

Bijlagen bij
Deel A: Kew-deel

Revisie van Bijlage A23:
Activeringsberekeningen
(lucht, bodem, beton,
betonijzer)

Revisie 11/03/2015

Revisie overzicht

Wijzigingsdatum

11/03/2015

Aanleiding van de wijzigingen

Sinds de op 16 juni 2013 toegekende Kew vergunning heeft HollandPTC voor andere leverancier van protonenapparatuur gekozen dan eerder was voorzien. Dit heeft veranderingen tot gevolg in de technische specificaties van het cyclotron en op detailniveau in het gebouwontwerp. Met name de wijziging van de maximale protonenenergie 250 MeV (in plaats van 230 MeV) en de keuze voor directe ventilatie van de cyclotronbunker (in plaats van indirecte) hebben gevolgen voor de activering van lucht, bodem en beton. Daarom zijn nieuwe activeringsberekeningen nodig.

Samenvatting van de wijzigingen

Algemeen

- Voor de duidelijkheid is een nummering toegevoegd aan de Excel-sheets.
- Alle berekeningen zijn opnieuw uitgevoerd volgens ongewijzigde methodiek. Hierbij zijn de nieuwste inzichten omtrent het klinische gebruik van de protonenbundel meegenomen om tot realistische schattingen te komen.
- Referenties naar Ministeriële besluiten zijn aangepast op de inwerkingstelling van de "Uitvoeringsregeling stralingsbescherming EZ"

Activering lucht

- Het resultaat van de nieuwe berekeningen is een luchtactivering van maximaal 34 GBq/jaar in plaats van de eerder vergunde bovengrens van 56 GBq/jaar zodat er geen wijziging van de eerdere vergunning nodig is.

Activering bodem

- Toegevoegd is de opmerking dat geen rekening wordt gehouden met de fractionering van bundelgebruik binnen de toegewezen bundeltijd. Deze fractionering zal de gemiddelde stroom en daarmee de activering doen afnemen, Hierdoor is er sprake van een conservatieve schatting van de activering.
- Ten opzichte van de analyse die in de vorige versie van deze bijlage is gepresenteerd, blijkt het neutronenspectrum ten gevolge van 250 MeV protonen op Cu zo te verschillen van 230 MeV protonen op Ta dat Si onder de BERAKT ondergrens van 1 Bq blijft. Wel komt Fe-55 nu boven genoemde ondergrens uit. Dit nuclide blijft echter onder de vrijstellingsconcentratie.

Activering beton

- Toegevoegd is de opmerking dat geen rekening wordt gehouden met de fractionering van bundelgebruik binnen de toegewezen bundeltijd. Deze fractionering zal de gemiddelde stroom en daarmee de activering doen afnemen, Hierdoor is er sprake van een conservatieve schatting van de activering.

Activering betonijzer

- Dit onderdeel is op verzoek nieuw toegevoegd.

Conclusie van de wijzigingen

In de gewijzigde situatie wordt onverminderd aan de voorschriften van de vergunning voldaan. Er wordt hierin dan ook geen wijziging aangevraagd. Wel wordt verzocht Bijlage A23 zoals genoemd in de vigerende vergunning te vervangen door deze gewijzigde bijlage als beschrijving van de handelingen (**vergunning V, onder L, onder 1**).

1. Luchtactiveringsberekening

Vanuit het cyclotron worden hoog energetische protonen met een energie van 250 MeV in verschillende bundelelementen gestopt, waarbij secundaire straling ontstaat. De neutronencomponent in deze straling zal door een vangstreactie in Argon het radioactieve edelgas Ar-41 ($T_{1/2} = 1,8$ h) produceren.

Het cyclotron levert protonen afkomstig van een bron die constant 2500 nA aan protonen produceert. In het cyclotron wordt, na een eerste versnelling tot 13 MeV, deze stroomsterkte verzwakt tot de gewenste waarde door de transmissie door een slit elektronisch te sturen ("slit losses"). Nadat het restant versneld is tot 250 MeV verliest de bundel bij de extractie uit het cyclotron nog 25% van haar protonen ("extraction losses").

De resterende uitputbundel van het cyclotron wordt vervolgens tot een bundel met gewenste energie en afmetingen ("pencil beam" voor de R&D- en gantry-bestralingen) gevormd door een groot gedeelte te stoppen (filteren) in de eerste set collimatoren en energy degrader in het cyclotron gedeelte van de bestralingsbunker.

De kliniek inclusief het gehele bunkergedeelte van HollandPTC wordt geventileerd naar een lozingspunt op het dak boven het cyclotron. Hierbij wordt een ventilatievoud van 10 in de gantryruimten, 6 in de R&D-ruimte, 4 in de oogbehandelkamer en een ventilatievoud van 1 in de cyclotronbunker gehandhaafd. De behandeltime voor de oogbunker is 25 uur per jaar, en voor de gantries is dit 1960 uur per jaar. Zoals in de paragraaf 'Totaal jaarlijks bundelgebruik' van bijlage A16 uiteengezet is, leidt dit tot een beam-on-time van respectievelijk 25 (800 nA) en 300 (100 nA) uur per jaar.

Met deze gegevens wordt de luchtactivering conservatief geschat door de gehele protonenstroom te stoppen in het cyclotron/degrader bunkergedeelte met een maximale tijd waarin het luchtvolume aanwezig is. De tijd behorend bij de laagste ventilatievoud, wordt als bestralingstijd aangehouden en is 1 uur, namelijk de tijd waarin de lucht in de cyclotron/degraderruimte in zijn geheel vervangen is. In alle andere ruimten is de stroom lager en de tijd waarin het volume aan lucht te vervangen wordt korter. Immers hier wordt al het grootste gedeelte van de bundel daadwerkelijk gestopt, terwijl bij de overige verliezen (bundelgebruik) de bestralingsduur veel korter door de hogere ventilatievouden.

De faciliteit heeft verschillende behandelmodi met verschillende protonenenergieën en daarbij behorende verliezen in de bundelelementen, die de stroomsterkte vanuit het cyclotron beïnvloeden. Daarnaast is het neutronen energiespectrum afhankelijk van de protonenenergie. De activeringsberekeningen zijn daarom tweemaal uitgevoerd met de hoogste (250 MeV) en de laagste (70 MeV) protonenenergie en een cyclotron stroomsterkte behorend bij de hoogste patiëntenstroom (respectievelijk 0,06 nA en 0,53 nA). Deze activering wordt berekend door met het Monte Carlo programma MCNPX de thermische, epithermische en snelle neutronenflux te simuleren. In de simulatie wordt verondersteld dat de cyclotron-output-stroomsterkte, behorend bij een patiënten-behandelstroom die 1 Gy per minuut in een orgaan deponeert volledig in een kopertarget (het collimatormateriaal) gestopt wordt.

Door de impuls van de protonenstroom is er slechts een te verwaarlozen thermische neutronenflux vlak achter het kopertarget. Op grote afstand echter, daar waar de

neutronenenergie tot thermische waarden is afgenomen, is de flux door de kwadratenwet sterk afgenomen. Om toch over een realistische overschatting van de activering te kunnen beschikken, is de thermische flux vermeerderd met de waarde van de epithermische flux op een afstand vlak na het target.

Dit levert een hoekafhankelijke neutronenflux waarmee vervolgens per ruimtehoek van 10 graden de activering van 1 m³ lucht berekend wordt bij een bestralingstijd van 1 uur en korte afkoeltijd (10 s) met het bij het RID gangbare programma BERAKT.

In **sheets 1-3** (zie verder) zijn deze neutronenfluxen voor de verschillende energieën per ruimtehoek en de aanpassing van de thermische flux gegeven in de kolommen A t/m R. De waarden in de kolommen J, K en L zijn de fluxen die als input dienen voor het programma BERAKT.

Het **BERAKT programma** berekent de door neutronenbestraling geïnduceerde activiteit als volgt:

Om te beginnen wordt het activeringstempo R (dat is de kans op neutronenvangst per atoom per seconde) berekend met:

$$R = \sigma_0 g(T) \Phi_t + I_0(\alpha) \Phi_e + \sigma_{fast} \Phi_{fast}$$

waarin

σ_0 de conventionele werkzame doorsnede voor thermische neutronenvangst (m²)

$g(T)$ de Westcottfactor die voor niet-1/v reacties aangeeft hoe de werkzame doorsnede varieert met de temperatuur T van de thermische neutronen.

T de temperatuur van de thermische neutronen

Φ_t de conventionele thermische neutronenflux (m⁻²s⁻¹), zijnde de integraal over de Maxwell-Boltzmannverdeling van 0 tot ∞ (zie ook ref 1)

$I_0(\alpha)$ de resonantieintegraal als functie van de parameter α

α een parameter die de afwijking van de ideale 1/E relatie tussen flux en neutronenenergie in het epithermische gebied karakteriseert

Φ_e de epithermische flux bij een neutronenenergie van 1 eV (m⁻²s⁻¹)

σ_{fast} de werkzame doorsnede voor snelle neutronenvangst (m⁻²)

Φ_{fast} de snelle neutronenflux boven 200 keV (m⁻²s⁻¹)

Vervolgens wordt het aantal bestraalde atomen N berekend met

$$N = \frac{w \theta N_{avogadro}}{M}$$

waarin

w de hoeveelheid bestraalde atomen van iedere element (kg)

θ het isotopisch voorkomen van ieder isotoop van dat element (fractie tussen 0 en 1)

N_{avogadro} het getal van Avogadro (6×10^{23} atomen/mol)

M de atoommassa van het element (g/mol)

Tenslotte wordt de geïnduceerde radioactiviteit A (in Bq) berekend met

$$A = NR \frac{(1 - e^{-\lambda t_{\text{ir}}})}{\lambda} e^{-\lambda t_{\text{d}}}$$

waarin

t_{ir} de tijdsduur van de bestraling (s)

λ het radioactieve vervaltempo (s^{-1}), gelijk aan $\ln(2)/t_{1/2}$

t_{d} de tijdsduur tussen bestraling en moment van activiteitsbepaling (s)

Het eindresultaat wordt gerapporteerd voor ieder radio-isotoop dat gezien de samenstelling van het ingevoerde materiaal een activiteit oplevert van meer dan 1 Bq.

In die gevallen waarin radioactief verval leidt tot het ontstaan van radioactieve dochterisotopen of reeksen daarvan, wordt in gebruik gemaakt van een algoritme dat reeksen van onbeperkte complexiteit door kan rekenen (ref. 2).

Referenties:

Ref 1: M. Blaauw, P. Bode, M. de Bruin, "An alternative convention describing the (n, γ) activation rate suited for use in the k0 method of NAA", J.Radioanal.Nucl.Chem. 152 (1991) 507-518

Ref 2: M. Blaauw, "A versatile computer algorithm for Linear First Order Equations", Appl. Radiat.Isot. 44 (1993) 1225-1229

Hieronder is het resultaat gegeven van activeringsberekening onder de ruimtehoek 0-10 graden: er wordt met 54,1 kBq/m³ Ar-41 geproduceerd. Deze waarde en die over de ruimtehoeken tot 180 graden worden in de in kolom 0 ingevoerd in de bijbehorende Excel-sheet. Daarna wordt in deze sheet de bij deze instelling en ventilatievolumina berekende geloosde Ar-41 activiteit in cel E8 getoond.

Activiteitsberekening 70 MeV

BERAKT

stof gewicht (mg)

C 1.21e-001
 N 9.10e+002
 O 2.79e+002
 Ar 1.54e+001

Faciliteit: Eigen_invoer

Bestralingstijd: 1.00 hours
 Afkoeltijd: 10.00 seconds

Direct na bestraling:

Totale radionucliditeit: 0.00e+000 Sv
 Dosis tempo op 1 meter: 1.02e-005 uSwh
 Opp. dosis tempo op 10 cm: 5.41e-002 uSwh
 Productnuclide: Ar-41

Na afkoeling:

Totale radionucliditeit: 0.00e+000 Sv
 Dosis tempo op 1 meter: 1.02e-005 uSwh
 Opp. dosis tempo op 10 cm: 5.41e-002 uSwh
 Productnuclide: Ar-41

| Target | Product | halfv.tijd | aktMiteit (Bq) | (Gamma dosis) h10 (uSwh) | (Beta dosis) h07 (uSwh) |
|--------|---------|------------|----------------|--------------------------|-------------------------|
| Ar-40 | Ar-41 | 1.83 h | 5.41e+001 | 1.02e-005 | 5.41e-002 |

TE BESTRALEN STOFFEN

Help | Check Input

ppm 75.53 N
 23.18 O
 procent 1.28 A=
 0.01 C
 ug
 mg
 g

Totale massa: 1205 mg

Faciliteit: Eigen_invoer

Therm. flux: 9.04e9 s⁻¹.m⁻²
 Epl Therm. flux: 9.04e9 s⁻¹.m⁻²
 Snelle flux: 4.14e11 s⁻¹.m⁻²

Bestralingstijd: 1 hour
 Afkoeltijd: 10 sec

Hieruit blijkt dat Ar-41 het enige radionuclide is dat boven de ondergrens van 1 Bq per kubieke meter lucht geproduceerd wordt.

In een aparte sheet in het bovengenoemde Excel-programma wordt de Ar-41 uitstoot van de verschillende bedrijfsmodi met de specifieke bundelstroomsterkten bij elkaar opgeteld tot een waarde voor de totale Argonproductie (zie cel D29):

| | A | B | C | D | E | F | G | H |
|----|--|---------------------|--------------------|-------|----------|--------|---|---|
| 1 | versie 8/2/2015 | | | | | | | |
| 2 | "Typical beam current during operation (mail RE: Some questions related to shielding design" Joern Meissner 19 aug 2014. | | | | | | | |
| 3 | Cyclotron gebruik | | | | | | | |
| 4 | I_{ext} | ext. losses 250 Mev | slit losses 13 Mev | | | | | |
| 5 | [nA] | [nA] | [nA] | h/dag | dag/jaar | h/jaar | | |
| 6 | 800 | 200 | 1500 | 1 | 25 | 25 | | |
| 7 | 100 | 25 | 2375 | 1 | 300 | 300 | | |
| 8 | | | | | | | | |
| 9 | Ventillatie | | | | | | | |
| 10 | | | m ³ /h | h/dag | dag/jaar | | | |
| 11 | | cyclo | 1500 | 24 | 365 | | | |
| 12 | | R&D | 2300 | 24 | 365 | | | |
| 13 | | Gantry1 | 2300 | 24 | 365 | | | |
| 14 | | Gantry2 | 2300 | 24 | 365 | | | |
| 15 | | EYE | 300 | 24 | 365 | | | |
| 16 | | Gebouw nonRA | 30000 | 24 | 365 | | | |
| 17 | | reserve | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | |
| 19 | | Totaal | 38700 | | | | | |
| 20 | | | | | | | | |
| 21 | Totale geloosde Ar-41 activiteit: | | | | | | | |
| 22 | | I_{ext} | | [GBq] | | | | |
| 23 | | 800 | 250 Mev | 13,33 | | | | |
| 24 | | | 13 Mev | 0,02 | | | | |
| 25 | | 100 | 250 MeV | 20,00 | | | | |
| 26 | | | 13 MeV | 0,47 | | | | |
| 27 | | 100 | 70 MeV | 0,03 | | | | |
| 28 | | | | | | | | |
| 29 | | | 34 | [GBq] | | | | |
| 30 | | | | | | | | |

De totale argonproductie per jaar is dus **34 GBq**

SHEET 1: Toegepaste (aangepaste) neutronenflux en de bijbehorende Ar-41 waarden bij 70 MeV

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | |
|----|--|--|--|---------------------|--------------------|--|------------------------------|----------|--|--|-----------------------|---------------------------|---|---|------|-----------|------|---|--|
| 1 | Lucht: $\rho_{ho} = 1,205 \text{ mg/cm}^3$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | $= 1,205 \text{ kg/m}^3$ | | Cyclotron gebruik | | | | Ventilatie | | | | | | | | | | | | |
| 3 | $= 1205000 \text{ mg/m}^3$ | | I_{tot} | ext. losses 250 Mev | slit losses 13 Mev | | | | | m^3/h | h/dag | dag/jaar | | | | | | | |
| 4 | | | [nA] | [nA] | [nA] | h/jaar | | | | cyclo | 1500 | 24 | 365 | | | | | | |
| 5 | N: 75,53% | | 800 | 200 | 1500 | 25 | | | | R&D | 2300 | 24 | 365 | | | | | | |
| 6 | O: 23,18% | "Typical beam current during operation (mail RE: Some questions related to shielding design" Joern Meissner) | | | | | | | | | Gantry1 | 2300 | 24 | 365 | | | | | |
| 7 | Ar: 1,28% | | | | | | | | | Gantry2 | 2300 | 24 | 365 | | | | | | |
| 8 | C: 0,0124% | | Totale geloosde Ar-41 activiteit: | | | 0 | [GBq] | | | EYE | 300 | 24 | 365 | = activeringsvolume | | | | | |
| 9 | | | Submersiedosis aan terreingrens (rel. IBA-Tauw): | | | 0,00 | [$\mu\text{Sv}/\text{jr}$] | | | Gebouw nonRA | 30000 | 24 | 365 | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | reserve | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | Totaal | 38700 | [m^3/h] | | | | | | | |
| 12 | Activeringsstroom in berekening | 800 | [nA] | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | referentiestroom in fl. | 100 | [nA] | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | % loss | 100 | % | | $6,25E+11$ | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | #p/sec | $6,25E+11$ | [#/s] | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | Angle bin [deg] | | F0 forward at 50 cm from target #n.cm-2.p-1 | | | F0 forward at 50 cm from target #n.m-2.s-1 | | | AANGEPAST F0 forward at 50 cm from target #n.m-2.s-1 | | | Ar-41 (1,83h) | | | | | | | |
| 19 | | Slow | Epi | Fast | | Slow | Epi | Fast | | Slow | Epi | Fast | Concentratie bij referentiestroom (100 nA) na 1 ventilatievoud [Bq.m-3] (1h, 10s) | Concentratie na 1 ventilatievoud [Bq.m-3] (1h, 10s) | | | | | |
| 20 | 0-10 | 0,00E+00 | 2,30E-08 | 1,21E-06 | | 0,00E+00 | 1,44E+08 | 7,58E+09 | | 1,44E+08 | 1,44E+08 | 7,58E+09 | 0,86 | 0,72 | 6,90 | 5,72 | | | |
| 21 | 10-20 | 0,00E+00 | 2,03E-08 | 1,18E-06 | | 0,00E+00 | 1,27E+08 | 7,40E+09 | | 1,27E+08 | 1,27E+08 | 7,40E+09 | 0,76 | 0,63 | 6,08 | 5,05 | | | |
| 22 | 20-30 | 0,00E+00 | 1,85E-08 | 1,12E-06 | | 0,00E+00 | 1,15E+08 | 6,97E+09 | | 1,15E+08 | 1,15E+08 | 6,97E+09 | 0,69 | 0,57 | 5,50 | 4,57 | | | |
| 23 | 30-40 | 0,00E+00 | 1,64E-08 | 1,04E-06 | | 0,00E+00 | 1,03E+08 | 6,51E+09 | | 1,03E+08 | 1,03E+08 | 6,51E+09 | 0,62 | 0,51 | 4,93 | 4,09 | | | |
| 24 | 40-50 | 0,00E+00 | 1,46E-08 | 9,79E-07 | | 0,00E+00 | 9,14E+07 | 6,12E+09 | | 9,14E+07 | 9,14E+07 | 6,12E+09 | 0,55 | 0,45 | 4,38 | 3,63 | | | |
| 25 | 50-60 | 0,00E+00 | 1,34E-08 | 9,21E-07 | | 0,00E+00 | 8,36E+07 | 5,76E+09 | | 8,36E+07 | 8,36E+07 | 5,76E+09 | 0,50 | 0,41 | 4,00 | 3,32 | | | |
| 26 | 60-70 | 0,00E+00 | 1,36E-08 | 8,74E-07 | | 0,00E+00 | 8,52E+07 | 5,46E+09 | | 8,52E+07 | 8,52E+07 | 5,46E+09 | 0,51 | 0,42 | 4,08 | 3,39 | | | |
| 27 | 70-80 | 0,00E+00 | 1,29E-08 | 8,24E-07 | | 0,00E+00 | 8,03E+07 | 5,15E+09 | | 8,03E+07 | 8,03E+07 | 5,15E+09 | 0,48 | 0,40 | 3,84 | 3,19 | | | |
| 28 | 80-90 | 0,00E+00 | 1,22E-08 | 7,24E-07 | | 0,00E+00 | 7,61E+07 | 4,52E+09 | | 7,61E+07 | 7,61E+07 | 4,52E+09 | 0,46 | 0,38 | 3,64 | 3,02 | | | |
| 29 | 90-100 | 0,00E+00 | 1,26E-08 | 7,20E-07 | | 0,00E+00 | 7,87E+07 | 4,50E+09 | | 7,87E+07 | 7,87E+07 | 4,50E+09 | 0,47 | 0,39 | 3,77 | 3,13 | | | |
| 30 | 100-110 | 0,00E+00 | 1,16E-08 | 7,23E-07 | | 0,00E+00 | 7,28E+07 | 4,52E+09 | | 7,28E+07 | 7,28E+07 | 4,52E+09 | 0,44 | 0,36 | 3,49 | 2,89 | | | |
| 31 | 110-120 | 0,00E+00 | 1,13E-08 | 7,15E-07 | | 0,00E+00 | 7,07E+07 | 4,47E+09 | | 7,07E+07 | 7,07E+07 | 4,47E+09 | 0,42 | 0,35 | 3,38 | 2,81 | | | |
| 32 | 120-130 | 0,00E+00 | 1,24E-08 | 7,13E-07 | | 0,00E+00 | 7,75E+07 | 4,45E+09 | | 7,75E+07 | 7,75E+07 | 4,45E+09 | 0,46 | 0,39 | 3,71 | 3,08 | | | |
| 33 | 130-140 | 0,00E+00 | 1,23E-08 | 7,09E-07 | | 0,00E+00 | 7,66E+07 | 4,43E+09 | | 7,66E+07 | 7,66E+07 | 4,43E+09 | 0,46 | 0,38 | 3,66 | 3,04 | | | |
| 34 | 140-150 | 0,00E+00 | 1,26E-08 | 7,11E-07 | | 0,00E+00 | 7,85E+07 | 4,45E+09 | | 7,85E+07 | 7,85E+07 | 4,45E+09 | 0,47 | 0,39 | 3,76 | 3,12 | | | |
| 35 | 150-160 | 0,00E+00 | 1,20E-08 | 7,19E-07 | | 0,00E+00 | 7,52E+07 | 4,49E+09 | | 7,52E+07 | 7,52E+07 | 4,49E+09 | 0,45 | 0,37 | 3,60 | 2,99 | | | |
| 36 | 160-170 | 0,00E+00 | 1,20E-08 | 7,32E-07 | | 0,00E+00 | 7,53E+07 | 4,57E+09 | | 7,53E+07 | 7,53E+07 | 4,57E+09 | 0,45 | 0,37 | 3,61 | 2,99 | | | |
| 37 | 170-180 | 0,00E+00 | 1,45E-08 | 9,23E-07 | | 0,00E+00 | 9,04E+07 | 5,77E+09 | | 9,04E+07 | 9,04E+07 | 5,77E+09 | 0,54 | 0,45 | 4,33 | 3,59 | | | |
| 38 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 39 | | | 1,42E-08 | 8,64E-07 | | 0,00E+00 | 8,89E+07 | 5,40E+09 | | 8,89E+07 | 8,89E+07 | 5,40E+09 | mean | 0,53 | 0,44 | 4,26 | 3,53 | | |
| 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 41 | | | | | | | | | | Relatieve concentratie vrijstellings- som (<1) | | | | | 100 | 0,0353416 | | | |

SHEET 3: Toegepaste (aangepaste) neutronenflux en de bijbehorende Ar-41 waarden bij 13 MeV

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R |
|----|--|------------|--|---------------------|--------------------|--|-----------------------|----------|--|-----------------------|----------|---------------------------|------|---|---|-----------|------|---|
| 1 | Lucht: $\rho_{ho}=1,205 \text{ mg/cm}^3$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | = $1,205 \text{ kg/m}^3$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | = 1205000 mg/m^3 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | Cyclotron gebruik | | | | Ventilatie | | | | | | | | | | | |
| | | | I_{tot} | ext. losses 250 Mev | slit losses 13 Mev | | | | | m^3/h | h/jaar | dag/jaar | | | | | | |
| | | | [nA] | [nA] | [nA] | | | | | cyclo | 1500 | 24 | 365 | = activeringsvolume | | | | |
| 5 | N: 75,53% | | 800 | 200 | 1500 | 25 | | | | R&D | 2300 | 24 | 365 | | | | | |
| 6 | D: 23,18% | | | | | | | | | Gantry1 | 2300 | 24 | 365 | | | | | |
| 7 | Ar: 1,28% | | | | | | | | | Gantry2 | 2300 | 24 | 365 | | | | | |
| 8 | C: 0,0124% | | Totale geloosde Ar-41 activiteit: | | | 0 | [GBq] | | | EYE | 300 | 24 | 365 | | | | | |
| 9 | | | Submersiedosis aan terreingrens (rel. IBA-Tauw): | | | 0,00 | [$\mu\text{Sv/yr}$] | | | Gebouw nonRA | 30000 | 24 | 365 | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | reserve | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | Totaal | 38700 | [m^3/h] | | | | | | |
| 12 | Activeringsstroom in berekeningen: | | 1500 | [nA] | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | referentiestroom in flux: | 100 | [nA] | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | % loss | 100 | % | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | #p/sec | $6,25E+11$ | [#/s] | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | F0 forward at 50 cm from target #n.cm-2.p-1 | | | F0 forward at 50 cm from target #n.m-2.s-1 | | | AANGEPAST F0 forward at 50 cm from target #n.m-2.s-1 | | | Ar-41 (1,83h) | | | | | | |
| | Angle bin [deg] | | | | | | | | | | | | | Concentratie bij referentiestroom (100 nA) na 1 ventilatievoud [Bq.m-3] (1h, 10s) | Concentratie na 1 ventilatievoud [Bq.m-3] (1h, 10s) | | | |
| 19 | | Slow | Epi | Fast | | Slow | Epi | Fast | | Slow | Epi | Fast | | [kBq/m3] | [Bq/g] | | | |
| 20 | 0-10 | 0,00E+00 | 6,06E-10 | 4,35E-09 | | 0,00E+00 | 3,79E+06 | 2,72E+07 | | 3,79E+06 | 3,79E+06 | 2,72E+07 | | 0,02 | 0,02 | 0,34 | 0,28 | |
| 21 | 10-20 | 0,00E+00 | 4,53E-10 | 3,96E-09 | | 0,00E+00 | 2,83E+06 | 2,48E+07 | | 2,83E+06 | 2,83E+06 | 2,48E+07 | | 0,02 | 0,01 | 0,25 | 0,21 | |
| 22 | 20-30 | 0,00E+00 | 5,75E-10 | 4,13E-09 | | 0,00E+00 | 3,60E+06 | 2,58E+07 | | 3,60E+06 | 3,60E+06 | 2,58E+07 | | 0,02 | 0,02 | 0,32 | 0,27 | |
| 23 | 30-40 | 0,00E+00 | 5,49E-10 | 3,20E-09 | | 0,00E+00 | 3,43E+06 | 2,00E+07 | | 3,43E+06 | 3,43E+06 | 2,00E+07 | | 0,02 | 0,02 | 0,31 | 0,26 | |
| 24 | 40-50 | 0,00E+00 | 5,17E-10 | 2,77E-09 | | 0,00E+00 | 3,23E+06 | 1,73E+07 | | 3,23E+06 | 3,23E+06 | 1,73E+07 | | 0,02 | 0,02 | 0,29 | 0,24 | |
| 25 | 50-60 | 0,00E+00 | 3,12E-10 | 2,67E-09 | | 0,00E+00 | 1,95E+06 | 1,67E+07 | | 1,95E+06 | 1,95E+06 | 1,67E+07 | | 0,01 | 0,01 | 0,18 | 0,15 | |
| 26 | 60-70 | 0,00E+00 | 2,50E-10 | 3,20E-09 | | 0,00E+00 | 1,56E+06 | 2,00E+07 | | 1,56E+06 | 1,56E+06 | 2,00E+07 | | 0,01 | 0,01 | 0,14 | 0,12 | |
| 27 | 70-80 | 0,00E+00 | 3,14E-10 | 3,08E-09 | | 0,00E+00 | 1,97E+06 | 1,93E+07 | | 1,97E+06 | 1,97E+06 | 1,93E+07 | | 0,01 | 0,01 | 0,18 | 0,15 | |
| 28 | 80-90 | 0,00E+00 | 1,31E-09 | 3,69E-08 | | 0,00E+00 | 8,20E+06 | 2,30E+08 | | 8,20E+06 | 8,20E+06 | 2,30E+08 | | 0,05 | 0,04 | 0,74 | 0,61 | |
| 29 | 90-100 | 0,00E+00 | 3,84E-09 | 8,40E-08 | | 0,00E+00 | 2,40E+07 | 5,25E+08 | | 2,40E+07 | 2,40E+07 | 5,25E+08 | | 0,14 | 0,12 | 2,16 | 1,79 | |
| 30 | 100-110 | 0,00E+00 | 2,77E-09 | 7,32E-08 | | 0,00E+00 | 1,73E+07 | 4,95E+08 | | 1,73E+07 | 1,73E+07 | 4,95E+08 | | 0,10 | 0,09 | 1,56 | 1,29 | |
| 31 | 110-120 | 0,00E+00 | 2,48E-09 | 7,54E-08 | | 0,00E+00 | 1,55E+07 | 4,71E+08 | | 1,55E+07 | 1,55E+07 | 4,71E+08 | | 0,09 | 0,08 | 1,39 | 1,15 | |
| 32 | 120-130 | 0,00E+00 | 2,44E-09 | 6,69E-08 | | 0,00E+00 | 1,52E+07 | 4,18E+08 | | 1,52E+07 | 1,52E+07 | 4,18E+08 | | 0,09 | 0,08 | 1,36 | 1,13 | |
| 33 | 130-140 | 0,00E+00 | 1,43E-09 | 5,69E-08 | | 0,00E+00 | 8,96E+06 | 3,56E+08 | | 8,96E+06 | 8,96E+06 | 3,56E+08 | | 0,05 | 0,04 | 0,78 | 0,65 | |
| 34 | 140-150 | 0,00E+00 | 1,47E-09 | 4,49E-08 | | 0,00E+00 | 9,20E+06 | 2,80E+08 | | 9,20E+06 | 9,20E+06 | 2,80E+08 | | 0,06 | 0,05 | 0,83 | 0,68 | |
| 35 | 150-160 | 0,00E+00 | 8,09E-10 | 3,03E-08 | | 0,00E+00 | 5,05E+06 | 1,89E+08 | | 5,05E+06 | 5,05E+06 | 1,89E+08 | | 0,03 | 0,03 | 0,45 | 0,38 | |
| 36 | 160-170 | 0,00E+00 | 6,04E-10 | 4,51E-09 | | 0,00E+00 | 3,77E+06 | 2,82E+07 | | 3,77E+06 | 3,77E+06 | 2,82E+07 | | 0,02 | 0,02 | 0,34 | 0,28 | |
| 37 | 170-180 | 0,00E+00 | 4,55E-10 | 3,30E-09 | | 0,00E+00 | 2,94E+06 | 2,06E+07 | | 2,94E+06 | 2,94E+06 | 2,06E+07 | | 0,02 | 0,01 | 0,26 | 0,21 | |
| 38 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 39 | | | 1,18E-09 | 2,83E-08 | | 0,00E+00 | 7,36E+06 | 1,77E+08 | | 7,36E+06 | 7,36E+06 | 1,77E+08 | mean | 0,04 | 0,04 | 0,66 | 0,55 | |
| 40 | | | | | | | | | | | | | | 100 | | | | |
| 41 | | | | | | | | | | | | | | Relatieve concentratie vrijstellings- som (<1) | | | | |
| 42 | | | | | | | | | | | | | | | | 0,0054719 | | |

2. Grond en grondwater activeringsberekening

Vanuit het cyclotron worden hoog energetische protonen met een energie van 250 MeV in verschillende bundelelementen gestopt, waarbij secundaire straling ontstaat. Een neutronencomponent in deze straling zal na passage van lucht en de betonnen vloer door een vangstreactie in de bodemgrond of het grondwater, deze mogelijk kunnen activeren.

Deze activering wordt berekend door met het Monte Carlo programma MCNPX de thermische, epithermische en snelle neutronenflux te simuleren. In de simulatie wordt verondersteld dat de cyclotron-output-stroomsterkte, behorend bij een patiëntenbehandelstroom die 1 Gy per minuut in een orgaan deponereert volledig in een kopertarget (het collimator materiaal) gestopt wordt. De betonvloer wordt verondersteld direct hierachter bolvormig het kopertarget te omvatten, waarna de bodem bereikt wordt. Per ruimtehoek van 10 graden wordt de neutronenflux gesimuleerd, waarna deze over alle hoeken gemiddeld wordt. Met deze over de gehele ruimtehoek gemiddelde neutronenflux wordt de activering van 1 gram grond berekend wordt bij een zeer lange (1 jaar) bestralingstijd en korte afkoeltijd (1 uur) met het bij het RID gangbare programma BERAKT.¹

De faciliteit heeft verschillende behandelmodi met verschillende protonenenergieën en daarbij behorende verliezen in de bundelelementen, die de stroomsterkte vanuit het cyclotron beïnvloeden. De activeringsberekeningen zijn uitgevoerd met een cyclotron stroomsterkte behorend bij de hoogste (0,53 nA) patiëntenstroom en gemiddeld naar een continu cyclotronbedrijf gedurende een heel jaar. Hierbij is geen rekening gehouden met de fractionering van de beam-on tijd binnen de behandelstijd zoals is uitgelegd in de laatste paragraaf van Bijlage A16. Deze fractionering zal de gemiddelde stroom en daarmee de activering doen afnemen, Omdat het hier activering van een 'statische' gebouwsituatie betreft is ervoor gekozen deze conservatieve aanpak aan te houden.

De ondergrond van Delft (en dus ook het RID terrein) bestaat uit 20 tot 25 m dikke opeenvolgingen van zee en rivier afzettingen die bestaan uit zanden en kleien, met lokaal daar tussenin ingeklonken veenpakketten. Dit geheel ligt bovenop de grovere grindhoudende rivierzanden die als funderingslaag gebruikt worden bij het heien. Door de aard van deze afzettingen zijn aanzienlijke verschillen tussen diktes van zand en klei lagen over een gebied van enkele vierkante meters zeer wel mogelijk.

De chemische samenstelling van dit geheel kan heel goed weergegeven worden door een mengsel te nemen waarin zowel zand als klei en wat organische resten vertegenwoordigd zijn. Standard Reference Material 2709 van het NIST is hiervoor een goede kandidaat. De chemische samenstelling van dit referentiemateriaal is in de activeringsberekeningen gebruikt om de vaste activering te berekenen. De keuze van de bestralings- en afkoeltijd garanderen dat voor de geïnduceerde nucliden de evenwichtsconcentratie bereikt is, terwijl er voldoende bestralingstijd is om eventuele andere geïnduceerde nucliden voldoende te laten ingroeien tot een activiteit boven de rapportage ondergrens van het programma.

Om een indruk te krijgen van de activering in grondwater, is verondersteld dat na de betonnen vloer direct gevolgd wordt door water. In deze berekening is een stralingstijd

¹ De werking van het programma BERAKT is in onderdeel 'Luchtactivering' nader toegelicht.

van 100 jaar gekozen, zodat ook het langlevende tritium tot een evenwichtsconcentratie is ingegroeid.

Door de impuls van de protonenstroom is er een lage thermische neutronenflux vlak na de betonvloer. Op grote afstand echter, daar waar de neutronenenergie tot thermische waarden is afgenomen, is de flux door de kwadratenwet sterk afgenomen. Om toch over een realistische overschatting van de activering te kunnen beschikken is de thermische flux vermeerderd met de waarde van de epithermische flux op een afstand vlak na de betonvloer.

Hieruit blijkt dat:

- Na-24, K-42 en Fe-55 de enige radionucliden zijn die boven de ondergrens van 1 Bq per 100 gram grond geproduceerd worden (zie BERAKT berekening).
- Alle geïnduceerde nucliden onder de vrijstellingconcentratie blijven als gesteld in de Uitvoeringsregeling stralingbescherming EZ, Bijlage 1 d.d. 30 december 2014.

Overheid.nl › Hoog contrast Tekstgrootte

Home Particulieren Ondernemers **Overheidsinformatie** Over deze site Contact English Help Sitemap

› Home › Overheidsinformatie › Zoeken › Zoekresultaten › Regeling

Wet- en regelgeving

› Instellingen (nu: volledige regeling), opent een nieuw venster

← Terug naar resultaten
← Vorige
Volgende >
Wetstechnische informatie

Uitvoeringsregeling stralingbescherming EZ
Geldend op 30-12-2014

Afdrukken
Opslaan

Alles uitklappen

Alles inklappen

Opschrift >

Aanhef >

Hoofdstuk 1 Algemene bepalingen >
(Artikelen 1.1-1.8)

Hoofdstuk 2 Administratieve en organisatorische maatregelen stralingbescherming >
(Artikelen 2.1-2.10)

Hoofdstuk 3 Deskundigheid stralingbescherming >
(Artikelen 3.1-3.24)

Hoofdstuk 4 Meldingsplichtige bronnen >
(Artikelen 4.1-4.12)

Hoofdstuk 5 Instrumenten stralingbescherming >
(Artikelen 5.1-5.12)

Hoofdstuk 6 Beveiliging radioactieve stoffen >

Tabel 1. Vrijstellings- en vrijgavegrenzen voor kunstmatige en natuurlijke bronnen voor activiteitsconcentratie en activiteit

| Radionuclide | Activiteitsconcentratie (Bq g ⁻¹) | Activiteit (Bq) |
|-------------------------------|---|-----------------|
| H-3 (incl. OBT ¹) | 1E+6 | 1E+9 |
| Elementair H-3 | 1E+6 | 1E+9 |
| Be-7 | 1E+3 | 1E+7 |
| Be-10 | 1E+4 | 1E+6 |
| C-11 | 1E+1 | 1E+6 |
| C-11 monoxide | 1E+1 | 1E+9 |
| C-11 dioxide | 1E+1 | 1E+9 |
| C-14 | 1E+4 | 1E+7 |
| C-14 monoxide | 1E+8 | 1E+11 |
| C-14 dioxide | 1E+7 | 1E+11 |
| N-13 | 1E+2 | 1E+9 |
| Ne-19 | 1E+2 | 1E+9 |

- De gesommeerde relatieve activiteit volgens de regels als gesteld in het Uitvoeringsregeling Stralingsbescherming EZ is 0,01 en dus lager is dan 1, zodat zij daarmee vrijgesteld is (zie **sheet 4** verderop).

Activiteitsberekening Bodem

BERAKT

stof gewicht (mg)

O 5.23e+004

Na 1.16e+003

Mg 1.51e+003

Al 7.50e+003

Si 2.97e+004

P 6.00e+001

S 9.00e+001

K 2.03e+003

Ca 1.89e+003

Ti 3.40e+002

Fe 3.50e+003

Faciliteit Eigen_invoer

Bestralingstijd 100.00 years

Afkoeltijd 1.00 hours

Direct na bestraling:

Totale radiotoxiciteit 4.51e-008 Sv

Dosistempo op 1 meter 1.25e-005
uSv/h

Opp. dosistempo op 10 cm 4.02e-002
uSv/h

Productnuclide Al-28

Na afkoeling:

Totale radiotoxiciteit 6.18e-009 Sv

Dosistempo op 1 meter 3.73e-006
uSv/h

Opp. dosistempo op 10 cm 7.55e-003
uSv/h

Productnuclide Na-24

| | | | | (Gamma dosis) | (Beta dosis) |
|--------|---------|------------|-----------------|---------------|--------------|
| Target | Product | halfw.tijd | aktiviteit (Bq) | h10 (uSv/h) | h07 (uSv/h) |
| Na-23 | Na-24 | 14.90 h | 6.22e+000 | 3.15e-006 | 6.22e-003 |
| K-41 | K-42 | 12.36 h | 1.24e+000 | 5.74e-007 | 1.24e-003 |
| Fe-54 | Fe-55 | 2.73 y | 2.03e+000 | 2.03e-009 | 4.07e-005 |
| Fe-56 | Fe-55 | 2.73 y | 2.85e+000 | 2.85e-009 | 5.70e-005 |

TE BESTRALEN STOFFEN

Help

Check input

ppm

procent

ug

mg

g

| |
|----------|
| 7.5 Al |
| 1.89 Ca |
| 3.5 Fe |
| 1.51 Mg |
| 0.06 P |
| 2.03 K |
| 29.66 Si |
| 1.16 Na |

Totale massa: mg

Faciliteit:

Therm. flux: $s^{-1}.m^{-2}$

Epi Therm. flux: $s^{-1}.m^{-2}$

Snelle flux: $s^{-1}.m^{-2}$

Bestralingstijd:

Afkoeltijd:

Help

SHEET 4: Toegepaste (aangepaste) neutronenflux en de bijbehorende bodemactivering

| Soil Reference Material 2709 | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|---|----------|----------|---|----------|----------|---|------|------|------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| Ground: | Al | Ca | Fe | Mg | P | K | Si | Na | S | Ti | O | | | | |
| % | 7,50 | 1,89 | 3,50 | 1,51 | 0,06 | 2,03 | 29,66 | 1,16 | 0,09 | 0,34 | 52,26 | | | | |
| Stroom op target [nA] | 24,70 Gemiddelde continue stroom gedurende het gehele jaar naar: "Typical beam current during operation (mail RE: Some questions related to shieldingdesign" Joern Meissner | | | | | | | | | | | | | | |
| % loss | 100,00 | #p/sec | 1,54E+11 | | | | | | | | | | | | |
| Angle bin [deg] | Forward flux after 1m concrete at 2m from Ta-target #n.cm ⁻² .p ⁻¹ | | | Forward flux after 1m concrete at 2m from Ta-target #n.m ⁻² .s ⁻¹ | | | | | | | Activiteit-evenwichts-concentratie [Bq.g ⁻¹] (100y, 1h) | | | | |
| | Slow | Epi | Fast | Slow | Epi | Fast | Σ Slow,Epi | | | | T1/2 | Na-24 | K-42 | Fe-55 | |
| Gemiddeld over 4π | | | | 3,18E+06 | 8,60E+05 | 1,87E+06 | 4,04E+06 <----Flux in BERAKT geeft: ----> | | | | 14,9h | 0,062 | 12,26h | 0,012 | 2,73y |
| | | | | | | | | | | | | [Bq.g ⁻¹] | [Bq.g ⁻¹] | [Bq.g ⁻¹] | |
| 0-10 | 8,63E-09 | 2,63E-09 | 6,38E-09 | 1,33E+07 | 4,06E+06 | 9,85E+06 | 1,74E+07 | | | | vrijstelling [Bq/g] | 10 | 100 | 10000 | |
| 10-20 | 7,54E-09 | 2,35E-09 | 5,42E-09 | 1,16E+07 | 3,63E+06 | 8,37E+06 | 1,53E+07 | | | | fraction | 6,20E-03 | 1,20E-04 | 4,80E-06 | |
| 20-30 | 5,77E-09 | 1,66E-09 | 3,79E-09 | 8,91E+06 | 2,57E+06 | 5,84E+06 | 1,15E+07 | | | | Som over fracties 0,01 | | | | |
| 30-40 | 3,89E-09 | 1,06E-09 | 2,22E-09 | 6,00E+06 | 1,64E+06 | 3,42E+06 | 7,63E+06 | | | | | | | | |
| 40-50 | 2,42E-09 | 6,13E-10 | 1,18E-09 | 3,74E+06 | 9,46E+05 | 1,82E+06 | 4,69E+06 | | | | | | | | |
| 50-60 | 1,53E-09 | 3,58E-10 | 6,21E-10 | 2,37E+06 | 5,53E+05 | 9,58E+05 | 2,92E+06 | | | | H-3 | C-14 | | | |
| 60-70 | 1,01E-09 | 2,04E-10 | 3,26E-10 | 1,55E+06 | 3,15E+05 | 5,03E+05 | 1,87E+06 | | | | Bq in 1 l H ₂ O 100 year | | | | |
| 70-80 | 7,45E-10 | 1,35E-10 | 1,95E-10 | 1,15E+06 | 2,08E+05 | 3,01E+05 | 1,36E+06 | | | | 0,000214 | 0,0000153 | | | |
| 80-90 | 4,00E-10 | 5,31E-11 | 6,16E-11 | 6,18E+05 | 8,20E+04 | 9,52E+04 | 7,00E+05 | | | | | | | | |
| 90-100 | 2,19E-09 | 5,72E-10 | 1,18E-09 | 3,37E+06 | 8,83E+05 | 1,82E+06 | 4,26E+06 | | | | | | | | |
| 100-110 | 4,23E-10 | 5,76E-11 | 7,20E-11 | 6,54E+05 | 8,89E+04 | 1,11E+05 | 7,43E+05 | | | | | | | | |
| 110-120 | 4,00E-10 | 5,14E-11 | 6,13E-11 | 6,18E+05 | 7,93E+04 | 9,47E+04 | 6,97E+05 | | | | | | | | |
| 120-130 | 3,75E-10 | 4,96E-11 | 5,41E-11 | 5,78E+05 | 7,66E+04 | 8,35E+04 | 6,55E+05 | | | | | | | | |
| 130-140 | 3,77E-10 | 4,91E-11 | 4,87E-11 | 5,82E+05 | 7,58E+04 | 7,51E+04 | 6,58E+05 | | | | | | | | |
| 140-150 | 3,68E-10 | 4,29E-11 | 5,03E-11 | 5,68E+05 | 6,63E+04 | 7,77E+04 | 6,34E+05 | | | | | | | | |
| 150-160 | 3,45E-10 | 4,07E-11 | 4,87E-11 | 5,32E+05 | 6,28E+04 | 7,51E+04 | 5,95E+05 | | | | | | | | |
| 160-170 | 3,61E-10 | 4,62E-11 | 5,03E-11 | 5,57E+05 | 7,13E+04 | 7,77E+04 | 6,29E+05 | | | | | | | | |
| 170-180 | 3,54E-10 | 4,97E-11 | 4,87E-11 | 5,47E+05 | 7,67E+04 | 7,52E+04 | 6,24E+05 | | | | | | | | |

3. Betonactiveringsberekening

Vanuit het cyclotron worden hoog energetische protonen met een energie van 250 MeV in verschillende bundelelementen gestopt, waarbij secundaire straling ontstaat. De neutronencomponent in deze straling zal door een vangstreactie in de betonnen afschermingsmuren het beton mogelijk kunnen activeren.

De faciliteit heeft verschillende behandelmodi met verschillende protonenenergieën en daarbij behorende verliezen in de bundelelementen, die de stroomsterkte vanuit het cyclotron beïnvloeden. De activeringsberekeningen zijn uitgevoerd met een cyclotron stroomsterkte behorend bij de hoogste (0,53 nA) patiëntenstroom en gemiddeld naar een continu cyclotronbedrijf gedurende een heel jaar. Hierbij is geen rekening gehouden met de fractionering van de beam-on tijd binnen de behandeltime zoals is uitgelegd in de laatste paragraaf van bijlage A16. Deze fractionering zal de gemiddelde stroom en daarmee de activering doen afnemen, Omdat het hier activering van een 'statische' gebouwsituatie betreft is ervoor gekozen deze conservatieve aanpak aan te houden.

Deze activering wordt berekend door met het Monte Carlo programma MCNPX de thermische, epithermische en snelle neutronenflux te simuleren. In de simulatie wordt verondersteld dat de cyclotron-output-stroomsterkte, behorend bij een patiënten-behandelstroom die 1 Gy per minuut in een orgaan deponereert volledig in een kopertarget (het collimatormateriaal) gestopt wordt. De betonwand wordt verondersteld hierachter op een gemiddelde afstand van 2 m het kopertarget bolvormig te omvatten.

Per ruimtehoek van 10 graden wordt de neutronenflux gesimuleerd, waarna deze over alle hoeken gemiddeld wordt. Met deze over de gehele ruimtehoek gemiddelde neutronenflux wordt de activering van 1 gram beton berekend bij een zeer lange (100 jaar) bestralingstijd en korte afkoeltijd (1 dag) met het bij het RID gangbare programma BERAKT (De werking van het programma BERAKT wordt in het onderdeel 'Luchtactivering' van deze Bijlage nader toegelicht). De keuze van de bestralings- en afkoeltijd garanderen dat voor de geïnduceerde nucliden de evenwichtsconcentratie bereikt is, terwijl er voldoende bestralingstijd is om eventuele andere geïnduceerde nucliden voldoende te laten ingroeien tot een activiteit boven de rapportage-ondergrens van het programma.

Door de impuls van de protonenstroom is er slechts een te verwaarlozen thermische neutronenflux vlak na het kopertarget. Op grote afstand echter, daar waar de neutronenenergie tot thermische waarden is afgenomen, is de flux door de kwadratenwet sterk afgenomen. Om toch over een realistische overschatting van de activering te kunnen beschikken is de thermische flux vermeerderd met de waarde van de epithermische flux op een afstand vlak na het target.

Hieruit blijkt dat:

- Na-24, Ar-29, Ca-45 Mn-54 en Fe-55 de enige radionucliden zijn die boven de ondergrens van 1 Bq per gram beton geproduceerd worden (zie BERAKT berekening).
- Alle geïnduceerde nucliden onder de vrijstellingconcentratie blijven als gesteld in de Uitvoeringsregeling stralingbescherming EZ, Bijlage 1 d.d. 30 december 2014.

- De gesommeerde relatieve activiteit volgens de regels als gesteld in bijlage 1 van de Uitvoeringsregeling EZ is 0,15 en dus lager is dan 1, zodat zij daarmee vrijgesteld is (zie **sheet 5** verderop).

Activiteitsberekening

BERAKT

stof gewicht (mg)

H 1.00e+002
 C 1.00e+001
 O 5.29e+003
 Na 1.60e+002
 Mg 2.00e+001
 Al 3.39e+002
 Si 3.37e+003
 K 1.30e+002
 Ca 4.40e+002
 Fe 1.40e+002

| Faciliteit | Eigen_invoer | |
|-----------------|--------------|-------|
| Bestralingstijd | 100.00 | years |
| Afkoeltijd | 1.00 | days |

Direct na bestraling:

| | |
|--------------------------|--------------------|
| Totale radiotoxiciteit | 6.19e-007 Sv |
| Dosistempo op 1 meter | 1.16e-004 uSv/h |
| Opp. dosistempo op 10 cm | 4.23e-001 uSv/h |
| Productnuclide | Fe-55 |

Na afkoeling:

| | |
|--------------------------|--------------------|
| Totale radiotoxiciteit | 1.63e-007 Sv |
| Dosistempo op 1 meter | 5.36e-006 uSv/h |
| Opp. dosistempo op 10 cm | 2.30e-002 uSv/h |
| Productnuclide | Fe-55 |

| | | | | | |
|--|--|--|--|---------------|--------------|
| | | | | (Gamma dosis) | (Beta dosis) |
|--|--|--|--|---------------|--------------|

| Target | Product | halfw.tijd | aktiviteit (Bq) | h10 (uSv/h) | h07 (uSv/h) |
|--------|---------|------------|-----------------|-------------|-------------|
| Na-23 | Na-24 | 14.90 h | 9.41e+000 | 4.76e-006 | 9.41e-003 |
| K-39 | Ar-39 | 269.01 y | 3.75e+000 | 3.75e-009 | 7.51e-003 |
| Ca-44 | Ca-45 | 162.99 d | 1.79e+000 | 1.79e-009 | 1.25e-003 |
| Fe-54 | Mn-54 | 312.16 d | 2.81e+000 | 3.54e-007 | 2.81e-005 |
| Fe-54 | Fe-55 | 2.73 y | 2.50e+000 | 2.50e-009 | 5.00e-005 |
| Fe-56 | Fe-55 | 2.73 y | 2.37e+002 | 2.37e-007 | 4.75e-003 |

TE BESTRALEN STOFFEN

Help **Check input**

ppm
 procent
 ug
 mg
 g

1 H
 0.1 C
 52.91 O
 1.6 Na
 0.2 Mg
 3.39 Al
 33.7 Si
 1.3 K

Totale massa: mg

Faciliteit:
Therm. flux: s⁻¹.m⁻²
Help
Epi Therm. flux: s⁻¹.m⁻²
Snelle flux: s⁻¹.m⁻²

Bestralingstijd:

 Afkoeltijd:

SHEET 5: Toegepaste (aangepaste) neutronenflux en de bijbehorende activering

| Atomic Concrete Composition by weigh fraction [%] | | | | | | | | | | Density [g.cm ⁻³]: 2,3 | | | |
|---|--|----------|--|---|----------|----------|---|----------------------------------|----------|------------------------------------|----------|----------|----------|
| H | C | O | Na | Mg | Al | Si | K | Ca | Fe | | | | |
| 1,00 | 0,10 | 52,91 | 1,60 | 0,20 | 3,39 | 33,70 | 1,30 | 4,40 | 1,40 | | | | |
| Stroom op target [nA] | | 24,70 | Gemiddelde continue stroom gedurende het gehele jaar naar: "Typical beam current during operation (mail RE: Some questions related to shieldingdesign" Joern Meissner 19 aug 2014. | | | | | | | | | | |
| % loss | | 100,00 | #p/sec | 1,54E+11 | | | | | | | | | |
| Angle bin [deg] | F0 forward at 2 m from target #n.cm ⁻² .p ⁻¹ | | | F0 forward at 2 m from target #n.m ⁻² .s ⁻¹ | | | Activiteit-evenwichts-concentratie [Bq.g ⁻³] (exposure 100 year after 1 | | | | | | |
| | Slow | Epi | Fast | Slow | Epi | Fast | Σ Slow,Epi | T1/2 | Na-24 | Ar-29 | Ca-45 | Mn-54 | Fe-55 |
| Gemiddeld over 4π | | | | 0,00E+00 | 1,15E+08 | 3,90E+09 | 1,15E+08 | <----Flux in BERAKT geeft: ----> | 0,941 | 0,375 | 0,179 | 0,281 | 237,000 |
| 0-10 | 0,00E+00 | 9,04E-08 | 4,14E-06 | 0,00E+00 | 1,40E+08 | 6,40E+09 | 1,40E+08 | wijstelling [Bq/g] | 10 | 1,00E+07 | 1,00E+04 | 10 | 1,00E+04 |
| 10-20 | 0,00E+00 | 8,69E-08 | 4,04E-06 | 0,00E+00 | 1,34E+08 | 6,24E+09 | 1,34E+08 | fraction | 9,41E-02 | 3,75E-08 | 1,79E-05 | 2,81E-02 | 2,37E-02 |
| 20-30 | 0,00E+00 | 8,24E-08 | 3,62E-06 | 0,00E+00 | 1,27E+08 | 5,59E+09 | 1,27E+08 | Som over fracties | 0,15 | | | | |
| 30-40 | 0,00E+00 | 7,51E-08 | 3,18E-06 | 0,00E+00 | 1,16E+08 | 4,91E+09 | 1,16E+08 | | | | | | |
| 40-50 | 0,00E+00 | 6,84E-08 | 2,74E-06 | 0,00E+00 | 1,06E+08 | 4,24E+09 | 1,06E+08 | | | | | | |
| 50-60 | 0,00E+00 | 6,29E-08 | 2,41E-06 | 0,00E+00 | 9,71E+07 | 3,71E+09 | 9,71E+07 | | | | | | |
| 60-70 | 0,00E+00 | 5,86E-08 | 2,15E-06 | 0,00E+00 | 9,04E+07 | 3,33E+09 | 9,04E+07 | | | | | | |
| 70-80 | 0,00E+00 | 5,42E-08 | 1,97E-06 | 0,00E+00 | 8,37E+07 | 3,04E+09 | 8,37E+07 | | | | | | |
| 80-90 | 0,00E+00 | 6,90E-08 | 1,96E-06 | 0,00E+00 | 1,07E+08 | 3,03E+09 | 1,07E+08 | | | | | | |
| 90-100 | 0,00E+00 | 9,45E-08 | 2,33E-06 | 0,00E+00 | 1,46E+08 | 3,60E+09 | 1,46E+08 | | | | | | |
| 100-110 | 0,00E+00 | 9,16E-08 | 2,30E-06 | 0,00E+00 | 1,41E+08 | 3,56E+09 | 1,41E+08 | | | | | | |
| 110-120 | 0,00E+00 | 8,87E-08 | 2,25E-06 | 0,00E+00 | 1,37E+08 | 3,47E+09 | 1,37E+08 | | | | | | |
| 120-130 | 0,00E+00 | 8,42E-08 | 2,16E-06 | 0,00E+00 | 1,30E+08 | 3,33E+09 | 1,30E+08 | | | | | | |
| 130-140 | 0,00E+00 | 7,80E-08 | 2,04E-06 | 0,00E+00 | 1,20E+08 | 3,15E+09 | 1,20E+08 | | | | | | |
| 140-150 | 0,00E+00 | 7,08E-08 | 1,94E-06 | 0,00E+00 | 1,09E+08 | 3,00E+09 | 1,09E+08 | | | | | | |
| 150-160 | 0,00E+00 | 6,35E-08 | 1,88E-06 | 0,00E+00 | 9,80E+07 | 2,90E+09 | 9,80E+07 | | | | | | |
| 160-170 | 0,00E+00 | 5,80E-08 | 1,82E-06 | 0,00E+00 | 8,95E+07 | 2,81E+09 | 8,95E+07 | | | | | | |
| 170-180 | 0,00E+00 | 6,36E-08 | 2,50E-06 | 0,00E+00 | 9,83E+07 | 3,86E+09 | 9,83E+07 | | | | | | |

4. Betonijzeractiveringsberekening

De mogelijke activering van het betonijzer in het beton van de afschermingsbunker is eveneens afgeschat. De aanpak verschilt niet van de wijze als gevolgd bij de activeringsberekeningen voor bodem en beton in deze Bijlage, d.w.z. dat er gerekend wordt met de te verwachte neutronenflux daar waar deze het hoogst is (cyclotron/degraderruimte). In deze ruimte wordt in de voorwaartse richting van de protonenbundel de afscherming tot twee meter dikte gevormd door losse gestapelde betonblokken die geen bewapening bevatten. In de eerste meter van de (vaste) betonbunker wordt slechts een lichte bewapening toegepast met 50 kg betonijzer type B500B per kubieke meter beton.

Hieronder worden de voor de berekening toegepaste BERAKT gegevens en Excel-sheet (**sheet 6**) weergegeven. Hieruit blijkt dat:

- Fe-55 het enige radionuclide is dat boven de ondergrens van 1 Bq per gram betonijzer geproduceerd wordt met een waarde van 1,39 Bq/g na 100 jaar bestralen en 1 dag afkoelen..
- Dit nuclide onder de vrijstellingconcentratie blijft als gesteld in de Uitvoeringsregeling stralingbescherming EZ, Bijlage 1 d.d. 30 december 2014.

Informatie over het betonijzertype B500B is als laatste pagina van deze bijlage toegevoegd.

Activiteitsberekening

| | | | | | |
|--------|--------|-----|----------------|------------|-----|
| Berakt | Berakt | Okx | 83010483768094 | Nederlands | Yes |
| Berakt | Berakt | No | | | |

BERAKT

stof gewicht (mg)

C 2.40e+001

N 1.40e+000

P 5.50e+000

S 5.50e+000

Fe 9.96e+003

Cu 8.50e+000

Faciliteit Eigen_invoer

Bestralingstijd 100.00 years

Afkoeltijd 1.00 days

Direct na bestraling:

Totale radiotoxiciteit 8.75e-009 Sv

Dosistempo op 1 meter 1.39e-008 uSv/h

Opp. dosistempo op 10 cm 2.78e-004
uSv/h
Productnuclide Fe-55

Na afkoeling:

Totale radiotoxiciteit 8.74e-009 Sv
Dosistempo op 1 meter 1.39e-008
uSv/h
Opp. dosistempo op 10 cm 2.78e-004
uSv/h
Productnuclide Fe-55

| | | | | (Gamma dosis) | (Beta dosis) |
|--------|---------|------------|-----------------|---------------|--------------|
| Target | Product | halfw.tijd | aktiviteit (Bq) | h10 (uSv/h) | h07 (uSv/h) |
| Fe-54 | Fe-55 | 2.73 y | 5.78e+000 | 5.78e-009 | 1.16e-004 |
| Fe-56 | Fe-55 | 2.73 y | 8.10e+000 | 8.10e-009 | 1.62e-004 |

TE BESTRALEN STOFFEN

Help

ppm

procent

ug

mg

g

Check input

99.55 Fe

0.24 C

0.055 S

0.055 P

0.014 N

0.085 Cu

Totale massa: **mg**

Faciliteit: ▼

Therm. flux: **s⁻¹.m⁻²**

Epi Therm. flux: **s⁻¹.m⁻²**

Snelle flux: **s⁻¹.m⁻²**

Bestralingstijd: ▼

Afkoeltijd: ▼

Help

SHEET 6: Toegepaste (aangepaste) neutronenflux en de bijbehorende activering

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
|----|-----------------------|--|--|----------|---|----------|----------|--|---|------------|---|----------|----------|----------|---|-------|
| 1 | Betonijzer B500B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Ground: | Fe | C | S | P | N | Cu | | | | | | | | | |
| 4 | % | 99,5500 | 0,2400 | 0,0550 | 0,0550 | 0,0140 | 0,0850 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Stroom op target [nA] | 24,70 | Gemiddelde continue stroom gedurende het gehele jaar naar: "Typical beam current during operation (mail RE: Some questions related to shieldingdesign" Joern Meissner 19 aug 2014. | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | % loss | 100,00 | #p/sec | 1,54E+11 | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | Angle bin [deg] | Forward flux after 1m concrete at 2m from Ta-target #n.cm ⁻² .p ⁻¹ | | | Forward flux after 1m concrete at 2m from Ta-target #n.m ⁻² .s ⁻¹ | | | Activiteit-evenwichts-concentratie [Bq.g-1] (100y, 1h) | | | | | | | | |
| 11 | | Slow | Epi | Fast | | Slow | Epi | Fast | | Σ Slow,Epi | | | | | | Fe-55 |
| 12 | | | | | | | | | | | | T1/2 | | | | 2,73y |
| 13 | Gemiddeld over 4π | | | | | | | | | | | [Bq.g-1] | [Bq.g-1] | [Bq.g-1] | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 0-10 | 8,63E-09 | 2,63E-09 | 6,38E-09 | | 1,33E+07 | 4,06E+06 | 9,85E+06 | | 1,74E+07 | | | | | | |
| 16 | 10-20 | 7,54E-09 | 2,35E-09 | 5,42E-09 | | 1,16E+07 | 3,63E+06 | 8,37E+06 | | 1,53E+07 | | | | | | |
| 17 | 20-30 | 5,77E-09 | 1,66E-09 | 3,79E-09 | | 8,91E+06 | 2,57E+06 | 5,84E+06 | | 1,15E+07 | | | | | | |
| 18 | 30-40 | 3,89E-09 | 1,06E-09 | 2,22E-09 | | 6,00E+06 | 1,64E+06 | 3,42E+06 | | 7,63E+06 | | | | | | |
| 19 | 40-50 | 2,42E-09 | 6,13E-10 | 1,18E-09 | | 3,74E+06 | 9,46E+05 | 1,82E+06 | | 4,69E+06 | | | | | | |
| 20 | 50-60 | 1,53E-09 | 3,58E-10 | 6,21E-10 | | 2,37E+06 | 5,53E+05 | 9,58E+05 | | 2,92E+06 | | | | | | |
| 21 | 60-70 | 1,01E-09 | 2,04E-10 | 3,26E-10 | | 1,55E+06 | 3,15E+05 | 5,03E+05 | | 1,87E+06 | | | | | | |
| 22 | 70-80 | 7,45E-10 | 1,35E-10 | 1,95E-10 | | 1,15E+06 | 2,08E+05 | 3,01E+05 | | 1,36E+06 | | | | | | |
| 23 | 80-90 | 4,00E-10 | 5,31E-11 | 6,16E-11 | | 6,18E+05 | 8,20E+04 | 9,52E+04 | | 7,00E+05 | | | | | | |
| 24 | 90-100 | 2,19E-09 | 5,72E-10 | 1,18E-09 | | 3,37E+06 | 8,83E+05 | 1,82E+06 | | 4,26E+06 | | | | | | |
| 25 | 100-110 | 4,23E-10 | 5,76E-11 | 7,20E-11 | | 6,54E+05 | 8,89E+04 | 1,11E+05 | | 7,43E+05 | | | | | | |
| 26 | 110-120 | 4,00E-10 | 5,14E-11 | 6,13E-11 | | 6,18E+05 | 7,93E+04 | 9,47E+04 | | 6,97E+05 | | | | | | |
| 27 | 120-130 | 3,75E-10 | 4,96E-11 | 5,41E-11 | | 5,78E+05 | 7,66E+04 | 8,35E+04 | | 6,55E+05 | | | | | | |
| 28 | 130-140 | 3,77E-10 | 4,91E-11 | 4,87E-11 | | 5,82E+05 | 7,58E+04 | 7,51E+04 | | 6,58E+05 | | | | | | |
| 29 | 140-150 | 3,68E-10 | 4,29E-11 | 5,03E-11 | | 5,68E+05 | 6,63E+04 | 7,77E+04 | | 6,34E+05 | | | | | | |
| 30 | 150-160 | 3,45E-10 | 4,07E-11 | 4,87E-11 | | 5,32E+05 | 6,28E+04 | 7,51E+04 | | 5,95E+05 | | | | | | |
| 31 | 160-170 | 3,61E-10 | 4,62E-11 | 5,03E-11 | | 5,57E+05 | 7,13E+04 | 7,77E+04 | | 6,29E+05 | | | | | | |
| 32 | 170-180 | 3,54E-10 | 4,97E-11 | 4,87E-11 | | 5,47E+05 | 7,67E+04 | 7,52E+04 | | 6,24E+05 | | | | | | |