mu\text{Sv}$ bij een aangenomen bezettingsgraad van 100%. Het oppervlakte waarover gemiddeld is is gelijk aan het oppervlakte genomen in de paragraaf "FLARE kantoren;

D.5”.

4.2 Extrapolatie naar de terreingrens

De terreingrens ligt te ver weg van het FEL-gebouw om met behulp van FLUKA serieuze directe dosisberekeningen te kunnen uitvoeren: om voldoende statistiek te krijgen moeten zodanig veel primaire deeltjes worden afgeschoten dat de berekeningen onaanvaardbaar lang zouden duren. Bijvoorbeeld: het dichtste punt op de terreingrens ligt op circa honderd meter van het FEL-gebouw. Aan het maaiveld van dit gebouw worden, volgens Afbeelding D.9, lokaal fracties van 1 mSv op jaarbasis berekend. Dit is ongeveer 20 – 25 m van de bron, de eerste bocht van FELICE, verwijderd. Uitgaande van onbelemmerde uitbreiding met een afval evenredig aan de inverse kwadratische afstand, dus een puntbronbenadering, zou de dosis ongeveer vier tot zes procent bedragen van het niveau berekend in Afbeelding D.9 op deze honderd meter afstand en in dezelfde richting als de uittredende stralingspluim. Dit betekent dat ongeveer vijfentwintig maal zoveel primaire elektronen zouden moeten worden afgeschoten om eenzelfde, versnipperd, resultaat te krijgen op honderd meter afstand van de puntbron als te zien is in Afbeelding D.9 op 20 – 25 m afstand van deze bron hetgeen een evenredige verlenging van CPU-tijd betekent.

Gezien het feit dat in Afbeelding D.9 slechts in één richting een stralingslek naar het maaiveld optreedt, en in ogenschouw genomen dat als gevolg daarvan is voorgenomen de afscherming te verzwaren zoals beschreven in paragraaf 4.3 zodat een factor tien tot vijftig meer afscherming bereikt wordt, wordt een simpel model gehanteerd om de dosis aan de terreingrens af te schatten. In dit model wordt de bron van straling beschouwd als een puntbron, wat gezien de afstand van het gebouw tot de terreingrens in de richting van het lek van ongeveer tweehonderd meter, een aanvaardbare aanname lijkt. Deze puntbron van straling is gekozen op 120 cm boven het maaiveld zodanig dat op het dichtsbijzijnde punt op de terreingrens een jaardosis van tien microsievert ontstaat, zoals is weergegeven in Afbeelding E.1. De bronconstante van de bron op de oorsprong zou in dat geval 400 mSv m² bedragen, oftewel: de grens van 1 mSv op jaarbasis zou dan op 20 m van deze bron liggen.

Om een afschatting te maken van de jaardosis aan het dichtstbijzijnde punt aan de terreingrens binnen de relevante sector is gekeken naar de gemiddelde dosis over het oppervlakte van de FLARE-kantoren en aan het maaiveld. Deze gemiddelde dosis wordt berekend via:

$$\langle H^*(10) \rangle_{FlareOffices} = \frac{\int H^*(10)(\mathbf{r}) d\mathbf{r}}{\int d\mathbf{r}}, \quad (2)$$

waar de beide integralen worden gevalueerd over het oppervlakte van de FLARE-kantoren aan het maaiveld zoals is weergegeven in Afbeelding E.1.

Uitgaande van de FLUKA-berekeningen is over het oppervlakte van de FLARE kantoren

gemiddeld, dus daar waar de stralingspluim ontwijkt, een jaardosis berekend van 66.9 μSv op basis van 2000 uur. Dit neemt op basis van 4000 uur een waarde aan van 0.134 mSv. Echter, bij aanname van de virtuele puntbron met een bronconstante van 400 mSv m^{-2} op het maaiveld loodrecht boven de eerste bocht van FELICE $(x,y) = (2418 \text{ cm}, 449 \text{ cm})$ volgt in de puntbronbenadering een gemiddelde dosis over hetzelfde oppervlak van de FLARE kantoren van:

$$\langle H^*(10) \rangle = \frac{400}{8.00 \times 22.50} \times \int_{27\text{m}}^{35\text{m}} \int_{12.5\text{m}}^{35\text{m}} \frac{dx dy}{(x-24.18)^2 + (y-4.49)^2} dx dy \text{ mSv} = 1.2 \text{ mSv}. \quad (3)$$

De integratiegrenzen lopen over de coördinaten van de FLARE kantoren zoals ingevoerd in het FLUKA-model en zoals weergegeven in Afbeelding E.1.

De berekende waarde van 1.2 mSv in de puntbronbenadering die aanleiding geeft tot een 10 μSv jaardosis aan de terreingrens is ongeveer negen maal hoger dan de met FLUKA berekende waarde aan het maaiveld en boven de FLARE kantoorruimtes en levert daarmee een overschatting van de waarde aan de terreingrens op. Op grond van de FLUKA rekenresultaten zal derhalve als gevolg van de lekkende stralingspluim de jaardosis aan de terreingrens naar rato

$$\text{lager uitvallen: } H^*(10)_{TG} = \frac{0.134 \text{ mSv}}{1.2 \text{ mSv}} \times 10 \mu\text{Sv} = 1.1 \mu\text{Sv} \text{ op jaarbasis.}$$

De werkelijke dosis zal op maaiveldniveau nog lager uitkomen omdat de lekkende straling tevens omhoog gericht is. De puntbron benadering gaat uit van een bron op maaiveldniveau. De werkelijke bron is ongeveer zes meter onder het maaiveldniveau te nemen. Er is dus een stijging van 25 – 30% aan te houden: op tweehonderd meter van de bron zal het geschatte niveau van 1.1 μSv op ongeveer 50 m hoogte worden bereikt in de puntbron aanname met de bron op zes meter onder het maaiveldniveau. Op het maaiveld is de afscherming in het horizontale vlak door gebouwen en de aarde dusdanig groter dan in de diagonale richting dat het in de verwachting ligt dat de dosis op 1.50 m boven het maaiveld op de terreingrens aanzienlijk lager dan de voor de diagonale richting afgeschatte 1.1 μSv uitkomt. Deze waarde kan dus als bovengrens voor de jaardosis op de terreingrens worden genomen. De conclusie is dat zonder de extra afschermdende maatregelen, besproken in de paragraaf 4.3, de dosis met zeer grote waarschijnlijkheid niet boven de 1.1 μSv op jaarbasis zal uitkomen binnen de aangegeven sector. Buiten de aangegeven sector is het stralingsniveau onder de rekendrempel van $2 \times 0.1 \mu\text{Sv}$ (de verdubbeling geldt ivm. 2000-urig werkjaar naar 4000-urig bedrijfsjaar) gebleven en zal dus een verwaarloosbare bijdrage op de terreingrens in de desbetreffende richtingen opleveren.

4.3 Wijziging bouwplannen ter reductie stralingslek: verzwaring beton en zwaarbeton gedeelte tussen FEL-bunker en trappenhuis

Zoals uit Afbeeldingen D.8 en D.9 blijkt is er een pluim van straling berekend richting zuid-west die

wordt veroorzaakt door voornamelijk de eerste bocht van FELICE. Ofschoon de jaardosis als gevolg van deze straling onder de 1 mSv blijft is besloten om extra afscherming te plaatsen in de vorm van beton en zwaarbeton om het stralingsniveau omlaag te schroeven. Dit mede om beter tegen onverwachte, incidentele, bundelverliezen te kunnen afschermen die kunnen optreden tijdens bijvoorbeeld het inregelen van de FELs. In Afbeelding F.1 is de bij de berekeningen aangehouden configuratie te zien als “oud” en de aangepaste situatie, die in werkelijkheid gebouwd gaat worden en die de voorgenomen extra afschermingsmaatregelen in zich draagt, te zien als “nieuw”. Zie in dit verband ook Afbeeldingen A1 t/m A3 voor een overzicht. Afbeelding F.1 laat zien dat in de X-richting de dikte van de afscherming met 20 cm gewoon beton en 20 cm zwaarbeton toeneemt, wat neerkomt op een factor tien extra afzwakking. In de Y-richting zal de afscherming worden uitgebreid van 360 cm naar 414.5 cm waar de extra lengte door zwaarbeton wordt ingevuld: in de afbeelding linksboven in Afbeelding F.1 is te zien dat het effect van deze verlenging in de Y-richting zal zijn het afdichten van het lek door de hoek van de FEL-bunker. In de middelste figuren en de onderste figuren van Afbeelding F.1 valt te zien dat ook naar onderen toe zo'n 40 cm extra zwaarbeton wordt toegevoegd. Deze 40 cm extra zwaarbeton zal het dosistempo tot enkele procenten van het berekende niveau terugdringen. Deze afchatting is te maken door de decimeringsdikte van normaal beton, die ongeveer 50 cm bedraagt, te vergelijken met die van zwaarbeton, die ongeveer $\frac{1}{2} - \frac{2}{3}$ daarvan bedraagt op grond van de hogere dichtheid van dit laatste bouw materiaal. Tevens wordt een drempel geplaatst van ongeveer één meter gewoon beton. Deze aanpassing dient om het stralingslek door de vloer van het trappenhuis met een factor van méér dan tien af te zwakken. De verwachting is dat deze aanpassingen zullen resulteren in een zodanige extra afzwakking dat met zekerheid gesteld kan worden dat de jaarlijks te ontvangen effectieve dosis minder dan enkele tientallen microsievert zullen bedragen.

4.3 Activering van bestanddelen in de lucht

Met FLUKA zijn per bron de bijdragen aan de activering van ^{41}Ar en ^{14}C in de lucht berekend. Ook hier blijkt dat de dumps in vergelijking tot de eerste bochten nauwelijks (minder dan een promille) bijdragen aan de hoeveelheid geactiveerde kernen. Voor de remstralingspunten zijn voor een versnelspanning van 15 MV (FLARE) en voor 45 MV (FEL-2 en FELICE) de productietermen

$$p_{Ar,15} = 4.19 \times 10^{-19}, \quad p_{C,15} = 3.83 \times 10^{-16}, \quad p_{Ar,45} = 1.88 \times 10^{-16} \quad \text{en} \quad p_{C,45} = 1.02 \times 10^{-13} \quad \text{geact}$$

iveerde kernen per kubieke centimeter en per primair elektron berekend. Dit levert met het volume van de FEL-bunker en labyrint van $V = 9.5 \times 10^8 \text{ cm}^3$ en de stroomsterktes $I_{15} = 7 \mu\text{A}$ en $I_{45} = 1.2 \mu\text{A}$ voor respectievelijk de verliezen bij de eerste bocht van FLARE en de eerste bochten van FEL-2 en FELICE met gebruikmaking van:

$$P_{\alpha,i} = p_{\alpha,i} \times I_i \times V \times 2.25 \times 10^{16}, \quad (4)$$

waar i over de gebruikte versnelspanningen loopt en α het beschouwde nuclide weergeeft, de

productietermen: $P_{Ar,15}=6.3\times 10^7$, $P_{C,15}=5.8\times 10^{10}$, $P_{Ar,45}=4.8\times 10^9$ en

$P_{C,45}=2.6\times 10^{12}$ geactiveerde kernen per uur. De totale productie (1 FEL bij 15 MeV en 2 FELs bij 45 MeV) is dan vervolgens: $P_{Ar}=9.7\times 10^9$ ^{41}Ar kernen per uur en $P_C=5.3\times 10^{12}$ ^{14}C kernen per uur. Deze productie wordt geacht instantaan en homogeen verdeeld over het volume te zijn. Dit levert uiteindelijk een overschatting voor de hoeveelheid uitgestoten activiteit op aangezien het in werkelijkheid enige tijd zal vergen om van het productiepunt naar de afzuigopening van de luchtventilatie te verplaatsen. Met name het geactiveerd argon zal in tussentijd deels vervallen.

4.3.1 Binnen de FEL-bunker: submersie van werknemers

Met de productietermen berekend volgens vergelijking (4) kan het aantal in de FEL-bunker aanwezige kernen als functie van de tijd worden bepaald door het oplossen van de differentiaalvergelijking:

$$\dot{N}(t) = -(\mu(t) + \lambda) \times N(t) + P(t), \quad (5)$$

met $\mu(t)$ de tijdsafhankelijke, in dit geval stuksgewijs constante, ventilatievoud, λ de vervalconstante (voor ^{41}Ar : $\lambda = 0.38 \text{ hr}^{-1}$; voor ^{14}C : $\lambda = 1.4 \times 10^{-6} \text{ hr}^{-1}$) van het betreffende nuclide en $N(t)$ de hoeveelheid geactiveerde kernen van het betreffende nuclide. De productieterm is voor ^{41}Ar en ^{14}C in de voorgaande paragraaf afgeleid en is tevens essentieel stuksgewijs constant en gelijk aan de berekende waarde wanneer het FEL-systeem draait vanaf tijdstip t_0 tot tijdstip $t_1 = t_0 + 16$ uur en is gelijk nul voor andere tijdstippen. De ventilatievoud is gelijk 1 hr^{-1} en wordt gedurende korte tijd na het uitschakelen van het FEL-systeem verdrievoudigd tussen $t_1 = t_0 + 16$ uur en $t_2 = t_0 + 16\frac{1}{3}$ uur.

Wanneer deze cyclus gedurende vijf achtereenvolgende dagen per week wordt aangehouden volgt onder de steady-state conditie (d.w.z.: $N(t) = N(t + 168 \text{ uur})$) de activiteitsdichtheid per nuclide in de FEL-bunker en labyrinth uit het product van de vervalconstante met het instantane aantal kernen per eenheid van volume. Deze activiteitsdichtheden zijn uitgezet als functie van de tijd voor een cyclus van één week in Afbeelding G.1, linker paneel, in rood voor ^{41}Ar en in groen voor ^{14}C . Hier moet vooropgesteld worden dat de nucliden homogeen over het volume verdeeld zijn.

Na het inschakelen van het FEL-systeem (FEL-2, FELICE en FLARE op respectievelijk 45, 45 en 15 MV, bij bundelstromen van respectievelijk 24, 24 en 70 μA) wordt na een paar uur het evenwicht bereikt waar de productie en het verval c.q. afvoer via de ventilatie elkaar compenseren. De evenwichtsniveaus liggen op respectievelijk ongeveer 1 MBq en 10 Bq voor ^{41}Ar en ^{14}C , wat neerkomt op activiteitsdichtheden van respectievelijk 1 kBq m^{-3} en 10^{-2} Bq m^{-3} voor deze nucliden. Na het uitschakelen van het FEL-systeem wordt gedurende 20 minuten de ventilatievoud verdrievoudigd. In deze tijd zakken de activiteitsdichtheden in tot de waarden: 0.34 kBq m^{-3} en 3.4

mBq m⁻³ voor de beide nucliden. Daarna wordt de ventilatievoud weer teruggebracht op de waarde van $\mu = 1 \text{ hr}^{-1}$.

Bij het nieuw opstarten van het FEL-systeem de volgende dag zijn de dichtheden gedaald tot de waarden 9 mBq m⁻³ voor ⁴¹Ar en 3.8 $\mu\text{Bq m}^{-3}$ voor ¹⁴C. Na de vijfde dagcyclus wordt het systeem pas na twee dagen weer opgestart: dit is tijdstip $t = 168$ uur. Op dit moment zijn zowel de activiteiten voor ⁴¹Ar als voor ¹⁴C gedaald tot een niveau van zo goed als nihil.

De bijdrage aan de opgelopen dosis als gevolg van submersie (⁴¹Ar) wordt middels de dosisconversiecoëfficiënten [HBRN] berekend als:

$$E_{t_0}(T) = \int_{t_0}^{t_0+T} e_{dcc} \times a(t) dt, \quad (6)$$

met $E_{t_0}(T)$ de opgelopen effectieve dosis na vanaf tijdsduur t_0 tot tijdstip $t_0 + T$ in de FEL-bunker geweest te zijn. van de effectieve dosis, e_{dcc} de desbetreffende dosisconversiecoëfficiënt en $a(t)$ de tijdsafhankelijke activiteitsdichtheid voor het nuclide. Voor ⁴¹Ar wordt de dosisconversiecoëfficiënt klasse SR-0 *i.e.*, niet reactieve, onoplosbare gassen die niet worden opgenomen in de stofwisseling, gebruikt die meet: $e_{dcc} = 2.2 \times 10^{-4} \mu\text{Sv h}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^3$. De bijdrage aan de dosis als gevolg van het koolstof isotoop wordt verder buiten beschouwing gelaten: de (achtergronds)dichtheid van ¹⁴CO₂ in de biosfeer is ongeveer 220 Bq kg⁻¹ – dus ook voor het menselijk lichaam – waar de berekende activiteitsdichtheid in de lucht als gevolg van het bedrijf van de FELs ruwweg vier grootteordes lager uitvalt en daarmee geen rol van betekenis speelt zowel in vergelijking met de dosis op te lopen als gevolg van geproduceerd ⁴¹Ar als van de achtergrondsichtheid aan ¹⁴C. Met de hiervoor vermelde waardes volgt voor een werknemer voor de bijdrage aan de effectieve dosis in *microsievert* als gevolg van submersie in de lucht van de FEL-bunker de in de onderstaande tabel vermelde waardes voor tijdsintervallen van verblijf in de FEL-bunker gerekend vanaf entree na een zekere wachttijd ná het uitschakelen van het FEL-systeem:

Tabel 4.1: Op te lopen effectieve dosis in microsievert als gevolg van betreden van de FEL-bunker bij inachtneming van een zekere wachttijd na het uitschakelen van het FEL-systeem en bij een zekere aaneengesloten verblijfsduur.

aaneengesloten duur van het verblijf in de FEL-bunker →	10'	20'	30'	1 hr	2 hr	4 hr
wachttijd na uitschakelen FEL voordat de FEL-bunker wordt betreden ↓						
0'	0.024	0.038	0.048	0.070	0.087	0.092
10'	0.014	0.025	0.035	0.052	0.065	0.069
20'	0.010	0.021	0.027	0.041	0.051	0.054
30'	0.008	0.014	0.019	0.030	0.039	0.041
1 hr	0.004	0.007	0.010	0.015	0.019	0.021
2 hr	0.001	0.002	0.002	0.004	0.005	0.005
4 hr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00

Uit Tabel 4.1 valt af te leiden dat als de FEL-bunker direct na het uitschakelen betreden wordt na vier uur continu verblijf een dosis van 0.092 μSv wordt opgelopen. Aangezien bij entree ná vier uur wachttijd de dosishijdrage steeds vrijwel gelijk is aan nihil volgt dat bij betreden direct ná het uitschakelen van het FEL-systeem de dosis als gevolg van submersie van een werknemer in de ^{41}Ar houdende lucht van de FEL-bunker de dosis bijdrage tengevolge van deze handeling de 0.092 + 0.000 < 0.1 μSv niet zal overschrijden. Over een werkjaar van 250 dagen gerekend betekent dit dat de op te lopen effectieve dosis voor één werknemer als gevolg van de submersie maximaal zo'n 25 μSv bedraagt.

4.3.2 Buiten de FEL-bunker: verspreiding van ^{41}Ar

De hoeveelheid geactiveerde kernen binnen de FEL-bunker wordt beschreven middels de differentiaalvergelijking (5). In deze vergelijking wordt de toename van kernen bepaald door de produktieterm $P(t)$ terwijl de afname van kernen wordt bepaald door het fysisch verval λ en de uitstoot via het ventilatiesysteem $\mu(t)$. Wanneer de uitstoot instantaan gebeurt, dat wil zeggen, de uitgestoten lucht wordt niet via één of ander vertragsingsmechanisme naar buiten geleid, dan volgt voor het aantal uitgestoten geactiveerde kernen, en daarmee de uitgestoten activiteit, de volgende vergelijkingen:

$$\dot{N}_u(t) = \mu(t) N_i(t) \Leftrightarrow \dot{A}_u(t) = \mu(t) A_i(t) = \mu(t) a_i(t) V, \quad (7)$$

waar de index i zich betreft op "binnen de FEL-bunker" en de index u zich betreft op "uitgestoten naar de buitenlucht".

De lucht wordt uitgestoten op 2½ m boven het hoogste punt van de nieuwbouw. Vanaf het uitstootpunt, dat als puntbron wordt beschouwd, zal een pluim lucht met geactiveerde kernen zich

verspreiden en, onder andere, op en over de terreingrens aan de dosis voor de bevolking bijdragen. Om deze pluim te modelleren en de dosisbijdrage aan de terreingrens af te schatten wordt een eenvoudig model gebruikt, gebaseerd op het gaussische puntbron pluim model[GPPM]. De uitgestoten wolk wordt hier gemodelleerd als passieve pluim (gelijke dichtheid als omringende lucht) die horizontaal afdrijft. De drijfrichting is genomen als de kortste afstand naar de terreingrens en is als x -richting gedefinieerd. Loodrecht op de afdrijfrichting is de verdeling gaussisch met standaardafwijkingen σ_y en σ_z . Dáár waar de wolk het maaiveld niveau bereikt wordt de gaswolk weer omhoog gereflecteerd alsof die van een gespiegelde, of virtuele, bron onder het maaiveld komt. Dit is weergegeven in Afbeelding G.2.

Dit simpel gaussisch model is een oplossing van de advection-diffusie transportvergelijking:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + \langle v \rangle \frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \right] a(t; x, y, z) = 0. \quad (8)$$

Deze differentiaalvergelijking beschrijft het advectieve transport door de gemiddelde heersende wind, met verwachte snelheid $\langle v \rangle$, en het effect van turbulente diffusie middels de turbulentie coëfficiënten K_y en K_z en waar verder $a(t; x, y, z)$ de activiteitsdichtheid op tijdstip t ter plekke (x, y, z) weergeeft. De activiteitsdichtheid in het gaussische puntbron pluim model wordt dan beschreven als:

$$a(t; x, y, z) = \frac{\dot{A}_u}{2\pi \langle v \rangle \sigma_y \sigma_z} \times \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]. \quad (9)$$

De oorsprong is genomen op maaiveldhoogte direct onder het uitstootpunt dat zich op hoogte h bevindt. De advection volgt in de x -richting via de plaatsafhankelijke standaardafwijkingen. De laatste factor in vergelijking (9) betreft de sommatie over de werkelijke bron en de virtuele bron van uitstoot. Het fysisch verval wordt verwaarloosd wat een overschatting van de activiteitsconcentratie op de terreingrens tot gevolg zal hebben. Daarbij kan worden opgemerkt dat bij normale windsnelheden en de afstand tot de terreingrens in de orde van grootte van enkele honderden meters bedraagt de tijdsduur waarin de uitgestoten lucht de terreingrens zal bereiken in de grootte orde van minuten ligt en dat bij een vervalconstante van $\lambda = 0.38 \text{ hr}^{-1}$ voor ^{41}Ar er dus vrijwel geen fysisch verval optreedt tijdens het verspreidingsproces.

Verder volgt vergelijking (9) onder de randvoorwaarden dat:

- 1) de windsnelheid is constant als functie van de hoogte (v hangt niet af van z) en
- 2) de diffusie hangt niet af van y en z : $\sigma_{y,z}^2 \equiv \frac{2K_{y,z}(x)}{\langle v \rangle}$.

De diffusie hangt daarentegen wél af van de heersende windconditie. In het meest ongunstige geval is de windrichting zuidwest, een niet ongebruikelijke windrichting in Nederland, en daarmee gericht van het uitstootpunt naar de dichtbijzijnde locatie op de terreingrens, dat zich op ongeveer honderd meter in noordoostelijke richting vanaf het uitstootpunt bevindt.

Bij het gebruik van luchtvervuilingsmodellen is het gangbaar de turbulente diffusie te karakteriseren middels de Pasquill atmosferische stabiliteitsklassen[PASQ]. Deze klassen volgend treedt de minste diffusie in laterale richtingen op bij een windsnelheid van tussen de twee en vier meter per seconde. Dit komt neer op 2 – 3 Beaufort, evenzo niet ongebruikelijk in Nederland. In Afbeelding G.3 is met een magenta pluim de afdrijfrichting van de verontreiniging aangegeven.

De diffusie wordt vervolgens beschreven met aanname van Pasquill klasse *F* en de daarbij berekende waarden van σ_y en σ_z . Deze standaardafwijkingen worden, bijvoorbeeld, middels de tabellen behorende het luchtvervuilingsverspreidingsmodel van de United States Environmental Protection Agency[EPA] en bedragen:

$$\sigma_y(x) = 465.11628 \times x \times \tan(0.017453293 \times (a - b \ln x)) \quad \text{en} \quad \sigma_z(x) = c x^d. \quad (10)$$

Hier wordt x in kilometer uitgedrukt en volgen σ_y en σ_z in meter. Het argument van de tangens is in radialen uitgedrukt. Voor Pasquill klasse *F* en over een afstand van $x = 0.1$ km zijn vervolgens getabelleerd en weergegeven in Tabel 4.2. Er geldt: $a = 4.17$, $b = 0.362$, $c = 15.2$ en $d = 0.816$ waarmee berekend: $\sigma_y = 4.1$ m en $\sigma_z = 2.3$ m.

Tabel 4.2: Parameters ter bepaling van σ_y en σ_z in het ICS gaussian pointsource plume model van de US Environmental Protection Agency.

Pasquill Stability Category F				
	$\sigma_y(x) = 465.11628 \times x \times \tan \theta(x)$ $\theta(x) = 0.017453293 \times (a - b \ln x)$		$\sigma_z(x) = c x^b$	
X (km)	a	b	c	d
< 0.2	4.1667	0.36191	15.209	0.81558
0.2 – 0.7	4.1667	0.36191	14.457	0.78407
0.7 – 1.0	4.1667	0.36191	13.953	0.68465
1.0 – 2.0	4.1667	0.36191	13.953	0.63227

Met $\langle v \rangle = 2 \text{ ms}^{-1}$ en de uitstoothoogte genomen op $h = 4$ m, een conservatieve hoogte die bijvoorbeeld voor effecten als 'downwash' corrigeert, volgt dan voor de activiteitsconcentratie aan de terreingrens op een hoogte van $z = 1.5$ m volgens vergelijkingen (7) en (9):

$$a(t; 100, 0, 1.5) = 1.4 \times 10^{-6} \times \mu(t) \times a_i(t) \times V. \quad (11)$$

Hier wordt μ in hr^{-1} uitgedrukt en verder de grootheden a , a_i en V bij voorkeur, maar in ieder geval onderling overeenstemmend, uitgedrukt in respectievelijk Bq m^{-3} , Bq m^{-3} en m^3 . In dat geval wordt de dimensie van de evenredigheidscoëfficiënt gegeven door hr m^{-3} .

Uitgaande van het wekelijks verloop van de activiteitsdichtheid in de FEL-bunker zoals weergegeven in Afbeelding G.1, bij het gebruikte tijdsverloop van μ en een volume van de FEL-bunker van 950 m^3 volgt met inachtneming van vergelijkingen (6) en (11) voor de op te lopen effectieve dosis aan de terreingrens als gevolg van ^{41}Ar submersie een waarde van $E = 1.3 \text{ } \mu\text{Sv}$ op jaarbasis. Deze waarde is berekend voor het meest nabije punt van de terreingrens en op een hoogte van 1.50 m. Een jaar is hierbij gerekend als vijftig weken van zestien uur aaneengesloten FEL-bedrijf per dag gedurende vijf achtereenvolgende dagen per week en daarmee gelijk aan vierduizend bedrijfsuren. De berekende waarde blijft voldoende ruim onder de dosisbegrenzing van $10 \text{ } \mu\text{Sv}$ per jaar die wordt aangehouden aan de terreingrens om het risico als gevolg van stralingsbelasting door het FEL-bedrijf voor de bevolking aanvaardbaar te houden.

Maximale submersie binnen de terreingrens

Op grond van het gedrag van vergelijking (9) is een maximum te verwachten voor de activiteitsdichtheid: bij vaste $y = 0$ men $z = 1.5 \text{ m}$ en voor $x < 0.1 \text{ km}$ constante getabelleerde waarden $a = 4.17$, $b = 0.362$, $c = 15.2$ en $d = 0.816$ volgt dit maximum, bij substitutie van de uitdrukkingen in (10) en vervolgens differentiatie van (9), op een afstand van 72 m van het uitstootpunt als:

$$a(t; 72, 0, 1.5) = 1.54 \times 10^{-6} \times \mu(t) \times a_i(t) \times V. \quad (12)$$

Dit levert een maximale waarde van ^{41}Ar submersie op voor niet-werknemers binnen de terreingrens en buiten het FEL-gebouw van $E = 1.4 \text{ } \mu\text{Sv}$ op jaarbasis.

Additioneel: risico in de zuid-west richting

Zoals gezien levert het FEL-bedrijf op maaiveldniveau een lichte stralingspluim richting zuid-west op. Het meest nabije punt op de terreingrens dat hier beschouwd wordt is gelegen op $x = 0.2 \text{ km}$. Op deze afstand worden de standaardafwijkingen, vergelijking (9) volgend, geëvalueerd als: $a = 4.17$, $b = 0.362$, $c = 14.5$ en $d = 0.784$ en daarmee: $\sigma_y = 7.7 \text{ m}$ en $\sigma_z = 4.1 \text{ m}$. Met $\langle v \rangle = 2 \text{ ms}^{-1}$ en de uitstoothoogte genomen op $h = 4 \text{ m}$ volgt dan voor de activiteitsdichtheid aan de terreingrens in de zuid-west-richting en op een hoogte van $z = 1.5 \text{ m}$ volgens vergelijkingen (7) en (9):

$$a(t; 200, 0, 1.5) = 8.7 \times 10^{-7} \times \mu(t) \times a_i(t) \times V. \quad (13)$$

Hiermee volgt een bijtelling van de effectieve dosis als gevolgd van ^{41}Ar submersie op die plaats

aan de terreingrens als $E = 0.8 \mu\text{Sv}$ per jaar. Omdat de dosis als gevolg van externe straling zoals gezien naar verwachting $1.1 \mu\text{Sv}$ of minder zal bedragen, zeker na de voorgenomen aanpassingen in de betonnen stralingsafscherming, zoals beschreven in paragraaf 4.3, is ook hier geen reden tot zorg voor de volksgezondheid als gevolg van de stralingsbelasting door het FEL-bedrijf. De in zuidwest richting afdrijvende wolk met verontreiniging is weergegeven in Afbeelding G.3 met een cyaan pluim.

4.3.3 Buiten de FEL-bunker: geschatte jaarlijkse uitstoot van ^{41}Ar en ^{14}C activiteit

Met betrekking tot de lozing van radionucliden in het milieu is op grond van de resultaten weergegeven in de voorgaande paragrafen afgeschat met hoeveel activiteit op jaarbasis gerekend moet worden. Evaluatie van de integraal:

$$A = V \times \int_0^{168} a(t) dt, \quad (14)$$

levert de wekelijks geproduceerde activiteit op voor ^{41}Ar of ^{14}C bij gebruik van het het verloop zoals geschetst in Afbeelding G.1.

Er volgt voor ^{41}Ar en ^{14}C respectievelijk $A_{\text{Ar}} = 80 \text{ MBq}$ en $A_{\text{C}} = 60 \text{ Bq}$ gerekend per week, hetgeen op jaarbasis (één jaar is gelijk aan vijftig bedrijfsweken) leidt tot 4 GBq en 3 kBq voor deze nucliden. De lozing van ^{14}C wordt verder buiten beschouwing gelaten: een vergelijk met de vrijgavegrenzen voor lozing leert dat de absolute grens van $A_v = 10 \text{ MBq}$ voor dit nuclide[HBRN] pas na 3000 jaar zou worden bereikt wanneer fysisch verval buiten beschouwing wordt gelaten: zou het ^{14}C zich bijvoorbeeld volledig in de filters van het luchtverversingsysteem afzetten, dan zouden deze filters eens per jaar met het gewone bedrijfsafval of wellicht met het chemisch afval meegegeven kunnen worden verder zonder speciale stralingszorg.

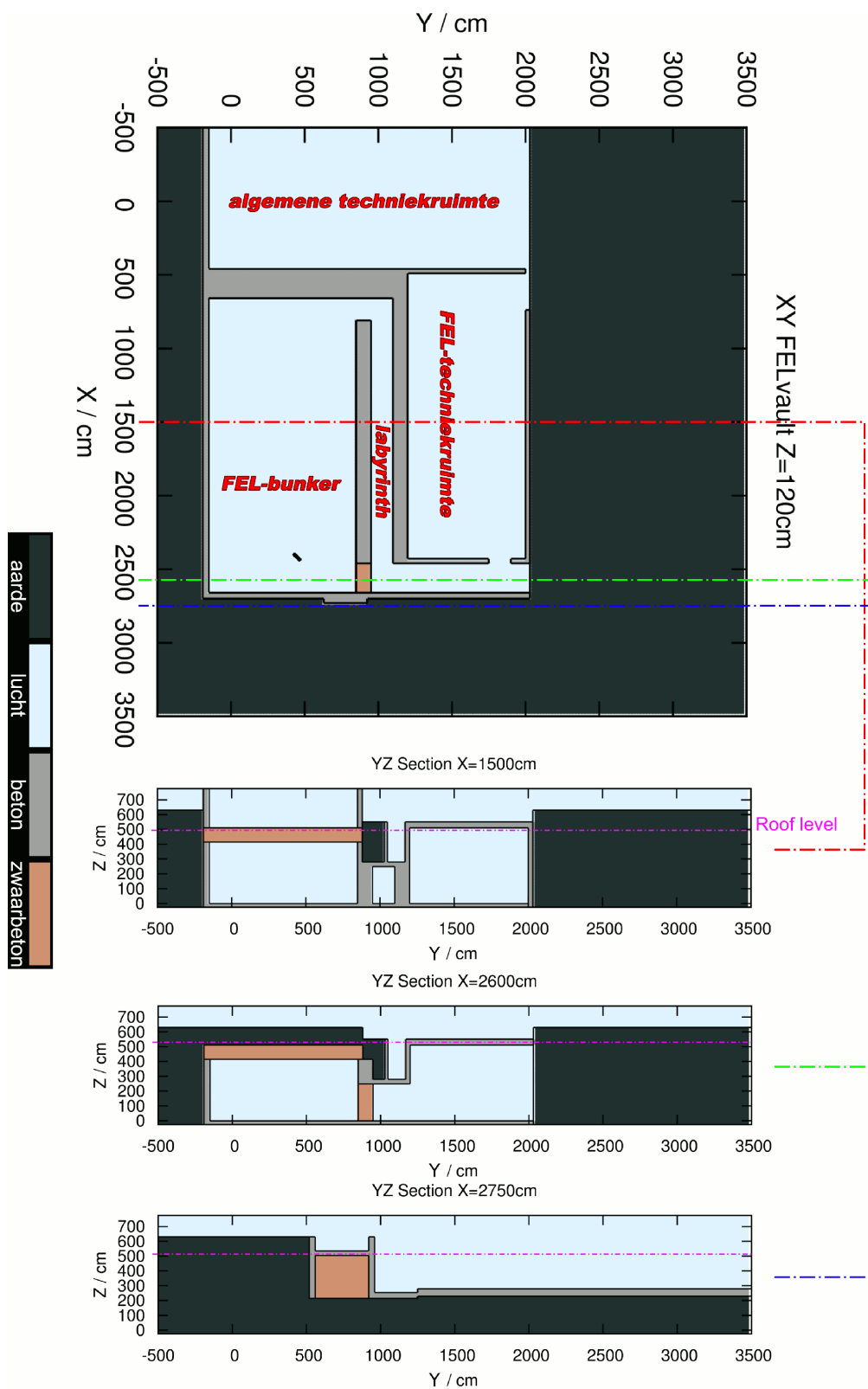
Voor ^{41}Ar geldt dit niet: dit nuclide is chemisch inert en zal zich niet afzetten aan wanden en filters en dergelijke. Gezien het snelle fysisch verval, de halfwaardetijd bedraagt iets minder dan $T_{1/2} = 2 \text{ hr}$, en de vrijgave grens van 1 GBq [HBRN], is een hoeveelheid activiteit van 4 GBq die gradueel op jaarbasis wordt uitgestoten nog niet direct een werkelijk risico te noemen. Door verdunning in alle windrichtingen en het snelle fysisch verval zal de dosisbijdrage voor de bevolking als gevolg van ^{41}Ar , zoals berekend aan de terreingrens in de voorgaande paragraaf, maar een fractie van de maximale $10 \mu\text{Sv}$ op jaarbasis bedragen. De lozing van 4 GBq op jaarbasis van het radionuclide ^{41}Ar zal geen onverantwoord risico voor de bevolking opleveren.

Referenties

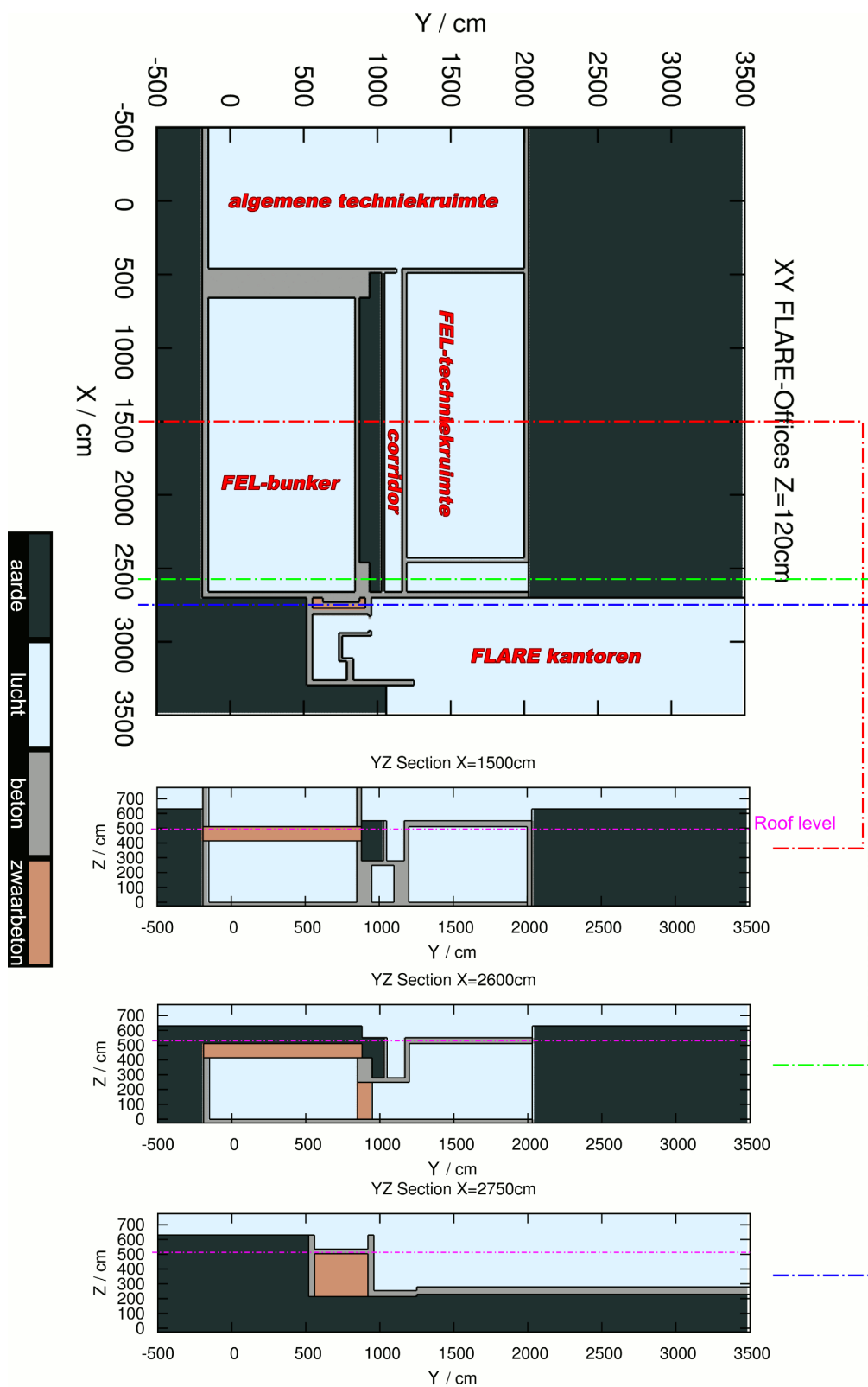
- [FLUKA07] "The FLUKA code: Description and benchmarking", G. Battistoni, S. Muraro, P. R. Sala, F. Cerutti, A. Ferrari, S. Roesler, A. Fassò, J. Ranft, Proceedings of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006, Fermilab 6 – 8 September 2006, M. Albrow, R. Raja eds., AIP Conference Proceeding **896** 31 – 49, (2007)
- [FLUKA05] "FLUKA: a multi-particle transport code", A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fasso`, and J. Ranft, CERN-2005-10 (2005), INFN/TC_05/11, SLAC-R-773
- [FLURL] <http://www.fluka.org/>
- [INFN] <http://www.infn.org/>
- [CERN] <http://www.cern.ch/>
- [ICRP74] "Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation", ICRP Publication 74, Ann. ICRP **26**(3/4) (Oxford: Elsevier Science) (1996)
- [ICRU57] "Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiation", ICRU Report 57 (Bethesda, MD: ICRU Publications) (1998)
- [PelI] "Overview of fluence-to-effective dose and fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the fluka code", M. Pelliccioni, Radiation Protection Dosimetry, **88**(4) 279 – 297 (2000)
- [HBRN] "Handboek Radionucliden", Tweede, geheel herziene druk: augustus 2007, BetaText Bergen (NH), A.S. Keverling Buisman
- [GPPM] "The spread of smoke and gases from chimney", Bosanquet, C.H. and Pearson, J.L., Transaction of the Faraday Society, **32** 1249 (1936)
- [PASQ] "The estimation of the dispersion of windborne material", Pasquill, F., The Meteorological Magazine, **90**(1063) 33 – 49 (1961)
- [EPA] <http://www.epa.gov/>

Appendices

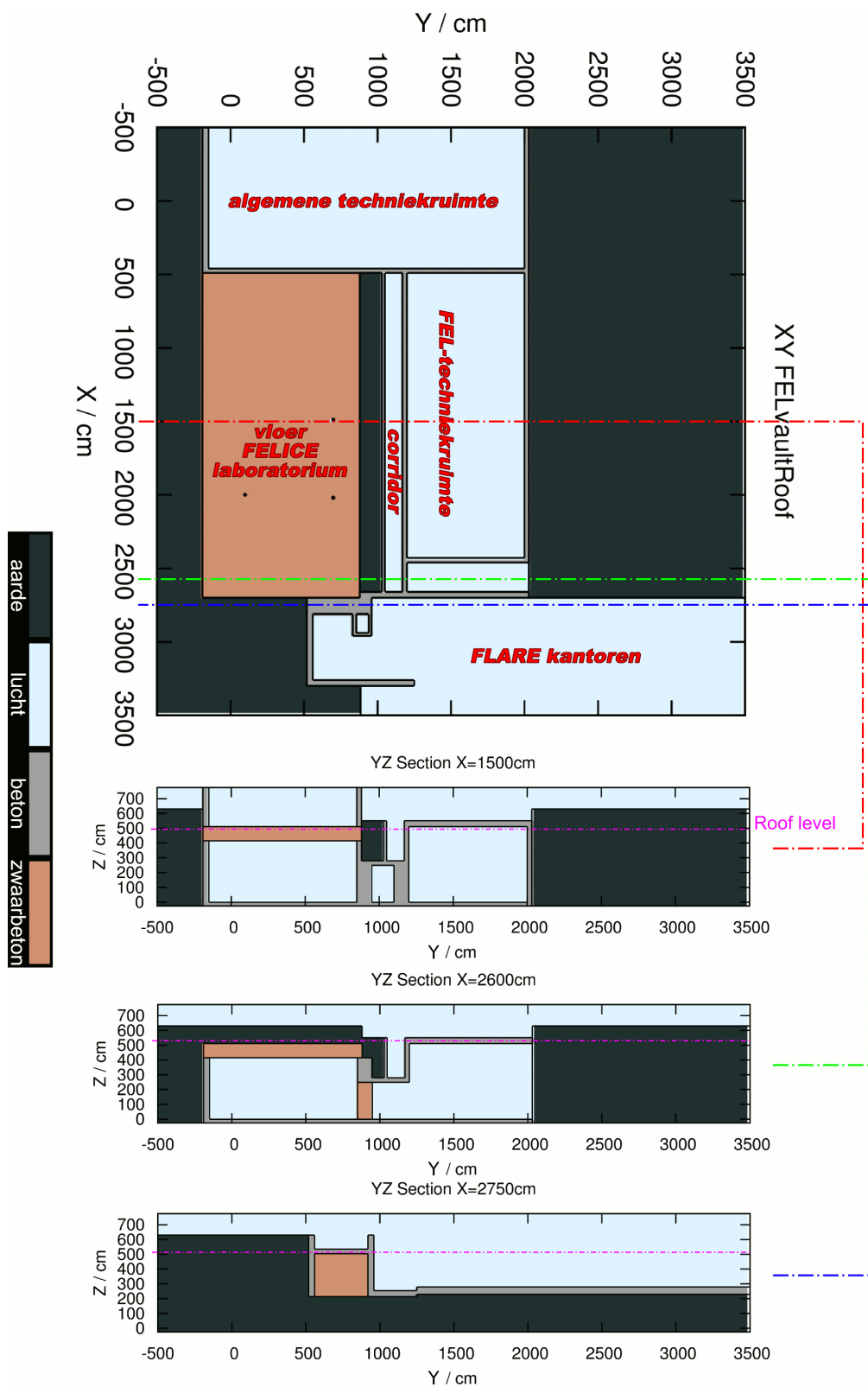
A Model van FEL-gebouw gebruikt ter berekening van dosistempovelden en activatie van lucht door middel van FLUKA



A.1: Doorsnede op 510 cm onder het maaiveld niveau c.q. 120 cm boven de vloer van de FEL-bunker (figuur boven en in magenta aangegeven in de dwarsdoorsnedes onder). Lichtblauw: lucht, oranje: zwaar beton, grijs: standaard beton, donkergroen: aarde.

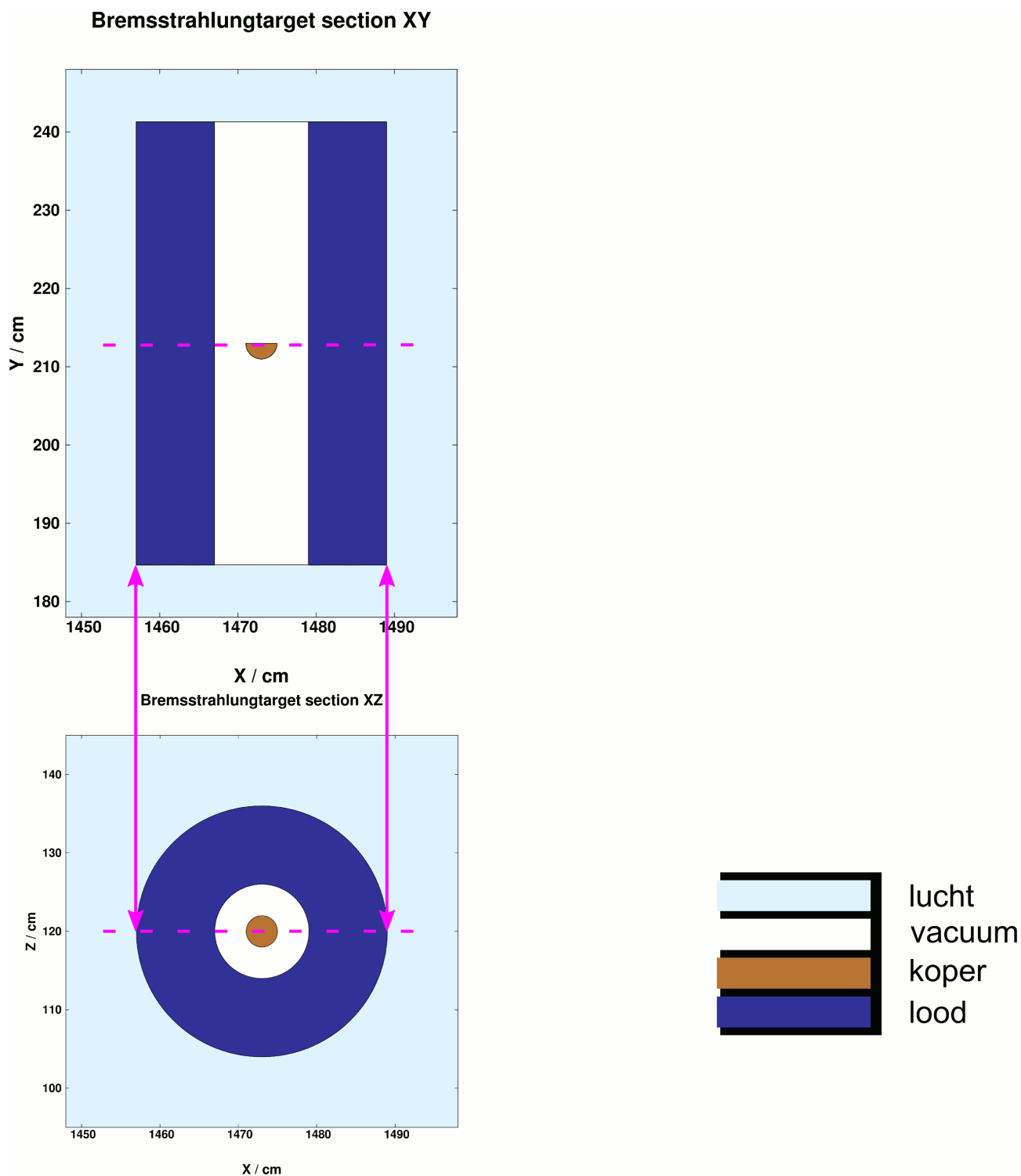


A.2: Als in Afbeelding A.1 maar nu op een hoogte van 255 cm onder het maaiveld niveau c.q. ca. 120 cm boven de vloer van de bestaande kantoren van FLARE.

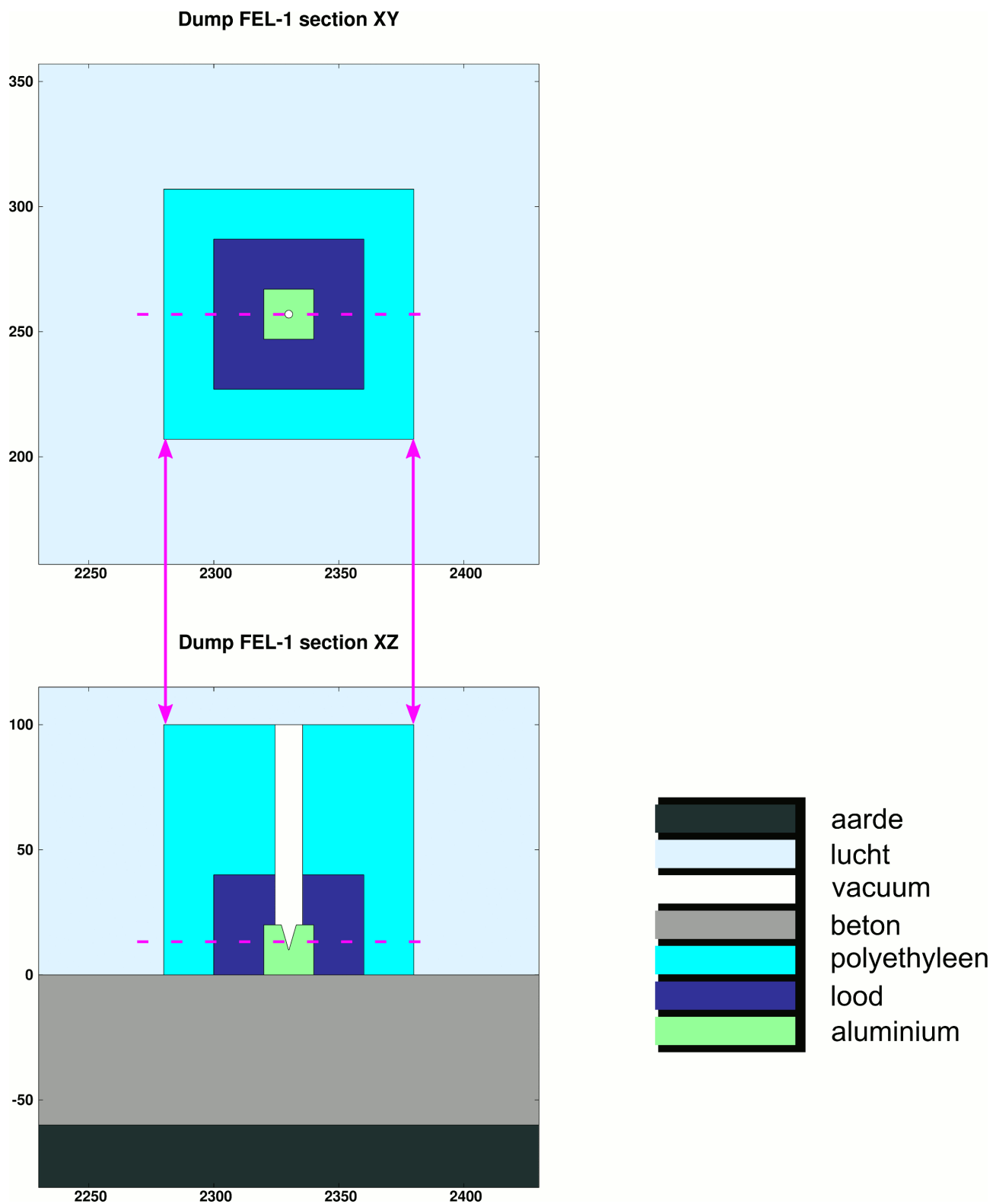


A.3: Als in Afbeelding A.1 maar nu op een hoogte van 120 cm onder het maaiveld niveau c.q. ca. ter hoogte van de vloer van het geplande FELICE laboratorium.

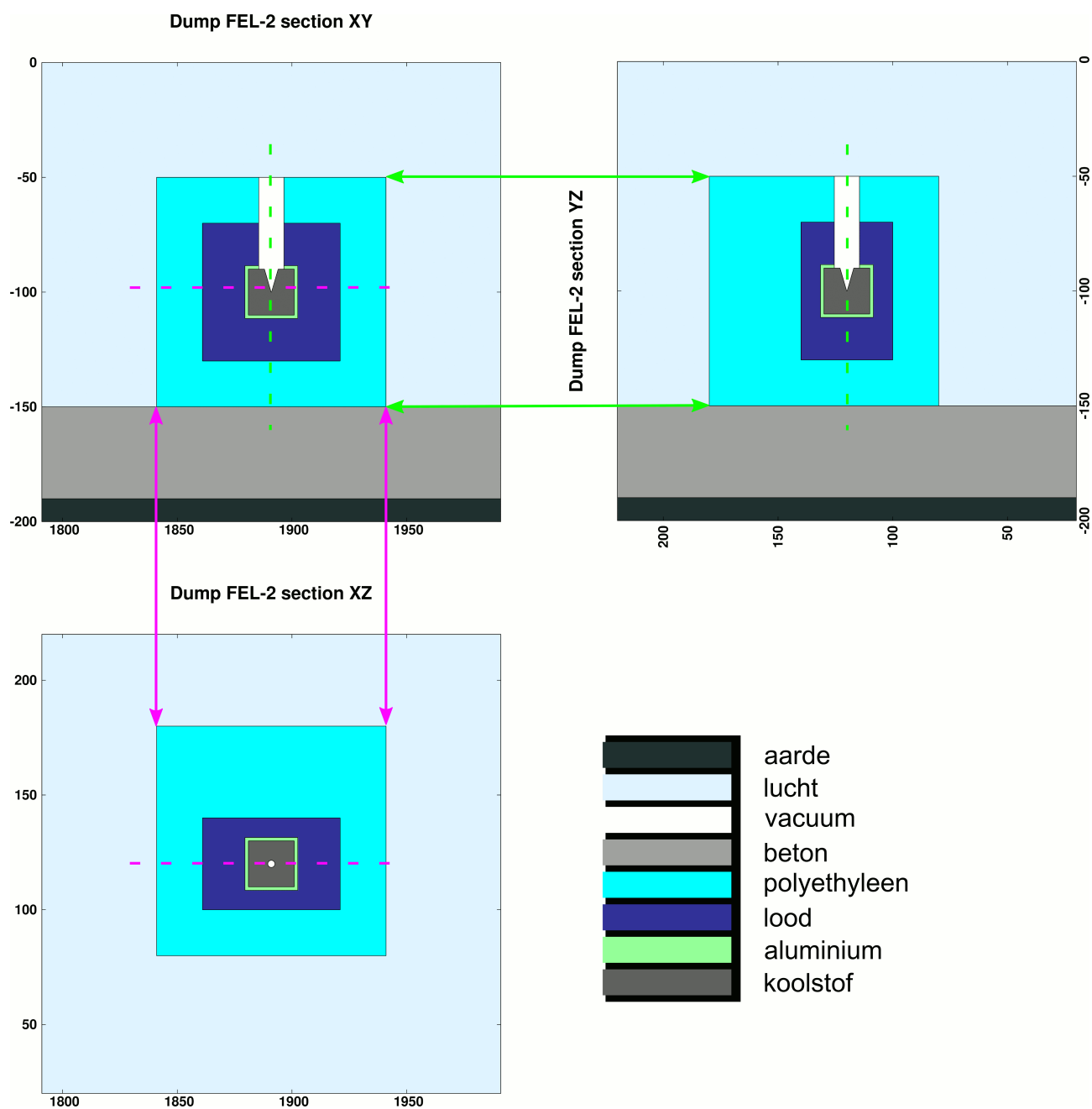
**B Bronnen van remstraling- en neutronproductie gebruikt ter berekening van
dosistempovelden en activatie van lucht door middel van FLUKA**



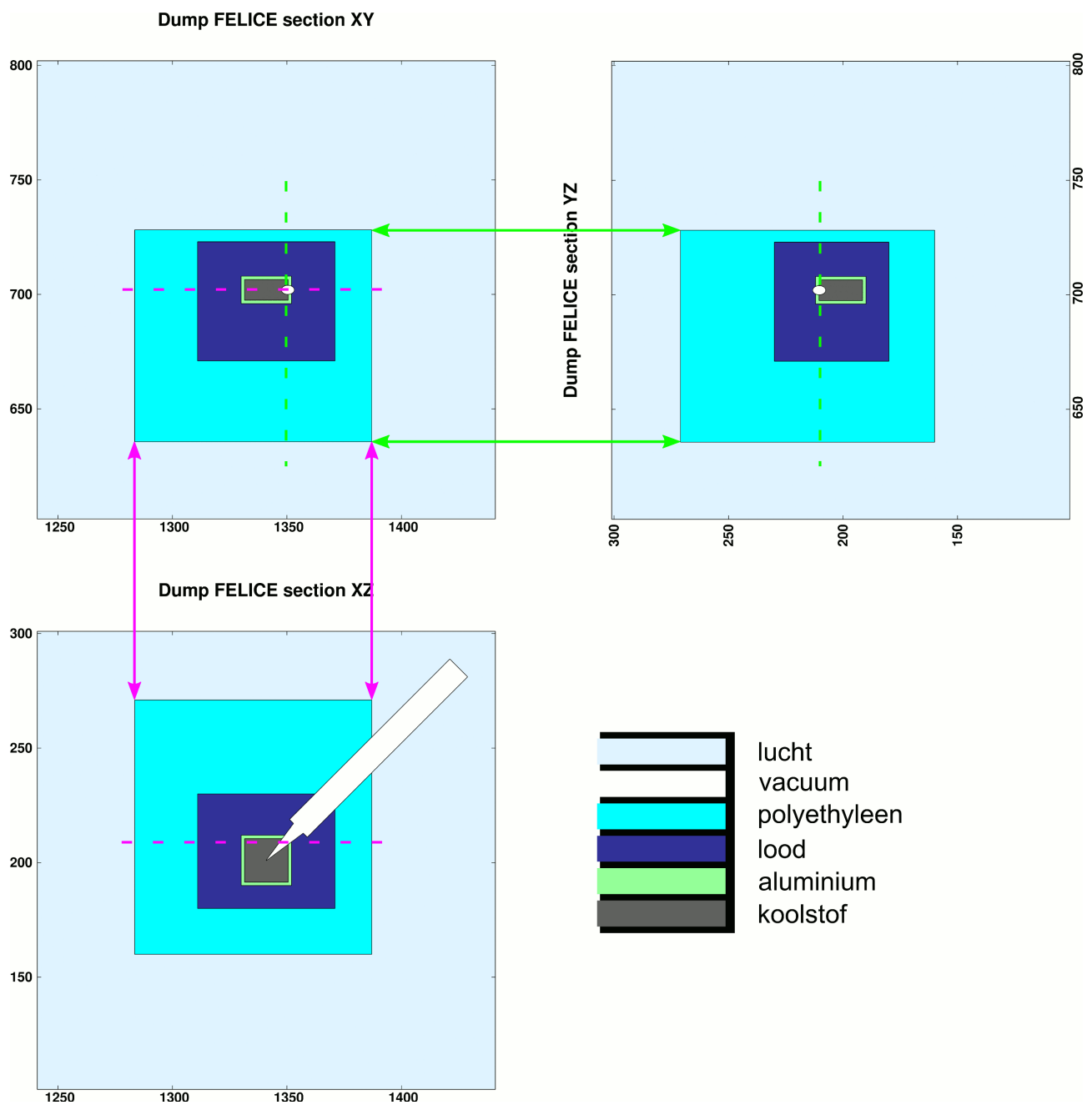
B.1: Model van een remstralingstarget in de eerste bocht van een FEL-systeem zoals gebruikt in FLUKA simulaties. De elektronenbundel valt in op het midden van de vlakke zijde van het halve koperen bolletje dat de koperen messen van de collimator simuleert..



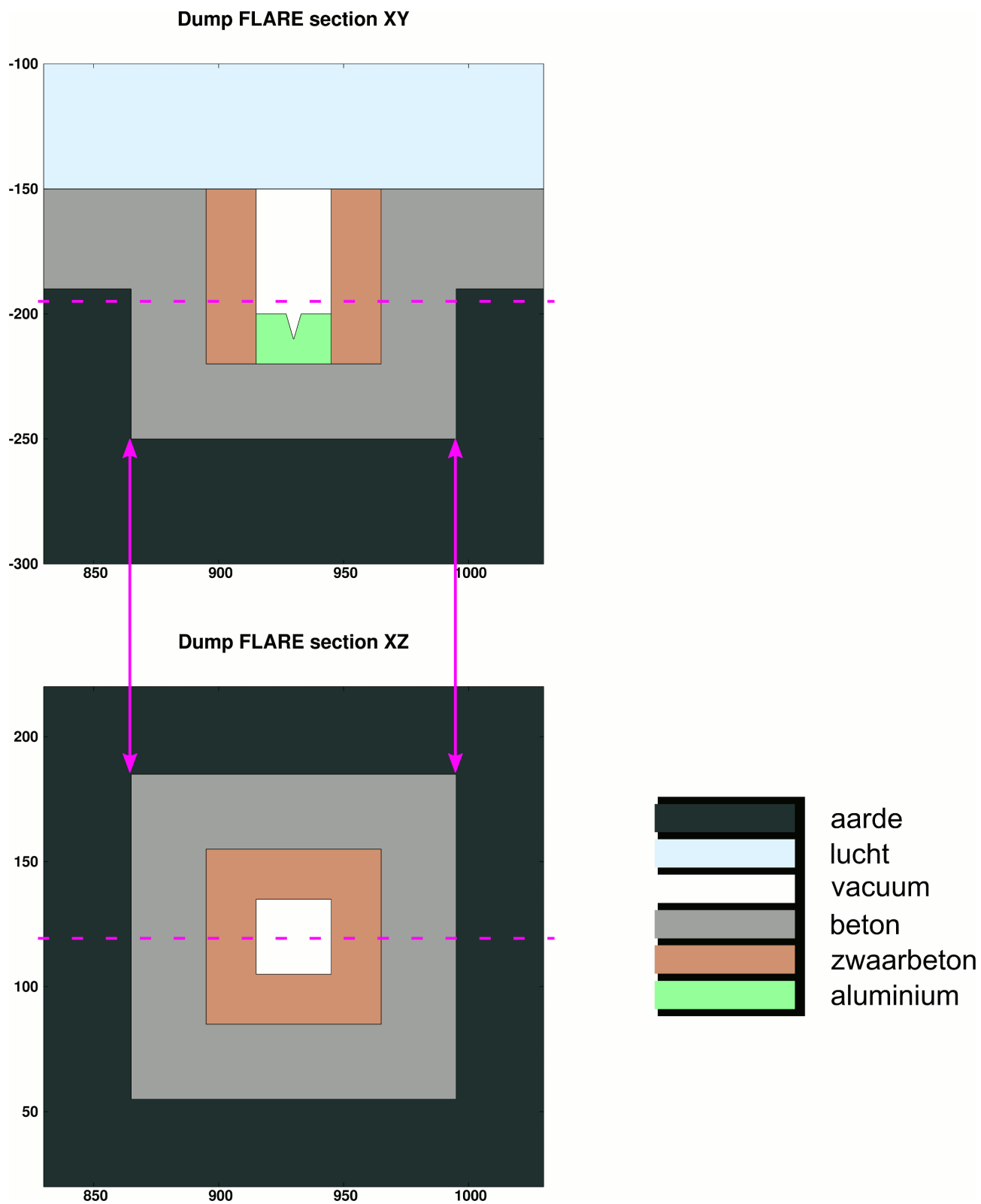
B.2: Model van de dump van FEL-1 zoals gebruikt in FLUKA simulaties. De elektronenbundel valt in op het midden van de conus in de aluminium kern. Alle coördinaten zijn in centimeter.



B.3: Model van de dump van FEL-2 zoals gebruikt in FLUKA simulaties. De elektronenbundel valt in op het midden van de conus in de koolstof kern. Alle coördinaten zijn in centimeter.

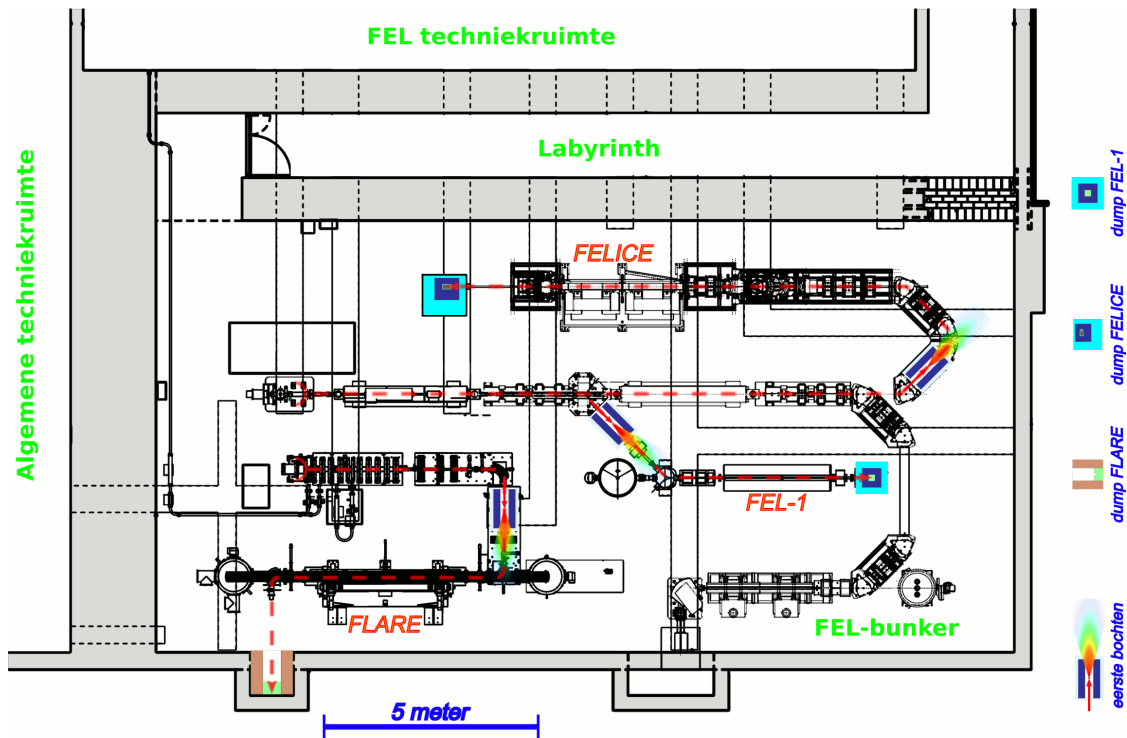


B.4: Model van de dump van FELICE zoals gebruikt in FLUKA simulaties. De elektronenbundel valt in op het midden van de conus in de koolstof kern. Alle coördinaten zijn in centimeter.

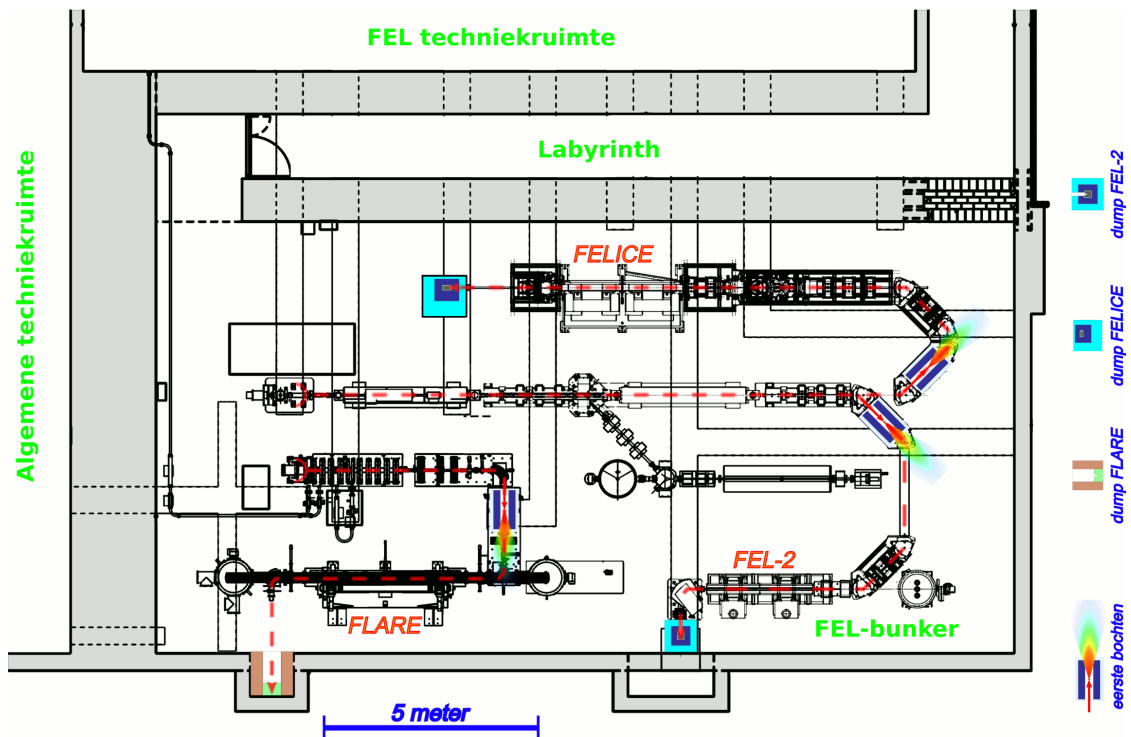


B.5: Model van de dump van FLARE zoals gebruikt in FLUKA simulaties. De elektronenbundel valt in op het midden van de conus in de aluminium kern. Alle coördinaten zijn in centimeter.

**C Plattegrond van de FEL-bunker met geprojecteerde elektronbundellijnen en bronnen
remstraling- en neutronenproductie**

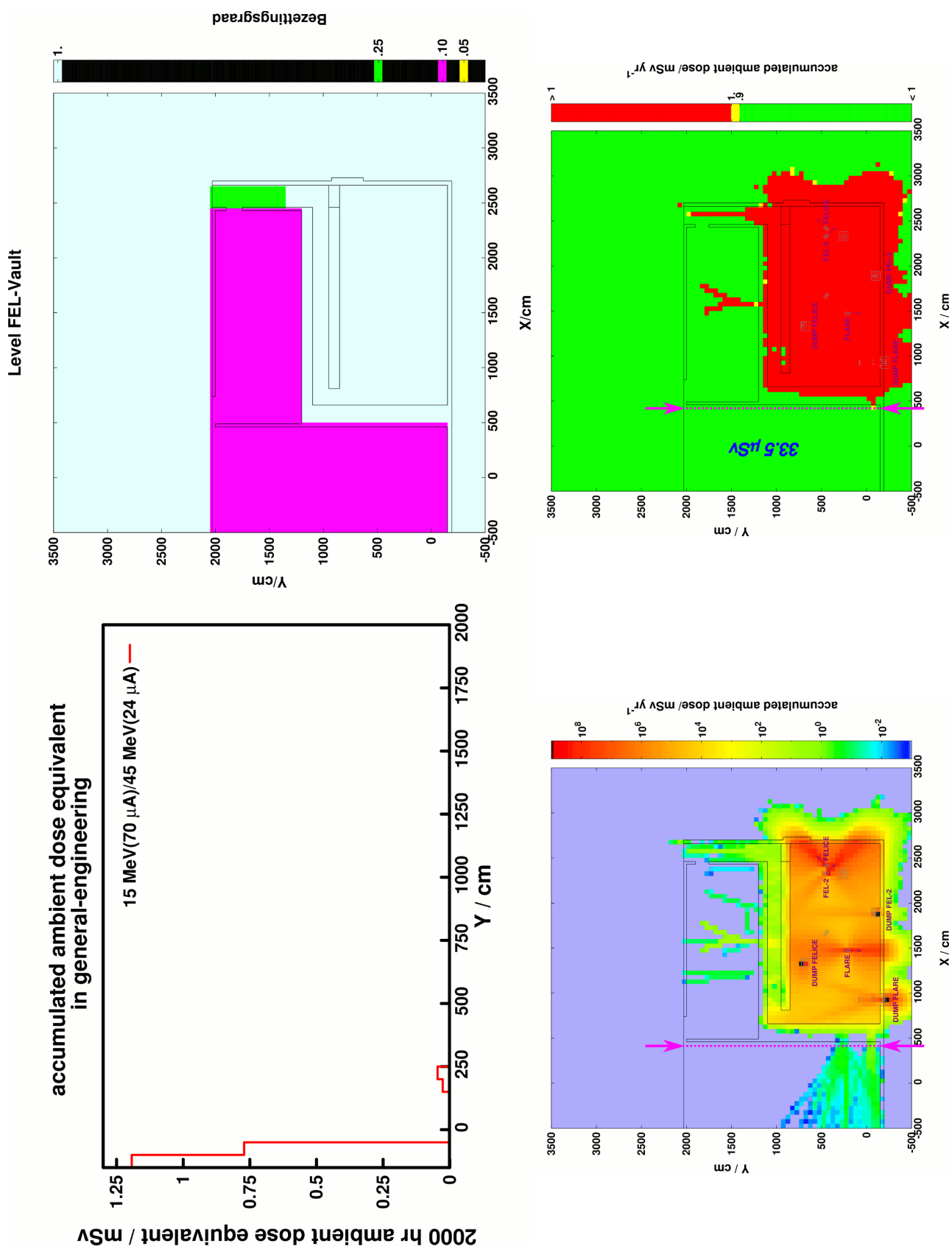


C.1: Elektronenbundellijn (rode streeplijn), eerste bochten en dumps bij simultaan bedrijf van FLARE, FEL-1 en FELICE geprojecteerd op een plattegrond van de FEL-bunker.

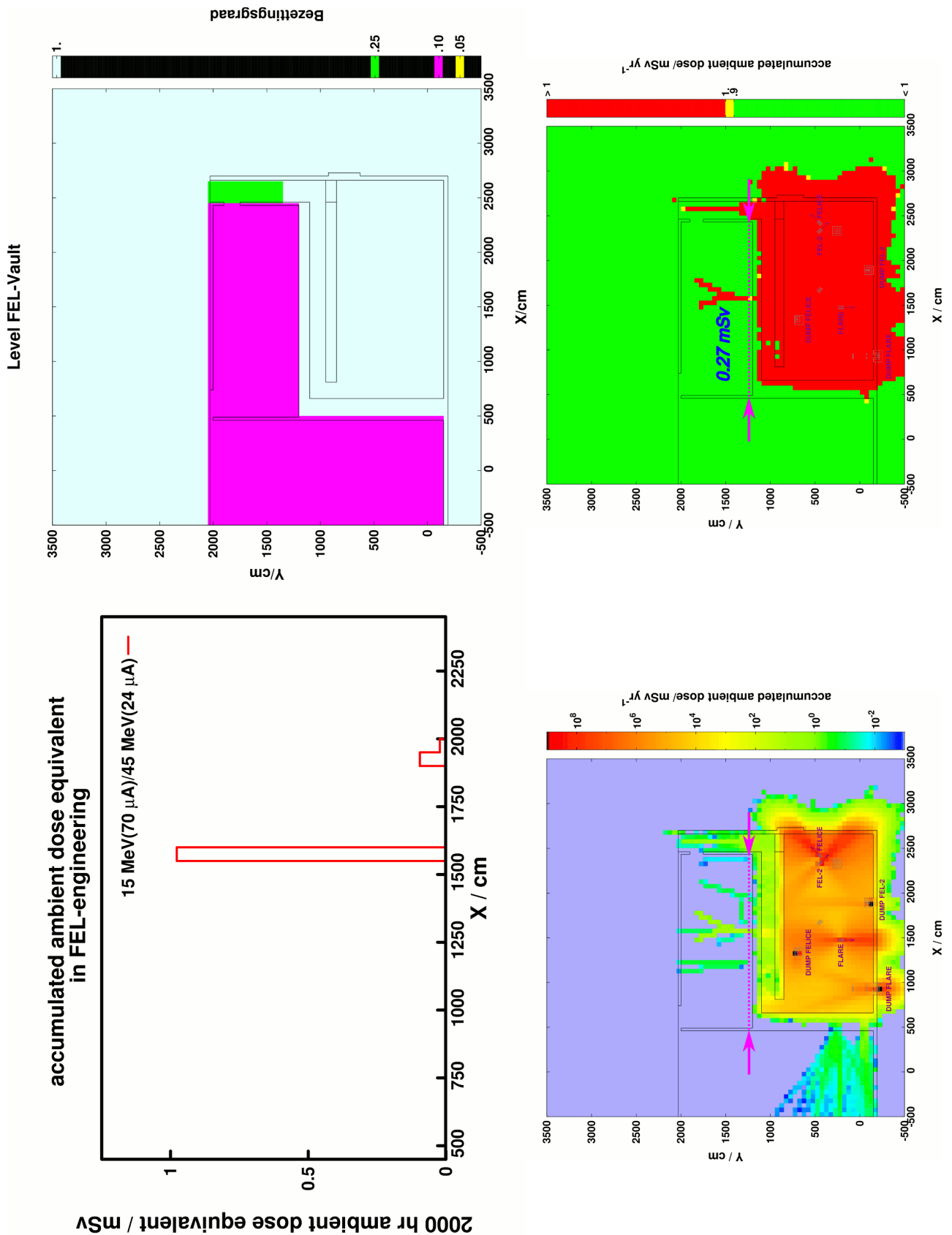


C.2: Elektronenbundellijn (rode streeplijn), eerste bochten en dumps bij simultaan bedrijf van FLARE, FEL-2 en FELICE geprojecteerd op een plattegrond van de FEL-bunker.

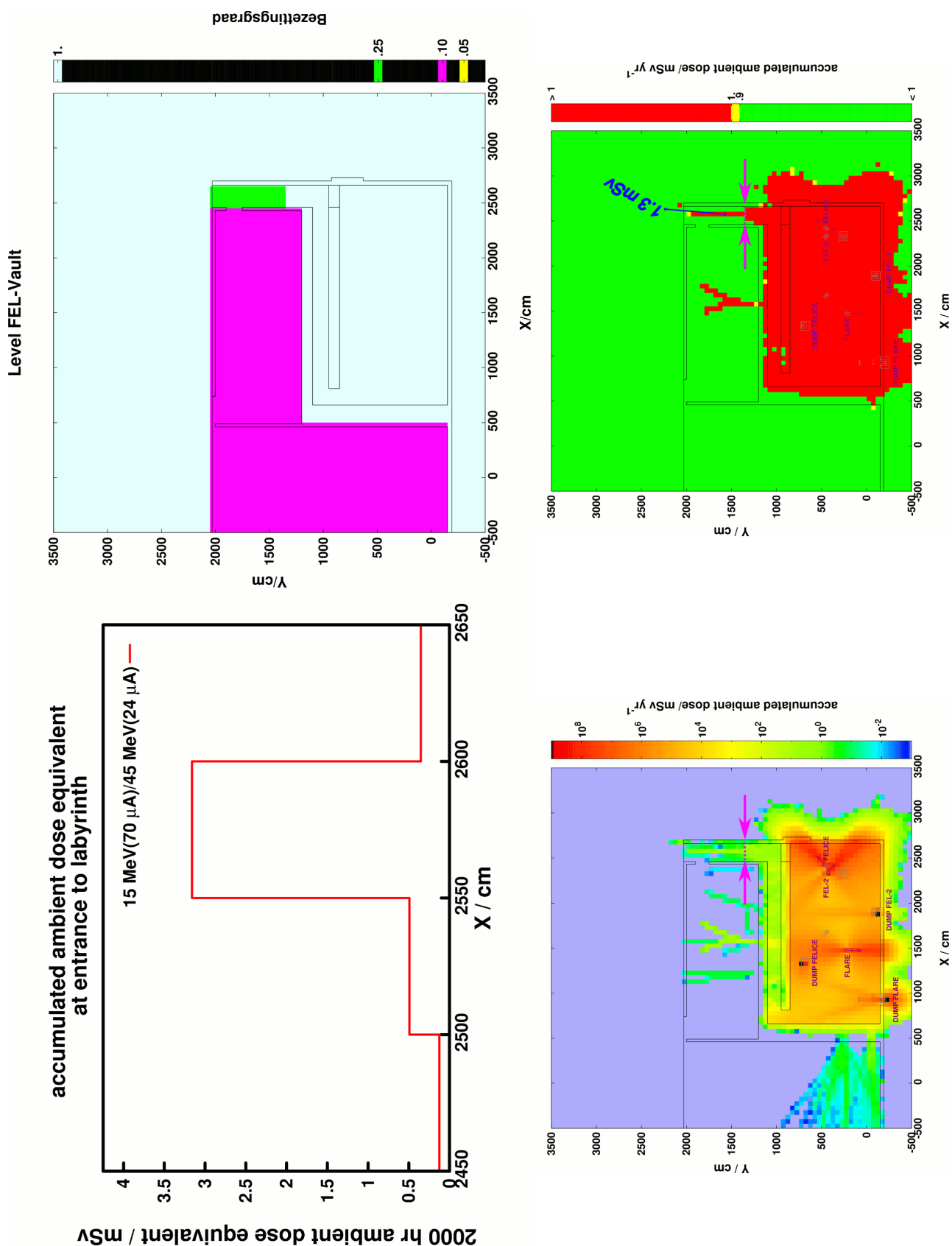
**D Jaardosisvelden, bezettingsgraden en expliciete doses in relevante horizontale vlakken
van het FEL-gebouw**



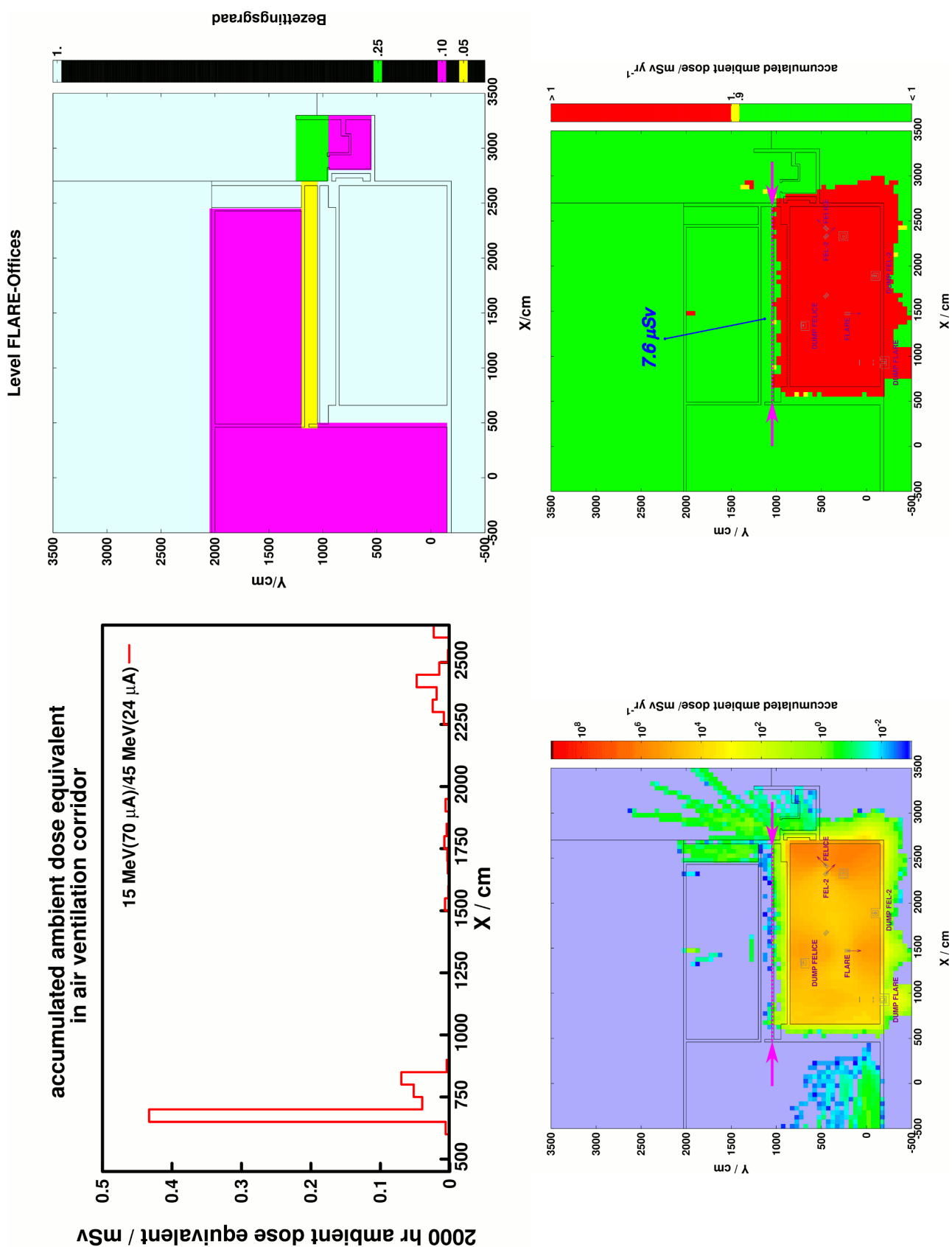
D.1: Jaardosisveld als berekend met FLUKA op 120 cm boven de vloer van de FEL-bunker: rechtsonder in gradient, rechtsboven in vereenvoudigde kleurstelling (rood: > 1 mSv). Bij de simulatie is rekening gehouden met de bezettingsgraden weergegeven linksboven. Over de magenta stippellijn in de grafiek rechtsonder aangeduid met twee pijlen is de dosis in de algemene techniekruimte direct aan de afscheidingswand met de FEL-bunker weergegeven in de grafiek linksonder. Het gemiddelde omgevingsdosisequivalent in de algemene techniekruimte bedraagt 33.5μ Sv.



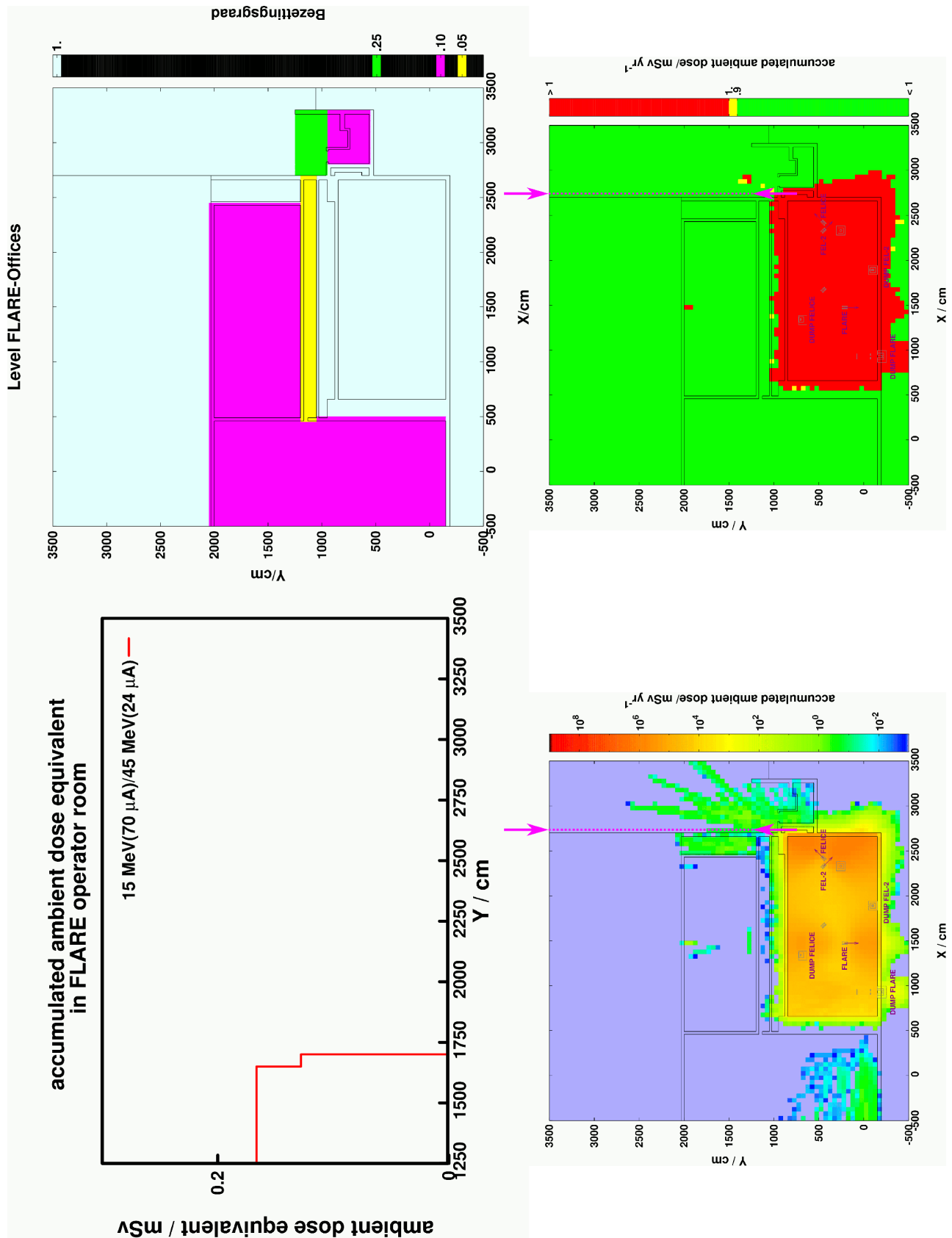
D.2: Jaardosisveld als berekend met FLUKA op 120 cm boven de vloer van de FEL-bunker: rechtsonder in gradient, rechtsboven in vereenvoudigde kleurstelling (rood: > 1 mSv). Bij de simulatie is rekening gehouden met de bezettingsgraden weergegeven linksboven. Over de magenta stippellijn in de grafiek rechtsonder aangeduid met twee pijlen is de dosis in de FEL techniekruimte direct aan de afscheidingswand met het labirynth naar de FEL-bunker weergegeven in de grafiek linksonder..Het gemiddelde omgevingsdosisequivalent in de FEL-techniekruimte bedraagt 0.27 mSv.



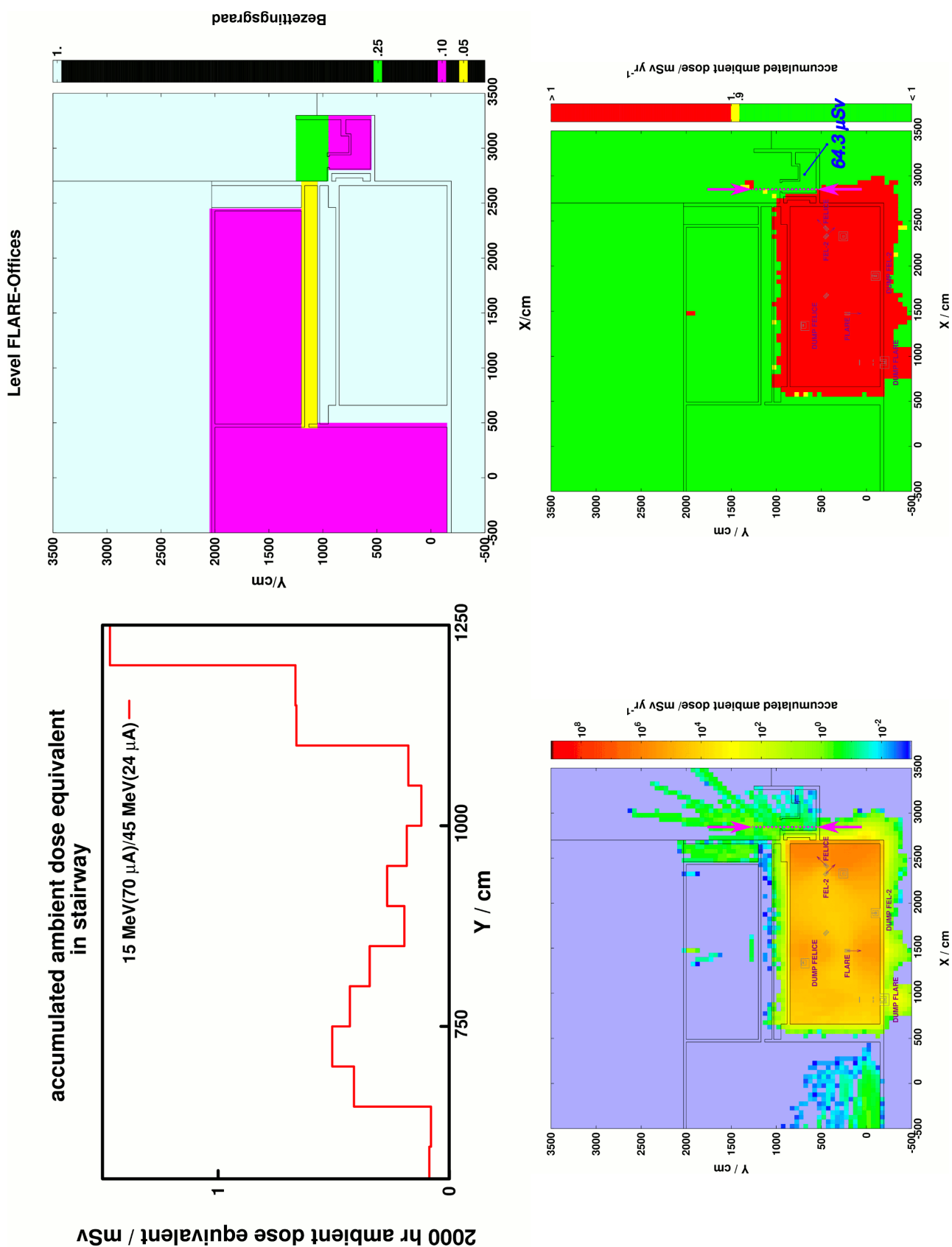
D.3: Jaardosisveld als berekend met FLUKA op 120 cm boven de vloer van de FEL-bunker: rechtsonder in gradient, rechtsboven in vereenvoudigde kleurstelling (rood: > 1 mSv). Bij de simulatie is rekening gehouden met de bezettingsgraden weergegeven linksboven. Over de magenta stippellijn in de grafiek rechtsonder aangeduid met twee pijlen is de dosis bij de toegangsdeur naar het labirynth weergegeven in de grafiek linksonder. Het gemiddelde omgevingsdosisequivalent in de gang naar het labirynth bedraagt 1.3 mSv.



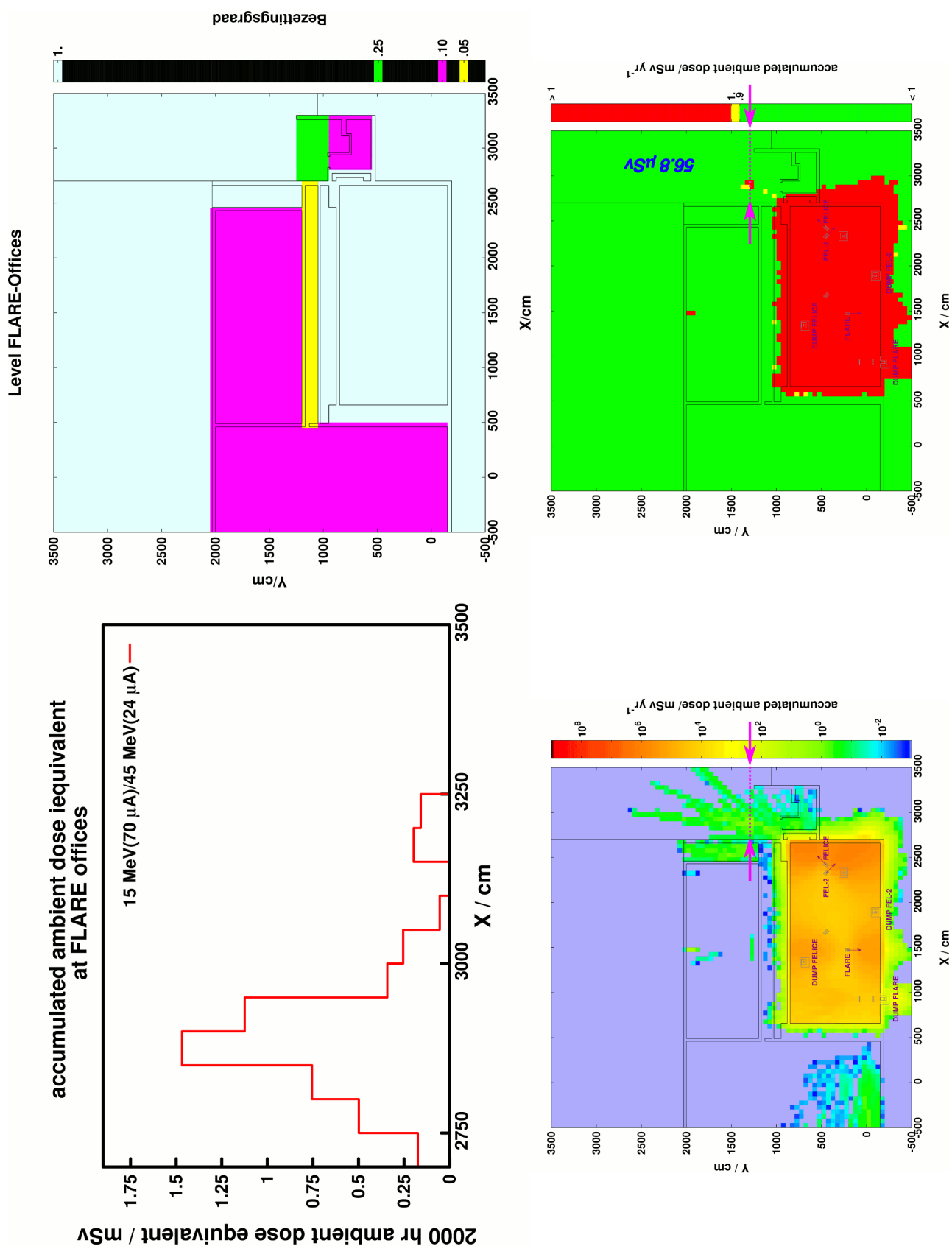
D.4: Jaardosisveld als berekend met FLUKA op 120 cm boven de vloer van de FLARE kantoren: rechtsonder in gradient, rechtsboven in vereenvoudigde kleurstelling (rood: > 1 mSv). Bij de simulatie is rekening gehouden met de bezettingsgraden weergegeven linksboven. Over de magenta stippellijn in de grafiek rechtsonder aangeduid met twee pijlen is de dosis in de corridor met luchtverseringskanalen boven het labirynth naar de FEL-bunker weergegeven in de grafiek linksonder. Het gemiddelde omgevingsdosisequivalent in de corridor boven het labirynth bedraagt 7.6 μ Sv.



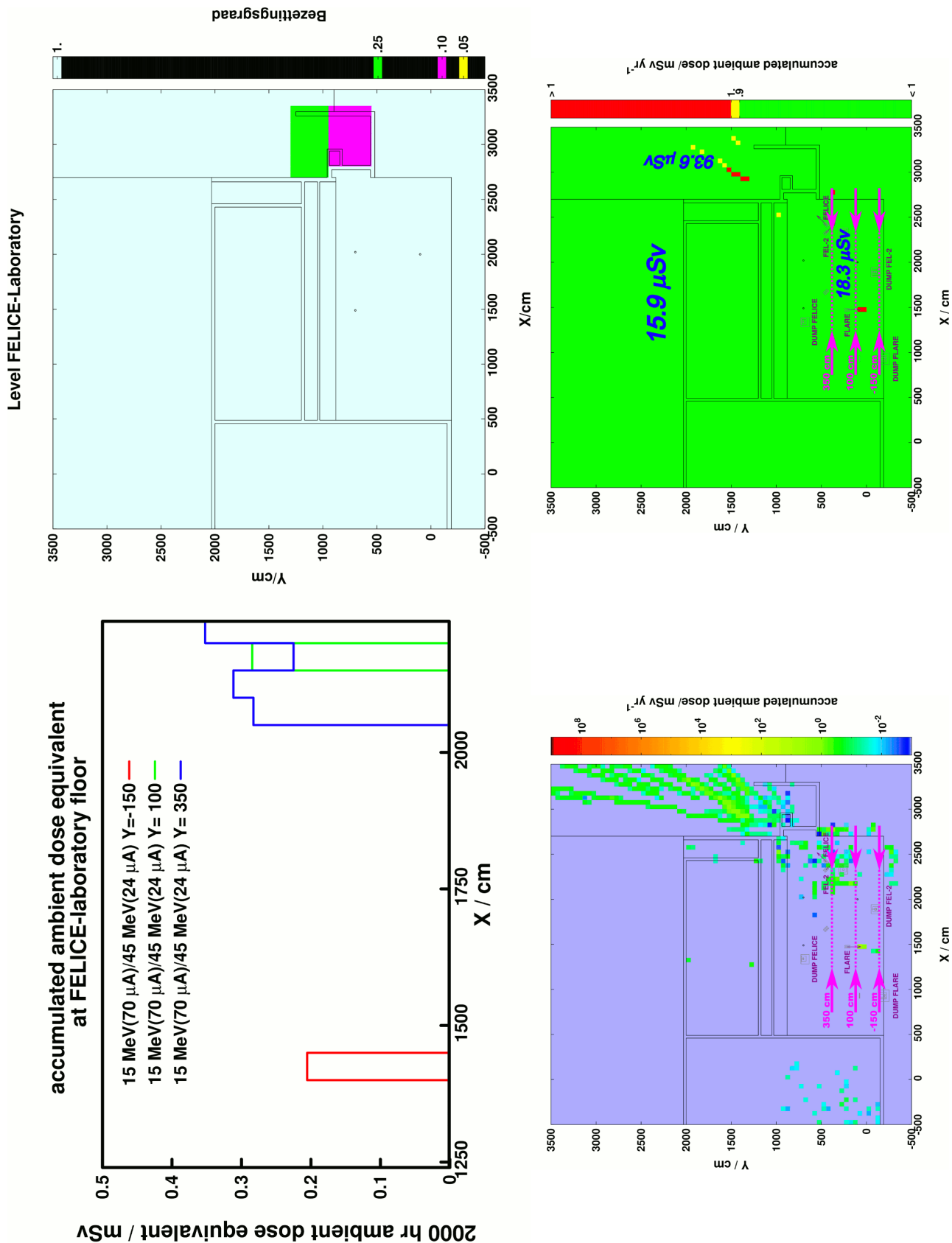
D.5: Jaardosisveld als berekend met FLUKA op 120 cm boven de vloer van de FLARE kantoren: rechtsonder in gradient, rechtsboven in vereenvoudigde kleurstelling (rood: > 1 mSv). Bij de simulatie is rekening gehouden met de bezettingsgraden weergegeven linksboven. Over de magenta stippellijn in de grafiek rechtsonder aangeduid met twee pijlen is de dosis in de FLARE operator ruimte direct tegen de afscheidingswand naar de toegang van het labrynth weergegeven in de grafiek linksonder.



D.6: Jaardosisveld als berekend met FLUKA op 120 cm boven de vloer van de FLARE kantoren: rechtsonder in gradient, rechtsboven in vereenvoudigde kleurstelling (rood: > 1 mSv). Bij de simulatie is rekening gehouden met de bezettingsgraden weergegeven linksboven. Over de magenta stippellijn in de grafiek rechtsonder aangeduid met twee pijlen is de dosis in het trappenhuis tussen de FLARE kantoren en de FELIX/FELICE kantoren en gebruikersruimtes direct tegen de afscheidingswand met de FEL-bunker weergegeven in de grafiek linksonder. Het gemiddelde omgevingsdosis-equivalent in het trappenhuis inclusief voorportaal bedraagt 64.3 μSv.

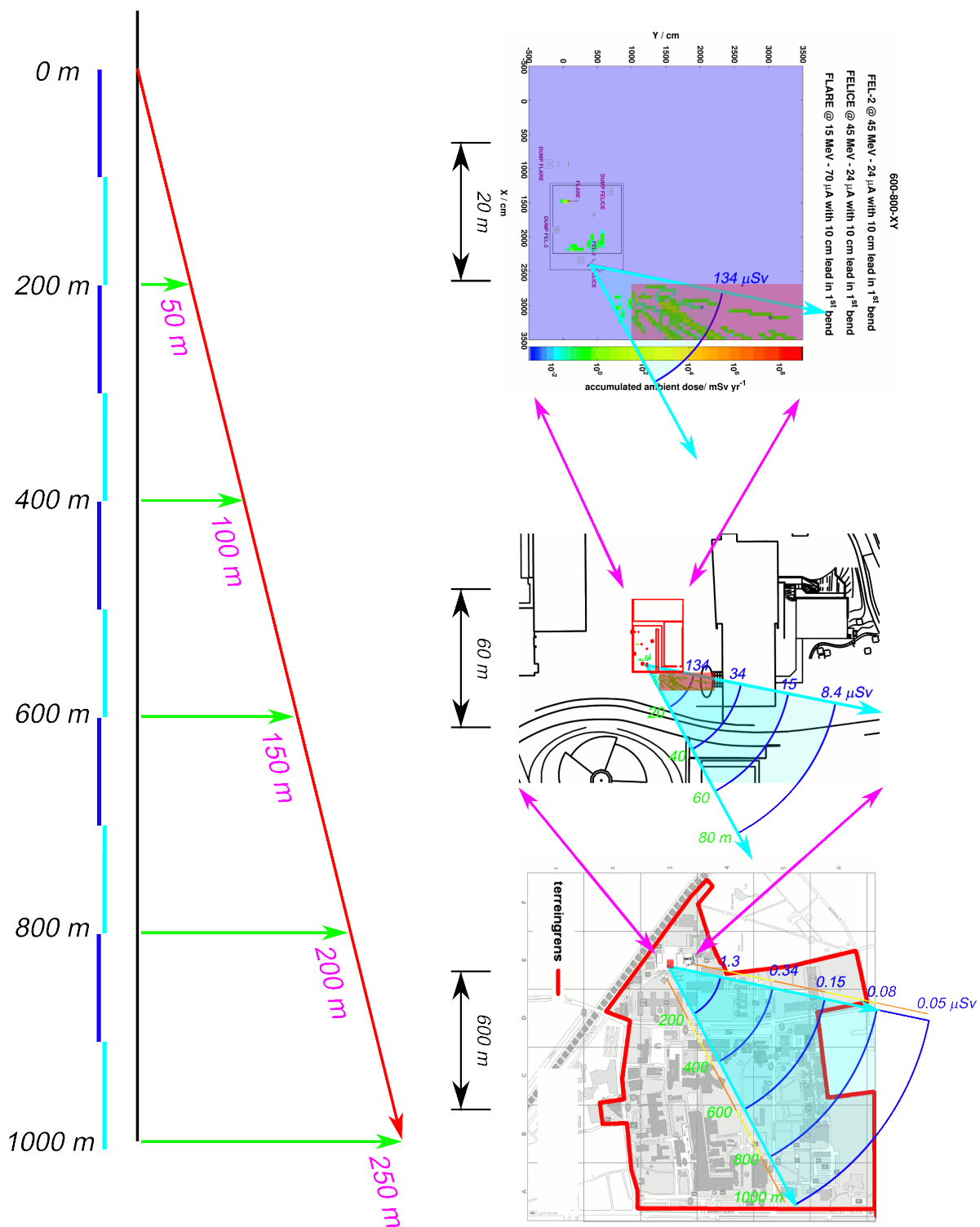


D.7: Jaardosisveld als berekend met FLUKA op 120 cm boven de vloer van de FLARE kantoren: rechtsonder in gradient, rechtsboven in vereenvoudigde kleurstelling (rood: > 1 mSv). Bij de simulatie is rekening gehouden met de bezettingsgraden weergegeven linksboven. Over de magenta stippellijn in de grafiek rechtsonder aangeduid met twee pijlen is de dosis in de kantoorruimtes direct bij de toegang naar het trappenhuis weergegeven in de grafiek linksonder. Het gemiddelde omgevingsdosisequivalent in de FLARE kantoren bedraagt 56.8 μ Sv.



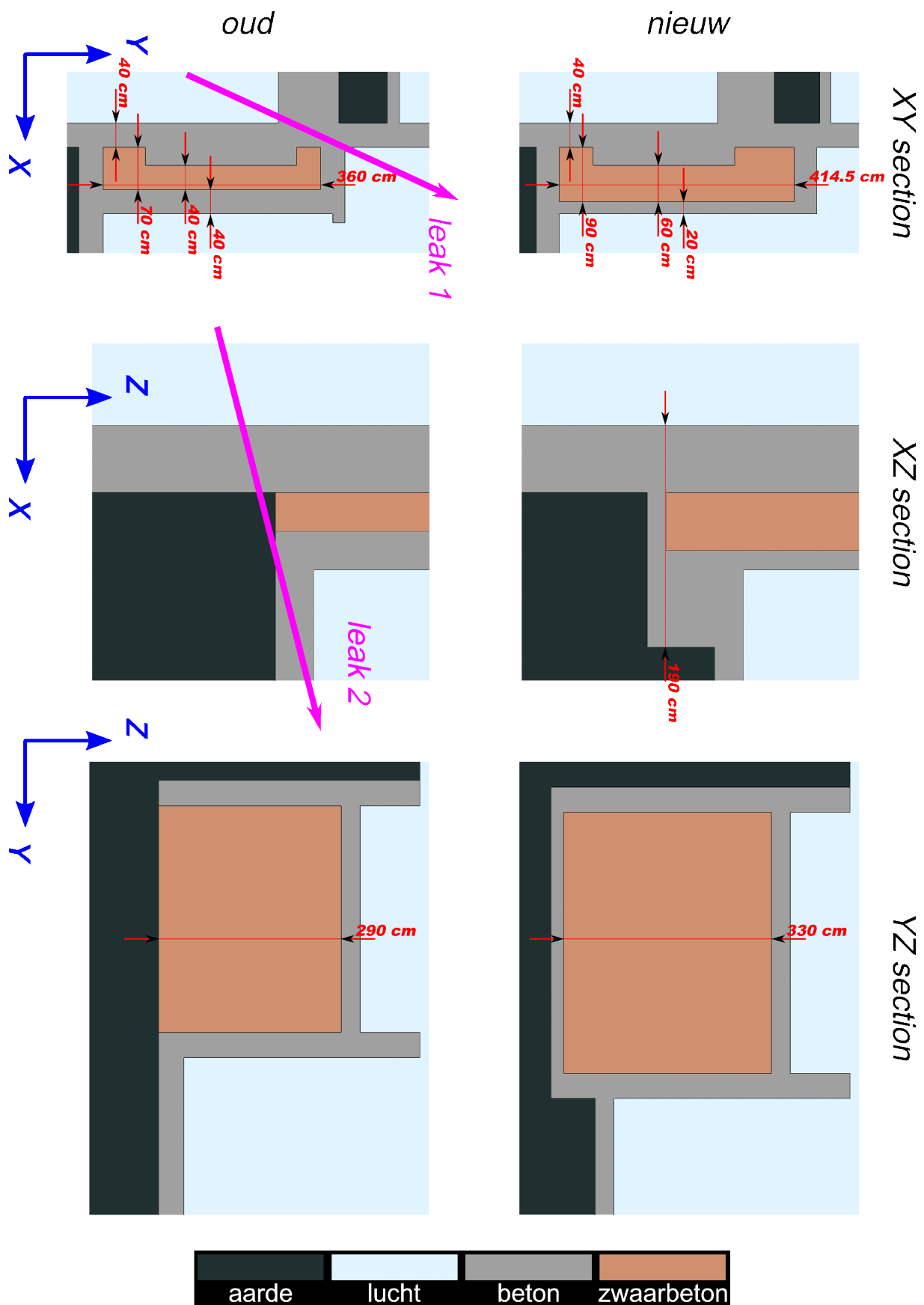
D.8: Jaardosisveld als berekend met FLUKA op 120 cm boven de vloer van het FELICE-laboratorium: rechtsonder in gradient, rechtsboven in vereenvoudigde kleurstelling (rood: > 1 mSv). Bij de simulatie is rekening gehouden met de bezettingsgraden weergegeven linksboven. Over de magenta stippellijnen in de grafiek rechtsonder aangeduid met pijlen is de dosis ter plaatse van het FELICE-laboratorium op drie snedes weergegeven in de grafiek linksonder. Het gemiddelde omgevingsdosisequivalent boven de FLARE kantoren bedraagt $93.6 \mu\text{Sv}$. Dat in het FELICE-laboratorium bedraagt $18.3 \mu\text{Sv}$ en dat gemiddeld over het hele gebouw bedraagt $15.9 \mu\text{Sv}$.

E Extrapolatie van de jaardosisvelden naar de terreingrens



E.1: Extrapolatie naar de terreingrens van het jaardosisveld op 120 cm boven het maaiveld als weergegeven in Afbeelding D.9. De gemiddelde dosis is berekend met FLUKA binnen de magenta rechthoek die zich van 27 m naar 35 m in de X-richting uitstrekt en van 12.5 m naar 35 m in de Y-richting uitstrekt en daarmee de FLARE-kantoren overdekt. De gemiddelde waarde is 134 μSv die op 20 m horizontaal vanaf de bron is neergelegd en vanwaaruit is in het horizontale vlak over het maaiveld is geëxtrapolleerd via een puntbron model. Links is de opwaartse richting van de stralingspluim weergegeven voor de horizontale uitbreiding weergegeven in de reeks plattegronden rechts.

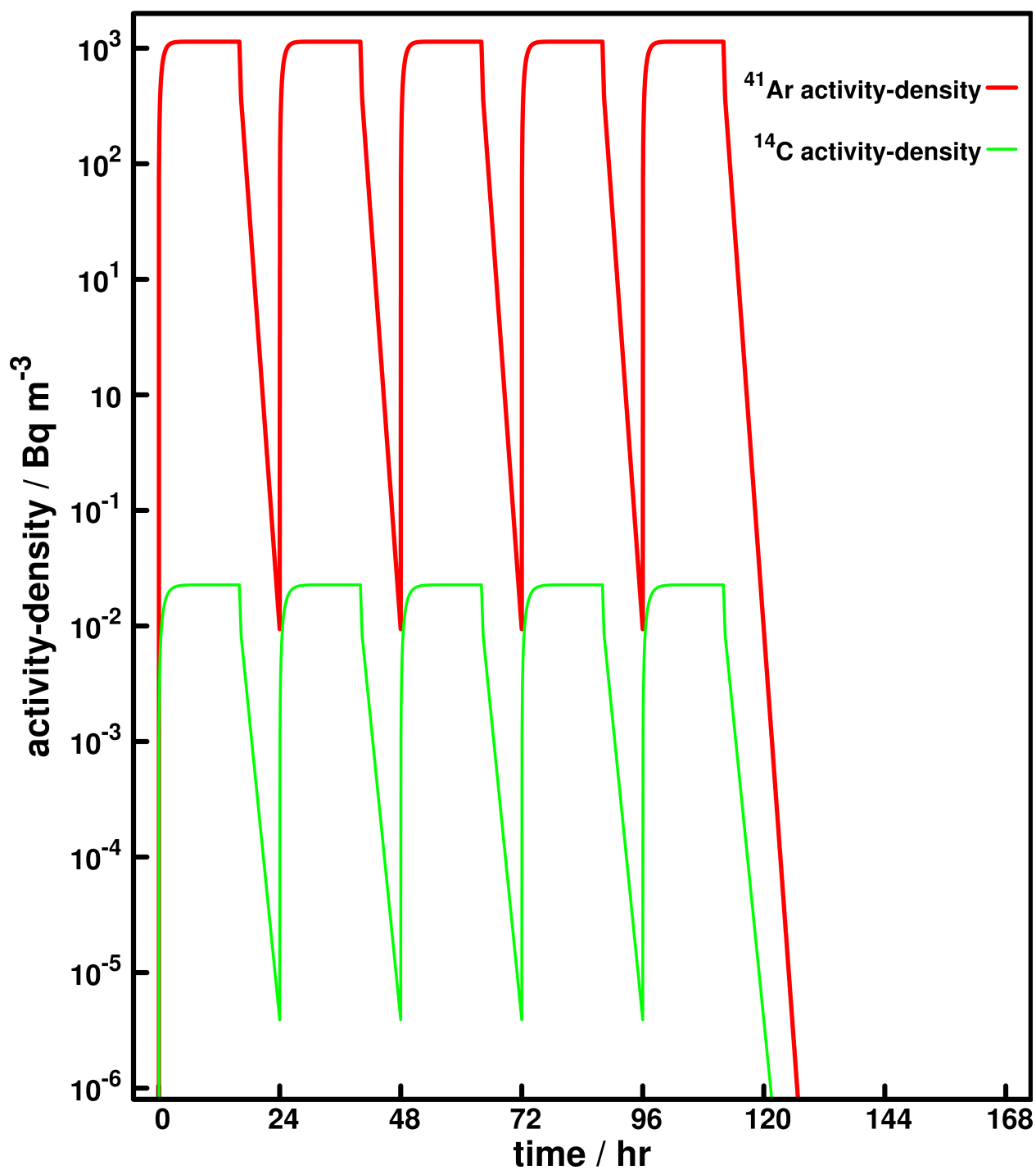
F Voorgenomen aanpassingen ter verzwaring van de stralingsafscherming in de richting van de FLARE kantoren



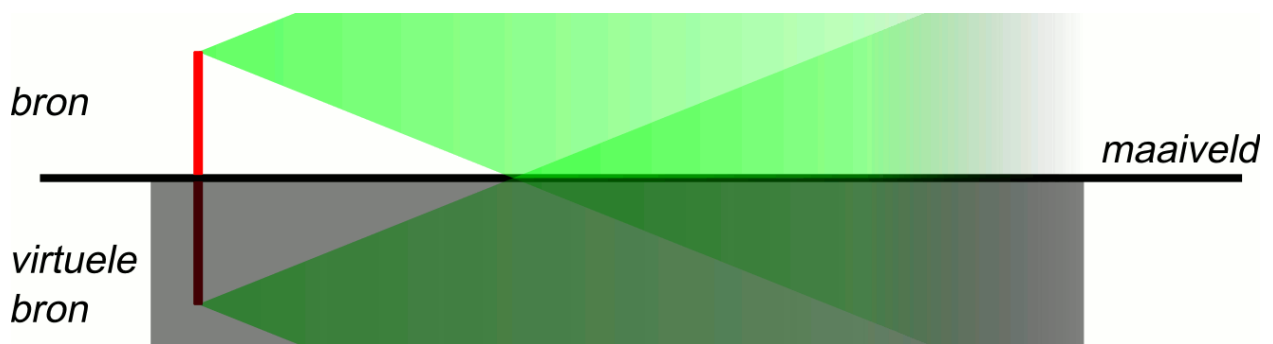
F.1: Voorgenomen wijzigingen om de stralingspluim in en rond de FLARE kantoren (zie Afbeeldingen D.4 t/m D.9) te reduceren. Links de oude situatie die is gebruikt bij de FLUKA simulaties van de dosisvelden; rechts de aanpassingen in de bouwtekeningen die in werkelijkheid gerealiseerd gaan worden.

G Activering van luchtbestanddelen in de FEL-bunker en gevolgen daarvan aan de terreingrens

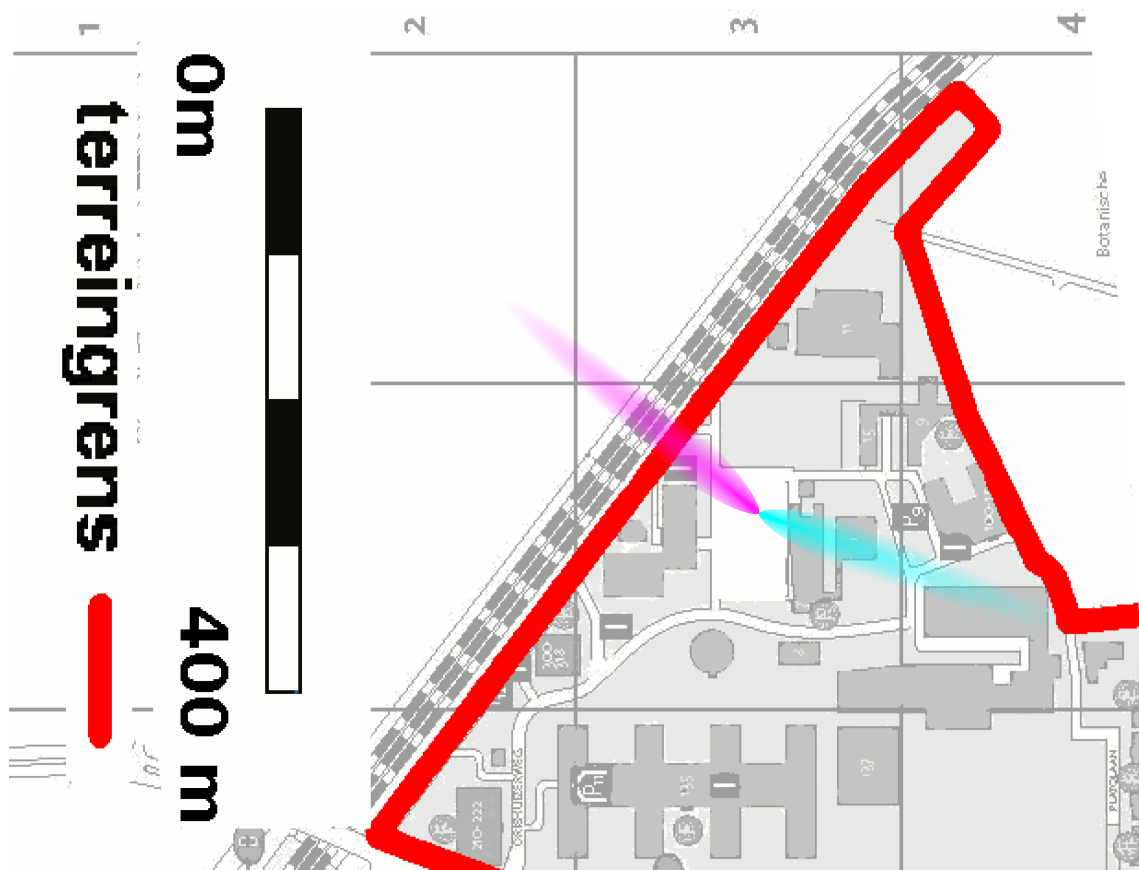
Activity-density of ^{41}Ar and ^{14}C in FEL-Vault



G.1: Verloop van de activiteitsdichtheid in de FEL-bunker gedurende één week FEL-bedrijf. Er wordt vijf achtereenvolgende dagen zestien uur per dag gewerkt, gevolgd door twee achtereenvolgende dagen van rust.



G.2: Model van verspreiding met gebruik van een virtuele bron om weerkaatsing van luchtverontreiniging aan het maaiveld te simuleren.



G.3: Indicatie van uitbreiding van met radionucliden verontreinigde lucht in door zuidwestenwind in de noordoost richting (magenta pluim): dit is de kleinste afstand, ongeveer 100 m, naar de terreingrens gerekend van het uitstootpunt. Bij noord-noordoostenwind drijft de pluim (cyaan) met radionucliden verontreinigde lucht door de sector waar de hogere jaardoses heersen als gevolg van de stralingslekken (zie Afbeeldingen D.4 t/m D.9) rond het trappenhuis. In deze richting is de kleinste afstand tot de terreingrens ongeveer 200 m.