

Bijlage III

Veiligheidsrapport 4,5 MeV APPEAL elektronenversneller

**Veiligheidsrapport 4.5 MeV APPEAL
elektronenversneller**

Advanced Picosecond Pulsed Electron Accelerator Laboratory

Technische Universiteit Delft
Chemical Engineering
Sectie Opto-electronic Materials
W. Roodhuyzen
M.J.W. Vermeulen
L.D.A. Siebbeles

5 december 2016

Inhoud

1	Inleiding	4
2	Beschrijving van de elektronenversneller	5
2.1	Bron	6
2.2	RF systeem	6
2.3	Experimentele stations	6
3	Locatie.....	7
3.1	Huidige Situatie.....	7
3.2	Nieuwe Situatie	7
3.2.1	Verhuizing naar het RID	7
3.2.2	Nieuwe situatie.....	7
3.3	Versnellerruimte.....	8
3.3.1	Indeling	8
3.3.2	Stralingsafscherming.....	9
3.3.3	Constructie	9
3.3.4	Versnelleropstelling	9
3.3.5	Toegang.....	9
4	Stralingsbescherming.....	11
4.1	Inleiding.....	11
4.2	Stralingsbronnen.....	11
4.2.1	Dosistempo van het klystron.....	11
4.2.2	Dosistempo van de trilholte	11
4.2.3	Dosistempo van de dump	12
4.2.4	Dosistempo van het sample.....	12
4.2.5	Neutronenproductie.....	13
4.3	Stralingsafscherming.....	13
4.4	Conditioneren	15
4.5	Doorvoeren.....	15
5	Milieu.....	16
5.1	Afvalverwerking.....	16
5.2	Geluidsproductie	16
5.3	Ozonproductie	16
6	Procedures en organisatie.....	17
6.1	Inleiding.....	17
6.2	Toegankelijkheid van de versnellerruimte	17
6.3	Bedieningsprocedure en veiligheidsvoorzieningen.....	17

Veiligheidsrapport van de APPEAL elektronenversneller

6.4	Veiligheidsorganisatie	18
6.5	Wijzigingsprocedure	18
6.6	Personeel	19
6.6.1	Inleiding	19
6.6.2	Versnelleroperator	19
6.6.3	Versnellergebruiker.....	19
7	Referenties	20
Bijlage A	Foto's en tekeningen RID-gebouw en versnellerruimte	21

1 Inleiding

In dit rapport worden de veiligheidsaspecten beschreven met betrekking tot het gebruik van een versnellerfaciliteit die picoseconde elektronenpulsen levert met een energie van 4.5 MeV. Deze versneller wordt nu gebruikt door de sectie Opto-electronic Materials (OM) in het oude gebouw van de afdeling Chemical Engineering, faculteit Technische Natuurwetenschappen van de TU Delft (Julianalaan 136, Delft). Voor dit gebouw vervalt eind 2017 de gebruikersvergunning. Daarom zal de versneller geplaatst worden in het nieuw te realiseren 'Advanced Picosecond Pulsed Electron Accelerator Laboratory' (APPEAL) in het Reactor Instituut Delft (RID, Mekelweg 15), dat ook onderdeel is van de faculteit Technische Natuurwetenschappen van de TU Delft.

Naast de wijziging van de locatie wordt ook het vermogen van de elektronenpulsen verhoogd. De versneller (zoals beschreven in hoofdstuk 3) wordt niet gewijzigd. Echter, op de huidige locatie aan de Julianalaan wordt het maximaal te gebruiken vermogen beperkt door geringe stralingsafscherming. Op de nieuwe locatie in het RID wordt het te gebruiken vermogen met een factor 100 verhoogd, omdat daarmee metingen met hogere gevoeligheid kunnen worden uitgevoerd. Het hogere vermogen komt door stand door de lading per puls te verhogen van 1 nC naar 10 nC en de puls frequentie van 10 Hz naar 100 Hz. Omdat de stralingsproductie hierdoor toeneemt is in de nieuwbouw een zwaardere afscherming noodzakelijk.

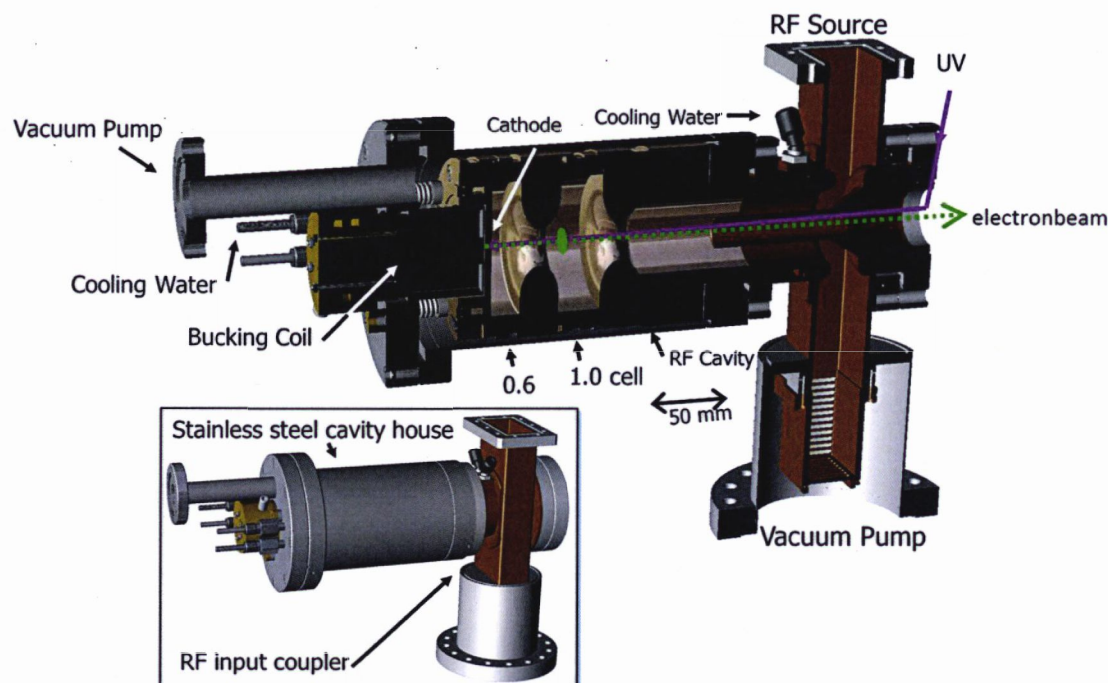
2 Beschrijving van de elektronenversneller

De lineaire radiofrequente (RF) elektronenversneller is in samenwerking met, en naar voorbeeld van de experimentele ‘micro-bunch’ versnelleropstelling¹ in de capaciteitsgroep Fysica en Toepassingen van Versnellers (FTV) van prof. M.J. van der Wiel (Technische Universiteit Eindhoven) gebouwd.

De elektronenversneller bestaat uit een bron (§3.1 en figuur 3-0), die een staande-golf radiofrequente trilholte is. De extreem korte elektronenpakketjes worden foto-elektrisch gegenereerd door de binnenkant van de achterwand van de trilholte (kathode) te bestralen met ultrakorte (100 fs) ultraviolette laserpulsen. Om elektronenpulsen met een tijdsduur korter dan 1 ps en een lading van 0.1 tot 10 nC te genereren is naast een laserpuls met voldoende energie een hoog versnelveld (100 MV/m) noodzakelijk. Het RF systeem genereert dit versnelveld (§3.2). Na het versnelproces is de energie van de elektronen ongeveer 4.5 MeV.

Nadat de elektronenpuls de trilholte heeft verlaten, wordt deze door een bundellijn naar een van de experimentele stations (§3.3) geleid. De elektronenpuls gaat daar door een dun sample. Bij de interactie tussen de elektronen en het sample vindt energieoverdracht plaats en daardoor worden er in het sample positieve en negatieve ladingen gegenereerd. Deze positieve en negatieve ladingen worden gekarakteriseerd als functie van de tijd na de elektronenpuls door gebruik te maken van een laserpuls, microgolven, of terahertzgolven. De elektronenpuls wordt na de passage door het sample op een bundelstop gestopt.

In de volgende paragrafen worden de diverse deelsystemen beschreven.



Figuur 3-0 De bron

2.1 Bron

De bron is een 1.6-cel RF trilholte (2.998 GHz) vervaardigd uit zuurstofvrij koper (OFHC). De trilholte is dusdanig gedimensioneerd dat het versnelveld in π -mode opereert, dat betekent dat het TMB_{010B}-veldpatroon van beide cellen precies π faseverschil hebben. Het RF-vermogen wordt axiaal ingekoppeld via de in/uitgang van de trilholte, waardoor de trilholte perfect cilinder symmetrisch is.

Foto-emissie van elektronen vindt plaats vanaf het kathodeoppervlak, dat uit hetzelfde OFHC kopermateriaal bestaat als de rest van de trilholte. Om de elektronen foto-elektrisch vrij te maken uit de kathode wordt 266 nm ultraviolet licht gebruikt. Dit licht wordt gegenereerd met een femtoseconde lasersysteem (Legend, Coherent Inc.) bestaande uit een Ti:S (titaan:saffier) oscillator, een regeneratieve Ti:S versterker en een derde-harmonische generator. Dit systeem produceert 266 nm pulsen met een duur van 100 fs met energie van maximaal 0.5 mJ per puls, bij een repetitiefrequentie van 200 Hz.

De veiligheidsaspecten rond het gebruik van dit lasersysteem is apart beschreven in een laserveiligheidsrapport⁴

2.2 RF systeem

Het RF systeem levert de hoge elektrische veldsterkte die noodzakelijk is om de elektronen te versnellen. Het voornaamste onderdeel hiervan is het klystron. Dit is een RF versterker die bij een frequentie van 2.998 GHz een piekvermogen van 10 MW produceert. Het klystron bestaat uit een vacuümbuis met 4 secties: een thermisch elektronenkanon, een buncher (ingangsignaal stuurmogelijkheid), driftsectie en een output trilholte. Het RF vermogen wordt als volgt versterkt. Er wordt een modulator gebruikt om de hoogspanning te genereren waarmee elektronen worden versneld. In de buncher wordt de snelheid van deze elektronen gemoduleerd. Doordat snellere elektronen de langzamere inhalen in de driftsectie wordt de snelheidsmodulatie omgezet in een stroommodulatie. De output trilholte staat op de plek waar de stroommodulatie maximaal is. Deze output trilholte koppelt het RF veld uit naar een microgolfpijp. Vandaar gaan de microgolven naar de versneller. De efficiëntie van het klystron is bijna 50%.

De hoogspanning die de elektronen in het klystron versnelt bestaat uit pulsen met een duur tot 4.5 μ s, die worden gegenereerd door de modulator. Er wordt een solid-state modulator gebruikt, waarin met behulp van halfgeleiders een puls van 800 - 1350 V gemaakt wordt, die de primaire zijde van een transformator aanstuurt. De transformator genereert vervolgens een secundaire puls van 130 kV tot maximaal 170 kV.

2.3 Experimentele stations

In het experimentele station gaat de elektronenpuls door een dunne laag (typisch < 1 mm) van het te onderzoeken opto-elektronische materiaal, waarvan voorbeelden in H2 zijn genoemd. Daarna wordt de elektronenbundel gestopt in een bundelstop. Op de plaats waar de elektronenbundel het kleinste en snelste is (op ongeveer 1 meter van de kathode) zullen meerdere meetplaatsen zijn. Zowel diagnose- als sampleplaatsen. Het aansturen van de bundel naar een plaats gebeurt door middel van een afstembare afbuigmagneet.

3 Locatie

3.1 Huidige Situatie

De versneller is reeds in 2006 gerealiseerd in de afdeling Chemical Engineering van de TU Delft aan Julianalaan 136. Daar mag de versneller opereren volgens de omschrijving in de reeds verleende vergunning⁵. De pulsen hebben een lading van maximaal 1 nC en een frequentie van 10 Hz bij een energie van 4.0 MeV.

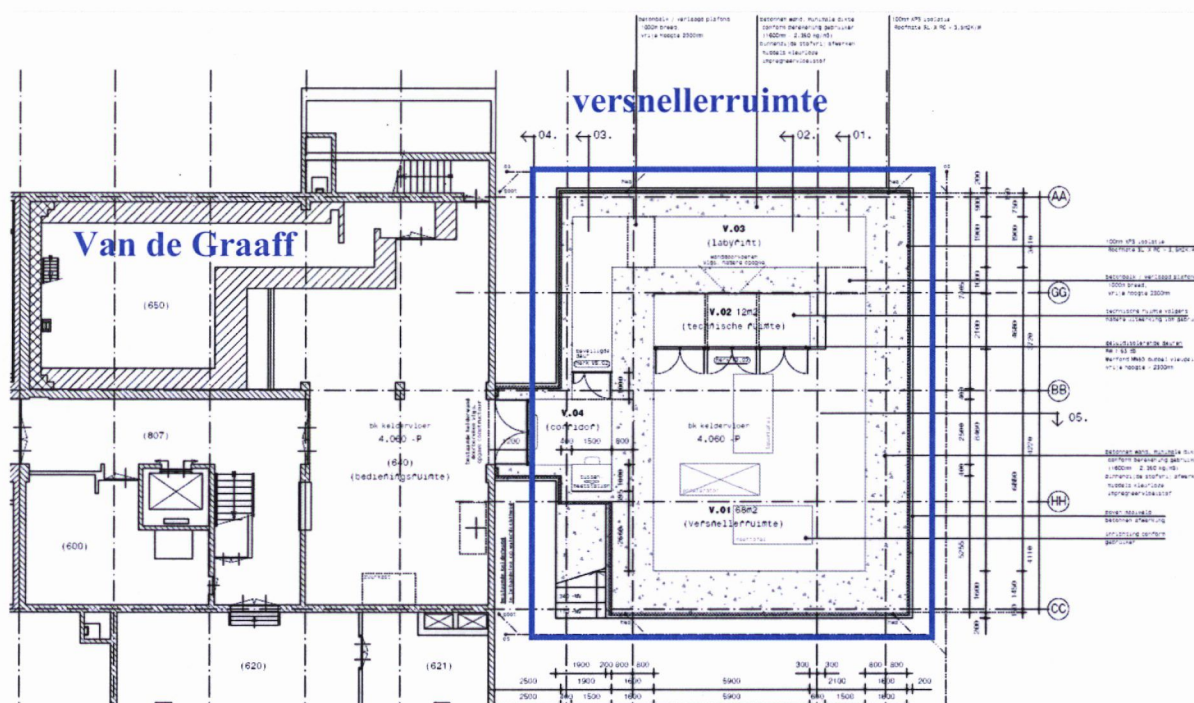
3.2 Nieuwe Situatie

3.2.1 Verhuizing naar het RID

Sinds 1 juli 2016 is de afdeling Chemical Engineering verhuisd naar het nieuwe TNW Zuid gebouw aan de van der Maasweg 9 te Delft. De versneller gaat om gebouwtechnische en stralingshygiëne redenen naar het RID terrein, omdat dit het concentratie punt is voor stralingsfaciliteiten. De te gebruiken maximale lading en puls frequentie zullen verhoogd worden tot respectievelijk 10 nC en 100 Hz, omdat dit de meetgevoeligheid tijdens de experimenten verhoogd. De versneller blijft fysiek identiek aan de huidige situatie.

3.2.2 Nieuwe situatie

De picoseconde gepulste elektronenversneller (APPEAL) zal worden gerealiseerd in een versnellerruimte, gedeeltelijk onder het maaiveld, bij het RID. De locatie is voorzien op het einde van de ‘Oostvleugel’ waar ook de Van de Graaff versneller van de sectie Opto-electronic Materials staat, zie Figuur 4-0. Daar wordt de muur op kelderniveau doorgebroken om een aansluiting te verkrijgen met de versnellerruimte.



Figuur 4-0 Plattegrond huidige situatie met versnellerruimte

Veiligheidsrapport van de APPEAL elektronenversneller

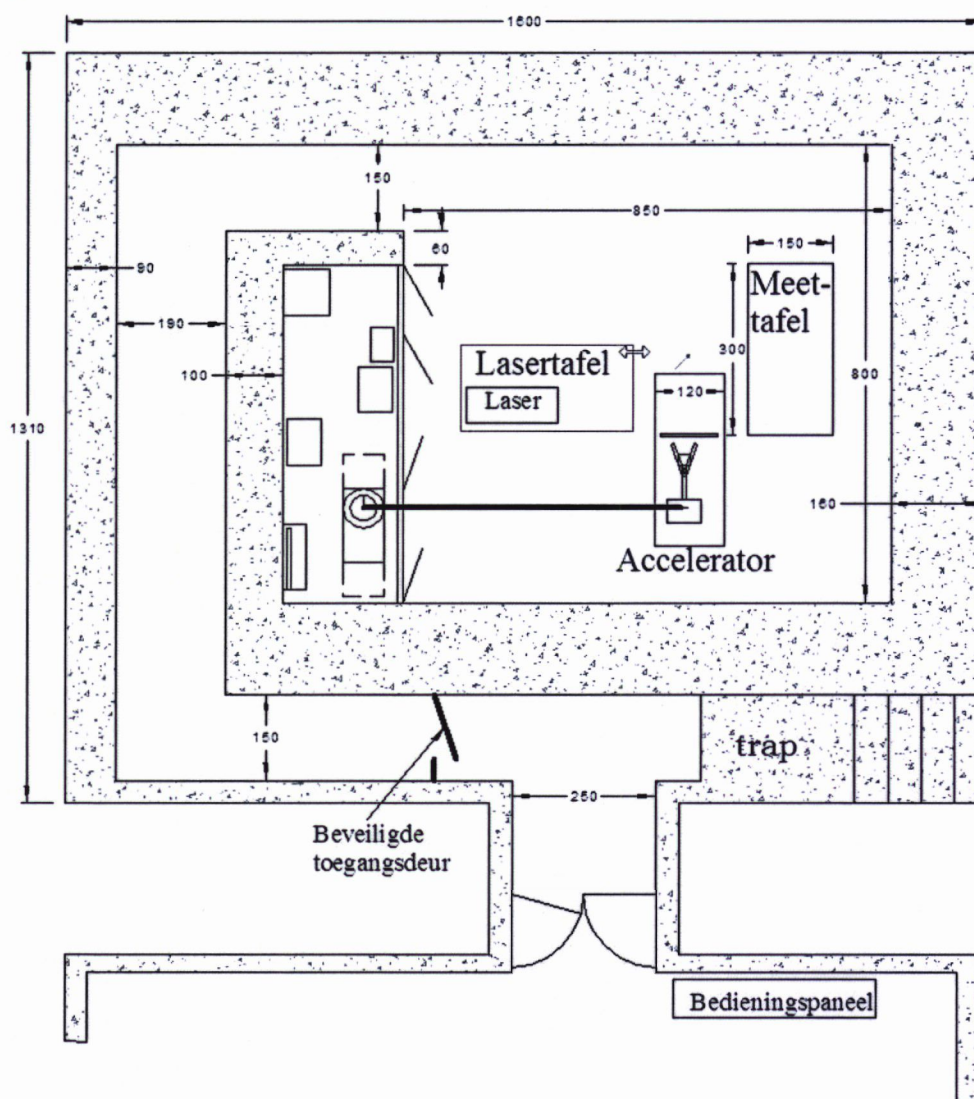
De versnellerruimte zal bestaan uit de versnellerruimte, een technische ruimte (opstelplaats voor alle apparatuur die lawaai en/of warmte produceert), een labyrint en een corridor, die als doorgangsruijme fungeert, zie Figuur 4-0.

De ruimte waar het bedieningspaneel voor de versneller komt te staan, is voorzien in de ruimte waar nu ook het bedieningspaneel van de Van de Graaff versneller staat. Deze ruimte wordt functioneel gesplitst in een gedeelte voor de Van de Graaf versneller en een gedeelte voor de APPEAL versneller.

3.3 Versnellerruimte

3.3.1 Indeling

Het gedeelte tussen de Beveiligde Toegangsdeur en de doorgebroken muur van het bestaande gebouw is als Voorkamer of corridor benoemd. Metingen worden standaard bij het bedieningspaneel gedaan. De stralingsdosis voor de Beveiligde Toegangsdeur is minder dan 1 mSv per jaar. De ruimte na de Beveiligde Toegangsdeur en de binnenkomst in de grote versnellerruimte heet het Labyrint. De Apparatenruimte is afgeschermd met een geluidswerende wand. Hier zijn alle lawaai- en warmte producerende apparaten geplaatst om de gevoelige metingen niet te verstoren.



Figuur 4-1 Plattegrond van versnellerruimte.

3.3.2 Stralingsafscherming

Zoals genoemd in de inleiding is een zwaardere afscherming noodzakelijk voor het gebruik van de versneller bij een hoger vermogen. In het kader van de stralingsbescherming (onderbouwing in §5) zijn de volgende betondiktes aangehouden: (zie ook figuur 4-1)

- De primaire stralingsafscherming wordt gevormd door drie betonnen muren met dikte van 1.6 m.
- Het betonnen dak begint op 3.4 m hoogte van de vloer en heeft een dikte van 1.3 m.
- Het betonnen labirint bestaat uit een scheidingsmuur met dikte van 1 m en een buitenmuur met dikte van 0.9 m. Het labirint heeft twee bochten van 90 graden.

De versnellerruimte wordt beveiligd door middel van een interlock-systeem dat geïntegreerd is in de bediening van de APPEAL versneller. Dit systeem sluit uit dat de versneller in bedrijf kan worden gezet als de beveiligde toegangsdeur niet dicht en vergrendeld is. De bedieningsleutel voor versnellerbedrijf en de sleutel voor de beveiligde toegangsdeur zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden.

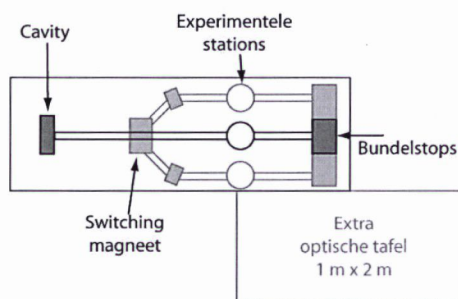
3.3.3 Constructie

De constructie is onder toezicht van een architect en FMVG getoetst op belastbaarheid, alsmede constructieve en wettelijke regelgeving.

Het versnellerlaboratorium bestaat uit de versnellerruimte en labirint, waarvan een schematische weergave is gegeven in Figuur 4-1. De versneller wordt niet in het midden geplaatst maar dichterbij de west muur met de elektronenbundel in oostwaartse richting.

3.3.4 Versnelleropstelling

In de versnellerruimte, staat de elektronenversneller (zie Figuur 3-2). De versnelleropstelling heeft een maximale afmeting van 1 m x 3 m. Het hart van de elektronenbundellijn bevindt zich op ongeveer 1.1 m hoogte vanaf de vloer in het horizontale vlak. Rondom de elektronenversneller lopen ook nog verschillende laserbundels. Tevens bevindt zich naast de bundellijn een optische tafel waarop verschillende lasersystemen en een tafel voor de detectiesystemen, voor de bundelanalyse en experimenten staan opgesteld.



Figuur 3-2: Schets van de versnelleropstelling.

3.3.5 Toegang

De toegang van personen en goederen verloopt via het labirint, dat afgesloten is met een beveiligde deur. Omdat er een toegangsbeperking is voor de versnellerruimte, geldt, op grond van stralingsbescherming en laserveiligheid, dat de ontgrendeling doormiddel van sleutels

Veiligheidsrapport van de APPEAL elektronenversneller
geregeld wordt. Deze sleutels zijn in het beheer van de SBD (Straling BeschermingsDienst) van
het RID. De beveiligde deur is bovendien onderdeel van het interlock-systeem voor zowel de
elektronenversneller als de laserbundels in de versnellerruimte.

4 Stralingsbescherming

4.1 Inleiding

Bij het ontwerp van de afscherming wordt het algemene principe van ALARA, ‘as low as reasonable achievable’, in acht genomen om tot een zo optimaal mogelijke situatie rond de APPEAL elektronenversneller te komen. Door aanwezigheid van metaal van het vacuum systeem rondom de elektronenbundel en het feit dat de elektronen uiteindelijk stoppen in een dump is er rondom de versneller alleen remstraling aanwezig. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen remstraling die direct via een rechte lijn uit de afscherming komt (directe straling) en straling die één of meerdere keren van richting veranderd is door verstrooiing op de afscherming. De directe straling wordt door de betonnen muren van de versnellerruimte afgeschermd, terwijl de verstrooide straling ook door het labrynt en het dak worden afgeschermd.

Voor de afschermingsberekeningen is gebruik gemaakt van het meest recente rapport van het NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) voor deeltjesversneller faciliteiten: NCRP Report No. 144¹, hierna NCRP-144 genoemd. De berekende waarden voor het equivalente dosistempo zijn getoetst aan de maximaal toelaatbare waarden dosistempo die genoemd zijn in het Besluit stralingsbescherming³.

4.2 Stralingsbronnen

De versneller kent vier stralingsbronnen:

- het klystron, hierin worden elektronen versneld tot een relatief lage energie van 170 keV
- de trilholtte, het RF veld genereert een achtergrondstroom van elektronen met energie van maximaal 4.5 MeV
- het sample, een deel van de energie van de elektronen wordt hierin omgezet in remstraling
- de koolstof dump, hierin komen de elektronen tot stilstand en wordt hun energie omgezet in remstraling

4.2.1 Dosistempo van het klystron

Uit metingen bij een maximale pulsduur en een frequentie van 100 Hz is gebleken dat het maximale dosistempo rondom het met lood afgeschermd klystron gelijk is aan $\dot{D}_{\text{klystron}} = 4 \cdot 10^{-6}$ Gy/h.

4.2.2 Dosistempo van de trilholtte

De achtergrondstraling van de trilholtte is te meten wanneer er geen foto-elektronen geproduceerd worden (de laser staat dan uit), terwijl de RF energie wel aanwezig is om hoogspanning te genereren. Bij een maximale pulsduur en een frequentie van 100 Hz is vastgesteld dat het dosistempo op 1 m afstand van de trilholtte gelijk is aan $\dot{D}_{\text{trilholtte}} = 0.04$ Gy/h.

4.2.3 Dosistempo van de dump

Omdat het dosis tempo van de dump bij een maximaal vermogen van 10 nC en 100 Hz nog niet gemeten is wordt dit berekend. De versneller zal elektronenpulsen met de volgende maximale karakteristieken gaan leveren:

- energie per elektron $E = 4.5 \text{ MeV}$
- lading per puls $Q = 11 \text{ nC}$ (10 nC foto-elektronen en 1 nC achtergrondstroom)
- repetitiefrequentie $F = 100 \text{ Hz}$.

Het dosistempo van remstraling ten gevolge van het tot stilstand komen van de elektronen in de dump is gelijk aan:

$$\dot{D} = x^{-2} \cdot A \cdot P ,$$

met x de afstand tot de dump, A een factor die de efficiëntie van omzetting in remstraling in rekening brengt en P het vermogen van de elektronen die in de dump terecht komen (energie van alle elektronen per tijdseenheid). Figuur 3.5 van het NRPC-144 rapport¹ levert voor de factor A voor elektronen met een energie van 4.5 MeV die tot stilstand komen in lood (hoge Z -waarde):

$$A_{vw} = 0.77 \text{ Gy h}^{-1} \text{ W}^{-1} \text{ m}^2 \quad \text{voorwaarts in het verlengde van de elektronenbundel}$$

$$A_{zw} = 0.09 \text{ Gy h}^{-1} \text{ W}^{-1} \text{ m}^2 \quad \text{zijwaarts loodrecht op de bundel.}$$

Het bundelvermogen is gelijk aan $P = E \cdot F \cdot N = P = E \cdot F \cdot Q/e$ met N het aantal elektronen per puls en e de elementaire lading.

Met bovenstaande gegevens wordt op 1 m afstand vanaf de dump gevonden:

Dosistempo voorwaarts

$$\text{t.g.v. de fotoelektronen} \quad \dot{D} = 1^{-2} \cdot 0.77 \cdot 4.5 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \text{ Gy/h} = 3.46 \text{ Gy/h}$$

$$\text{t.g.v. de achtergrondstroom} \quad \dot{D} = 1^{-2} \cdot 0.77 \cdot 4.5 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \text{ Gy/h} = 0.35 \text{ Gy/h}$$

$$\text{Totaal dosistempo voorwaarts} \quad \dot{D}_{\text{lood,vw}} = 3.8 \text{ Gy/h}$$

Dosistempo zijwaarts

$$\text{t.g.v. de fotoelektronen} \quad \dot{D} = 1^{-2} \cdot 0.09 \cdot 4.5 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \text{ Gy/h} = 0.41 \text{ Gy/h}$$

$$\text{t.g.v. de achtergrondstroom} \quad \dot{D} = 1^{-2} \cdot 0.09 \cdot 4.5 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \text{ Gy/h} = 0.04 \text{ Gy/h}$$

$$\text{Totaal dosistempo zijwaarts} \quad \dot{D}_{\text{lood,zw}} = 0.45 \text{ Gy/h}$$

Bij de versneller stoppen de elektronen in lichtere Z -materialen dan lood ($Z_{\text{lood}} = 82$). Het overgrote deel van de elektronen komt terecht in de koolstof dump ($Z_{\text{koolstof}} = 6$), maar door verkeerd uitlijnen kunnen elektronen in onderdelen van koper of roestvrijstaal (ijzer) terecht komen ($Z_{\text{koper}} = 29$, $Z_{\text{ijzer}} = 26$). In het meest ongunstige geval is alle remstraling het gevolg van elektronen in koper dat 45% van het dosistempo van lood levert. De maximale dosistempo's zijn dan op een afstand van 1 m vanaf de dump gelijk aan:

$$\dot{D}_{\text{dump,vw}} = 0.45 \cdot 3.8 \text{ Gy/h} = 1.7 \text{ Gy/h}$$

$$\dot{D}_{\text{dump,zw}} = 0.45 \cdot 0.45 \text{ Gy/h} = 0.2 \text{ Gy/h}$$

4.2.4 Dosistempo van het sample

Het sample heeft een maximale dikte van $d = 1 \text{ mm}$ en zet een klein deel van de energie van de elektronenpuls om in remstraling. De fractie van de doorgelaten energie, ofwel de transmissie, T , is gelijk aan:

$$T(d) = 10^{-d/TVL}$$

Veiligheidsrapport van de APPEAL elektronenversneller

met *TVL* (tenth-value layer) de dikte waarbij het dosistempo met een factor van 10 is afgenomen. De zwaarste samples die onderzocht zullen worden zijn anorganische halfgeleiders. Voor deze materialen is een bovengrens van de *TVL* gegeven door die van lood (55 mm). Met de *TVL* van lood wordt een bovengrens gevonden van het dosistempo van remstraling op 1 m afstand vanaf het sample gelijk aan:

$$\dot{D}_{\text{sample}} = \dot{D}_{\text{dump,vw}} (1-T) = 1.7 \cdot (1-10^{-1/55}) \text{ Gy/h} = 0.07 \text{ Gy/h.}$$

4.2.5 Neutronenproductie

Remstralingsfotonen kunnen in een materiaal neutronen produceren via het kernfoto-effect. Voor slechts twee materialen is de drempelwaarde voor het kernfoto-effect beneden de maximale van de remstralingsfotonen die door de 4.5 MeV elektronen uit de versneller gevormd kunnen worden. Dit zijn de isotopen D (^2H) en ^9Be met een drempelwaarde van respectievelijk 2.3 MeV en 1.7 MeV. De neutronenproductie door deze isotopen wordt verwaarloosd, omdat ze in zeer geringe hoeveelheid voorkomen (0.015% D) of niet in de opstelling gebruikt worden (Be).

4.3 Stralingsafscherming

Volgens de resultaten in paragraaf 5.2 is het maximale totale dosistempo van het klystron, de trilholte, het sample en de dump gelijk aan $\dot{D}_{\text{intern}} = 1.8 \text{ Gy/h}$ in voorwaartse richting op 1 m afstand van de dump. In deze paragraaf wordt beschreven hoe deze straling wordt afgeschermd, zodat het equivalente dosistempo buiten de versnellerruimte minder is dan $\dot{H}_{\text{extern}} = w_R \cdot \dot{D}_{\text{extern}} = 1 \text{ mS}$ per jaar, met de stralingswegingsfactor voor remstraling $w_R = 1$. Uitgaande van 1650 bedrijfsuren per jaar komt dit overeen met een maximaal dosistempo tijdens het bedrijf van de versneller gelijk aan $\dot{D}_{\text{extern}} = 0.6 \text{ } \mu\text{Gy/h}$. Om deze waarde te halen worden de volgende restricties nageleefd met betrekking tot de locatie van de versneller binnen de versnellerruimte:

- de versneller met de dump staat minimaal $l = 2 \text{ m}$ van de betonnen binnenwand af
- de straling mag niet direct in het labrynt kunnen komen
- de elektronenbundel is horizontaal opgesteld en blijft minstens 2 m onder het plafond.

Voor de betonnen muur met een *TVL* van 298 mm en dikte $d = 1.6 \text{ m}$ levert dit een dosistempo buiten de versnellerruimte gelijk aan:

$$\dot{D}_{\text{extern}} = (l + d)^{-2} \cdot 10^{-d/TVL} \cdot \dot{D}_{\text{intern}} = (2 + 1.6)^{-2} \cdot 10^{-1600/298} \cdot 1.8 \text{ Gy/h} = 0.59 \text{ } \mu\text{Gy/h}$$

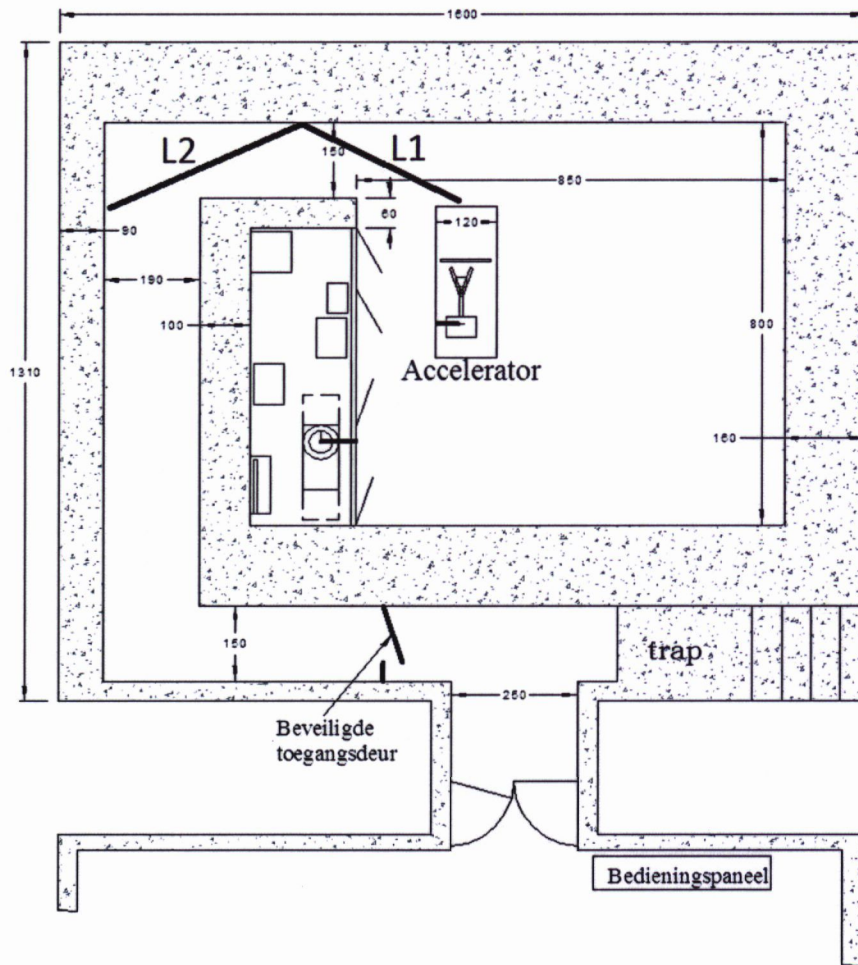
Hiermee wordt voldaan aan de eis dat het equivalente dosistempo buiten de versnellerruimte minder is dan 1 mS per jaar.

Remstraling die op het beton terecht komt wordt verstrooid en kan in het labrynt terecht komen. Volgens het NCRP-144 rapport¹ kan het dosistempo in het labrynt berekend worden volgens:

$$\dot{D}_{\text{labrynt}} = \alpha \cdot A_{\text{vw}} \cdot P \cdot O \cdot L_1^{-2} \cdot L_2^{-2}$$

met het differentiële geabsorbeerde dosis albedo $\alpha = 0.02$ uit Fig. 4.14b van het NCRP-144¹ rapport, L_1 de afstand van de dump tot het oppervlak O waar verstrooiing plaatsvindt en L_2 de afstand tot het punt waarvoor het dosistempo berekend wordt. Voor deze berekening is uitgegaan van de meest ongunstige positie van de dump met inachtneming van de eerder genoemde restricties.

Veiligheidsrapport van de APPEAL elektronenversneller



Figuur 5.1: *Verstrooiing van de dump naar het labrynt*

Met een oppervlak $O = 1.5 \text{ m} \times 2.3 \text{ m} = 3.45 \text{ m}^2$, $L_1 = 4 \text{ m}$ en $L_2 = 4 \text{ m}$ wordt dan gevonden:

$$\dot{D}_{\text{labyrint}} = 0.02 \cdot 1.7 \cdot 3.45 \cdot 4^{-2} \cdot 4^{-2} \text{ Gy/h} = 458 \text{ } \mu\text{Gy/h}$$

De straling in het labrynt wordt afgeschermd door een muur van 0.9 m beton met $TVL = 298 \text{ mm}$. Buiten de muur is het dosistempo dan gelijk aan $10^{-900/298} \cdot 458 \text{ } \mu\text{Gy/h} = 0.44 \text{ } \mu\text{Gy/h}$ hetgeen kleiner is dan de hierboven gestelde maximale waarde van $\dot{D}_{\text{extern}} = 0.6 \text{ } \mu\text{Gy/h}$

Voordat de straling in de buurt van de toegangsdeur komt moet het minstens 10 m afleggen en nogmaals gereflecteerd worden. Het dosistempo bij de toegangsdeur na verdere verstrooiing zal hierdoor lager zijn dan $0.08 \text{ } \mu\text{Gy/h}$.

Het dosistempo $\dot{D}_{\text{dump, zw}}$ wordt radiaal rondom de dump uitgezonden, dus ook omhoog naar het dak. Deze straling heeft een lagere energie, en daardoor ook een lagere TVL van 255 mm. Het dak heeft een dikte van 1.3 m, bij een bundel hoogte van 1.4 m (dat is 2 m onder het dak) geeft dat het volgende dosistempo:

$$\dot{D}_{\text{extern}} = x^{-2} \cdot 10^{-d/TVL} \cdot A_{\text{vw}} \cdot P = 3.3^{-2} \cdot 10^{-1300/255} \cdot 0.2 = 0.15 \text{ } \mu\text{Gy/h}$$

Uit bovenstaande volgt dat de betonnen muren en het betonnen dak van de versnellerruimte en het labrynt voldoende stralingsafscherming leveren, zodat overal buiten de versnellerruimte het dosistempo lager is dan $\dot{D}_{\text{extern}} = 0.6 \text{ } \mu\text{Gy/h}$, ofwel 1 mS per jaar.

Bij de eerste inbedrijfstelling en na verandering van de locatie van de versneller zal de SBD metingen verrichten rondom de versnellerruimte en controleren of de gemeten waarden van het

Veiligheidsrapport van de APPEAL elektronenversneller

dosistempo beneden de berekende waarden in dit rapport blijven. Als dit niet het geval is, zullen de afscherming en/of de maximale bedrijfsparameters van de elektronenversneller worden aangepast.

4.4 Conditioneren

De eerste keer dat een nieuwe trilholte wordt aangedreven met RF, wordt een conditioneringsprocedure opgestart. Dit houdt in dat de trilholte belast wordt met zachte RF ontladingen bij veldsterktes dicht tegen de waarde van spontane doorslag. Die doorslagen worden geïnduceerd door oneffenheden op de binnenwand waardoor lokaal de veldsterktes zeer hoog kunnen zijn. Een zachte doorslag zorgt ervoor dat die kleine oneffenheden verdampen zonder de schade die bij een harde doorslag ontstaat. Het oppervlak van de trilholte wordt door dit conditioneren steeds gladder en schoner, zodat het steeds hogere veldsterktes aankan. Een conditioneringsprocedure voor traditionele RF versnellers duurt typisch enkele uren.

Het kathode oppervlak in de trilholte kan langzaam verouderen door de invloed van de ultraviolette laserpulsen waarmee elektronen worden vrijgemaakt. Daardoor kan het nodig zijn ongeveer eens per jaar het kathode oppervlak te vernieuwen. Na terugplaatsing is weer een conditioneringsprocedure nodig.

De stralingsproductie tijdens het conditioneren zal lager zijn dan de stralingsproductie bij normaal gebruik.

4.5 Doorvoeren

Er zijn diverse doorvoeren door de muren voor lucht (grotere diameters), koelwaterleidingen, kabelgoten voor elektra en andere voorzieningen en een meetdoorvoer. De meetdoorvoer is een gat van 5 cm onder 45 graden van boven in de versnellerruimte naar 1 meter hoogte op de meetplek door de 160 cm muur. De doorvoeren zijn op minimaal 260 cm boven de vloer. Dan is het voor straling vanaf de dump niet mogelijk om zonder twee maal te verstrooien in het labirint te komen.

5 Milieu

5.1 Afvalverwerking

De activatie van materialen in de APPEAL versneller is alleen mogelijk via neutronen productie zoals beschreven in § 5.2.5. Daarom wordt er geen deuterium of beryllium gebruikt in de opstelling of in experimenten. Zodoende is de afvoer van geactiveerd materiaal niet van toepassing.

5.2 Geluidsproductie

Aangezien het ventilatie systeem van de versnellerruimte aangesloten wordt op de bestaande infrastructuur van het gebouw zal er geen extra geluid geproduceerd worden.

5.3 Ozonproductie

Remstraling produceert ozon in de lucht. Voor ozon is de maximaal toelaatbare concentratie (threshold limited value, *TLV*) gelijk aan 0.1 ppm. Het productie tempo (p) van ozon bij elektronenenergieën kleiner dan 50 MeV wordt gegeven door:

$$p = 1.7 \cdot 10^{-7} \cdot L \cdot P \text{ l/min}$$

met L de afstand van de fotonenbundel door de ruimte in meters (maximale lengte ongeveer 5 m) en P het bundelvermogen in W, zodat:

$$p = 1.7 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 4.5 \text{ l/min} = 3.8 \cdot 10^{-6} \text{ l/min.}$$

De verzadigingsconcentratie C_s bij continu bedrijf van de versneller en het extreme geval van geen enkele verversing van de ruimte (stilstaande lucht) wordt gegeven door:

$$C_s = p \cdot T / V$$

met T de vervaltijd in minuten en V het volume van de ruimte in liters. Voor ozon geldt dat $T = 50$ minuten. De versnellerruimte (zonder labyrint) heeft een volume van ruim $2 \cdot 10^5$ L ($8.5 \cdot 8 \cdot 3.3 \cdot 1000$ – volume van apparatuur ≈ 24400 L). De verzadigingsconcentratie bij een bundelvermogen van 4.5 W in een niet geventileerde ruimte is dan:

$$C_s = 3.8 \cdot 10^{-6} \cdot 50 / 2 \cdot 10^5 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ ppm}$$

In deze conservatieve schatting is de concentratie ongeveer 1% van de drempelwaarde zonder de aanwezige luchtverversing in acht te nemen. Verder is de aanname een hoge Z -waarde van het stopping-materiaal in de dump. In de praktijk wordt koolstof gebruikt. Dit resulteert in een waarde ruim onder de drempelwaarde. Daarnaast zal een gemiddelde meting niet langer dan 50 minuten duren.

6 Procedures en organisatie

6.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de veiligheidsaspecten en procedures met betrekking tot het bedienen van de APPEAL elektronenversneller. De elektronenversneller wordt uitsluitend bediend door personen die daartoe bevoegdheid hebben verkregen van de stralingsbeschermingsdienst (SBD) van het RID. Deze personen zijn genoemd in de interne vergunning en hun namen staan vermeld bij de ingang van de versnellerruimte.

6.2 Toegankelijkheid van de versnellerruimte

Een volautomatisch stoplicht bij de ingang van de versnellerruimte geeft de toestand van de versneller aan. Het stoplicht is rood als de versneller in bedrijf is, oranje als deze in stand-by toestand is en groen als de versneller is uitgeschakeld.

Tijdens bedrijf van de versneller zijn de modulator en het klystron aangeschakeld en kunnen elektronenpulsen worden gegenereerd. In deze toestand is niemand aanwezig in de versnellerruimte. De versnellerruimte is dan ontoegankelijk gemaakt door middel van een met slot vergrendelde deur.

In de stand-by toestand is de hoogspanning van de modulator uitgeschakeld waardoor het niet mogelijk is RF-vermogen te generen en elektronen te versnellen. In deze toestand is toegang tot de versnellerruimte uitsluitend toegestaan door de versnelleroperator (zie §7.6.2) of onder diens begeleiding. Deze status is bedoeld om snel een handeling bij de elektronenversneller te kunnen verrichten, zoals het wisselen van een sample.

In uitgeschakelde toestand van de versneller (modulator en klystron zijn dan uitgeschakeld) kunnen andere benodigde systemen (zoals vacuümpompen) ingeschakeld blijven. De ruimte is dan algemeen toegankelijk.

6.3 Bedieningsprocedure en veiligheidsvoorzieningen

Voor het opstarten van de elektronenversneller wordt de hieronder beschreven vergrendelingsprocedure gevolgd. De versnelleroperator maakt een visuele inspectieronde door de versnellerruimte en zorgt ervoor dat daarin niemand meer aanwezig is. Vervolgens bedient de operator een veiligheidsschakelaar waardoor een kort waarschuwingsgeluid te horen is en een waarschuwingsslamp gaat branden. Tijdens deze twee signalen moet de versnellerruimte worden verlaten en wordt vervolgens de toegangsdeur middels het slot aan de buitenkant vergrendeld. Vanuit de versnellerruimte kan de toegangsdeur altijd zonder sleutel worden geopend, zodat insluiting van personen onmogelijk is. De elektronenversneller wordt in bedrijf gesteld middels een startsleutel.

Het bedienen van de versneller is alleen mogelijk als de startsleutel in het daartoe bestemde slot op het bedieningspaneel aanwezig is. De sleutel van de toegangsdeur en de startsleutel zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden, zodat de toegangsdeur niet met de sleutel kan worden geopend als de versneller in bedrijf is. Middels een veiligheidsinterlock wordt gecontroleerd of de toegangsdeur op slot is terwijl de versneller in bedrijf is. In geval van ongeautoriseerde toegang wordt daardoor de versneller uitgeschakeld.

Op diverse plaatsen in de versnellerruimte en bij het bedieningspaneel zijn duidelijk herkenbare noodstop-schakelaars geplaatst, waarmee de versneller kan worden uitgeschakeld. In een noodsituatie kan een ieder hiermee de versneller (modulator en klystron) direct uitschakelen.

Veiligheidsrapport van de APPEAL elektronenversneller

In het labrynt naar de versnellerruimte zal het dosistempo van remstraling voortdurend worden gemeten door middel van een stralingsmonitor. Als de versneller in bedrijf dan wordt door de stralingsmonitor een verhoogd dosistempo geregistreerd, hetgeen bij de ingang naar de versnellerruimte visueel wordt aangegeven door een waarschuwinglamp. De stralingsmonitor kan via een interlocksysteem de elektronenversneller uitschakelen als een ingesteld dosistempo wordt overschreden.

In een logboek van de elektronenversneller worden de bedrijfscondities geregistreerd: datum, tijd, naam van de versnelleroperator, de experimentator, elektronenenergie, bundellading, repetitiefrequentie, type meting, en duur. Hieruit moet bepaald kunnen worden wat de bedrijfstijd van de versneller is geweest, zodat de maximale bedrijfstijd niet zal worden overschreden.

Waarschuwingstekens en teksten die wijzen op de mogelijke aanwezigheid van hoogenergetische elektronenpulsen en remstraling, laserlicht en hoogspanning worden geplaatst bij de ingang van de versnellerruimte.

6.4 Veiligheidsorganisatie

De APPEAL elektronenversneller valt onder toezicht van de SBD van de TU Delft, gevestigd in het RID. De SBD heeft de eindverantwoordelijkheid wat betreft stralingsbescherming en stralingshygiëne binnen de TU Delft. De organisatie is omschreven in KEW-vergunning E/EE/KK/96056756 van de TU Delft. De SBD ziet toe dat de veiligheidsmaatregelen worden aangebracht en gehandhaafd en controleert of het personeel zich aan de voorschriften houdt.

Bij de eerste trainingssessie en de eerste inbedrijfstelling van de elektronenversneller zal de SBD metingen verrichten om te controleren of de werkelijke waarden van het dosistempo beneden de limiet van 1 mS per jaar blijft. De resultaten en conclusies van deze metingen zullen worden vastgelegd in een verslag. Indien nodig zal er additionele afscherming worden aangebracht of zullen er andere passende maatregelen worden genomen.

Voor het dagelijkse toezicht op het bedrijven van de elektronenversneller is een lokale stralingsdeskundige verantwoordelijk, die aan de SBD rapporteert.

In de ruimtes voor de elektronenversneller zal permanente stralingsdosiscontrole plaatsvinden met behulp van ruimtedosimeters, die extern bij het NRG (Nuclear Research & consultancy Group) worden geëvalueerd.

6.5 Wijzigingsprocedure

Deze paragraaf beschrijft de procedure rond wijzigingen, die kunnen resulteren in een significante verandering van waarden van het dosistempo rondom de versnellerruimte. Wijzigingen zijn bijvoorbeeld veranderingen van de technische specificaties (lading, energie en repetitiefrequentie van elektronenpuls), van de primaire lokale afscherming of van de veiligheidsvoorzieningen.

Het is niet toegestaan de versnelleropstelling wezenlijk te wijzigen zonder toestemming van de SBD. De situatie na een wijziging moet worden vastgelegd in een aangepaste versie van dit veiligheidsrapport. De SBD beoordeelt of voor de gewenste wijziging een vergunningswijziging in het kader van de Kernenergiewet vereist is.

6.6 Personeel

6.6.1 Inleiding

De SBD van het RID houdt toezicht op de naleving van de werk- en veiligheidsvoorschriften en het gestelde in het veiligheidsrapport van de APPEAL elektronenversneller. De SBD benoemt versnelleroperateurs en versnellergebruikers. De namen van de operateurs en gebruikers staan vermeld op een bord bij de ingang van de versnellerruimte.

6.6.2 Versnelleroperateur

Versnelleroperateurs hebben toestemming om de versneller en bijbehorende apparatuur volledig te bedienen en te wijzigen. Zij zijn verantwoordelijk voor het juiste gebruik en bedrijf van de versneller.

Een versnelleroperateur zorgt voor:

- Actualisering van de procedures zoals beschreven in het veiligheidsrapport van de versneller met zijn opstellingen.
- Naleven van de regels en beschrijvingen zoals gangbaar zijn en beschreven in dit rapport.
- Toezicht houden op de naleving van de werk- en veiligheidsvoorschriften en het gestelde in het Veiligheidsrapport en de interne vergunning voor deze versneller. Indien duidelijke afwijkingen van het naleven van de voorschriften worden geconstateerd en/of de veiligheid in het geding is, kan de versnelleroperateur de werkzaamheden stilleggen en/of personeel de toegang tot de elektronenversneller ontzeggen. Direct daarna rapporteert de operateur aan de SBD-organisatie. Nadat de herstelwerkzaamheden zijn uitgevoerd en/of het personeel is geïnstrueerd over de veiligheidsvoorschriften, mogen de werkzaamheden worden hervat.
- Sleutelbeheer van de elektronenversneller. Een set sleutels is beschikbaar bij het bedieningspaneel en een reserve set is in bezit van de SBD.
- Melding aan de SBD van voorgenomen inhoudelijke veranderingen in de gang van zaken zoals vastgelegd in dit rapport en de interne vergunning.

Verslaglegging indien nodig en zorgen voor de juiste logboek invulling en vastlegging

6.6.3 Versnellergebruiker

Versnellergebruikers mogen uitsluitend onder verantwoordelijkheid van een versnelleroperateur met de versneller werken. Versnellergebruikers hebben toestemming om de versneller op te starten (conditioneren en afregelen) en om metingen te doen aan samples.

Zij hebben:

- Kennis van de versneller en meetapparatuur om metingen goed en veilig te kunnen doen.
- Kennis van de risico's die verbonden zijn aan het werken met de elektronenversneller.
- Kennis van de werk- en veiligheidsvoorschriften die in dit rapport zijn genoemd.
- De cursus Stralingshygiëne niveau 5 of hoger met succes volbracht.
- Kennis van de algemeen geldende veiligheidsregels van het RID.

7 Referenties

¹ NCRP Report No. 144, Radiation Protection for Particle accelerator Facilities 31 december 2003, herzien op 4 maart 2005. Gratis in te zien op:

https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpRPPAFRN2/viewerType:toc/root_slug:radiation-protection/url_slug:kt0046KPY1

² Veiligheidsrapport 4,5 MeV elektronenversneller, Ultrakort gepulste bestralingsfaciliteit, Technische Universiteit Delft, DelftChemTech, Sectie Opto-electronic Materials, W. Knulst, 7 maart 2006.

³ Besluit stralingsbescherming, BWBR0012702, geldend op 15 – 07 - 2016.

⁴ Laser Safety Report 4,5 MeV electron accelerator, Ultrakort gepulste bestralingsfaciliteit, Technische Universiteit Delft, DelftChemTech, Sectie Opto-electronic Materials, M.J.W. Vermeulen W. Knulst, 23 augustus 2011.

⁵ Besluit stralingsbescherming op 17 Juli 2006 vergunning met kenmerk 2006/4306-06

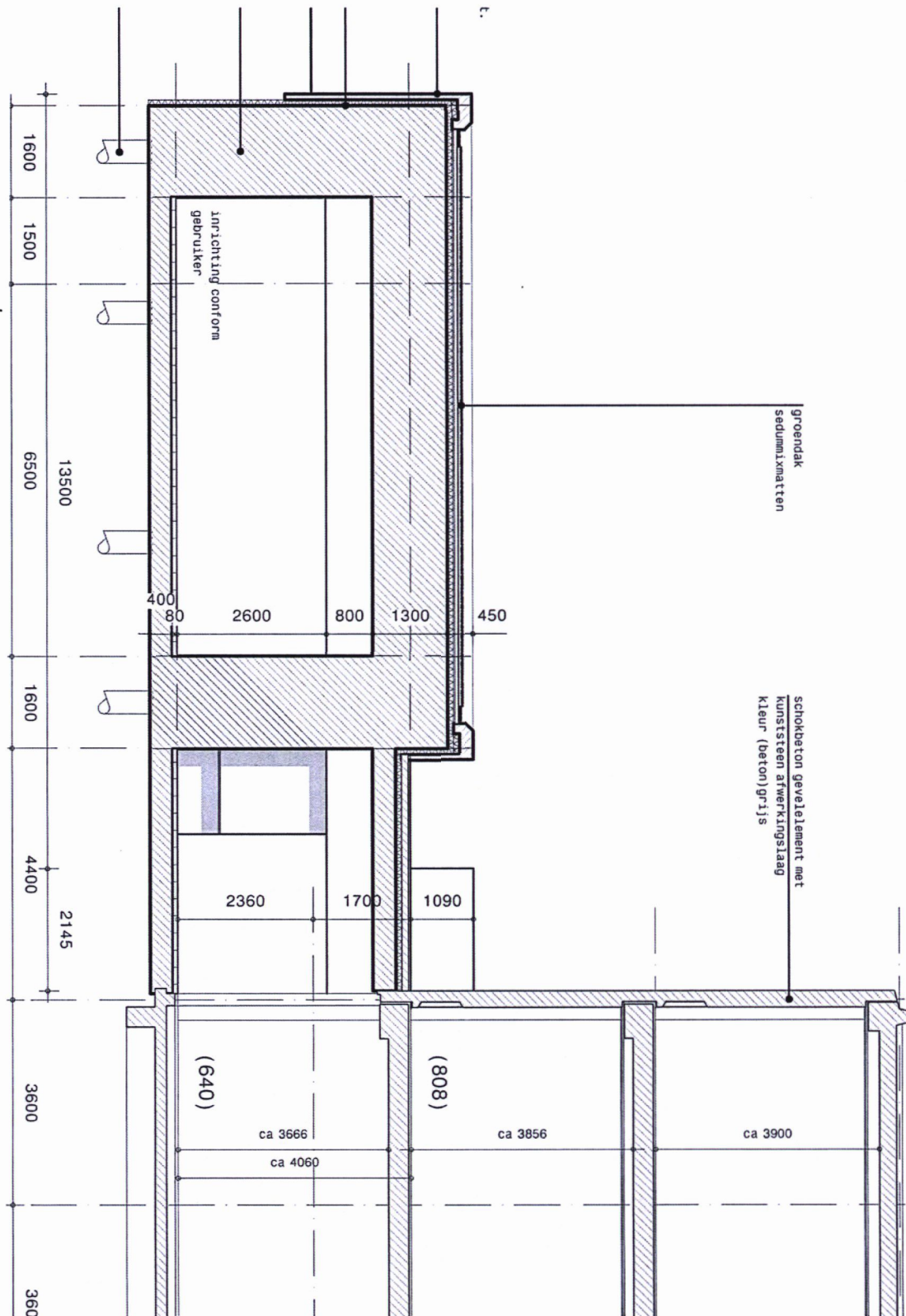
Bijlage A Foto's en tekeningen RID-gebouw en versnellerruimte

Veiligheidsrapport van de APPEAL elektronenversneller



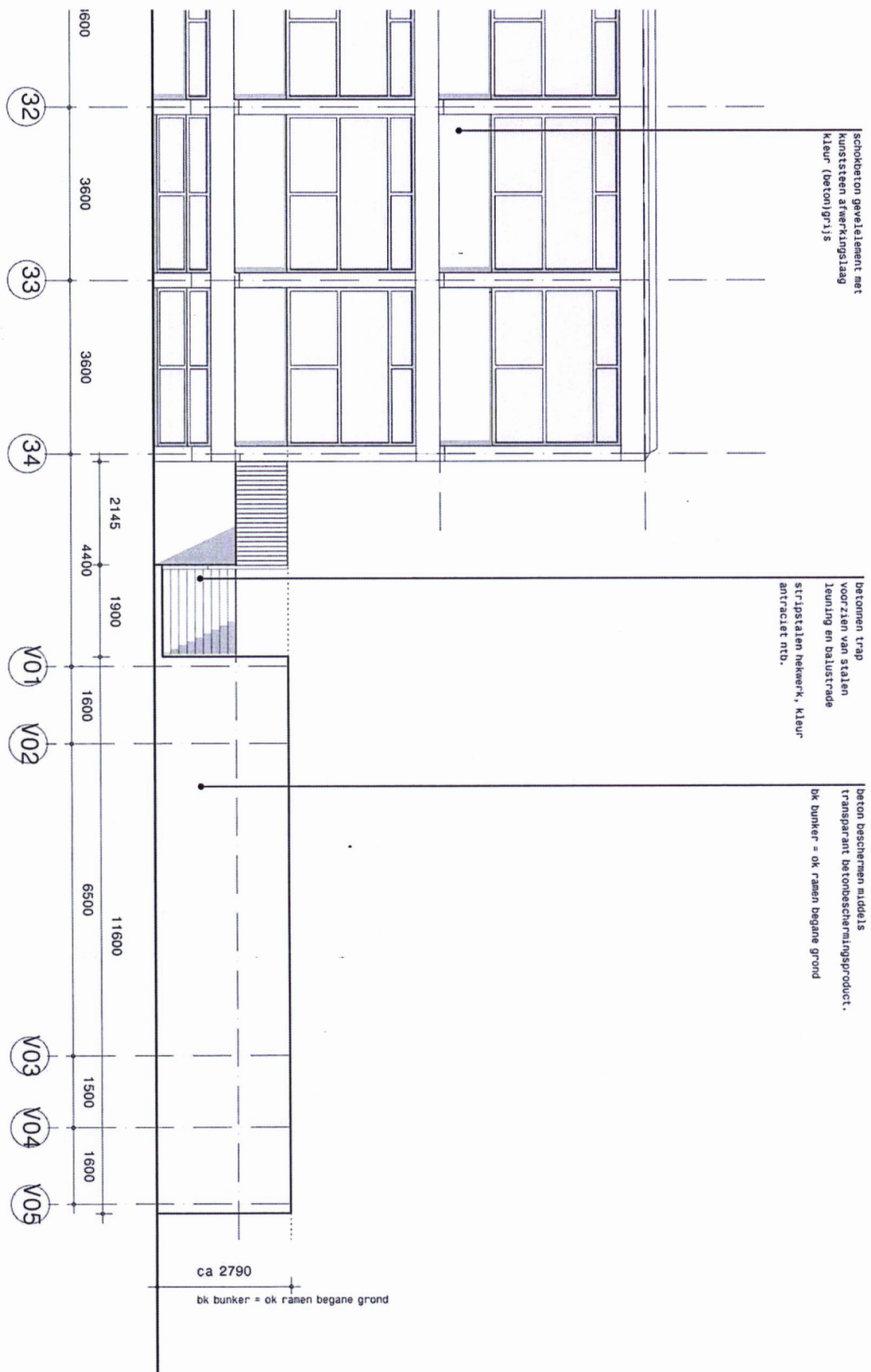
Figuur A-2: Versnellerruimte bij bestaande Oostvleugel op kelder niveau. Bovenaanzicht

Veiligheidsrapport van de APPEAL elektronenversneller



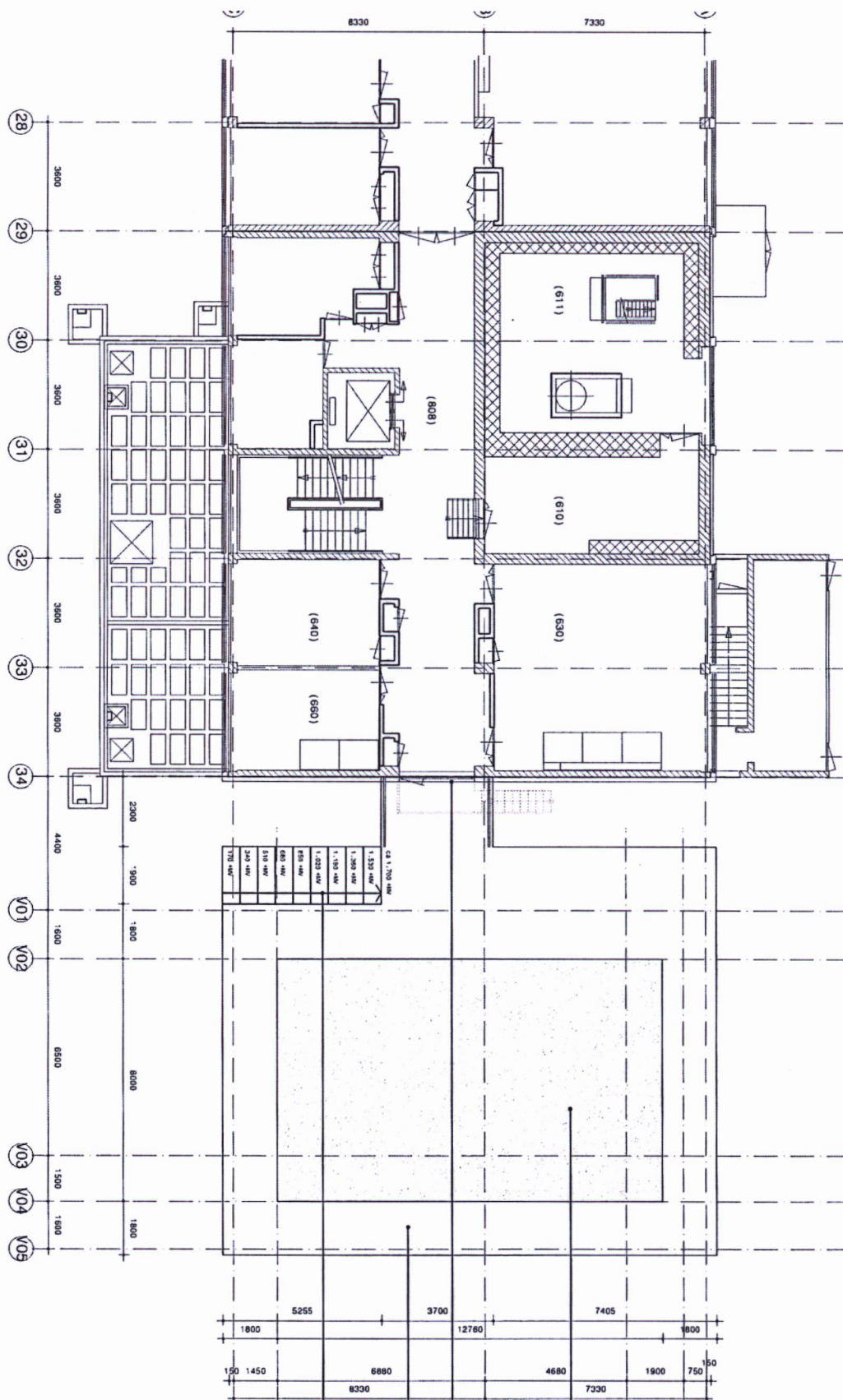
Figuur A-3: Versnellerruimte bij bestaande Oostvleugel. Zijaanzicht noordelijke muur

Veiligheidsrapport van de APPEAL elektronenversneller



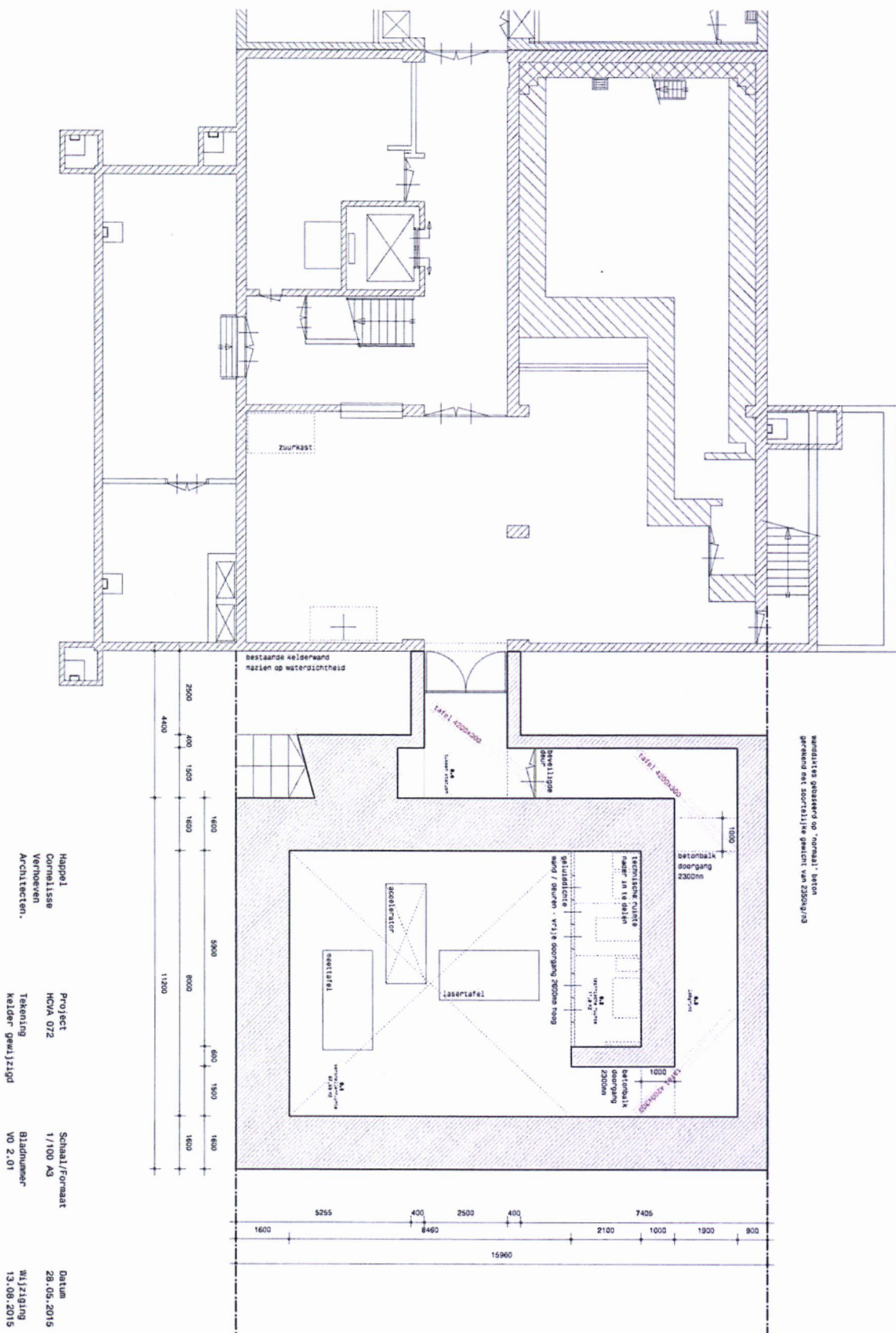
Figuur A-4: Versnellerruimte bij bestaande Oostvleugel. Zijaanzicht zuidelijke muur

Veiligheidsrapport van de APPEAL elektronenversneller



Figuur A-5: Versnellerruimte bij bestaande Oostvleugel op begane grondniveau. Bovenaanzicht

Veiligheidsrapport van de APPEAL elektronenversneller



Figuur A-6: Versnellerruimte bij bestaande Oostvleugel op kelderniveau. Bovenaanzicht