

MASTER

De productie van $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$ -generatoren aan de THE voor toepassing in de nucleaire geneeskunde

Witsenboer, A.J.; Mulders, J.J.L.

Award date:
1981

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

STRALINGSVEILIGHEID EN DOSIMETRIE

Addendum bij het afstudeerverslag

De produktie van $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$ -generatoren aan de THE voor toepassing in de nucleaire geneeskunde.

In dit addendum worden de stralingshygiënische aspecten bij de produktie van $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$ -generatoren, met behulp van de gas-targetopstelling, besproken. Er wordt globaal aangegeven aan welke typen ioniserende straling een radiologische werker tijdens af na de ^{81}Rb -produktie blootgesteld kan worden, indien de produktie normaal verloopt en als er calamiteiten optreden. In dit addendum is ook aandacht besteed aan de stralingsbelasting van een patiënt die $^{81\text{m}}\text{Kr}$ inademt voor een ventilatiestudie.

De tot stand koming van dit addendum is te danken aan de nauwe samenwerking met de Stralingsbeschermingsdienst gedurende de gehele afstudeerperiode. Bij het schrijven van dit addendum heeft ir. Chr. J. Huyskens (hoofd SBD) ons begeleid.

J.J.L. Mulders,
A.J. Witsenboer.

INHOUDSOPGAVE

- 1 INLEIDING
 - 1.1 De uitgangssituatie
 - 1.2 Overzicht

- 2 DETAILBESCHRIJVING VAN DE HANDELINGEN NA EOB
 - 2.1 De handelingen in bunker 4A na EOB
 - 2.2 Het transport van het geproduceerde rubidium naar gebouw Athene
 - 2.3 Handelingen in het B-laboratorium voor de vervaardiging van generatoren

- 3 IONISERENDE STRALING TEN GEVOLGE VAN DE PRODUKTIE VAN ^{81}Rb
 - 3.1 Het stralingsniveau tijdens de produktie van ^{81}Rb
 - 3.2 Beschouwingen omtrent de aanwezigheid van activiteit in bunker 4A
 - 3.3 Activering van de gastargetopstelling
 - 3.3.1 De activering van aluminium
 - 3.3.2 De activering van messing
 - 3.3.3 De activering van tantaal
 - 3.3.4 De activering van roestvrij staal
 - 3.3.5 De activering van koolstof
 - 3.4 Conclusies

- 4 MOGELIJKE STORINGEN OF CALAMITEITEN
 - 4.1 Mogelijke storingen tijdens een bestraling
 - 4.2 Mogelijke storingen bij de handelingen na EOB

- 5 MOGELIJKE BESMETTINGEN
 - 5.1 (MPC)_a-waarden
 - 5.2 ALI-waarden
 - 5.3 De radiologische gevolgen van een besmetting

- 6 HET EXPOSITIEMPO VAN EEN Rb/Kr-GENERATOR

7 DOSISBEREKENINGEN BIJ INWENDIGE BESTRALING TEN GEVOLGE VAN IN- ADEMING VAN $^{81\text{m}}\text{Kr}$

7.1 Inleidng

7.1.1 Effectief dosisequivalent

7.1.2 Berekening van de geabsorbeerde dosis

7.2 De geabsorbeerde dosis in de longen ten gevolge van het in- ademen van $^{81\text{m}}\text{Kr}$

7.3 De geabsorbeerde dosis in de longen ten gevolge van inademing van ^{133}Xe

7.4 Discussie

8 CONCLUSIES

APPENDIX

REFERENTIES

1 INLEIDING

Bij de produktie van $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$ -generator is het onvermijdelijk dat de bij de produktie betrokken radiologisch werker een verhoogde dosis oploopt. Onder de dosis wordt hier verstaan de geabsorbeerde dosis ten gevolge van de blootstelling aan ioniserende straling.

Uit stralingsveiligheidsoverwegingen is het noodzakelijk om bekend te zijn met de radiologische gevolgen van de produktie van Rb/Kr-generatoren. Daartoe dient inzicht te worden verkregen in de dosistempi waaraan de radiologische werker bij normale omstandigheden en bij ongevallen blootstaat. Voor de toepassing van de generator in het ziekenhuis, is het wenselijk om de stralingsbelasting van de patiënt, die het onderzoek met $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ondergaat, te bepalen.

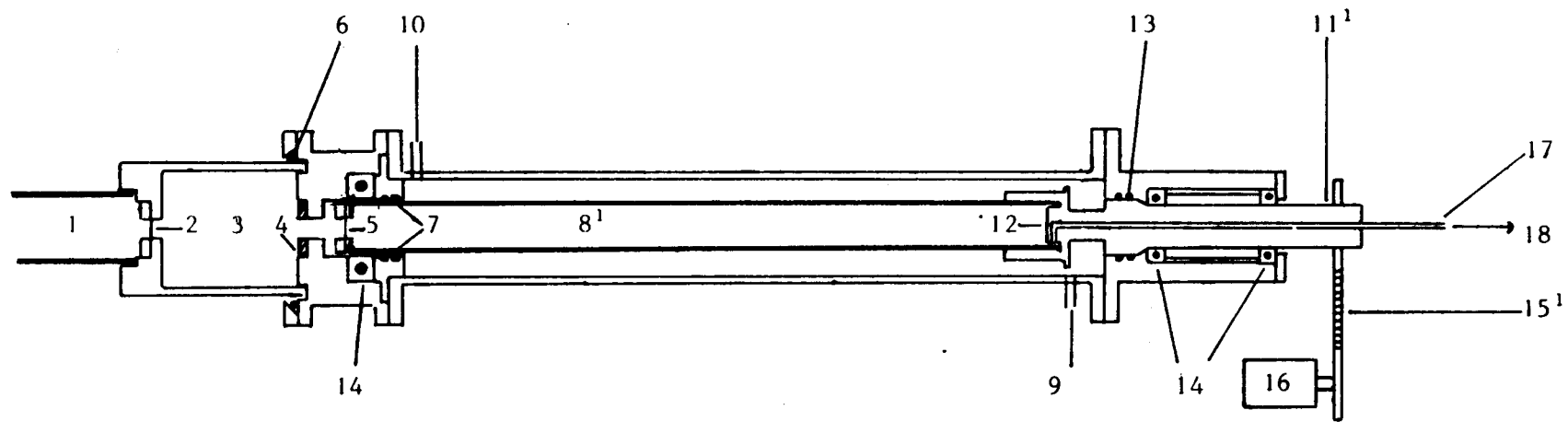
1.1 De uitgangssituatie

In dit addendum worden de volgende veronderstellingen gemaakt, die betrekking hebben op de produktie van de Rb/Kr-generatoren:

1. Het ^{81}Rb wordt geproduceerd met de gastargetopstelling in bunker 4A (zie fig. 1.1). Het krypton dat een targetdikte heeft van 2 barmeter, wordt bestraald met 26,2 MeV protonen. De opbrengst bedraagt dan ca. 55 GBq/C (5,4 mCi/ μAh) (zie hoofdstuk 3 van het afstudeerverslag)

Bij de produktie wordt de spoelvloeistof (60 ml gedestilleerd water) na bestraling in de opstelling gepompt ("droog" bestralen) en tenslotte opgevangen in het opvangreservoir dat van snelkoppelingen is voorzien. Bij de produktie wordt de koelval gebruikt om het krypton, na bestraling, uit de opstelling te "pompen". De handelingen na bestraling worden in detail besproken in hoofdstuk 2.

2. Het opvangreservoir wordt na bestraling vervoerd naar het radiochemisch B-laboratorium in gebouw Athene, in een speciaal voor dat doel ontworpen container.



- | | | | |
|----------------|---|-----------------|--|
| 1 | bundelpijp | 10 | koelwater uit |
| 2 | Ta-folie (25 μm) | 11 ¹ | houder van de messing cilinder |
| 3 | bufferruimte | 12 | Al-bundelstop met daarin het toe- en afvoer- |
| 4 | grafiet ringetje | | kanaal |
| 5 | Ta-folie (25 μm) | 13 | afdichtringen tussen het koelwater en de |
| 6 | afdichtring | | buitenlucht |
| 7 | afdichtringen tussen het krypton en het | 14 | kogellager(s) |
| | koelwater | 15 ¹ | aandrijfketting |
| 8 ¹ | vernikkelde messing cilinder | 16 | motor |
| 9 | koelwater in | 17 | Cu-pijpje |
| | | 18 | naar de slangenpomp |

Fig. 1.1 De gastargetopstelling (verbeterde versie)

Schaal: 1 : 5

¹ Onderdelen 8, 11, 15 en 17 draaien tijdens het spoelen. De overige onderdelen staan stil.

3. De generatoren worden geladen en getest in het radiochemisch B-laboratorium in gebouw Athene (zie hoofdstuk 5 van het afstudeerverslag).

1.2 Overzicht

Nadat de detailhandelingen besproken zijn voor de produktie van de Rb/Kr-generator (hoofdstuk 2), wordt in hoofdstuk 3 besproken welke soorten ioniserende straling het gevolg zijn van de produktie van ^{81}Rb . Hierdoor wordt inzicht verkregen in de blootstelling aan ioniserende straling van de betrokken radiologisch werker bij een normaal verlopende produktie van ^{81}Rb . Mogelijke storingen tijdens de produktie van ^{81}Rb worden, met de radiologische gevolgen, besproken in hoofdstuk 4. Een storing kan tot gevolg hebben dat er in bunker 4A een besmetting optreedt. De radiologisch werker kan dan inwendig besmet worden met de geproduceerde radionucliden. De dosis die daarvan het gevolg is kan worden bepaald met behulp van de $(\text{MPC})_a^1$ of de ALI^1 (hoofdstuk 5).

In hoofdstuk 6 worden enige aspecten betreffende de stralingsveiligheid bij het gebruik van de generator, en de afscherming door de container besproken. Bij de toepassing van de generator in het ziekenhuis loopt de patiënt die het $^{81\text{m}}\text{Kr}$ inademt een dosis op ten gevolge van de geïnhaleerde activiteit. In hoofdstuk 7 wordt besproken hoe deze geabsorbeerde dosis bepaald kan worden. Tenslotte wordt in hoofdstuk 8 een aantal conclusies getrokken uit de beschouwingen over de stralingsveiligheid bij de produktie van ^{81}Rb en over de dosimetrie bij het ademhalingsonderzoek.

¹ Voor een definitie zie hoofdstuk 5.

2 DETAILBESCHRIJVING VAN DE HANDELINGEN NA EOB

In dit hoofdstuk worden de handelingen beschreven die na een bestraling van krypton in de gastargetopstelling (verslag: hoofdstuk 3, appendix D), verricht worden in bunker 4A (2.1). Na deze handelingen bevindt zich 60 ml water, waarin de radionucliden zijn opgelost, in het opvangreservoir. Dit reservoir wordt getransporteerd in een speciaal daartoe ontworpen container. Het transport wordt beschreven in 2.2.

Tenslotte wordt in 2.3 een beschrijving gegeven van het laden van een generator met de spoelvloeistof uit het opvangreservoir. Bij alle handelingen is een schatting gemaakt van het tijdstip na EOB waarop ze verricht worden.

2.1 De handelingen in bunker 4A na EOB

Op EOB is in bunker 4A de volgende uitgangssituatie ontstaan:

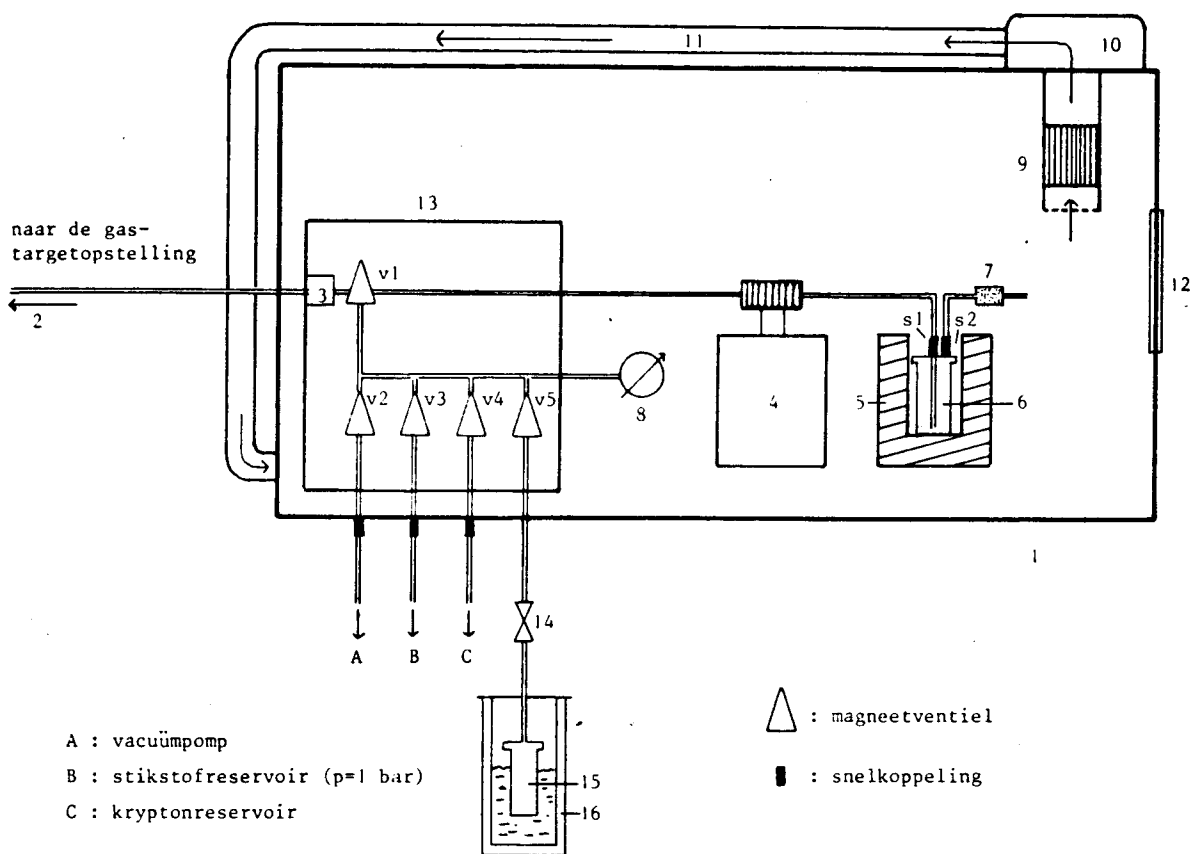
- 1 - de gastargetopstelling is gevuld met krypton, de druk bedraagt ca. 4 bar
- 2 - de koelval is gevuld met vloeibare stikstof
- 3 - de Rb-radioisotopen die tijdens de produktie gevormd zijn, zijn neergeslagen op de wand van de vernikkelde messing cilinder
- 4 - alle magneetventielen zijn onbekrachtigd
- 5 - het koelwater van het gesloten koelsysteem wordt rondgepompt.

Tijdstip: EOB.

Nadat bunker 4B is betreden worden de volgende handelingen verricht (zie fig. 2.1):

- 1 - koeling uitschakelen
- 2 - magneetventiel V5¹ openen, wachten tot de druk laag genoeg is, V5 sluiten
- 3 - V3 openen, de opstelling vult zich met stikstof, V3 sluiten
- 4 - recirculatie ventilator (10)¹ aan
- 5 - V1 bekrachtigen (dan is de gastargetopstelling met de slangenpomp verbonden)

¹ zie figuur 2.1



- | | |
|----------------------------------|--|
| 1. perspex glovebox | 9. absoluut filter |
| 2. Cu-pijpje | 10. recirculatie ventilator |
| 3. afdichting voor het Cu-pijpje | 11. recirculatie slang |
| 4. slangenpomp | 12. luikje |
| 5. loodcontainer | 13. "containment" met magneetventielen |
| 6. perspex opvangreservoir | 14. naaldafsluiter |
| 7. filter | 15. koelval |
| 8. manometer | 16. dewarvat voor LN ₂ |

Fig. 2.1 Schets van de glovebox in bunker 4A

- 6 - spoelvloeistof met behulp van de slangenpomp (4)¹ in de gastargetopstelling pompen (inpomptijd bedraagt ca. 10 minuten)
- 7 - target motor aanzetten; de wand van de messing cilinder wordt schoongespoeld
- 8 - target motor uitzetten (de juiste positie voor het uitpompen is bereikt wanneer het controlelampje brandt)

¹ zie figuur 2.1

- 9 - met behulp van de slangenpomp de spoelvroestof uit de opstelling pompen (uitpomptijd bedraagt ca. 10 minuten); daarna slangenpomp in positie n (neutraal) zetten
- 10 - VI terug zetten in oorspronkelijke positie.

Nu kan bunker 4A betreden worden. De spoelvroestof met daarin opgelost de geproduceerde radioisotopen bevindt zich in het opvangreservoir (5).

Tijdstip: EOB + 35 minuten.

In bunker 4A vinden de volgende handelingen plaats:

- 1 - het exposietempo in de bunker meten
- 2 - snelkoppelingen S1 en S2 losmaken met behulp van de handschoenen van de glovebox
- 3 - luik (12) openen en reservoir (5) met behulp van een lang pincet uit de glovebox halen en in de transportcontainer plaatsen
- 4 - transportcontainer sluiten en vergrendelen
- 5 - luik (12) sluiten na eventueel één wrijfproef te hebben genomen ter controle van in de glovebox vrijgekomen radioactiviteit
- 6 - transportcontainer op besmetting controleren
- 7 - ter afsluiting van de produktie in bunker 4A:
 - naaldafsluiter (14) sluiten
 - recirculatie ventilator (10) uitzetten
 - het bedieningspaneel uitzetten met behulp van de hoofdschakelaar

Eindsituatie: Het geproduceerde rubidium bevindt zich, opgelost in 60 ml water, in een transportcontainer en is gereed om vervoerd te worden. Het exposietempo op 1 m afstand van de container is ca. 0,5 mR/h en op het oppervlak ca. 40 mR/h per 10 mCi ^{81}Rb .

Tijdstip: ca. 40 minuten na EOB.

2.2 Het transport van het geproduceerde rubidium naar gebouw Athene

Het laden van de generatoren met de spoelvroestof gebeurt in het radiochemisch B-laboratorium van gebouw Athene. Het vervoer naar het B-laboratorium geschiedt op de volgende wijze:

- 1 - de transportcontainer wordt buiten bunker 4A gereden
- 2 - het exposietempo op het oppervlak van de container en op 1 m afstand wordt gemeten en op het transportlabel genoteerd
- 3 - de transportkar wordt via de bundelzaal en de benedengang van het cyclotrongebouw naar de nooduitgang gebracht
- 4 - de transportcontainer en de kar worden overgeladen in een auto waarmee naar gebouw Athene wordt gereden
- 5 - de container wordt via de achterdeur van de actieve ruimte naar het B-laboratorium gebracht.

Eindsituatie: Het geproduceerde rubidium bevindt zich opgelost in 60 ml water, in een transportcontainer in het radiochemisch B-laboratorium van gebouw Athene.

Tijdstip: ca. 55 minuten na EOB.

2.3 Handelingen in het B-laboratorium voor de vervaardiging van generatoren

In het B-laboratorium worden de volgende handelingen verricht om een generator met de geproduceerde Rb-radioisotopen te laden:

- 1 - het openen van de transportcontainer en het overbrengen van het spoel-vloeistofreservoir naar de zuurkast (met "handling tools")
- 2 - via een snelkoppeling 10 μ l tot 100 μ l uit het reservoir pipetteren en in een telflesje deponeren voor metingen; met dit gedeelte van de spoelvloeistof wordt de ^{81}Rb -activiteit en de nuclidische samenstelling van de verkregen oplossing bepaald
- 3 - met behulp van een slangpomp kan de spoelvloeistof gepompt worden op een ionenwisselaarskolom voor "indikking",
en/of papiergeneratoren,
en/of ionenwisselaarskolommen die als generatoren dienen.
- 4 - indien nodig het eluaat van de indikkolom (dat de Rb-radioisotopen bevat) op de papiergenerator pompen
- 5 - het meten van het elutierement van de papiergenerator en/of de ionenwisselaar met behulp van de opstelling beschreven in 5.2.2 van het afstudeerverslag.

- 6 - het meten van het eerste eluaat van de ionenwisselaar op doorbraak van rubidium, met behulp van de Ge(Li)-detector.
- 7 - indien de generatoren voldoen aan de gestelde eisen betreffende het elutierendement en de Rb-doorbraak worden zij verpakt in de daarvoor bestemde transportcontainers.

Eindsituatie: Een of meer geteste generatoren die geschikt zijn om naar ziekenhuizen getransporteerd te worden en te worden toegepast.

Tijdstip: ca. 2,5 uur na EOB.

3 IONISERENDE STRALING TEN GEVOLGE VAN DE PRODUKTIE VAN ^{81}Rb

In dit hoofdstuk wordt besproken welke straling het gevolg is van de produktie van ^{81}Rb , en welke veiligheidsmaatregelen er genomen zijn om de blootstelling aan die straling te beperken. Tijdens de produktie is er sprake van een hoog neutronendosis tempo in bunker 4A ten gevolge van de kernreacties die de protonen aangaan met het krypton en met andere delen van de gastargetopstelling. De afscherpende maatregelen voor deze neutronenstraling worden besproken in 3.1. Na bestraling is er een hoeveelheid radioactiviteit in bunker 4A aanwezig. De maatregelen die genomen zijn tegen de blootstelling van personen aan deze straling en tegen de eventuele verspreiding van radioactiviteit worden beschreven in 3.2.

Tenslotte wordt in 3.3 de bijkomende activering besproken van onderdelen van de gastargetopstelling waar de protonenbundel (mogelijkerwijs) opvalt, en worden in 3.4 enkele conclusies getrokken uit de getroffen maatregelen.

3.1 Het stralingsniveau tijdens de produktie van ^{81}Rb

Tijdens de proefbestralingen met de gastargetopstelling is aandacht besteed aan de afscherming tegen neutronenstraling. Bij de produktie van ^{81}Rb ontstaat er ter plaatse van de gastargetopstelling een hoog neutronendosis tempo ten gevolge van de kernreacties die de opvallende protonen aangaan met het materiaal dat bestraald wordt. Het neutronen- en gammadosisequivalent tempo resp. \dot{H}_n en \dot{H}_γ , wordt bij een gegeven opstelling bepaald door de bundelstroom en de primaire en secundaire afscherming. Het exposietempo buiten bunker 4A wordt op enkele plaatsen langs de zuidwand van de cyclotronhal gemeten. Indien het exposietempo groter blijft dan 5 mR/h valt, na korte tijd, het cyclotron uit. De maximale bundelstroom I_{max} is die bundelstroom welke bij een gegeven primaire en secundaire afscherming aanleiding geeft tot een exposietempo buiten bunker 4A van 5 mR/h. De primaire afscherming wordt gevormd door een laag paraffine die om de opstelling is geplaatst. De secundaire afscherming wordt gevormd door de betonnen wand en

het dak van bunker 4A.

Om na te gaan welk effect bepaalde afschermingsmaatregelen hebben, is bij een aantal van de proefbestralingen het neutronen- en gammadosisequivalenttempo gemeten op verschillende plaatsen buiten de bunker. Ter verduidelijking is in fig. 3.1 een plattegrond opgenomen van de bestralingsruimte, en zijn de plaatsen 1 t/m 5 waar de metingen zijn verricht aangegeven. In tabel 3.1 is een numerieke weergave van de diverse dosisequivalenttempi gegeven. Alle tempi zijn gerelateerd aan een bundelstroom van 1 μ A op het target. In de tabel zijn tevens de afschermingscondities opgenomen.

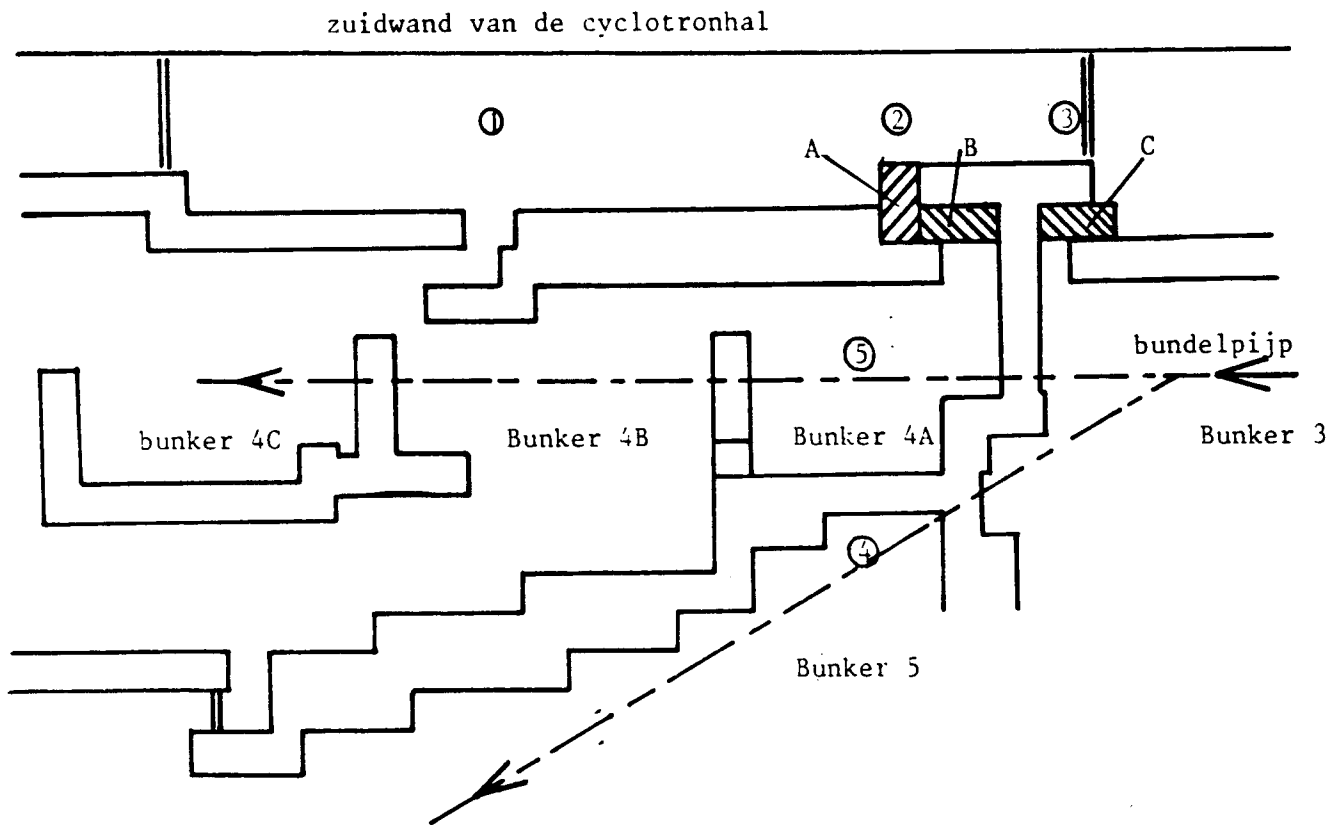
Bij tabel 3.1 dient te worden opgemerkt dat \dot{H}_n en \dot{H}_γ ook afhangen van de wijze waarop de bundel is uitgericht, d.w.z. welk gedeelte van de totale bundelstroom er bij het transport van de bundel naar het gastarget verloren gaat.

Er mag worden geconcludeerd dat de getroffen afschermingsmaatregelen effect hadden, hetgeen ook blijkt uit de maximaal haalbare bundelstroom. De hoge waarden van \dot{H}_n en \dot{H}_γ op meetplaats 4 hebben ertoe geleid dat tijdens de productie van ^{81}Rb , bunker 5 in het veiligheidssyteem moet worden opgenomen.

3.2 Beschouwingen omtrent de aanwezigheid van activiteit in bunker 4A

Na een bestraling van krypton met protonen bevindt het geproduceerde ^{81}Rb zich op de wand van de vernikkelde messing cilinder (fig. 1.1). De aanwezigheid van de, bij de bestraling gevormde, kortlevende activeringsprodukten (zie 3.3) en van de geproduceerde hoeveelheid ^{81}Rb geven aanleiding tot een verhoogd (ca. 20 mR/h) exposietempo in bunker 4A, enkele minuten na EOB. Om niet onnodig in dit stralingsveld te hoeven werken is het mogelijk gemaakt om de opstelling in bunker 4B te bedienen (zie 2.1) en daarmee de verblijftijd van de radiologisch werker in bunker 4A tot een aanvaardbaar niveau terug te brengen. Het exposietempo in bunker 4B bedraagt na EOB minder dan 1 mR/h.

Door onvoorziene omstandigheden of ongelukken zou het mogelijk zijn dat de geproduceerde radionucliden zich (gedeeltelijk) verspreiden in bunker 4A. De radiologisch werker in bunker 4A kan dan inwendig besmet worden waardoor hij



De plaatsen ① t/m ⑤ waar het neutronendosis-equivalent- en het gammadosis-equivalenttempo is gemeten, zijn omcirkeld. Meetplaats 5 bevindt zich op het dak van bunker 4A loodrecht boven de gastargetopstelling.

De extra betonblokken (zie tabel 3.1) zijn aangeduid met A, B en C.

Fig. 3.1 Plattegrond van de produktiebunker en omliggende bunkers.
Meetpunt 5 bevindt zich op het dak van bunker 4A.

Tabel 3.1 De dosisequivalenttempi \dot{H}_n en \dot{H}_γ ($\mu\text{Sv/h}$) op de meetplaatsen 1 t/m 5, zoals aangegeven in figuur 3.4. De grootheden \dot{H}_n en \dot{H}_γ zijn genormeerd op een bundelstroom op het target van $1 \mu\text{A}$. Ook de afschermingsmaatregelen en de daaruit voortvloeiende maximaal haalbare bundelstroom zijn in de tabel opgenomen.

| proefbestraling nr. | | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 |
|--|------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
| <u>condities</u> | | | | | | |
| - primaire afscherming van ca. 10 cm paraffine aanwezig? | | nee | ja | ja | ja | ja |
| - aanwezige betonblokken | | - | - | A | A+B+C | A+B+C ³ |
| - opbouw van het dak: beton | | 50 cm | 50 cm | 50 cm | 65 cm | 65 cm |
| paraffine | | - | - | - | 15 cm | 15 cm |
| <u>dosisequivalenttempo</u> ¹ | | | | | | |
| meetplaats 1 | \dot{H}_n | 30 | 10 | 2 | 1 | 1 |
| | \dot{H}_γ | 30 | 10 | 1 | 1 | 2 |
| meetplaats 2 | \dot{H}_n | 500 | 100 | 9 | 10 | 5 |
| | \dot{H}_γ | 250 | 300 | 9 | 50 | 2 |
| meetplaats 3 | \dot{H}_n | 50 | 10 | 5 | 4 | 2 |
| | \dot{H}_γ | 30 | 20 | 5 | 9 | 2 |
| meetplaats 4 | \dot{H}_n | 1500 | 700 | 500 | 300 | 300 |
| | \dot{H}_γ | 800 | 500 | 500 | 500 | 2 |
| meetplaats 5 | \dot{H}_n | 2500 | 500 | 110 | 50 | 50 |
| | \dot{H}_γ | 1100 | 300 | 300 | 50 | 2 |
| I_{max} (μA) | | 0,35 | 2,0 | 2,5 | 6,0 | 8,0 |

¹ opgegeven in $\mu\text{Sv/h}$ voor $I = 1 \mu\text{A}$.

Er geldt: $1 \mu\text{Sv/h} = 0,1 \text{ mrem/h}$.

² niet gemeten

³ Het dak is doorgetrokken tot over betonblok B (zie fig. 3.1).

een dosis oploopt ten gevolge van de aanwezigheid van radioactiviteit in het lichaam. Om de verspreiding van radionucliden tegen te gaan zijn er een aantal maatregelen getroffen:

- (1) De ruimte waarin het krypton zich bevindt tijdens de bestraling heeft slechts één toegangskanaal. Dit toegangskanaal is via een draaibare koppeling verbonden met de magneetventielen van het in- en uitlaatsysteem (zie fig. 2.1). De draaiende koppeling bevindt zich in de glovebox zodat bij een eventuele lekkage de vrijkomende activiteit binnen de glovebox blijft.
- (2) De gastargetopstelling is voorzien van een bufferruimte, welke tijdens de bestraling vacuüm is. De gebruikte folies¹ (2) en (5) zijn Ta-folies (25 µm dik), die bij kamertemperatuur een drukverschil van 7 bar kunnen houden. Mocht tijdens een bestraling folie (5) scheuren, dan kan het krypton niet in het bundelgeleidingssysteem van het cyclotron terecht komen. De bufferruimte vult zich dan met krypton, waardoor de druk gehalveerd wordt (zie ook afstudeerverslag 6.2.4).
- (3) Het gehele in- en uitlaatsysteem is ondergebracht in een glovebox, zodat eventueel vrijkomende radioactiviteit zich niet in bunker 4A kan verspreiden. De glovebox (zie fig. 2.1) is voorzien van een recirculatiesysteem waarin een absoluut filter is opgenomen. Dit filter vangt o.a. aerosolen in, waardoor de activiteit die zich aan aerosolen heeft gehecht ingevangen wordt.
- (4) Er is gebruik gemaakt van een slangenpomp (Gilson minipuls 2) voor het in- en uitpompen van de spoelvoelstof. Een slangenpomp heeft in het gedeelte waar de voelstof zich bevindt geen (draaiende) afdichtingen waardoor de kans op lekkage zeer gering is.
- (5) Het opvangreservoir² is voorzien van snelkoppelingen die het reservoir als het losgekoppeld is van het in- en uitlaatsysteem, automatisch afsluiten, zodat niet met de spoelvoelstof gemorst kan worden. Het opvangreservoir is verder voorzien van een filter² waardoor de, in het reservoir gevormde aerosolen, ingevangen worden.

¹ De vermelde getallen verwijzen naar de in fig. 1.1 genummerde onderdelen.

² Zie figuur 2.1.

- (6) Het opvangreservoir wordt via een luikje ¹ uit de glovebox gehaald, zodat de eventueel in de glovebox aanwezige activiteit zich vrijwel niet in de bunker zal verspreiden.
- (7) De wanden en het plafond van bunker 4A zijn betimmerd en van een afwasbare verflaag voorzien. Op de vloer is een afwasbare vloerbedekking met opstaande randen gelegd. Hierdoor is bunker 4A gemakkelijk te decontamineren. (Met één natte veegproef van de vloer wordt 75% van de activiteit verwijderd.) Bunker 4A is van bunker 4B gescheiden door een deur waardoor van bunker 4A een gesloten ruimten kan worden gemaakt. De aangebrachte voorzieningen hebben ertoe geleid dat in bunker 4A condities ontstaan zijn analoog aan die van een radiochemisch C-laboratorium.

3.3 Activering van de gastargetopstelling

Bij de gebruikte gastargetopstelling wordt de protonenbundel via een diafragma uitgericht op het target. Het is mogelijk dat de bundel door verstrooiing en/of door verkeerde uitrichting invalt op delen van de gastargetopstelling die dan geactiveerd zouden kunnen worden (zie fig. 3.2).

Bij het transport van de bundel naar het krypton target kunnen de volgende materialen geactiveerd worden (zie ook fig. 1.1) ²:

- (1) aluminium (bundelpijp, bundelstop (11), wand van bufferruimte (3))
- (2) messing (70% Cu, 30% Zn) (vernikkelde messing cilinder)
- (3) tantaal (folies (2) en (5))
- (4) roestvrij staal (aandrukplaat van de folies, schroeven)
- (5) koolstof (diafragma, grafiet ringetje (4))

¹ In de toekomst zal het luikje vervangen worden door een sluis.

² De vermelde getallen verwijzen naar de genummerde onderdelen in fig. 1.1.

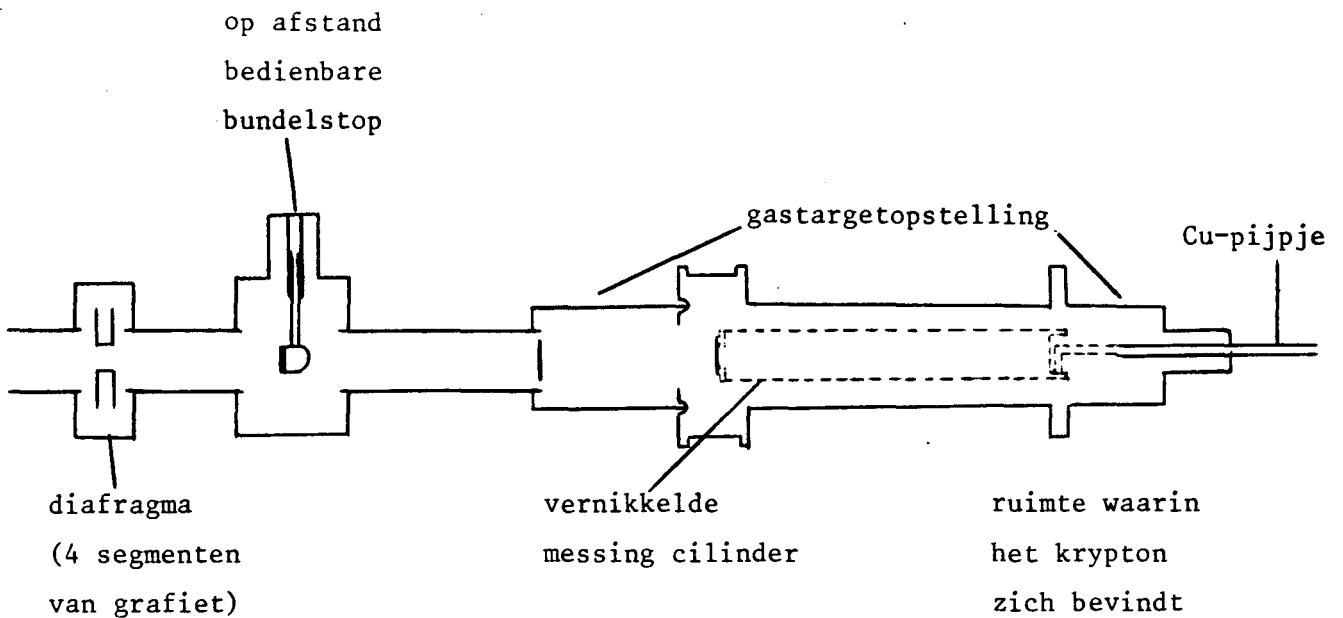


Fig. 3.2 Schematische weergave van de bestralingsopstelling

3.3.1 De activering van aluminium

Het grootste gedeelte van de opstelling bestaat uit aluminium, waarin via (p, xn) reacties alleen kortlevende Si-radioisotopen ontstaan ($t_{\frac{1}{2}} < 5$ s). Het aluminium wordt met name gebruikt om het koperen pijpje af te schermen (zie fig. 3.3).

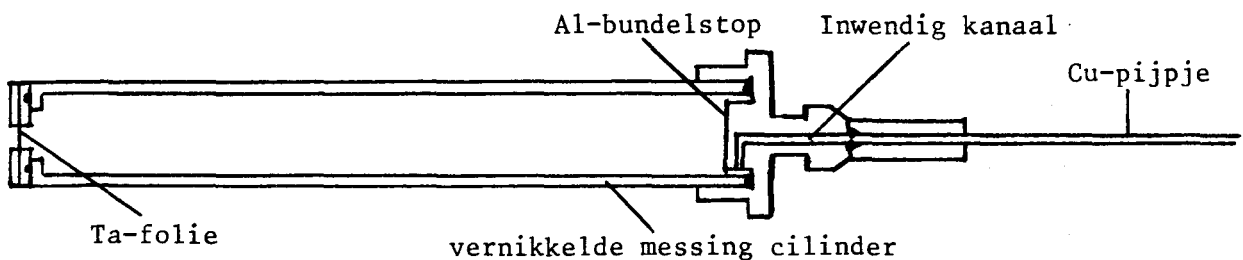


Fig. 3.3 De positie van het koperen toe- en afvoerpijpje

De bundel protonen wordt in de Al bundelstop volledig gestopt. De protonen kunnen het Cu pijpje niet bereiken, zodat het niet geactiveerd kan worden.

3.3.2 De activering van messing

Door een niet goed uitgerichte bundel en/of door verstrooiing kunnen de protonen invallen op de messing cilinder. In het messing worden dan o.a. ^{63}Zn en ^{65}Zn geproduceerd via (p,xn) reacties op koper en ^{66}Ga en ^{67}Ga via (p,xn) reacties op zink.

Met behulp van de werkzame doorsnede voor de protonreacties op koper (Col 74) kan berekend worden hoeveel ^{63}Zn en ^{65}Zn er ontstaat (zie ook appendix A, afstudeerverslag). In het geval dat de gehele bundel op het messing valt ontstaat er bij een bundelstroom van 1 μA en een bestralingstijd van 1 uur ca. 5,3 GBq (142 mCi) ^{63}Zn ($t_{1/2} = 38$ min) en 0,60 MBq (16,2 μCi) ^{65}Zn ($t_{1/2} = 243$ d). Van de mogelijk geproduceerde gallium-radioisotopen heeft ^{67}Ga een halveringstijd van 78,3 uur, en zal als langlevend Ga-radioisotoop een belangrijke bijdrage leveren aan de activering van de messing cilinder.

De dunne laag nikkel aan de binnenzijde van de messing cilinder levert als langlevend activeringsproduct ^{64}Cu (via de reactie $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$) met een halveringstijd van 13 uur.

3.3.3 De activering van tantaal

De folies van de gastargetopstelling bestaan voor 100% uit ^{181}Ta . In de folies wordt de bundel bij een bestraling met 26,2 MeV protonen ongeveer 0,4 MeV afgeremd (zie ook Appendix A van het afstudeerverslag en Wil 66). Door (p,xn) reacties ontstaan wolfram isotopen, waarvan ^{181}W de meest langlevende is ($t_{1/2} = 130$ d) (gevormd door de (p, n) reactie op ^{181}Ta). Het folie (5) ¹ dat na de eerste zes proefbestralingen met de gastargetopstelling verwijderd was, gaf een exposietempo van ca. 50 mR/h aan het oppervlak.

¹ De vermelde getallen verwijzen naar de genummerde onderdelen in fig. 1.1.

3.3.4 De activering van roestvrij staal

De gebruikte schroeven, kogellagers en de aandrukplaat voor de Ta-folies zijn vervaardigd uit roestvrij staal. Indien het roestvrij staal door de (verstrooide) protonen getroffen wordt kunnen o.a. een aantal Co-radioisotopen ontstaan, waarvan ^{56}Co en ^{57}Co de meest langlevende zijn ($t_{\frac{1}{2}} = 77$ d, resp. $t_{\frac{1}{2}} = 270$ d). Na de eerste zes proefbestralingen bleek van de aandrukplaten van de Ta-folies een exposietempo op het oppervlak af te komen van minder dan 1 mR/h.

3.3.5 De activering van koolstof

Het diafragma is vervaardigd uit koolstof (evenals het grafiet ringetje (4)). Op het diafragma zal zeker een gedeelte van de bundel vallen, waardoor via (p,n) en (p,2n) reacties op ^{12}C en ^{13}C , ^{12}N ($t_{\frac{1}{2}} = 11$ ms) en ^{13}N ($t_{\frac{1}{2}} = 10$ min) ontstaan. Deze radioisotopen kunnen vanwege de lage druk in het bundelgeleidingssysteem, uit het koolstof diffunderen en zo in de bundelpijp terecht komen. Belangrijker dan deze stikstof-radioisotopen, zijn de radioisotopen die ontstaan door de aanwezigheid van verontreinigingen in het koolstof. Het is momenteel niet mogelijk om hier een uitspraak over te doen. Uit metingen van het exposietempo is gebleken dat de activeringsprodukten in het diafragma na ca. 24 uur zijn uitgestorven.

3.4 Conclusies

De aangebrachte primaire en secundaire afscherming hadden tot gevolg dat de (uit stralingsveiligheidsoverwegingen) maximaal haalbare bundelstroom steeg van 0,35 μA tot 8 μA (bij 25 MeV protonen). De aangebrachte voorzieningen in bunker 4A hebben ertoe geleid dat ^{81}Rb op radiologisch verantwoorde wijze geproduceerd kan worden. De bijkomende activering van de opstelling kwam bij de zes proefbestraling tot uiting in de langlevende produkten in de tantaalfolies en in de vernikkelde messing cilinder. Na 6 proefbestralingen was het exposietempo van het tantaalfolie en van de messing cilinder 50 mR/h resp. 10 mR/h op het oppervlak.

4 MOGELIJKE STORINGEN OF CALAMITEITEN

In dit hoofdstuk worden de mogelijke storingen besproken die tijdens een produktie van ^{81}Rb met de gastargetopstelling kunnen optreden. In het kort worden weergegeven: de storing, de waarneming van die storing, de gevolgen van de storing (fysisch, chemisch), het radiologisch gevolg en de handeling(en) die verricht moet(en) worden om de storing te verhelpen en/of de (radiologische) gevolgen te beperken. In 4.1 worden de mogelijke storingen tijdens de produktie besproken, en in 4.2 de storingen die kunnen optreden bij de handelingen na EOB (zie 2.1).

4.1 Mogelijke storingen tijdens een bestraling

- (1) Mogelijke storing : Het tantaal-folie tussen de kryptonruimte en de bufferruimte scheurt.
- Gevolg : Het krypton stroomt in de bufferruimte, die een volume heeft dat ongeveer gelijk is aan het volume van de messing cilinder.
- Radiologisch gevolg : Er worden Rb-radioisotopen geproduceerd in de bufferruimte. Deze radioisotopen slaan neer op de wand van de bufferruimte.
- Waarneming : De druk in de messing cilinder wordt gehalveerd. Dit wordt in de bedieningsruimte waargenomen via de spanningsmeter die de druk weergeeft.
- Handeling : De bestraling stoppen en de gastargetopstelling doorverbinden met de koelval.
- (2) Mogelijke storing : De beide tantaal-folies scheuren.
- Gevolg : Er ontstaat een gasinlek in het bundelgeleidings-systeem; vacuümklep KD gaat automatisch dicht.
- Radiologisch gevolg : De gevormde Kr-radioisotopen worden de bundelpijp ingezogen, en komen mogelijk via de vacuümpompen in bunker 3 terecht.

Een gedeelte van de geproduceerde Rb-radioisotopen kan terecht komen in het bundelgeleidingssysteem. Er is dan een besmetting ontstaan van KD tot de gastargetopstelling.

Waarneming : De druk in de cilinder neemt sterk af, KD valt dicht.

Handeling : De bestralingsprocedure beëindigen en het bundelgeleidingssysteem controleren op radioactieve besmetting.

(3) Mogelijke storing : De waterkoeling valt uit.

Gevolg : Geen gevolg voor lage bundelstromen ($< 1 \mu\text{A}$).
Voor hogere bundelstromen: een nog in te bouwen waterslot laat de op afstand bedienbare bundelstop neer.

Radiologisch gevolg : Geen direct gevolg.

Waarneming : Bundelstop m T 11B valt dicht.

Handeling : De storing verhelpen (als dat mogelijk is).

(4) Mogelijke storing : Het krypton lekt uit de opstelling.

Gevolg : De druk neemt langzaam af.

Radiologisch gevolg : De geproduceerde Kr-radioisotopen komen in het koelwater en/of de glovebox en/of bunker 4A terecht.

Waarneming : Via de drukmeter die elektrisch wordt uitgelezen.

Handeling : Bestraling stoppen, het overige krypton in de koelval opvangen. Bunker 4A, de glovebox en het koelwater op besmetting controleren. Verdere handelingen in overleg met de SBD.

4.2 Mogelijke storingen bij de handelingen na EOB

(1) Mogelijke storing : De koelval werkt niet.

Gevolg : Het krypton wordt niet uit de opstelling verwijderd.

Radiologisch gevolg : Geen.

Waarneming : De druk neemt niet af na het openen van V5 (zie fig. 2.1).

- Handeling : Koelval op aanwezigheid van vloeibare stikstof controleren; controleren of de handkraan (14) op de koelval openstaat.
- (2) Mogelijke storing : Een of meerdere ventielen worden niet bekrachtigd.
Gevolg : De beoogde verbinding in het stromingskanaal wordt niet tot stand gebracht.
- Radiologisch gevolg : Geen.
- Waarneming : Op bedieningspaneel.
- Handeling : Secundaire zekering (3 AT) controleren en/of externe voeding (20 V) aanbrengen.
- (3) Mogelijke storing : Targetmotor werkt niet.
Gevolg : De wand van de vernikkelde messing cilinder wordt niet schoongespoeld.
- Radiologisch gevolg : De geproduceerde activiteit kan niet uit de opstelling gehaald worden.
- Waarneming : Via controlelampje op het bedieningspaneel.
- Handeling : Uitgangsspanning van bedieningspaneel controleren, werking microswitch controleren.
Anders: demontage van de afscherming om ter plekke te kunnen handelen (in overleg met de SBD).
- (4) Mogelijke storing : Slangenpomp werkt niet.
Gevolg : Het spoelwater wordt niet in en/of uitgepompt.
Radiologisch gevolg : De activiteit wordt niet (of gedeeltelijk) uit de gastargetopstelling verwijderd.
- Waarneming : Nadat bunker 4A betreden is. De spoelvloeistof staat in de toe- en afvoerslangen of is niet terug gekomen in het reservoir (5).
- Handeling : Uitgangsspanning van bedieningspaneel controleren.
Anders: In overleg met de SBD de slangenpomp door een andere vervangen.
- (5) Mogelijke storing : Spoelvloeistof lekt uit de opstelling.
Gevolg : Lekkage treedt op bij de koppeling 3, de ventielen VI t/m V5 of langs de slangverbindingen.

- Radiologisch gevolg : De glovebox is besmet met (een gedeelte van) de spoelvroelstof.
- Waarneming : De hoeveelheid spoelvroelstof die in het reservoir (5) terugkomt is kleiner dan 60 ml. Of d.m.v. veegproeven in de glovebox.
- Handeling : Decontamineren of andere maatregelen treffen in overleg met de SBD.

5 MOGELIJKE BESMETTINGEN

Het is mogelijk dat ten gevolge van storingen (zie hoofdstuk 4) een besmetting met de aangemaakte radioactiviteit in bunker 4A optreedt. De gevolgen van een besmetting kunnen beschouwd worden aan de hand van de $(MPC)_a$ waarden (zie 5.1) en de ALI-waarden (zie 5.2).

Een vergelijking van deze waarden met de activiteitsconcentratie in bunker 4A bij een ongeval wordt gemaakt in 5.3 (realistic, pessimistic approach).

5.1 $(MPC)_a$ -waarden

Als er in bunker 4A een besmetting is opgetreden, is het mogelijk dat de radiologisch werker die de bunker betreedt, een hoeveelheid activiteit in het lichaam opneemt. De meest waarschijnlijke weg via welke een besmetting van het lichaam optreedt is inhalatie van de in de ruimte aanwezige radionucliden.

Een model dat de opname van radionucliden beschrijft is het in ICRP-2¹ (ICRP 2) beschreven model voor continue blootstelling. Daarbij wordt er van uit gegaan dat er een evenwicht ontstaat tussen opname en uitscheiding van het radionuclide. Het gehele lichaam wordt opgesplitst in diverse compartimenten (organen) en er wordt berekend welk gedeelte van de geïnhaleerde activiteit in het betreffende orgaan terecht komt.

Dan wordt de evenwichtsactiviteit in het orgaan berekend, waarbij rekening wordt gehouden met de fysische en biologische afname van de activiteit in het orgaan.

Vervolgens wordt de geabsorbeerde dosis berekend in het orgaan ten gevolge van de daarin aanwezige activiteit. Door een limiet te stellen voor de orgaandosis kan voor elk orgaan de maximaal toelaatbare evenwichtsactiviteit \hat{q}_i berekend worden.

¹ 2e publicatie van ICRP: International Commission on Radiological Protection.

Tenslotte kan de activiteitsconcentratie in lucht bepaald worden die bij continue opname, aanleiding zou geven tot de maximaal toelaatbare orgaandosis. De laagste van deze activiteitsconcentraties (die aanleiding geeft tot een maximale orgaandosis) wordt de $(MPC)_a$ (maximum permissible concentration in air) genoemd en het bijbehorende orgaan wordt het kritieke orgaan genoemd (zie ICRP-2; Web 79).

Als er in bunker 4A na EOB een krypton-activiteit in de ruimte aanwezig is wordt de bestraling door inwendige besmetting verwaarloosd ten opzichte van de uitwendige bestraling (krypton is een inert gas, dat niet door het lichaam wordt opgenomen). In ICRP-2 wordt de activiteitsconcentratie die aanleiding geeft tot de maximale lichaamsdosis (50 mSv/y) bij continue blootstelling van 40 h/week, de $(MPC)_a$ -submersion genoemd (Web 79).

Bij de produktie van ^{81}Rb worden er ook andere radionucliden gevormd. Van de nucliden die bij een besmetting mogelijk in bunker 4A terecht zouden kunnen komen, zijn de $(MPC)_a$ -waarden berekend (zie ook Appendix en Web 79), omdat in ICRP-2 die waarden niet vermeld worden. Voor de Kr-radioisotopen die mogelijk bij een besmetting vrijkomen zijn de $(MPC)_a$ -submersion waarden berekend. Het resultaat van deze berekeningen wordt weergegeven in tabel 5.1. De in tabel 5.1 vermelde $(MPC)_a$ -waarden zijn berekend voor het gehele lichaam, waarbij er van uit gegaan is dat het gehele lichaam het kritieke orgaan is (zoals door ICRP-2 opgegeven voor ^{82}Br en ^{86}Rb). Indien bij een opgetreden besmetting een schatting gemaakt kan worden van de in bunker 4A aanwezige concentraties van de diverse nucliden (Bq/m^3), kan met behulp van de berekende $(MPC)_a$ -waarden een schatting gemaakt worden van de stralingsbelasting van de radiologisch werker in bunker 4A. Daarbij dient wel opgemerkt te worden dat de $(MPC)_a$ is afgeleid uit een model dat uitgaat van een gelimiteerde orgaandosis en een evenwichtsactiviteit in elk orgaan (continue blootstelling).

Tabel 5.1 De berekende $(MPC)_a$ -waarden van de radioisotopen, die bij een eventuele besmetting vrij zouden kunnen komen (zie ook Appendix).

| nuclide | $t_{\frac{1}{2}}$ | $(MPC)_a$, 40 h/week | |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| | | kBq/m ³ | $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ |
| ⁷⁹ Rb | 23 min | $4 \cdot 10^3$ | $1 \cdot 10^{-4}$ |
| ⁸¹ Rb | 4,6 h | $2 \cdot 10^3$ | $4 \cdot 10^{-5}$ |
| ^{82m} Rb | 6,2 h | $2 \cdot 10^2$ | $6 \cdot 10^{-6}$ |
| ⁸³ Rb | 86,2 d | 10 | $3 \cdot 10^{-7}$ |
| ⁸⁴ Rb | 32,9 d | 5 | $1 \cdot 10^{-7}$ |
| ^{84m} Rb | 20,5 min | $3 \cdot 10^4$ | $7 \cdot 10^{-4}$ |
| ⁸⁶ Rb | 18,8 d | 10^1 | $3 \cdot 10^{-7}$ ¹ |
| ⁷⁷ Br | 57 h | $3 \cdot 10^2$ | $8 \cdot 10^{-6}$ |
| ⁷⁹ Kr | 35 h | $7 \cdot 10^2$ ² | $2 \cdot 10^{-5}$ ² |
| ^{79m} Kr | 50 s | 10^3 ² | $3 \cdot 10^{-5}$ ² |
| ^{81m} Kr | 13 s | $7 \cdot 10^2$ ² | $2 \cdot 10^{-5}$ ² |
| ^{83m} Kr | 1,8 h | $3 \cdot 10^3$ ² | $8 \cdot 10^{-5}$ ² |

¹ overgenomen uit ICRP-2

² submersion

5.2 ALI-waarden

Recente ontwikkelingen op het gebied van de stralingshygiëne hebben geleid tot een uitgebreid model voor de berekening van het dosisequivalent ten gevolge van een inwendige besmetting (ICRP-30). Indien het dosisequivalent in elk orgaan van het lichaam bekend is, kan het effectief dosisequivalent in het lichaam berekend worden (zie 7.1 en ICRP 30). In ICRP 30 wordt voor radiologische werkers de ALI (annual limit of intake) gedefinieerd als de in 1 jaar opgenomen activiteit (Bq) die aanleiding zou geven tot een effectief dosisequivalent van 50 mSv (5 rem) of een orgaandosis-equivalent van 500 mSv (50 rem), waarbij beide waarden als bovenste limiet beschouwd moeten worden.

Met het invoeren van de ALI is het ICRP-2 model van de continue blootstelling aan ioniserende straling verlaten, en er is een wijziging aangebracht in de dosisberekening en de normstelling.

De ALI-waarden voor de meeste geproduceerde radioisotopen zijn in het supplement van ICRP-30 opgenomen (zie tabel 5.2).

Tabel 5.2 De geïnhaleerde activiteit, indien in de glovebox 20% van de geproduceerde activiteit terecht is gekomen bij bestraling van 2 barmkrypton waarmee in 2 uur 3,0 GBq (81 mCi) ^{81}Rb wordt geproduceerd en er gedurende 1 minuut lucht uit de glovebox wordt ingeademd. *C* is de concentratie van de activiteit van de radionucliden in de glovebox.

| nuclide | $t_{\frac{1}{2}}$ | activiteit EOB (Bq) | ALI (Bq) | C (Bq/m ³) | geïnhaleerde act. (Bq) | geïnhaleerde fractie van ALI |
|--------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|
| ^{77}Br | 57 h | $3,7 \cdot 10^6$ | $9 \cdot 10^8$ | $7,4 \cdot 10^5$ | $1,5 \cdot 10^4$ | $2 \cdot 10^{-5}$ |
| ^{79}Rb | 23 min | $9,0 \cdot 10^8$ | $4 \cdot 10^9$ | $1,8 \cdot 10^8$ | $3,6 \cdot 10^6$ | $9 \cdot 10^{-4}$ |
| ^{81}Rb | 4,6 h | $3,0 \cdot 10^9$ | $2 \cdot 10^9$ | $6,0 \cdot 10^8$ | $1,2 \cdot 10^7$ | $6 \cdot 10^{-3}$ |
| $^{82\text{m}}\text{Rb}$ | 6,2 h | $1,9 \cdot 10^9$ | $7 \cdot 10^8$ | $3,8 \cdot 10^8$ | $7,6 \cdot 10^6$ | $1 \cdot 10^{-2}$ |
| ^{83}Rb | 86,2 d | $2,5 \cdot 10^7$ | $4 \cdot 10^7$ | $5,0 \cdot 10^6$ | $1,0 \cdot 10^5$ | $3 \cdot 10^{-3}$ |
| $^{84\text{m}}\text{Rb}$ | 20,5 min | $2,1 \cdot 10^9$ | $6 \cdot 10^{10}$ ¹ | $4,2 \cdot 10^8$ | $8,4 \cdot 10^6$ | $1 \cdot 10^{-4}$ |
| ^{84}Rb | 32,9 d | $1,1 \cdot 10^7$ | $3 \cdot 10^7$ | $2,2 \cdot 10^6$ | $4,4 \cdot 10^4$ | $1 \cdot 10^{-3}$ |
| ^{86}Rb | 18,8 d | $3,0 \cdot 10^7$ | $3 \cdot 10^7$ | $6 \cdot 10^6$ | $1,2 \cdot 10^5$ | $4 \cdot 10^{-3}$ |

¹ De ALI voor $^{84\text{m}}\text{Rb}$ wordt niet vermeld in het supplement van ICRP-30.

De gegeven waarde is afgeleid uit de in de appendix berekende (MPC)_a-waarde.

5.3 De radiologische gevolgen van een besmetting

Om een afschatting te kunnen maken van de dosis die een radiologisch werker oploopt bij een ongeval in bunker 4A, wordt uitgegaan van een realistische pessimistische afschatting.

Veronderstel dat 2 barmeter krypton bestraald is met 26,2 MeV protonen en dat in 2 uur 3,0 GBq (81 mCi) ^{81}Rb geproduceerd wordt. De aangemaakte hoeveelheid van de overige radioisotopen kan worden afgeleid uit de resultaten vermeld in hoofdstuk 3 van het afstudeerverslag (zie tabel 5.2).

Door een ongeval komt van de geproduceerde hoeveelheid 20% in de glovebox terecht ¹. In de glovebox ontstaat een homogene activiteitsconcentratie C (Bq/m³). De radiologisch werker betreedt bunker 4A en merkt de besmetting van de glovebox niet op. Hij opent de glovebox om het opvangreservoir te verwijderen en ademt 1 minuut lang de in de glovebox aanwezige lucht (met de activiteit) in, met een debiet van 20 l/min. De geïnhaleerde activiteit bedraagt dan $2 \cdot 10^{-2} C$ (Bq) (zie tabel 5.2).

In tabel 5.2 is de fractie van de ALI van alle radionucliden die gedurende 1 minuut worden ingeademd gegeven. Voor het effectief dosisequivalent (H_{eff}) geldt dan:

$$H_{\text{eff}} = 50 \text{ mSv} \sum_i f_i$$

met f_i = de fractie van de ALI van radionuclide i, die ingeademd is.

Substitutie van de in tabel 5.2 vermelde waarden van f_i in deze formule leidt tot:

$$H_{\text{eff}} (\text{inhalatie}) = 1 \text{ mSv (100 mrem)}$$

De bijdrage van bestraling door krypton(gas) kan als volgt bepaald worden. Stel dat bij het openen van de glovebox het $^{81\text{m}}\text{Kr}$ en het $^{79\text{m}}\text{Kr}$ in evenwicht zijn met ^{81}Rb resp. ^{79}Rb en dat deze isotopen zich direct over de gehele ruimte (15 m³) van bunker 4A verdelen. De activiteitsconcentratie van $^{79\text{m}}\text{Kr}$ resp. $^{81\text{m}}\text{Kr}$ bedraagt dan $2,2 \cdot 10^7$ Bq/m³ resp. $2,0 \cdot 10^8$ Bq/m³ (zie ook tabel 5.2).

In geval de ruimte van bunker 4A bestond uit een half-oneindige bol (overschatting!) dan kan met de $(\text{MPC})_a$ submersion de dosis op het gehele lichaam berekend worden volgens:

¹ 20% is het gedeelte van de geproduceerde radionucliden dat wij maximaal in de koelval gemeten hebben.

$$H \text{ (t.g.v. } ^{79\text{m}}\text{Kr)} = \frac{2,2 \cdot 10^7}{(\text{MPC})_a} \times \frac{1}{40 \cdot 50 \cdot 60} \times 50 \text{ mSv} = 10^{-2} \text{ mSv (1 mrem)}$$

$$H \text{ (t.g.v. } ^{81\text{m}}\text{Kr)} = \frac{2,0 \cdot 10^8}{(\text{MPC})_a} \times \frac{1}{40 \cdot 50 \cdot 60} \times 50 \text{ mSv} = 0,12 \text{ mSv (12 mrem)}$$

Immers, de blootstelling van 2400 min/week aan de $(\text{MPC})_a$ heeft een dosis-equivalent van 50 mSv tot gevolg.

Uit deze beschouwing (een overschatting) volgt dat de belangrijkste bijdrage tot het effectief dosisequivalent bij een ongeval gevormd wordt door de inwendige besmetting van Rb-radioisotopen en niet door de uitwendige bestraling door het krypton dat zich in de bunker verspreid.

Indien tengevolge van calamiteiten tijdens of na de bestraling radioactiviteit vrijkomt, kan de radiologisch werker deze activiteit gedurende ca. 1 minuut gedeeltelijk inademen. Van de stralingsbelasting van de radiologisch werker kan een schatting gemaakt worden.

Volgens een pessimistisch realistische schatting bedraagt het effectief dosisequivalent ten gevolge van, bij calamiteiten vrijkomende, ingeademde Rb-activiteit ca. 1 mSv (100 mrem).

De uitwendige bestraling door de Kr-radioisotopen, en de geabsorbeerde dosis op de longen ten gevolge van het inademen van deze Kr-radioisotopen is verwaarloosbaar (zie ook hoofdstuk 7).

6 HET EXPOSITIETEMPO VAN EEN Rb/Kr-GENERATOR

De geproduceerde activiteit wordt na EOB, naar het radiochemisch B-laboratorium vervoerd. De activiteit bevindt zich dan in het opvangreservoir, dat dezelfde uitwendige afmetingen heeft als de papiergenerator. Het opvangreservoir kan vervoerd worden in een transportcontainer die ook geschikt is voor het vervoer (en de afscherming) van de papiergenerator.

Een stralingsveiligheidsgrootte die van belang is voor de blootstelling van de radiologisch werker(s) aan de ioniserende straling afkomstig van de activiteit in het opvangreservoir resp. de papiergenerator is de expositie \dot{X} .

Het expositietempo \dot{X}_i dat het gevolg is van een activiteit A_i van nuclide i wordt gegeven door (Web 79):

$$\dot{X}_i = \Gamma_i \frac{A_i}{r^2} \quad 1$$

met: A_i = activiteit van het nuclide i (Ci)

r = de afstand van de activiteit tot de plaats waar \dot{X} gemeten wordt (m)

Γ_i = de specifieke gammaconstante van het beschouwde nuclide i (Rm^2/hCi)

In het geval dat meer nucliden de radioactieve bron vormen geldt:

$$\dot{X} = \sum_i \dot{X}_i = \sum_i \Gamma_i \frac{A_i}{r^2}$$

Voor de spoelvloeistof of de papiergenerator, waarin diverse Rb-radioisotopen aanwezig zijn, kan \dot{X} geschreven worden als:

$$\dot{X} = \sum_i \Gamma_i \frac{A_i}{r^2} = \sum_i \Gamma_i f_i \frac{A}{r^2}$$

met: Γ_i = de specifieke gammaconstante van nuclide i (Rm^2/hCi)

f_i = de fractie van de activiteit van nuclide i ten opzichte van het referentie nuclide

¹ Genoemde vergelijking geldt onder aanname van een puntbronactiviteit.

A = de activiteit van het referentie nuclide (Ci)

r = de afstand van de activiteit tot de plaats waar \dot{X} gemeten wordt (m)

In de spoelvroestof bevinden zich behalve ^{81}Rb , andere Rb-radioisotopen en enkele Kr-radioisotopen waarvan $^{79\text{m}}\text{Kr}$ en $^{81\text{m}}\text{Kr}$ een belangrijke bijdrage geven aan het exposietempo (deze radioisotopen groeien snel in). Wordt ^{81}Rb als referentie nuclide gekozen, dan geldt:

$$\dot{X} = \Gamma_{\text{eff}} \cdot \frac{A}{r^2}$$

met: $\Gamma_{\text{eff}} = \sum_i f_i \Gamma_i$ = de effectieve gammaconstante voor het mengsel van radio-

nucliden (Rm^2/hCi)

A = de activiteit van ^{81}Rb (Ci)

r = de afstand van de activiteit tot de plaats waar \dot{X} gemeten wordt (m)

Op deze wijze is het mogelijk om het exposietempo \dot{X} op een afstand r van de spoelvroestof of de generator te relateren aan de activiteit van ^{81}Rb op EOB. De fracties f_i zijn tijdsafhankelijk (door het verval van het nuclide i). Voor de Rb-radioisotopen die van belang zijn, is Γ_i niet bekend. Met behulp van de stralingsgegevens (Led 78), $\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}$, en de volgende vergelijking:

$$\Gamma_i = 19,54 \cdot \sum_j \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} (E_j) \cdot F_j \cdot E_j$$

kan Γ_i berekend worden (Nac 69).

Hierin is Γ_i = de gammaconstante van nuclide i (Rm^2/hCi)

μ_{en}/ρ = de lineaire absorptiecoëfficiënt per massadichtheid bij energie E_j

F_j = het voorkomen van de gammastraling met energie E_j per desintegratie

E_j = de energie van het geëmitteerde foton j (MeV)

Voor de Rb-radioisotopen en de Kr-radioisotopen die bijdragen tot het exposietempo van een generator (het opvangreservoir) is Γ_i bepaald (zie tabel 6.1).

Voor een bestraling van 2 barm krypton met 26,2 MeV protonen, waarbij in 2 uur 3,0 GBq (81 mCi) ^{81}Rb geproduceerd wordt, kan voor elk nuclide f_i bepaald worden (zie hoofdstuk 3, appendix A van afstudeerverslag). In tabel 6.1 is f_i bepaald als functie van de tijd na EOB, waarmee tenslotte Γ_{eff} bepaald kan worden.

Tabel 6.1 De specifieke gammaconstante Γ_i en de fracties f_i van de geproduceerde nucliden, bij bestraling van 2 barm krypton met 26,2 MeV protonen waarbij in 2 uur 3,0 GBq (81 mCi) ^{81}Rb geproduceerd wordt.

| nuclide | $\Gamma_i \left(\frac{\text{Rm}^2}{\text{hCi}} \right)$ | fractie van de activiteit van ^{81}Rb op tijdstip t (uur) na EOB | | | | | | |
|--------------------------|---|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | t = 0 | t = 1 | t = 2 | t = 3 | t = 4 | t = 6 | t = 8 |
| ^{79}Rb | 0,65 | $3,0 \cdot 10^{-1}$ | $4,9 \cdot 10^{-2}$ | $8,1 \cdot 10^{-3}$ | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $2,2 \cdot 10^{-4}$ | ~ 0 | ~ 0 |
| ^{81}Rb | 0,20 | 1,0 | $8,6 \cdot 10^{-1}$ | $7,4 \cdot 10^{-1}$ | $6,4 \cdot 10^{-1}$ | $5,5 \cdot 10^{-1}$ | $4,0 \cdot 10^{-1}$ | $3,0 \cdot 10^{-1}$ |
| $^{82\text{m}}\text{Rb}$ | 1,6 | $6,3 \cdot 10^{-1}$ | $5,6 \cdot 10^{-1}$ | $5,0 \cdot 10^{-1}$ | $4,5 \cdot 10^{-1}$ | $4,0 \cdot 10^{-1}$ | $3,2 \cdot 10^{-1}$ | $2,6 \cdot 10^{-1}$ |
| ^{83}Rb | 0,49 | $8,3 \cdot 10^{-3}$ | $8,3 \cdot 10^{-3}$ | $8,3 \cdot 10^{-3}$ | $8,3 \cdot 10^{-3}$ | $8,3 \cdot 10^{-3}$ | $8,3 \cdot 10^{-3}$ | $8,3 \cdot 10^{-3}$ |
| $^{84\text{m}}\text{Rb}$ | 0,21 | $7,0 \cdot 10^{-1}$ | $9,2 \cdot 10^{-2}$ | $1,2 \cdot 10^{-2}$ | $1,6 \cdot 10^{-3}$ | $2,1 \cdot 10^{-4}$ | ~ 0 | 0 |
| ^{84}Rb | 0,50 | $3,7 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ |
| ^{86}Rb | 0,052 | $1,0 \cdot 10^{-2}$ | $1,0 \cdot 10^{-2}$ | $1,0 \cdot 10^{-2}$ | $1,0 \cdot 10^{-2}$ | $1,0 \cdot 10^{-2}$ | $1,0 \cdot 10^{-2}$ | $1,0 \cdot 10^{-2}$ |
| $^{79\text{m}}\text{Kr}$ | 0,016 | $1,1 \cdot 10^{-1}$ | $1,8 \cdot 10^{-2}$ | $3,0 \cdot 10^{-3}$ | $4,8 \cdot 10^{-4}$ | ~ 0 | ~ 0 | ~ 0 |
| $^{81\text{m}}\text{Kr}$ | 0,065 | 1,0 | $8,6 \cdot 10^{-1}$ | $7,4 \cdot 10^{-1}$ | $6,4 \cdot 10^{-1}$ | $5,5 \cdot 10^{-1}$ | $4,0 \cdot 10^{-1}$ | $3,0 \cdot 10^{-1}$ |
| | $\Gamma_{\text{eff}} \left(\frac{\text{Rm}^2}{\text{hCi}} \right)$ | 1,6 | 1,2 | 1,0 | 0,88 | 0,77 | 0,61 | 0,49 |

Uit tabel 6.1 volgt dat de effectieve constante Γ op EOB 1,6 en 1 uur na EOB $1,2 \left(\frac{\text{Rm}^2}{\text{hCi}} \right)$ bedraagt. Dit betekent nu dat per mCi ^{81}Rb het exposietempo op 1 m afstand van de generator (de spoelvloeistof) Iop 1 uur na EOB) 1,2 mR/h bedraagt.

Bij de 9e bestraling (zie appendix C van het afstudeerverslag) is het exposietempo van de spoelvloeistof gemeten met een ionisatiekamer. Daaruit bleek dat de effectieve gammaconstante op 1,5 uur na EOB ca. $1,8 \left(\frac{\text{Rm}^2}{\text{hCi}} \right)$ bedroeg. Met behulp van tabel 6.1 wordt door interpolatie een waarde van $1,1 \left(\frac{\text{Rm}^2}{\text{hCi}} \right)$ gevonden. Het verschil tussen de gevonden waarden kan als volgt verklaard worden:

- Bij de berekening van Γ is de uitgezonden röntgenstraling verwaarloosd. De röntgenstraling zal wel een bijdrage leveren tot de in de ionisatiekamer afgegeven energie.
- Bij de meting van Γ dragen secundaire fotonen bij tot de in de ionisatiekamer afgegeven energie.

Het exposietempo van een 10 mCi $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$ generator bedraagt ca. 20 mR/h op 1 meter afstand. Het exposietempo is sterk afhankelijk van de bestralingscondities, en wordt in belangrijke mate bepaald door de aanwezigheid van $^{82\text{m}}\text{Rb}$ (zie tabel 6.1). Door afscherming met 5 cm lood wordt het exposietempo op 1 meter gereduceerd tot ca. 0,5 mR/h. De bovengenoemde waarden zijn experimenteel bepaald.

7 DOSISBEREKENINGEN BIJ INWENDIGE BESTRALING TEN GEVOLGE VAN INADEMING VAN ^{81m}Kr

Bij de toepassing van $^{81}\text{Rb}/^{81m}\text{Kr}$ generatoren in de nucleaire geneeskunde is het van belang te weten hoe groot de stralingsbelasting van de patiënt is, als zij of hij ^{81m}Kr inademt. In dit hoofdstuk wordt in 7.1 een algemene inleiding gegeven over het berekenen van een dosis (of dosisequivalent) tengevolge van de aanwezigheid van radioactiviteit in een orgaan (of compartiment), volgens de methode die momenteel gehanteerd wordt door ICRP (ICRP-30). In 7.2 wordt deze methode toegepast op de berekening van het effectieve dosisequivalent in het lichaam tengevolge van inademing van een bepaalde hoeveelheid ^{81m}Kr . Om een vergelijking te kunnen maken tussen de stralingsdosis door inademing van ^{81m}Kr en die door inademing van ^{133}Xe , wordt in 7.3 de dosis in de longen berekend tengevolge van inademing van ^{133}Xe . Tot slot wordt in 7.4 aan de hand van de resultaten uit 7.2 besproken wat het effectief dosisequivalent voor een patiënt is indien zij of hij gedurende 1 minuut het ^{81m}Kr uit een 370 MBq (10 mCi) Rb/Kr-generator inademt.

7.1 Inleiding

Om een kwantitatief inzicht te krijgen in de mogelijke gevolgen van blootstelling aan ioniserende straling is het in het algemeen nodig om de hoeveelheid energie te kennen die aan het beschouwde orgaan, het weefsel of het totale lichaam is overgedragen. De grootte die hier van belang is, is de geabsorbeerde dosis. Zonder verder in te gaan op de correcte definitie van geabsorbeerde dosis kan dit beschouwd worden als de hoeveelheid stralingsenergie die per massa-eenheid van de beschouwde hoeveelheid materie is geabsorbeerd (Huy 78; Huy 81; ICRP-30).

Afzonderlijk te beschouwen delen van het lichaam worden compartimenten of soms organen genoemd. Een compartiment kan overeenkomen met een totaal orgaan, zoals bijvoorbeeld de lever, milt en longen of soms ook met delen daarvan.

Met een compartiment kan echter ook het totale lichaam of andere combinaties van organen bedoeld worden (ICRP-30). Bij de dosisberekeningen in dit addendum wordt de geabsorbeerde dosis in organen of compartimenten die het gevolg zijn van de aanwezigheid van radioactiviteit in de longen berekend. Bij dosisberekeningen moet bijzondere aandacht geschonken worden aan de dimensies. Het is in dit vakgebied gebruikelijk om de energie van ioniserende straling uit te drukken in de eenheid MeV, terwijl de eenheid die in het *Système International* wordt gebruikt, de joule is. Zo is nog een aantal voorbeelden te noemen: de geabsorbeerde dosis wordt in het praktische stelsel uitgedrukt in de eenheid rad en in het *Système International* in gray of joule per kilogram; de massa wordt in het praktische stelsel uitgedrukt in gram maar in het *Système International* in kilogram. In tabel 7.1 worden enkele van deze grootheden vermeld.

Tabel 7.1 *Enkele stralingsfysische grootheden met de SI-eenheden en de praktische (conventionele) eenheden.*

| grootheid | SI-stelsel | praktisch stelsel | relatie |
|---------------------|------------|-------------------|---------------------------------------|
| geabsorbeerde dosis | Gy (J/kg) | rad | 1 Gy \equiv 100 rad |
| dosisequivalent | Sv | rem | 1 Sv \equiv 100 rem |
| energie | J | MeV | 1 MeV \equiv $1,6 \cdot 10^{-13}$ J |
| tijd | s | min, dag, jaar | |
| massa | kg | gram | |
| activiteit | Bq | Ci | 1 Ci \equiv $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq |

N.B. 1 rad \equiv $62,5 \cdot 10^6$ MeV/gram

$1,6 \cdot 10^{-8}$ rad \equiv 1 MeV/gram

1 Gy \equiv $6,25 \cdot 10^{12}$ MeV/kg

$1,6 \cdot 10^{-13}$ Gy \equiv 1 MeV/kg

7.1.1 Effectief dosisequivalent

Een belangrijke grootheid in de dosimetrie is het dosisequivalent (H). Dit is de naar het biologisch effect (weergegeven door de factor Q) gewogen geabsorbeerde dosis (Web 79). De kwaliteitsfactor (Q) is bedoeld om de schade ten gevolge van de microscopische verdeling van de geabsorbeerde energie in rekening te brengen. De kwaliteitsfactor is gelijk aan 1 voor gamma- en β -straling en voor elektronen. Voor deze soorten ioniserende straling is het dosisequivalent dus numeriek gelijk aan de geabsorbeerde dosis. Indien een mens blootgesteld wordt aan ioniserende straling kan, indien het dosisequivalent in de afzonderlijke compartimenten bekend is, het effectieve dosisequivalent op het lichaam berekend worden (ICRP-30). Voor het effectieve dosisequivalent geldt:

$$H_{\text{eff}} = \sum_T w_T \cdot H_T$$

met: w_T = de weegfactor voor het (target) orgaan T

H_T = het dosisequivalent in het (target) orgaan T

De weegfactoren voor de diverse compartimenten staan vermeld in tabel 7.2.

Tabel 7.2 Weegfactoren voor de berekening van het effectief dosisequivalent (ICRP-30).

| orgaan (of weefsel) | w_T |
|---------------------|-----------------|
| gonaden | 0,25 |
| borst | 0,15 |
| rode beenmerg | 0,12 |
| long | 0,12 |
| schildklier | 0,03 |
| botoppervlak | 0,03 |
| overige (5) | $5 \times 0,06$ |

In tabel 7.2 worden de zes organen genoemd waarvan het dosisequivalent bij de berekening van het effectieve dosisequivalent op het lichaam altijd meegerekend moet worden. De vijf overige organen (compartimenten) zijn die organen, waarin het dosisequivalent het hoogst is.

De grootheid effectief dosisequivalent wordt in de stralingshygiëne gehanteerd als maat voor het maken van schattingen van de kans op kwaadaardige kankervorming ten gevolge van blootstelling aan ioniserende straling. De inductiekans van een fatale kanker wordt door ICRP (Huy 78) geschat in de orde van 10^{-2} per Sv (10^{-4} per rem) effectief dosisequivalent.

7.1.2 Berekening van de geabsorbeerde dosis

Volgens de methode die door ICRP (ICRP-30) gehanteerd wordt kan de dosis in een zgn. "target" compartiment (orgaan) ten gevolge van activiteit die aanwezig is in een zgn. "source" compartiment (orgaan), berekend worden. Er wordt onderscheid gemaakt tussen doordringende straling (bijv. gamma- en röntgenstraling) en niet-doordringende straling (bijv. β -straling en elektronen). Voor de geabsorbeerde dosis in een target orgaan T ten gevolge van activiteit in een source orgaan S¹ geldt:

$$D(T \leftarrow S) = U \cdot \sum_i E_i \cdot f_i \cdot \phi_i$$

met: D = geabsorbeerde dosis (Gy)

U = het aantal desintegraties in het source orgaan S in de beschouwde periode

E_i = energie² van de uitgezonden straling (J)

f_i = voorkomen van de beschouwde straling per desintegratie

ϕ_i = fractie van de, in het source orgaan (S) geëmitteerde, energie die per kg target orgaan wordt geabsorbeerd (kg^{-1}).

N.B. Er moet worden gesommeerd over alle stralingssoorten en energieën die worden geëmitteerd.

¹ Het source orgaan en het target orgaan kunnen ook hetzelfde orgaan zijn.

² Bij niet-doordringende straling kan de gemiddelde energie van de uitgezonden straling genomen worden. Dan is f_i de som van het voorkomen van de stralingssoort waarover gemiddeld is.

De in een source orgaan geëmitteerde niet-doordringende straling wordt verondersteld volledig in het source orgaan geabsorbeerd te worden. Dan geldt:

$$\phi = 1 \text{ (kg}^{-1}\text{) in het source orgaan (= target orgaan)}$$

$$\phi = 0 \text{ (kg}^{-1}\text{) in alle overige targe organen.}$$

De in een source orgaan geëmitteerde doordringende straling wordt gedeeltelijk geabsorbeerd in het orgaan zelf en er zal ook energie-afgifte plaatsvinden in een aantal andere organen (of compartimenten).

De waarden van ϕ voor fotonen (doordringende straling) staan getabelleerd in ICRP 23, in de vorm van de geabsorbeerde fractie per gram target orgaan. De waarde van ϕ hangt af van het source orgaan, de energie van de uitgezonden straling en het beschouwde target orgaan.

Indien de energie E_i uitgedrukt wordt in MeV ($1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$) en ϕ in de fractie van de geëmitteerde energie per gram target orgaan (g^{-1}) moet de vermelde uitdrukking voor de geabsorbeerde dosis ($D(T + S)$) vermenigvuldigd worden met $1,60 \cdot 10^{-10}$.

7.2 De geabsorbeerde dosis in de longen ten gevolge van het inademen van $^{81\text{m}}\text{Kr}$

Een mens ademt gemiddeld 12 tot 15 maal per minuut. Per ademhaling wordt ca. 12% van de lucht in de longen verversd (Ber 79). Er wordt dus per 4 seconden 12% van de lucht in de longen verversd. Uit dit gegeven volgt dat de biologische vervalconstante λ_b (Web 79) gelijk is aan $0,03 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ voor inademing van een edelgas. Er wordt verondersteld dat een edelgas niet door het lichaam wordt opgenomen.

De fysische vervalconstante λ_f van $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ($t_{1/2} = 13 \text{ s}$) bedraagt $0,053 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ zodat voor de effectieve vervalconstante λ_e van $^{81\text{m}}\text{Kr}$ in de longen geldt:

$$\lambda_e = \lambda_b + \lambda_f = 0,083 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

Indien er $A \text{ Bq } ^{81\text{m}}\text{Kr}$ wordt ingeademd geldt voor het totaal aantal desintegraties dat in de longen plaatsvindt:

$$U = \int_0^{\infty} A_0 e^{-\lambda_e t} dt$$

met: A_0 = de ingeademde activiteit op tijdstip $t = 0$ (Bq)
 λ_e = de effectieve vervalconstante van ^{81m}Kr (s^{-1})
 t = de tijd (s)

Bij inademing van A Bq ^{81m}Kr geldt dus:

$$U = \frac{A}{\lambda_e} = \frac{A}{0,083}$$

Bij de berekeningen van de doses in de diverse organen ten gevolge van het inademen van ^{81m}Kr wordt uitgegaan van de volgende veronderstellingen:

- $\lambda_b = 0,03$ (s^{-1})
- krypton in de longen wordt niet door de rest van het lichaam opgenomen
- per desintegratie van ^{81m}Kr wordt de volgende ioniserende straling geëmitteerd (uit Led 78):
 - γ : 0,190 MeV (0,7%)
 - X: 0,014 MeV (28%)
 - e^{-1} : 0,188 MeV (5%)
 - e^{-1} : 0,176 MeV (28%)

De geabsorbeerde dosis in de longen ten gevolge van het inademen van 1 MBq ^{81m}Kr ($U = 10^6/0,083 = 1,2 \cdot 10^7$) geldt (zie 7.1.2):

- voor niet-doordringende straling (conversie-elektronen)
 $D = 1,60 \cdot 10^{-10} \cdot 1,2 \cdot 10^7 (0,05 \cdot 0,188 + 0,28 \cdot 0,176) 10^{-3} = 1,13 \cdot 10^{-7}$ Gy
- voor doordringende straling (gamma- en röntgenstraling)
 $D = 1,60 \cdot 10^{-10} \cdot 1,2 \cdot 10^7 (0,67 \cdot 0,190 \cdot 5 \cdot 10^{-5} + 0,28 \cdot 0,014 \cdot 6,58 \cdot 10^{-4})$
 $= 1,73 \cdot 10^{-8}$ Gy

De totale geabsorbeerde dosis in de longen bedraagt dus $1,3 \cdot 10^{-7}$ Gy per ingeademde MBq ^{81m}Kr (0,48 mrad per ingeademde mCi ^{81m}Kr).

De geëmitteerde γ -straling (190 keV), röntgenstraling (14 keV) en conversie-elektronen dragen voor resp. 9,4%, 3,8% en 86,8% bij in de totale geabsorbeerde dosis in de longen.

¹ conversie-elektronen

De geabsorbeerde dosis in organen voor inademing van 1 MBq en voor inademing van 1 mCi ^{81m}Kr staan vermeld in tabel 7.3.

Tabel 7.3 Geabsorbeerde dosis ten gevolge van inademing van 1 MBq ^{81m}Kr en ten gevolge van inademing van 1 mCi ^{81m}Kr in diverse organen

| orgaan | dosis | | orgaan | dosis | |
|-------------------------|----------------------|---------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| | Gy/MBq | mrad/mCi | | Gy/MBq | mrad/mCi |
| longen | $1,3 \cdot 10^{-7}$ | $4,5 \cdot 10^{-1}$ | borst ² | $2,2 \cdot 10^{-9}$ | $8,1 \cdot 10^{-3}$ |
| blaaswand | $4,5 \cdot 10^{-11}$ | $1,7 \cdot 10^{-4}$ | alvleesklier | $2,2 \cdot 10^{-9}$ | $8,1 \cdot 10^{-3}$ |
| maagwand | $1,6 \cdot 10^{-9}$ | $6,0 \cdot 10^{-3}$ | botoppervlak | $1,0 \cdot 10^{-9}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ |
| dunne darm | $1,8 \cdot 10^{-10}$ | $6,5 \cdot 10^{-4}$ | rode beenmerg | $1,3 \cdot 10^{-9}$ | $4,8 \cdot 10^{-3}$ |
| dikke darm ¹ | $1,5 \cdot 10^{-10}$ | $5,7 \cdot 10^{-3}$ | huid | $5,2 \cdot 10^{-10}$ | $1,9 \cdot 10^{-3}$ |
| nieren | $7,7 \cdot 10^{-10}$ | $2,9 \cdot 10^{-3}$ | milt | $2,0 \cdot 10^{-9}$ | $7,5 \cdot 10^{-3}$ |
| lever | $2,2 \cdot 10^{-9}$ | $8,1 \cdot 10^{-3}$ | testikels | $1,1 \cdot 10^{-11}$ | $4,2 \cdot 10^{-5}$ |
| spierweefsel | $1,2 \cdot 10^{-9}$ | $4,4 \cdot 10^{-3}$ | reukorgaan | $3,5 \cdot 10^{-9}$ | $1,3 \cdot 10^{-2}$ |
| eierstokken | $1,1 \cdot 10^{-10}$ | $4,0 \cdot 10^{-4}$ | schildklier | $7,3 \cdot 10^{-10}$ | $2,7 \cdot 10^{-3}$ |
| | | | baarmoeder | $8,7 \cdot 10^{-11}$ | $3,2 \cdot 10^{-4}$ |

¹ De geabsorbeerde dosis in de dikke darm is het gemiddelde van de geabsorbeerde dosis in het onderste en het bovenste deel van de dikke darm.

² Hiervoor wordt de waarde van ϕ niet vermeld in ICRP-23. Omdat het voor de berekening van het effectief dosisequivalent nodig is de dosis in de borst te kennen is een schatting gemaakt voor ϕ . De waarde van ϕ is gelijk genomen aan die van de lever vanwege de vergelijkbare locatie en afmetingen van de borst en de lever ten opzichte van de longen.

Met de in tabel 7.3 vermelde waarden van de geabsorbeerde dosis in de diverse organen kan met behulp van tabel 7.2 het effectief dosisequivalent in het lichaam berekend worden met de formule:

$$H_{\text{eff}} = \sum_T w_T \cdot H_T$$

In tabel 7.4 staan de organen vermeld die bij de berekening van het effectief dosisequivalent een rol spelen, met daarbij de waarden van w_T , H_T en $w_T \cdot H_T$. Opgemerkt moet worden dat de waarde van H_T gelijk is aan die van de geabsorbeerde dosis ($Q = 1$, zie 7.1.1).

Tabel 7.4 Het dosisequivalent H_T in, de weegfactoren w_T van, en de waarden van $w_T \cdot H_T$ voor die organen die bij de berekening van het effectief dosisequivalent in het hele lichaam zijn betrokken. De vermelde waarden zijn gerelateerd aan de inademing van 1 MBq en 1 mCi ^{81m}Kr .

| orgaan (compartiment) | w_T | H_T (Sv/MBq) | H_T (mrem/mCi) | $w_T \cdot H_T$ (Sv/MBq) | $w_T \cdot H_T$ (mrem/mCi) |
|--|-------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| gonaden | 0,25 | $6,1 \cdot 10^{-11}$ ¹ | $2,2 \cdot 10^{-4}$ ¹ | $1,5 \cdot 10^{-11}$ | $5,5 \cdot 10^{-5}$ |
| borst | 0,15 | $2,2 \cdot 10^{-9}$ | $8,1 \cdot 10^{-3}$ | $3,3 \cdot 10^{-10}$ | $1,2 \cdot 10^{-3}$ |
| rode beenmerg | 0,12 | $1,3 \cdot 10^{-9}$ | $4,8 \cdot 10^{-3}$ | $1,6 \cdot 10^{-10}$ | $5,8 \cdot 10^{-4}$ |
| longen | 0,12 | $1,3 \cdot 10^{-7}$ | $4,8 \cdot 10^{-1}$ | $1,6 \cdot 10^{-8}$ | $5,8 \cdot 10^{-2}$ |
| schildklier | 0,03 | $7,3 \cdot 10^{-10}$ | $2,7 \cdot 10^{-3}$ | $2,2 \cdot 10^{-11}$ | $8,1 \cdot 10^{-5}$ |
| botoppervlak | 0,03 | $1,0 \cdot 10^{-9}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,1 \cdot 10^{-4}$ |
| overige: | | | | | |
| maagwand | 0,06 | $1,6 \cdot 10^{-9}$ | $6,0 \cdot 10^{-3}$ | $3,6 \cdot 10^{-11}$ | $3,6 \cdot 10^{-4}$ |
| lever | 0,06 | $2,2 \cdot 10^{-9}$ | $8,1 \cdot 10^{-3}$ | $1,3 \cdot 10^{-10}$ | $4,9 \cdot 10^{-4}$ |
| alvleesklier | 0,06 | $2,2 \cdot 10^{-9}$ | $8,1 \cdot 10^{-3}$ | $1,3 \cdot 10^{-10}$ | $4,9 \cdot 10^{-4}$ |
| milt | 0,06 | $2,0 \cdot 10^{-9}$ | $7,5 \cdot 10^{-3}$ | $1,2 \cdot 10^{-10}$ | $4,5 \cdot 10^{-4}$ |
| reukorgaan | 0,06 | $3,5 \cdot 10^{-9}$ | $1,3 \cdot 10^{-2}$ | $2,1 \cdot 10^{-10}$ | $7,8 \cdot 10^{-4}$ |
| effectief dosisequivalent ($\sum_T w_T \cdot H_T$) = | | | | $1,7 \cdot 10^{-8}$ | $6,3 \cdot 10^{-2}$ |

¹ Voor het dosisequivalent is het gemiddelde genomen van het dosisequivalent in de gonaden van mannen en vrouwen.

Uit de resultaten in tabel 7.4 blijkt dat het effectief dosisequivalent ten gevolge van inademing van 1 MBq ^{81m}Kr , $1,7 \cdot 10^{-8}$ Sv is. In de conventionele eenheden is dit 0,063 mrem per ingeademde mCi ^{81m}Kr . De in de longen geabsorbeerde dosis draagt voor meer dan 90% bij aan het effectief dosisequivalent in het lichaam.

Tot slot nog een opmerking:

Bij de berekeningen is de biologische vervalconstante (of beter gezegd "verdwinconstante") gelijk aan $0,03 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ verondersteld. Daarbij is er vanuit gegaan dat per 4 seconden (1 ademhalingsperiode) 12% van de lucht in de longen wordt verversd. In werkelijkheid is dit een gemiddelde waarde. De verversing van de lucht in de longen hangt sterk af van de ademhalingsfrequentie en de ingeademde hoeveelheid lucht. De waarde $0,03 \text{ s}^{-1}$ voor λ_b moet dan ook als een richtgetal beschouwd worden waarvan de onnauwkeurigheid geschat kan worden op ca. 30%.

Hiervan uitgaande kan de berekende waarde voor het effectief dosisequivalent beschouwd worden als een gemiddelde waarde met een geschatte standaarddeviatie van ca. 30%.

7.3 De geabsorbeerde dosis in de longen ten gevolge van inademing van ^{133}Xe

Bij de berekening van de geabsorbeerde dosis in de longen indien 1 MBq (of 1 mCi) ^{133}Xe wordt ingeademt wordt uitgegaan van de volgende veronderstellingen:

- $\lambda_b = 0,03 \text{ s}^{-1}$ (zie 7.2)
- xenon in de longen wordt niet door de rest van het lichaam opgenomen
- per desintegratie van ^{133}Xe wordt de volgende ioniserende straling geëmitteerd (uit Led 78):
 - β^{-1} : 0,115 MeV (100%)
 - γ : 0,081 MeV (37%)
 - X: 0,036 MeV (55%)
 - X: 0,005 MeV (8%)
 - e^{-2} : 0,045 MeV (55%)
 - e^{-2} : 0,075 MeV (8%)

¹ $E_{\text{max}} = 0,346 \text{ MeV}$. Voor de gemiddelde energie, die voor de berekening van belang is, is $1/3 \cdot E_{\text{max}}$ genomen.

² conversie-elektronen.

Wegens de relatief lange halveringstijd van ^{133}Xe ($t_{\frac{1}{2}} = 5,3 \text{ d}$) is de effectieve vervalconstante gelijk aan λ_b zodat geldt:

$$\lambda_e = 0,03 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

Indien er $A \text{ Bq } ^{133}\text{Xe}$ wordt ingeademd geldt voor het totaal aantal desintegraties dat in de longen plaatsvindt:

$$U = \frac{A}{\lambda_e} = \frac{A}{0,03}$$

De berekening van de geabsorbeerde dosis in de longen ten gevolge van het inademen van 1 MBq (of 1 mCi) ^{133}Xe is analoog aan de berekening in 7.2.

De geabsorbeerde dosis in de longen ten gevolge van inademing van $1 \text{ MBq } ^{133}\text{Xe}$ bedraagt $8,1 \cdot 10^{-7} \text{ Gy}$. Bij inademing van $1 \text{ mCi } ^{133}\text{Xe}$ is de dosis in de longen $3,0 \text{ mrad}$.

De geabsorbeerde dosis wordt veroorzaakt door

| | |
|----------------------------------|-------|
| β -straling voor | 75,5% |
| γ -straling (81 keV) voor | 1,4% |
| röntgenstraling voor | 2,9% |
| conversie-elektronen voor | 20,2% |

Bij een afschatting van het effectief dosisequivalent blijkt deze voor meer dan 98% afkomstig te zijn van de in de longen geabsorbeerde dosis. Daarom wordt het effectief dosisequivalent gelijk gesteld aan $0,128 \cdot 10^{-7} = 9,7 \cdot 10^{-8} \text{ Sv}$ per ingeademde $\text{MBq } ^{133}\text{Xe}$. Dit is $0,36 \text{ mrem}$ per ingeademde $\text{mCi } ^{133}\text{Xe}$.

7.4 Discussie

De stralingsbelasting van de patiënt tijdens een ventilatiestudie met $^{81\text{m}}\text{Kr}$ hangt af van de totale hoeveelheid $^{81\text{m}}\text{Kr}$ die hij of zij inademt. Voor het effectief dosisequivalent geldt:

$$H_{\text{eff}} = 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot A^* \text{ (Sv)}$$

met: A^* = de ingeademde activiteit van $^{81\text{m}}\text{Kr}$ (MBq).

In de conventionele eenheden geldt:

$$H_{\text{eff}} = 0,063 \cdot A^* \text{ (mrem)}$$

met: A^* = de ingeademde activiteit van $^{81\text{m}}\text{Kr}$ (mCi)

Voorbeeld:

Indien een patiënt het $^{81\text{m}}\text{Kr}$ rechtstreeks vanuit de Rb/Kr-generator inademt, zal de geproduceerde $^{81\text{m}}\text{Kr}$ -activiteit gedurende het inademen verloren gaan, zodat verondersteld mag worden dat de patiënt de helft van de $^{81\text{m}}\text{Kr}$ -activiteit die uit de generator vrijkomt inademt (het verval in de slang tussen de generator en de patiënt wordt verwaarloosd):

De per seconde uit een, met A MBq ^{81}Rb geladen, generator vrijkomende activiteit H, wordt voor de helft door de patiënt ingeademd. De in 1 minuut ingeademde hoeveelheid $^{81\text{m}}\text{Kr}$, A^* (MBq) bedraagt dan (zie ook hoofdstuk 5 van het afstudeerverslag):

$$A^* = \frac{1}{2} \cdot 60 \cdot H = \frac{1}{2} \cdot 60 \cdot \epsilon \cdot \lambda_{^{81\text{m}}\text{Kr}} \cdot A$$

met: ϵ = de elutie-efficiency van de generator

$\lambda_{^{81\text{m}}\text{Kr}}$ = de vervalconstante van $^{81\text{m}}\text{Kr}$ (s^{-1})

A = de activiteit van ^{81}Rb in de generator (MBq)

Bedraagt van een (papier)generator de elutie-efficiency 90% dan geldt voor A^* :

$$A^* = 1,43 A \text{ (MBq)}$$

Als de patiënt gedurende 1 minuut een ventilatie-onderzoek ondergaat met $^{81\text{m}}\text{Kr}$ uit de papiergenerator (geladen met A MBq ^{81}Rb) bedraagt het effectief dosis-equivalent H_{eff} :

$$H_{\text{eff}} = 2,4 \cdot 10^{-8} \text{ (Sv)}$$

of als A gegeven wordt in (mCi):

$$H_{\text{eff}} = 0,090 \text{ (mrem)}$$

Het effectief dooiaequivalent ten gevolge van het inademen van $^{81\text{m}}\text{Kr}$ uit een 370 MBq (10mCi) $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$ -generator, bedraagt $9,0 \cdot 10^{-6}$ (Sv) (0,90 mrem) per minuut inademen.

8 CONCLUSIES

Over de blootstelling aan ioniserende straling van een radiologische werker die betrokken is bij het produceren van 3 GBq (81 mCi) ^{81}Rb met behulp van de gastargetopstelling die beschreven is in het afstudeerverslag, kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

De meeste handelingen die verricht moeten worden na EOB kunnen via een afstandsbediening in bunker 4B gedaan worden. Het exposietempo in bunker 4B na EOB is kleiner dan 1 mR/h.

Een half uur na EOB moeten twee radiologische werkers bunker 4A betreden om het opvangreservoir met de aangemaakte Rb-radioisotopen uit de glovebox te halen. Hiervoor is ongeveer 1 minuut voor nodig. Het exposietempo in bunker 4A is dan in de orde van 20 mR/h.

Indien een radiologische werker ten gevolge van calamiteiten inwendig besmet wordt met geproduceerde Rb-radioisotopen zal het effectief dosisequivalent niet meer dan 1 mSv (100 mrem) bedragen. Dit is een zgn. "realistic, pessimistic approach".

Over de stralingsbelasting van een patiënt die een ventilatie-onderzoek met $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ondergaat kan vermeld worden:

Het effectief dosisequivalent ten gevolge van het inademen van $^{81\text{m}}\text{Kr}$ bedraagt $1,7 \cdot 10^{-8}$ Sv/MBq (0,063 mrem/mCi).

APPENDIX

In deze appendix wordt aangegeven hoe de (MPC) α -waarden van de diverse radionucliden, vermeld in 5.1, berekend zijn. De gebruikte formules zijn ontleend aan ICRP-2 (zie ook Web 79) evenals de gebruikte transportfactoren f_{α} , de biologische halveringstijden en de effectieve straal van het gehele lichaam. De waarden van μ_{en} zijn overgenomen uit de door Weber (Web 79) vermelde tabellen. De fysische gegevens betreffende de radionucliden zijn overgenomen uit de bevindingen van Lederer (Led 78).

Volgens ICRP-2 is het maximaal toelaatbaar dosisequivalent voor een radiologisch werker 50 mSv (5 rem) per jaar. Uitgaande van een maximaal dosisequivalenttempo van 1 mSv (0,1 rem) per week geldt bij chronische blootstelling voor de maximaal toelaatbare lichaamsbelasting \hat{q} (MPBB):

$$\hat{q} = 10 \cdot \dot{m} / \epsilon \quad (\text{Web 79})$$

met: \hat{q} = maximum permissible body burden (kBq)

m = massa van het lichaam (70 kg)

ϵ = de effectieve energie: de totale energie die per desintegratie in het lichaam wordt geabsorbeerd (MeV)

Voor de bijdrage aan ϵ van de diverse soorten straling geldt:

- voor γ -straling : $E = E_{\gamma} \cdot F \cdot (1 - e^{-\mu_{en} \cdot x})$ MeV
- voor β^{-} -straling: $E = 0,33 \cdot E_{\max} \cdot F \cdot (1 - Z^{1/2}/50) \cdot (1 + E_{\max}^{1/2}/4)$ MeV
- voor β^{+} -straling: $E = 0,33 \cdot E_{\max} \cdot F \cdot (1 + E_{\max}^{1/2}/4) + 2 \cdot F \cdot 0,51 \cdot (1 - e^{-\mu_{en} \cdot x})$ MeV
- voor monoenergetische elektronen: $E = E(e^{-})$ MeV

met: F = voorkomen van de soort straling per desintegratie

Z = atoomnummer van het nuclide

μ_{en} = lineaire energieabsorptiecoëfficiënt (Web 79) (cm^{-1})

x = effectieve straal van het lichaam (30 cm)

Uitgaande van de MPBB kan nu een maximaal aanvaardbare concentratie van een nuclide in lucht worden berekend, indien een radiologisch werker die lucht 40 uur per week inademt. De evenwichtsactiviteit die hiervan het gevolg is mag niet groter zijn dan de MPBB. Voor de $(MPC)_a$ voor 40 uur per week (kBq/m^3) met het hele lichaam als referentieorgaan geldt dan, indien $T_e \ll 50$ jaar:

$$(MPC)_a = \frac{m}{T_e \cdot f_a \cdot \epsilon}$$

met: m = massa van het lichaam (70 kg)

ϵ = effectieve energie (MeV)

f_a = de fractie van de gehaleerde activiteit die in het lichaam achterblijft (volgens ICRP-2 geldt voor rubidium: $f_a = 0.75$)

T_e = de effectieve halveringstijd in dagen, waarbij zowel rekening gehouden wordt met fysisch verval als met biologische uitscheiding (de biologische halveringstijd van rubidium bedraagt volgens ICRP-2 45 d).

Met behulp van genoemde formule de door Lederer (Led 78) vermelde fysische gegevens zijn de $(MPC)_a$ -waarden van de geproduceerde radionucliden berekend. De resultaten zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1 $(MPC)_a$ -waarden van enkele geproduceerde radionucliden

| Nuclide | $t_{1/2}$ | ϵ (MeV) | kBq/m^3 | $(MPC)_a$ | $\mu\text{Ci/cm}^3$ |
|--------------------|-----------|------------------|------------------|-----------|---------------------|
| ^{77}Br | 2,38 | 0,12 | $3 \cdot 10^2$ | | $8 \cdot 10^{-6}$ |
| ^{79}Rb | 0,016 | 1,4 | $4 \cdot 10^3$ | | 10^{-4} |
| ^{81}Rb | 0,192 | 0,32 | $2 \cdot 10^3$ | | $4 \cdot 10^{-5}$ |
| ^{82m}Rb | 0,26 | 1,7 | $2 \cdot 10^2$ | | $6 \cdot 10^{-6}$ |
| ^{83}Rb | 86,2 | 0,31 | 10 | | $3 \cdot 10^{-7}$ |
| ^{84}Rb | 32,8 | 0,95 | 5 | | 10^{-7} |
| ^{84m}Rb | 0,0142 | 0,26 | $3 \cdot 10^4$ | | $7 \cdot 10^{-4}$ |
| $^{86}\text{Rb}^1$ | 18,8 | 0,70 | 10 | | $3 \cdot 10^{-7}$ |

¹ overgenomen uit ICRP-2

Voor krypton is de fractie van de geinhaleerde activiteit die in het lichaam achterblijft (f_a) zo klein, dat de geabsorbeerde dosis voornamelijk wordt bepaald door uitwendige bestraling (submersion). Met het gehele lichaam als referentieorgaan en een maximaal toelaatbaar dosisequivalenttempo van 1 mSv (0,1 rem) per week geldt voor de $(MPC)_a$:

$$(MPC)_a\text{-submersion} = \frac{96}{\epsilon} \text{ (kBq/m}^3\text{)}$$

De krypton radioisotopen die dochter zijn van de genoemde rubidium radioisotopen staan met de bijbehorende energie vermeld in tabel 2.

Tabel 2 $(MPC)_a\text{-submersion}$ voor enkele Kr-radioisotopen

| Nuclide | $t_{\frac{1}{2}}$ | ϵ (MeV) | $(MPC)_a$ | |
|-------------------|-------------------|------------------|--------------------|---------------------|
| | | | kBq/m ³ | $\mu\text{Ci/cm}^3$ |
| ⁷⁹ Kr | 35 h | 0,13 | $7 \cdot 10^2$ | $2 \cdot 10^{-5}$ |
| ^{79m} Kr | 50 s | 0,10 | 10^3 | $3 \cdot 10^{-5}$ |
| ^{81m} Kr | 13 s | 0,14 | $7 \cdot 10^2$ | $2 \cdot 10^{-5}$ |
| ^{83m} Kr | 1,8 h | 0,038 | $3 \cdot 10^3$ | $8 \cdot 10^{-5}$ |

REFERENTIES

- Ber 79 Bernardts, J., Bouman, N.
 "Fysiologie van de mens"
 Uitgeverij Bohn, Schetena en Holkema derde druk, Utrecht (1979)
- Col 74 Collé, R., Kishore, R., Cumming, J.
 Physical Review C vol. 9 (5) p. 1819-1829
- Huy 78 Huyskens, C.
 "Inleiding tot de stralingshygiëne" SBD nr. 1014
- Huy 81 Huyskens, C.
 Collegedictaat SBD nr. 2360
- ICRP-2 ICRP publication 2, Pergamon Press, New York (1959)
- ICRP-23 ICRP publication 23, Pergamon Press, New York (1975)
- ICRP-30 ICRP publication 30, Pergamon Press, New York (1978)
- Led 78 Lederer, C., Shirley, V.
 "Table of Isotopes" seventh ed.
 John Wiley & Sons Inc., New York (1978)
- Nac 69 Nachtigall, D.
 "Table of specific gamma ray constants"
 Verlag Karl Thiernig KG München (1969)
- Web 79 Weber, J., Rasmussen, C.
 "Stralingsbescherming"
 Delftse Uitgeversmaatschappij B.V. derde druk (1979)