

Rapport nr. 243504001

**Bepaling van de dosis(tempo)-verdeling in de
biologische bestralingsfaciliteit van het RIVM.**

F.J.M. Bader

februari 1990

RIJKSINSTITUUT VOOR VOLKSGEZONDHEID EN MILIEUHYGIENE
BILTHOVEN

Rapport nr. 243504001

Bepaling van de dosis(tempo)-verdeling in de
biologische bestralingsfaciliteit van het RIVM.

F.J.M. Bader

februari 1990

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van de Directie van het RIVM en is
beschreven onder projectnummer 243504.

VERZENDLIJST

- 1 Directie RIVM
- 2 Dr. Ir. T. Schneider
- 3 Dr. J.E.T. Moen
- 4 Dr. J.G. Kreeftenberg
- 5 Dr. H. van Loveren
- 6 Prof.Dr. G.R. Mohn
- 7 Dr. A.D.M.E. Osterhaus
- 8 M.C.M. Poelen
- 9 Dr. G. van Steenis
- 10 Dr. P.A. Steerenberg
- 11 Dr. F.C.G.M. Uytdehaag
- 12 Dr. J.G. Vos
- 13 Drs. E.J.H.J. Weertz
- 14 Laboratorium voor Stralingsonderzoek
- 15 Auteur
- 16 Bureau Projecten- en Rapportenregistratie
- 17 - 18 Documentatie en Bibliotheek
- 19 Informatie-Documentatiecentrum voor Kernongevallenbestrijding
- 20 - 24 Reserve-exemplaren
- 25 Depot Nederlandse publikaties en Nederlandse bibliografie

INHOUDSOPGAVE

| | |
|---|------------|
| | blz. |
| Verzendlijst | ii |
| Inhoudsopgave | iii |
| Summary | v |
| Samenvatting | vi |
| 1 Inleiding | 1 |
| 2 Materialen en Methoden | 3 |
| 2.1 Materialen | 3 |
| 2.2 Methoden | 6 |
| 2.2.1 Principe van thermoluminescentie dosimeters | 6 |
| 2.2.2 Uitlees- en uitglueiprocedure | 6 |
| 2.2.3 Bepaling van het dosistempo in water | 8 |
| 2.2.4 Bepaling van de dosisverdeling | 10 |
| 2.2.5 Bepaling van het in- en uitdraaieffect | 11 |
| 2.2.6 Klokcontrole | 12 |
| 3 Resultaten | 13 |
| 3.1 Dosistempo in water | 13 |
| 3.2 Dosisverdeling | 13 |
| 3.3 In- en uitdraaieffect | 15 |
| 3.4 Klokcontrole | 15 |
| 4 Discussie | 16 |
| 5 Conclusies en aanbevelingen | 17 |
| Literatuur | 19 |

| | blz. |
|---|------|
| Tabel 1 t/m 7 | 20 |
| Bijlage 1: Instelparameters van de ALNOR TLD-reader. | 27 |
| Bijlage 2: Instelparameters van de Vinten annealoven. | 27 |
| Bijlage 3: De verantwoording van het aangehouden formalisme voor de bepaling van de dosis in water met gebruik van TLD. | 28 |
| Bijlage 4: Gebruikte fysische parameters en constanten. | 31 |

SUMMARY

The RIVM has available a biological irradiation facility (BBF) for the irradiation of biological samples and small animals. The BBF is a self shielded device and can be safely operated in an existing laboratory environment. There are two ^{137}Cs sources (15 TBq) in a bilateral geometry to give maximum dose uniformity. The easily accessible irradiation chamber is housed in a rotating lead shielding.

The dosimetry of the BBF was performed by the Dosimetry Section of the RIVM. Experiments were made to determine the absorbed dose in plastic tubes filled with water and the dose distribution over the tube-holder. Separate experiments were made to determine the absorbed dose during the rotation of the irradiation chamber and to check the irradiation timer. For the experiments LiF:Mg,Ti (TLD-100) extruded ribbons were used. The TLDs were calibrated in a collimated beam of ^{137}Cs gamma rays. The determination of the absorbed dose in water was based on a users biological irradiation set up. The TLDs were individually sealed in thin plastic foil and put in plastic tubes filled for 1/3 with water. The tubes were vertical placed in the tube-holder and placed in the centre of the irradiation chamber.

The results show that the absorbed dose in water (determined on January 1, 1990) is equal to 0.97 Gy/timer-unit, with a total uncertainty of 7% (1σ). During the rotation of the irradiation chamber the absorbed dose (determined on January 1, 1990) is equal to 0.38 Gy, with a total uncertainty of 15% (1σ).

The variation of the dose distribution was determined at 15 different measurement points distributed over the tube-holder. The dosis in the measurement point in the centre of the tube-holder was taken as the reference value. The maximum observed deviation over the other 14 measurement points amounts to -16% of it.

The timer of the irradiation facility was checked against a special timer. The results indicate that within the range from 2 to 11 "timer units" no differences are present.

SAMENVATTING

Het RIVM beschikt over een biologische bestralingsfaciliteit (BBF) voor de bestraling van biologische preparaten en kleine proefdieren. De BBF bestaat uit een loodafscherming, gevat in een metalen omhulling, waarin zich een (draaibare) bestralingskamer bevindt. Boven en onder deze bestralingskamer is een ingekapselde ^{137}Cs -bron geplaatst, elk met een activiteit van ca 15 TBq. Door deze bilaterale plaatsing wordt getracht een homogene dosisverdeling in het biologische preparaat te bereiken. Voor de dosimetrie van de BBF werd het dosistempo in water en de dosisverdeling over de perspex-houder bepaald. Voorts werd de dosisbijdrage bepaald door het in- en uitdraaien van de bestralingskamer en zijn de klokaanwijzingen van de BBF gecontroleerd. Voor de bepaling van het dosistempo in water werd uitgegaan van een bestralingssituatie zoals deze wordt toegepast door de afdeling Immunobiologie. Hiervoor werd gebruik gemaakt van in ^{137}Cs -gammastraling gekalibreerde thermoluminescentie dosimeters (TLD-100 ribbons LiF:Mg,Ti). Deze TLD's werden geplaatst in kunststof buizen (Greiner type 15 ml en 50 ml) die voor ca 1/3 waren gevuld met water. Deze buizen stonden vertikaal in de perspex-houder. Het geheel werd symmetrisch in de bestralingskamer geplaatst en bestraald tot de aanwijzing van 2 klokeenheden (KE) op de BBF. Uit de resultaten bleek dat het dosistempo in water op 1 januari 1990 $0,97 \text{ Gy/KE} \pm 7\%$ (1σ , totale onzekerheid) bedroeg. De dosisbijdrage door het in- en uitdraaien van de bestralingskamer bedroeg $0,38 \text{ Gy} \pm 15\%$ (1σ , totale onzekerheid). De dosisverdeling over de perspex-houder werd bepaald door de perspex-houder in 15 meetpunten te verdelen, met in elk meetpunt 2 gekalibreerde TLD's. De perspex-houder werd vervolgens symmetrisch in de bestralingskamer geplaatst en bestraald tot de aanwijzing van 2 KE op de BBF. De gemiddelde waarde per meetpunt werd genormeerd op die van het middelste meetpunt van de perspex-houder. Uit de resultaten bleek een variatie van maximaal $+0\%$ tot -16% . De standaarddeviatie over deze 15 meetpunten bedroeg 7% (1σ). Uit de resultaten van de klokcontrole van de BBF bleek dat bij bestralingstijden van 2 KE tot 11 KE deze overeenkwamen met de aanwijzingen van een laboratorium-timer.

1. INLEIDING

Door het RIVM is een biologische bestralingsfaciliteit (BBF) aangeschaft voor de bestraling van biologische preparaten en kleine proefdieren (muizen, ratten en cavia's). Deze BBF is geleverd door de firma Von Gahlen Nederland B.V. uit Didam en is opgesteld in gebouw R kamer 3. De BBF is zodanig ontworpen dat de bestralingen relatief snel, eenvoudig en stralingshygienisch verantwoord, uitgevoerd kunnen worden.

De BBF bestaat uit een loodafscherming, gevat in een metalen omhulling, waarin zich een bestralingskamer bevindt. Deze bestralingskamer heeft een vloerooppervlak van $14 \times 14 \text{ cm}^2$ en een hoogte van 20 cm. Boven en onder deze bestralingskamer bevindt zich een ingekapselde ^{137}Cs -bron, elk met een activiteit van ca 15 TBq. Door de ^{137}Cs -bronnen op deze wijze te plaatsen wordt getracht een homogene dosisverdeling in het biologische preparaat te bereiken. Deze ^{137}Cs -bronnen zijn elk opgebouwd uit losse ^{137}Cs chloride-pellets, hermetisch opgesloten in een dubbele capsulering van roestvast staal. De geometrie van de van de BBF is gegeven in figuur 1. De maatvoering werd ontleend aan de constructietekeningen van de fabrikant.

In de periode maart tot juli 1989 zijn voor de dosimetrie van de BBF een aantal experimenten uitgevoerd met gekalibreerde thermoluminescentie dosimeters (TLD's). De kalibraties van deze TLD's zijn uitgevoerd in de (hoge luchtkermatempo) ^{137}Cs -referentieopstelling van het RIVM. Voor de omrekening van de grootte van de luchtkerma naar de grootte van de geabsorbeerde dosis in water werd gebruik gemaakt van NCS Rapport 2 (1986), McKinlay (1981), Hubbell (1977 en 1982) en ICRU-37 (1984) [1, 2, 3, 4, en 5].

Voor de bepaling van het dosistempo in water werd uitgegaan van een bestralingssituatie zoals deze wordt toegepast door de afdeling Immunobiologie (IMB). Hierbij bevindt zich een waterige oplossing van 5 ml tot 20 ml in een of meerdere kunststof buizen die vertikaal worden geplaatst in een perspex-houder. Dit geheel wordt symmetrisch geplaatst in de bestralingskamer van de BBF. De gegeven dosis ligt, afhankelijk van het beoogde biologisch effect, tussen de 5 Gy en 30 Gy. Voorts werd de dosisverdeling over de perspex houder bepaald, werd de

dosisbijdrage door het in- en uitdraaien van de bestralingskamer bepaald en zijn de klokaanwijzingen van de BBF vergeleken met een laboratorium-timer.

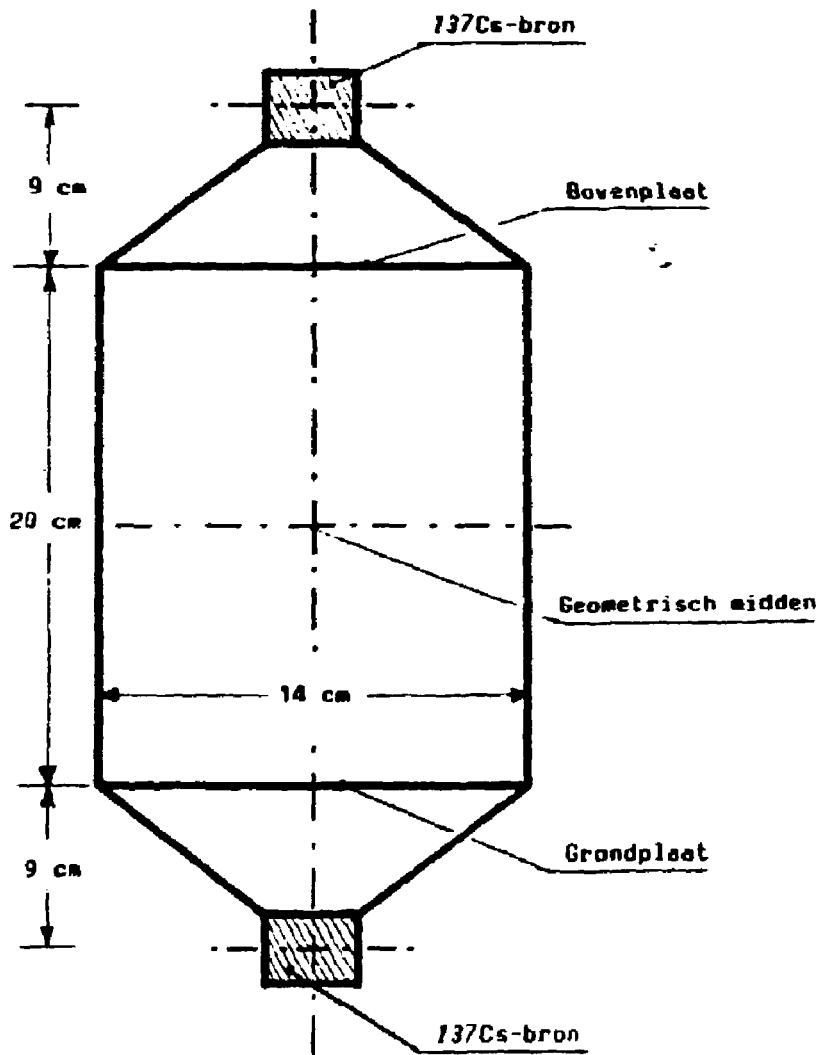


Fig. 1: De geometrie van de biologische bestralingsfaciliteit van het RIVM.

2 MATERIALEN EN METHODEN

2.1 Materialen

De metingen zijn uitgevoerd met behulp van LiF:Mg,Ti thermoluminescentie dosimeters (TLD's) van het fabrikaat Engelhard de Meern B.V. (voorheen Harshaw Chemical Co.) Dit materiaal wordt aangeduid als "TLD-100 extruded ribbon" en bestaat uit kristallen van lithium-fluoride verontreinigd met magnesium en titaan. De nominale afmetingen en massa van een TLD-100 ribbon bedragen respectievelijk $4 \times 4 \times 1 \text{ mm}^3$ en 30 mg.

Voor de metingen zijn 30 TLD's geselecteerd uit batch nr. T-1717-S(2) die vervolgens zijn gereinigd in methanol van p.a.-kwaliteit. De selectie werd uitgevoerd door controle van de TLD op uiterlijke gebreken.

De TLD's zijn uitgelezen in de Alnor Dosacus TLD-Reader, type RE-1, ser.nr. 06528, van het fabrikaat ALNOR OY uit Finland. De instelparameters van de TLD-reader zijn gegeven op bijlage 1.

De TLD's zijn uitgegloeid in een annealoven, type 622/E, ser.nr. 108, van het fabrikaat Vinten Instruments uit het Verenigd Koninkrijk. De instelparameters van de annealoven zijn gegeven op bijlage 2.

Voor het bestralen van biologische preparaten heeft de afdeling IMB drie perspex-houders laten maken, gecodeerd met I, II en III. Perspex-houder I en II zijn gebruikt voor de dosimetrische experimenten. Perspex-houder I was voorzien van vier konische 15 ml-buizen vervaardigd van polystyreen (Zie foto 1). Perspex-houder II was voorzien van vier konische 50 ml-buizen vervaardigd van polypropyleen (Zie foto 2). De buizen zijn geleverd door de firma Greiner uit Alphen a/d Rijn.

Voor de bepaling van de dosisverdeling over een perspex-houder werd gebruik gemaakt van perspex-houder I, twee plaatjes perspex, elk met de afmetingen van $84 \times 79 \times 4 \text{ mm}^3$ en 15 Alnor TLD-slides.

Voor een aantal experimenten werd gebruik gemaakt van de bodem van een kartonnen "aspullen-doesje", met de afmetingen van 115 x 115 x 65 mm³. (Zie foto 2.)

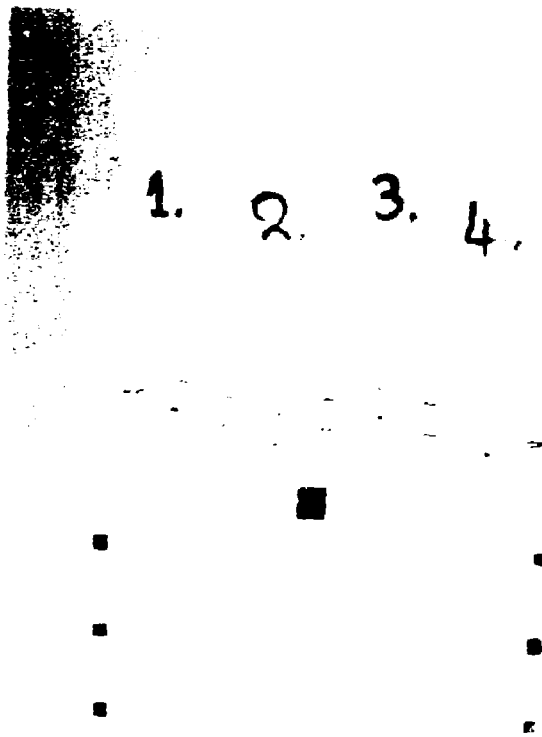


Foto 1: Perspex-houder I met de vier 15 ml konische buizen.

Deze configuratie werd gebruikt voor de bepaling van de dosis in water en is representatief voor een praktijkbestraling van de afdeling IMB.

2.2 Methoden

2.2.1 Principe van thermoluminescentie dosimeters

Een TLD wordt vervaardigd uit een (luminescerende) vaste stof waarin, door toevoeging van verontreiniging(en), defecten in de kristalstructuur zijn veroorzaakt. Deze defecten kunnen optreden als elektronenvallen voor de valentie-elektronen. Door blootstelling van de TLD aan (ioniserende) straling zullen door energieoverdracht deze elektronen de valentieband verlaten en worden ingevangen in de elektronenvallen. De TLD bezit de eigenschap dat deze situatie dagen tot jaren behouden blijft. Door verwarming van de TLD kunnen deze elektronen worden vrijgemaakt, onder uitzending van een karakteristiek emissie-spectrum van lichtfotonen. Dit verwarmen van de TLD wordt volgens een bepaalde uitleesprocedure (temperatuur/tijd-profiel) uitgevoerd in de TLD-reader. In de TLD-reader worden de lichtfotonen door een fotomultiplicatorbuis gedetecteerd en vervolgens (elektronisch) omgezet in een meetsignaal. Dit meetsignaal is in eerste orde benadering rechtevenredig met de geabsorbeerde dosis in de TLD.

2.2.2 Uitlees- en uitgloeiprocedure

In de hier gebruikte TLD-reader werd een uitleesprocedure toegepast waardoor de TLD tweemaal, direct achter elkaar, 24 seconden werd verwarmd met stikstof (N_2) van 250 °C. Om de invloed van de fadingpieken van TLD-100 (piek 1, 2 en 3) op het meetsignaal te minimaliseren werd een vooruitlezing (pre-read-out) toegepast. Het meetsignaal van de tweede uitlezing werd in mindering gebracht op het meetsignaal van de eerste uitlezing, waardoor het resulterende meetsignaal onafhankelijk werd van het achtergrondsignaal. In figuur 2 een representatieve gloeicurve van TLD-100 als functie van het ingestelde temperatuur/tijd-profiel.

De TLD's zijn voor hergebruik gereed gemaakt d.m.v. een uitgloeiprocedure (pre-irradiation-anneal). Deze uitgloeiprocedure had een tijdsduur van 24 uur en bestond uit de volgende drie fasen:

- 1^e. 70 minuten voor opwarmen van 21 °C naar 400 °C,
- 2^e. 60 minuten constant op 400 °C,
- 3^e. 1310 minuten voor afkoelen naar 21 °C.

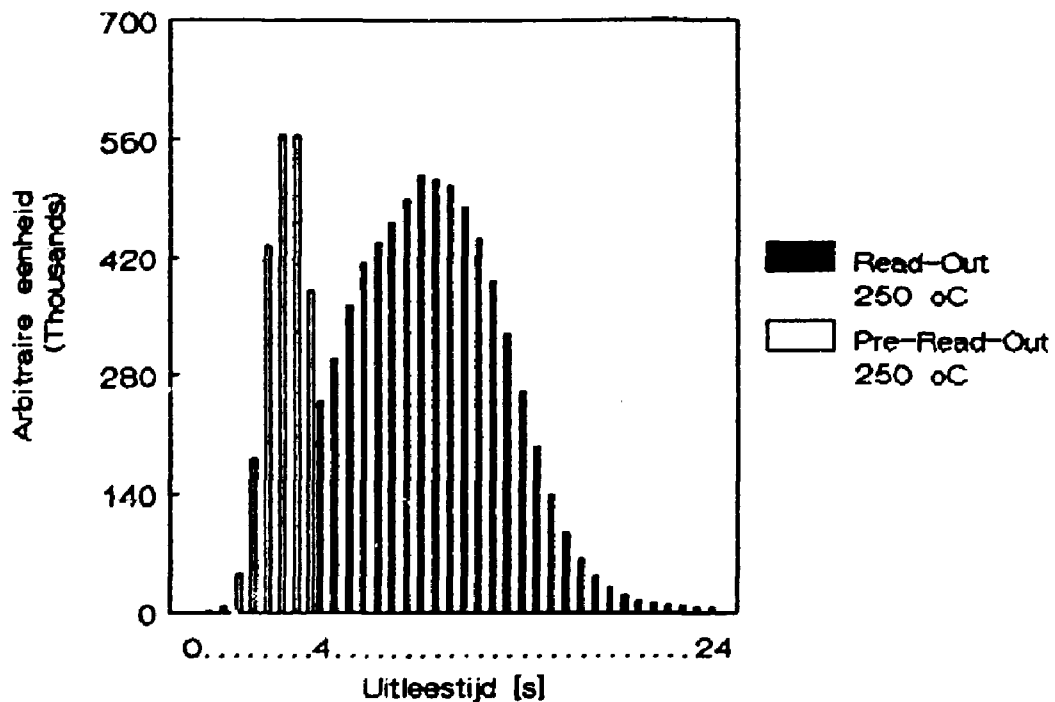


Fig. 2: De gloeicurve van TLD-100 extruded ribbon (LiF:Mg,Ti) als functie van het ingestelde temperatuur/tijd-profiel.

2.2.3 Bepaling van het dosistempo in water

Voor de bepaling van de dosis in water zijn in de perspex-houder I vier 15 ml-buizen geplaatst, elk gevuld met 5 ml water. In elke buis was ter hoogte van de markering van 1 ml en 4 ml een in dun plastic gesealde TLD geplaatst. In de perspex-houder II waren vier 50 ml-buizen geplaatst, elk gevuld met 20 ml water. In elke buis was ter hoogte van de markering van 5 ml en 15 ml een in dun plastic gesealde TLD geplaatst. De posities van de buizen in de perspex-houders zijn aangegeven in figuur 3. Elke perspex-houder werd vervolgens symmetrisch geplaatst in de bestralingskamer en bestraald tot de aanwijzing van 2 klokeenheden (KE) op de BBF. De draairichting van de bestralingskamer stond in de stand L. Deze symmetrische plaatsing werd uitgevoerd door de perspex-houder te plaatsen op de bodem van een kartonnen "ampullen doosje". Dit doosje stond op de grondplaat van de bestralingskamer.

De kalibratie van de TLD's werd uitgevoerd door bestraling van de TLD's in een goed gecollimeerde bundel van ^{137}Cs -gammastraling. Deze bundel wordt gerealiseerd door de (hoge luchtkermatempo) ^{137}Cs -referentieopstelling van het RIVM. De TLD's waren hiervoor gelegen op een perspex-support (build-up) van 4 mm dik. De kalibratieafstand bedroeg 197,7 cm en werd gedefinieerd als de afstand tussen het referentiepunt van de ^{137}Cs -gammabron en de voorzijde van de TLD's. De bundeldiameter ter plaatse van de TLD's bedroeg 18 cm. De TLD's zijn bestraald tot een luchtkerma van 2 Gy.

Het dosistempo in water \dot{D}_w is berekend volgens vergelijking (1). De numerieke waarden van de in de berekeningen gebruikte fysische parameters en constanten zijn gegeven in bijlage 4. De verantwoording van het aangehouden formalisme voor de bepaling van de dosis in water m.b.v. TLD is gegeven in bijlage 3.

$$\dot{D}_w = M_{w,tld} \cdot N_{K,tld} \cdot C_{w,tld} \cdot dt^{-1} \quad [\text{Gy} \cdot \text{KE}^{-1}] \quad (1)$$

waarin: $M_{w,tld}$ = het meetsignaal van de TLD in water, [cts]

$N_{K,tld}$ - de luchtkerma-kalibratiefactor van de TLD, [$Gy \cdot cts^{-1}$]

$C_{w,tld}$ - de factor voor conversie van de luchtkerma naar de dosis in water.

dt - de bestralingstijd van de BBF, [KE]

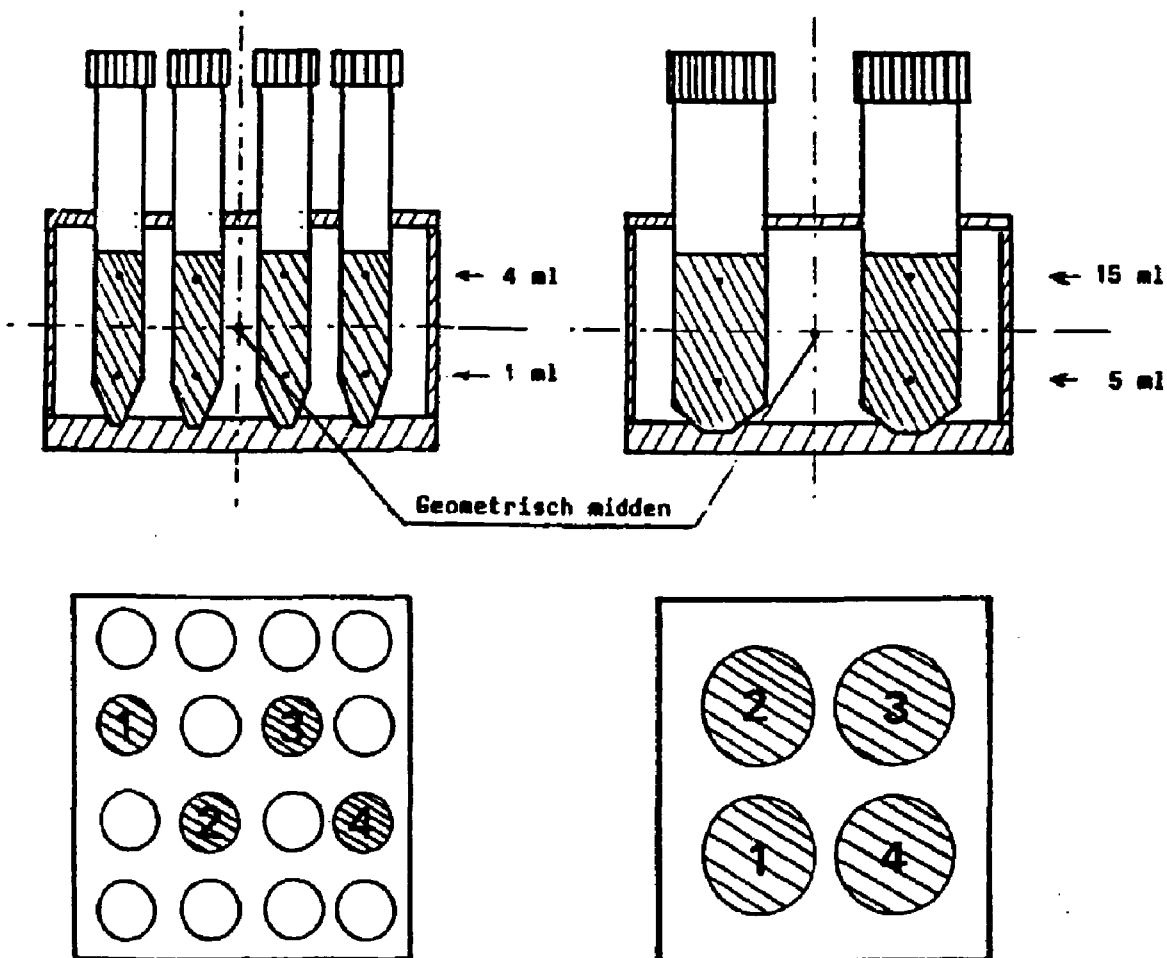


Fig. 3: De posities van de konische buizen in de perspex-houders tijdens de bepaling van de dosis in water. Links perspex-houder I met de vier 15 ml-buizen; Rechts perspex-houder II met de vier 50 ml-buizen.

2.2.4 Bepaling van de dosisverdeling

Voor de bepaling van de dosisverdeling over een perspex-houder werd gebruik gemaakt van perspex-houder I. Deze perspex-houder werd hiervoor opgedeeld in drie horizontale vlakken, gecodeerd met A, B en C. (Zie foto 3.) Elk vlak werd verdeeld in 5 meetpunten waarin gelegen een TLD-slide met 2 gekalibreerde TLD's. (Zie figuur 4.) Boven en onder de 5 TLD-slides lag een plaatje perspex van $84 \times 79 \times 4 \text{ mm}^3$. De vlakken A, B en C werden achtereenvolgens bestraald tot de aanwijzing van 2 KE op de BBF. De draairichting van de bestralingskamer stond in de stand L. De dosisverdeling werd bepaald door de gemiddelde TLD-waarde per meetpunt te normeren op die in het midden van vlak B (meetpunt B-5).

Voor deze bepaling van de dosisverdeling zijn twee experimenten uitgevoerd. Experiment 1 werd uitgevoerd met de perspex-houder I symmetrisch geplaatst op de grondplaat van de bestralingskamer. Dit experiment werd tweemaal uitgevoerd, waaruit de herhaalbaarheid van dit experiment werd geschat.

Experiment 2 werd uitgevoerd met de perspex-houder I symmetrisch geplaatst in de bestralingskamer. De perspex-houder I was hiervoor geplaatst op de bodem van het kartonnen "ampullen doosje". Dit kartonnen "ampullen doosje" was hiervoor symmetrisch geplaatst op de grondplaat van de bestralingskamer. De TLD's van vlak B waren hierdoor gelegen op het geometrisch midden van de bestralingskamer.

De kalibratie van de TLD's werd uitgevoerd door bestraling van de TLD's in een goed gecollimeerde bundel van ^{137}Cs -gammastraling. Deze bundel wordt gerealiseerd door de (hoge luchtkermatempo) ^{137}Cs -referentieopstelling van het RIVM. De TLD's waren hiervoor gevat in hun TLD-slide met boven en onder een plaatje perspex van $84 \times 79 \times 4 \text{ mm}^3$. Dit geheel werd vervolgens geplaatst op een strak gespannen mylarfolie. Het nummer op de TLD-slide was van de ^{137}Cs -bron afgericht. De bundeldiameter ter plaatse van de TLD's bedroeg 23 cm; de kalibratieafstand bedroeg 256,6 cm. De kalibratieafstand werd gedefinieerd als de afstand tussen het referentiepunt van de ^{137}Cs -bron en de voorzijde van de TLD's. De TLD's zijn bestraald tot een luchtkerma van 1 Gy.

2.2.5 Bepaling van het in- en uitdraaieffect

Tijdens het starten van een bestraling draait de bestralingskamer eerst van de ruststand naar de bestralingsstand, pas dan wordt de klok van de BBF gestart. Bij het bereiken van de ingestelde tijd draait de bestralingskamer terug naar de ruststand. Dit in- en uitdraaien van de bestralingskamer duurt elk ca 8 seconden. Door dit in- en uitdraaien wordt een dosis door de biologische preparaten ontvangen. Deze dosis werd bepaald door het volgen van de methode van paragraaf 2.2.4 (experiment 2), waarbij steeds drie TLD-slides waren gelegen op vlak B. (Zie figuur 4.) De TLD's zijn bestraald tot de aanwijzing van 1, 2, 3, 4 en 5 KE, met de draairichting van de bestralingskamer in de stand L. Door lineaire extrapolatie van de gemeten TLD-waarden naar het snijpunt met de Y-as werd de dosisbijdrage berekend.



Foto 3: Perspex-houder I met in vlak B de TLD-slides gevat tussen de perspex-plaatjes. Deze configuratie werd gebruikt voor de bepaling van de dosisverdeling over perspex-houder I.

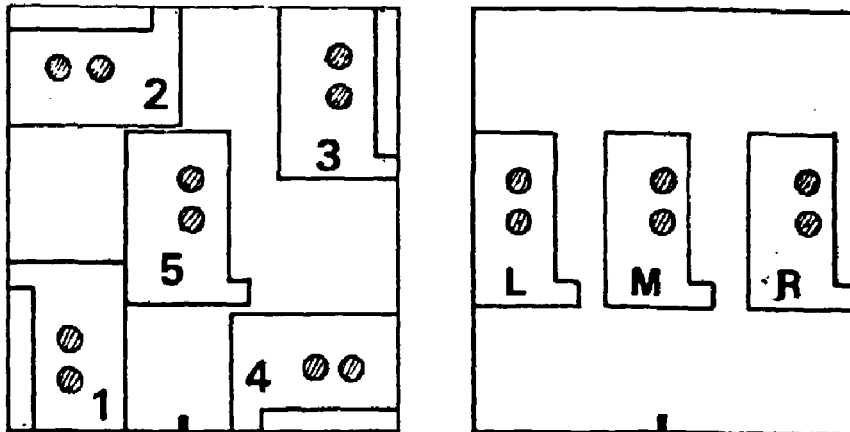


Fig. 4: De posities van de TLD-slides op de perspex-plaat.

Links de posities voor de bepaling van de dosisverdeling;

Rechts de posities voor de bepaling van de dosisbijdrage

door het in- en uitdraaien van de bestralingskamer.

2.2.6 Klokcontrole

De klokaanwijzingen van de BBF zijn gecontroleerd m.b.v. een laboratorium-timer. Het starten en stoppen van de laboratorium-timer werd handmatig uitgevoerd op aangeven van de BBF. Starten bij het gaan branden van de rode lamp op de BBF (Irradiation On) en stoppen bij het doven van deze rode lamp (Irradiation Off). De tijd aangegeven door de laboratorium-timer werd vervolgens vergeleken met de ingestelde tijd op de BBF. De gecontroleerde klokaanwijzingen van de BBF waren 2, 4, 6, 8 en 10 KE.

3 RESULTATEN

3.1 Dosistempo in water

De resultaten van de bepaling van het dosistempo in water bij gebruik van perspex-houder I met de vier 15 ml-buizen elk gevuld met 5 ml water, zijn gegeven in tabel 1. Het gemiddelde dosistempo in water bedroeg op 16 mei 1989: $0,97 \text{ Gy/KE} \pm 6,7\%$ (1σ , type A).

De resultaten van de bepaling van het dosistempo in water bij gebruik van perspex-houder II met de vier 50 ml-buizen elk gevuld met 20 ml water, zijn gegeven in tabel 2. Het gemiddelde dosistempo in water bedroeg op 16 mei 1989: $0,99 \text{ Gy/KE} \pm 4,2\%$ (1σ , type A).

Uit de resultaten van deze bepalingen bleek dat op 16 mei 1989 gemiddeld een dosistempo in water werd gemeten van $0,98 \text{ Gy/KE} \pm 5,5\%$ (1σ , type A). Hiervan uitgegaan mag gesteld worden dat het dosistempo in water op 1 januari 1990 $0,97 \text{ Gy/KE}$ bedraagt, met een totale onzekerheid van 7% (1σ). De resultaten van de foutenanalyse in de bepaling van het dosistempo in water zijn gegeven in tabel 7.

3.2 Dosisverdeling

De resultaten van de dosisverdeling van experiment 1 zijn gegeven in figuur 5 en tabel 3. Dit experiment werd tweemaal uitgevoerd waaruit een herhaalbaarheid werd geschat van 3% . Door de meetwaarden te normeren op die uit het midden van vlak B (punt B-5), bleek een variatie van maximaal $+21\%$ tot -32% . De standaarddeviatie over deze 15 meetwaarden bedroeg 17% (1σ).

De resultaten van de dosisverdeling van experiment 2 zijn gegeven in figuur 5 en tabel 4. Door de meetwaarden te normeren op die uit het midden van vlak B (punt B-5), bleek een variatie van maximaal $+0\%$ tot -16% . De standaarddeviatie over deze 15 meetwaarden bedroeg 7% (1σ).

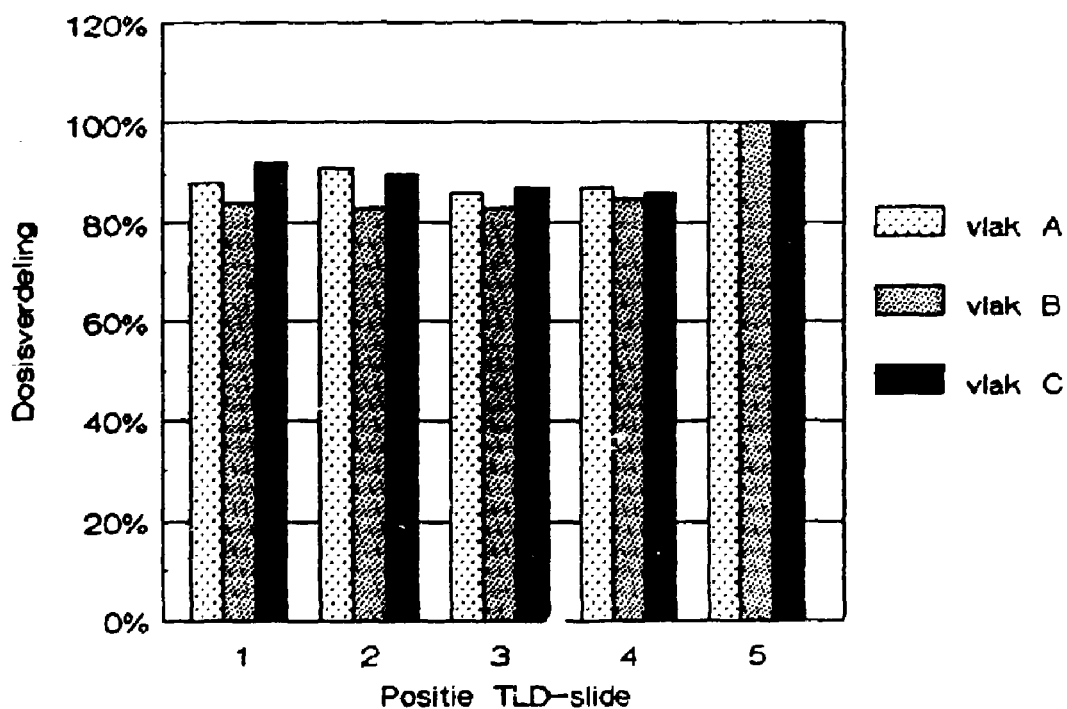
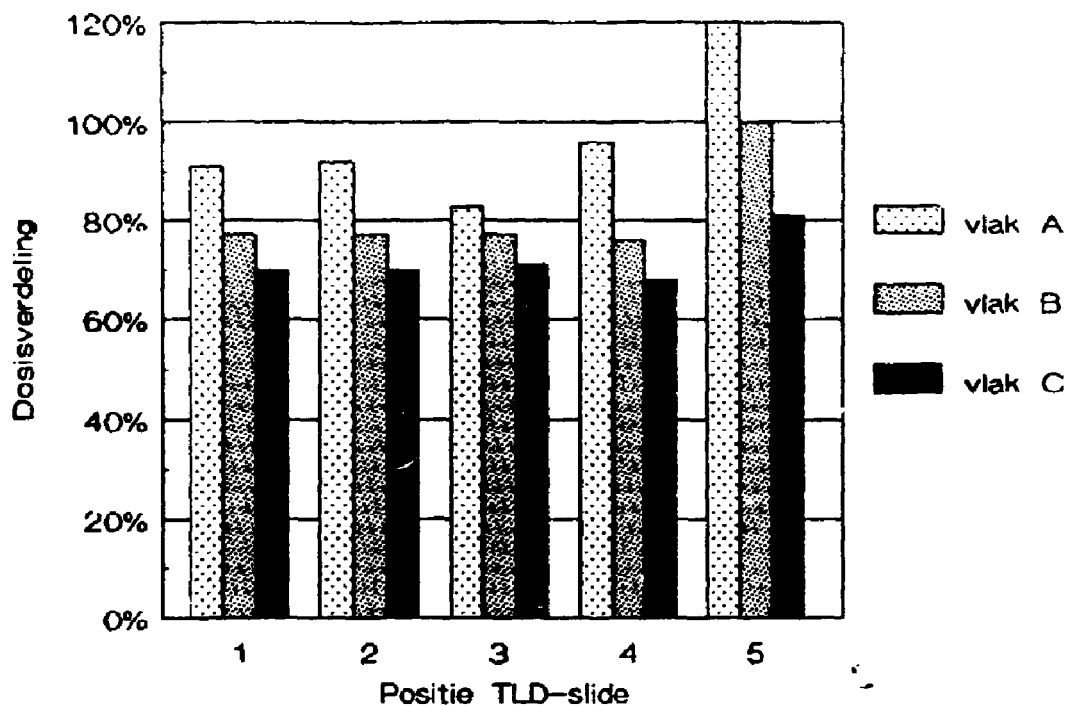


Fig. 5: De dosisverdeling over perspex-houder I waarbij deze was geplaatst op de grondplaat van de BBF (boven) en de dosisverdeling waarbij deze was geplaatst op de bodem van het kartonnen "ampullen-doesje" (onder). Vlak B-5 is 100%.

3.3 In- en uitdraai-effect

De resultaten van de bepaling van de dosisbijdrage door het in- en uitdraaien van de bestralingskamer, zijn gegeven in figuur 6 en tabel 5. Het snijpunt met de Y-as bedroeg op 24 april 1989: $0,39 \text{ Gy} \pm 14\%$ (1σ , type A). Deze waarde herleid naar 1 januari 1990 geeft een dosisbijdrage in water van $0,38 \text{ Gy} \pm 15\%$ (1σ , totale onzekerheid)

3.4 Klokcontrole

De resultaten van klokcontrole van de BBF zijn gegeven in tabel 6. De klokaanwijzingen van de BBF, gelegen tussen 2 en 11 KE, kwamen overeen met de aanwijzingen van de laboratorium-timer.

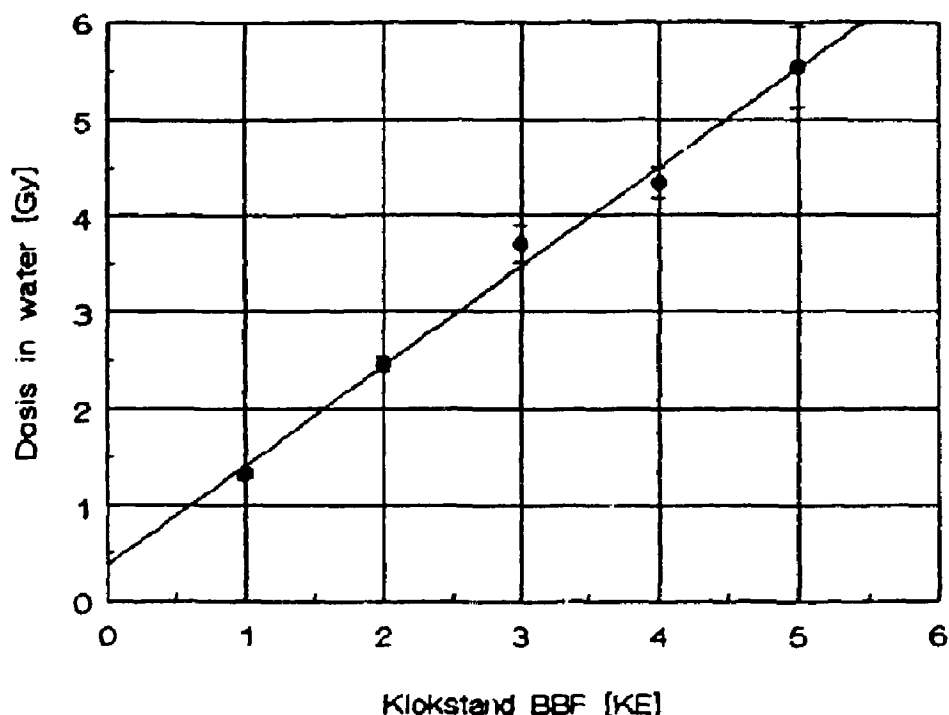


Fig. 6: De dosisbijdrage door het in- en uitdraaien van de bestralingskamer. Dit effect werd bepaald door lineaire extrapolatie van de meetwaarden uit de positie L, M, en R, naar het snijpunt met de Y-as. De TLD-slides waren hiervoor gelegen in vlak B zoals aangegeven in figuur 4.

4 DISCUSSIE

De stopping-power verhouding van elektronen in water en perspex ($S_{w,pmma}$), wordt bepaald door de energie van deze elektronen. Voor de juiste waarde moet deze verhouding worden bepaald door weging over het compton-elektronenspectrum in de BBF. Voor ^{137}Cs is de maximale (compton)elektronen-energie 0,478 MeV. Uit ICRU-37 blijkt dat de stopping-power verhouding van elektronen in het energiegebied van 0,01 MeV tot 0,478 MeV maximaal 0,3 % varieert. Op grond van dit gegeven is de verhouding bepaald door het gemiddelde te berekenen over de numerieke waarden uit ICRU-37.

De verhouding van de massieke energie-absorptiecoëfficiënten van perspex en lucht ($(\mu_{en}/\rho)_{pmma,air}$), wordt bepaald door de fotonen-energieën. Voor de juiste waarde moet deze verhouding bepaald worden door weging over het fotonen-energiespectrum van de ^{137}Cs -referentieopstelling. In dit rapport is uitgegaan van de mono-energetische fotonenergie van ^{137}Cs van 661,62 keV. De onzekerheid die hierdoor wordt geïntroduceerd is minder dan 1%.

De totale onzekerheid in de bepaling van de dosis in water werd geschat uit de kwadratische sommatie van de in tabel 7 gegeven onzekerheden. Deze onzekerheden zijn verdeeld in twee typen onzekerheid, te weten: type A en type B [6]. Type A zijn de statistische onzekerheden verkregen door middeling van individuele meetwaarden. Type B zijn de niet-statistische (systematische) onzekerheden gegeven door de gebruikte meetstandaarden, methoden en procedures. Elke bijdragende onzekerheid is bepaald als 1 standaarddeviatie of het equivalent hiervan.

5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Uit de resultaten van de bepalingen van de dosistemp*i* in water kan worden geconcludeerd dat in de beschreven situaties (perspex-houder I met de 15 ml buizen en perspex-houder II met de 50 ml buizen), een gelijk dosistempo werd gemeten. Dit dosistempo bedroeg op 1 januari 1990: 0,97 Gy/KE.

De dosisbijdrage door het in- en uitdraaien van de bestralingskamer bedroeg op 1 januari 1990: 0,38 Gy.

Uit de resultaten van de bepalingen naar de dosisverdeling bleek dat voor een homogene dosisverdeling van 10% (1σ) of beter, de perspex-houder met de buizen symmetrisch geplaatst moet zijn in de bestralingskamer. Deze symmetrische plaatsing is mogelijk door gebruik te maken van de bodem van het kartonnen "ampullen-doesje" zoals beschreven.

Voor een aantal klokinstellingen is in tabel 8 de dosis in water gegeven. Deze dosis werd berekend volgens vergelijking (2).

Door het fysisch verval van het nuclide ^{137}Cs zal per jaar het dosistempo in water en de dosisbijdrage door het in- en uitdraaien van de bestralingskamer, met 2,3% afnemen. De in tabel 8 gegeven waarden voor de dosis zullen hierdoor dus jaarlijks 2,3% lager worden. Bijstelling van deze dosiswaarden is mogelijk door vermenigvuldiging met de factor 0,977.

Tabel 8: De dosis in water per klokinstelling

De dosis D, geldt op 1 januari 1990 en bij symmetrische plaatsing van de perspex-houder I of II met bijbehorende buizen in de bestralingskamer. Deze buizen zijn hierbij voor ca 1/3 gevuld met een waterige oplossing.

$$D = (KE \cdot \dot{D}_w) + \Delta D \quad [\text{Gy}] \quad (2)$$

waarin: KE = het aantal klokeenheden,

\dot{D}_w = het dosistempo in water, [Gy/KE],

$$\dot{D}_w = 0,97 \text{ Gy/KE},$$

ΔD = de dosisbijdrage door het in- en uitdraaien van de bestralingskamer, [Gy].

$$\Delta D = 0,38 \text{ Gy}.$$

| Klokinstelling [KE] | Dosis [Gy] |
|---------------------|------------|
| 0000 | 0,38 |
| 0001 | 1,35 |
| 0002 | 2,32 |
| 0003 | 3,29 |
| 0004 | 4,26 |
| 0005 | 5,23 |
| 0010 | 10,1 |
| 0015 | 14,9 |
| 0020 | 19,8 |
| 0025 | 24,6 |
| 0030 | 29,5 |
| 0050 | 48,9 |

LITERATUUR

- [1] Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie (NCS)
Code of Practice for the Dosimetry of High-Energy Photon Beams
NCS Report 2, December 1986.
- [2] A.F. McKinlay
Thermoluminescence Dosimetry.
Medical Physics Handbooks 5. Bristol: Adam Hilger Ltd, 1981.
- [3] J.H. Hubbell
Photon Mass Attenuation and Mass Energy-Absorption Coefficients for H,
C, N, O, Ar, and Seven Mixtures from 0.1 keV to 20 MeV.
Radiat. Res. 70, 1977; pp 58-81
- [4] J.H. Hubbell
Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 keV
to 20 MeV.
Int. J. Appl. Radiat. Isot. Vol. 33. 1982; pp 1269 to 1290
- [5] International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)
Stopping Powers for Electrons and Positrons,
ICRU Report 37, (1984)
- [6] R. Kaarls
Report from the BIPM working group on the statement of uncertainties
to the Comite International des Poids et Mesures,
49, A1 - A12 (1981)

Tabel 1: Resultaat van de bepaling van het dosistempo in water bij gebruik van perspex-houder I met de 15 ml-buizen.

KE is 1 klokeenheid van de BBF

| TLD-code | positie | diepte [ml] | \dot{D}_{water} [Gy/KE] |
|-----------------------|---------|----------------|-------------------------------------|
| 240-1 | 1 | 1 | 0,950 |
| 240-2 | 1 | 4 | 0,976 |
| 230-1 | 2 | 1 | 0,904 |
| 230-2 | 2 | 4 | 1,05 |
| 234-1 | 3 | 1 | 1,01 |
| 234-2 | 3 | 4 | 1,05 |
| 237-1 | 4 | 1 | 0,868 |
| 237-2 | 4 | 4 | 0,978 |
| Gemiddeld dosistempo: | | | 0,973 |
| 1 standaarddeviatie : | | | 6,7% |

2: Resultaat van de bepaling van het dosistempo in water, bij gebruik van perspex-houder II met de 50 ml-buizen.

KE is 1 klokeenheid van de BBF

| TLD-code | positie | diepte [ml] | \dot{D} water [Gy/KE] |
|-----------------------|---------|----------------|-------------------------------|
| 224-1 | 1 | 5 | 0,952 |
| 224-2 | 1 | 15 | 1,08 |
| 216-1 | 2 | 5 | 1,02 |
| 216-2 | 2 | 15 | 0,989 |
| 218-1 | 3 | 5 | 1,00 |
| 218-2 | 3 | 15 | 0,959 |
| 215-1 | 4 | 5 | 0,980 |
| 215-2 | 4 | 15 | 0,962 |
| Gemiddeld dosistempo: | | | 0,993 |
| 1 standaarddeviatie : | | | 4,2% |

Tabel 3: Resultaat van de bepaling van de dosisverdeling over perspexhouder I geplaatst op de grondplaat (experiment 1), en de herhaalbaarheid van experiment 1.

| TLD-code | experiment | | ratio | gemiddeld | Relatieve dosisverdeling |
|------------|----------------|----------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| | 1 ^a | 1 ^b | 1 ^a / 1 ^b | 1 ^a en 1 ^b | t.o.v. TLD B00237 |
| A2 00218 | 1,54 | 1,49 | 0,97 | 1,52 | 92 % |
| A1 00215 | 1,50 | 1,52 | 0,99 | 1,51 | 91 % |
| A4 00216 | 1,62 | 1,58 | 0,98 | 1,60 | 96 % |
| A5 00214 | 2,01 | 2,00 | 1,00 | 2,01 | 121 % |
| A3 00221 | 1,36 | 1,40 | 1,03 | 1,38 | 83 % |
| B2 00223 | 1,26 | 1,27 | 1,01 | 1,27 | 77 % |
| B1 00232 | 1,28 | 1,26 | 0,98 | 1,27 | 77 % |
| B4 00240 | 1,26 | 1,26 | 1,00 | 1,26 | 76 % |
| B5 00237 | 1,66 | 1,66 | 1,00 | 1,66 | 100 % |
| B3 00230 | 1,25 | 1,29 | 1,03 | 1,27 | 77 % |
| C5 00233 | 1,33 | 1,36 | 1,02 | 1,35 | 81 % |
| C3 00224 | 1,18 | 1,17 | 0,99 | 1,18 | 71 % |
| C4 00236 | 1,12 | 1,13 | 0,99 | 1,13 | 68 % |
| C1 00234 | 1,16 | 1,16 | 1,00 | 1,16 | 70 % |
| C2 00229 | 1,16 | 1,15 | 0,99 | 1,16 | 70 % |
| Gemiddeld: | 1,38 | 1,38 | 1,00 | 1,38 | max.: +21% |
| 1σ: | 18% | 17% | 2% | 17% | min.: -32% |

Tabel 4: Resultaat van de bepaling van de dosisverdeling over perspexhouder 1, geplaatst op het kartonnen doosje (experiment 2).

| TLD-code | experiment 2 | Relatieve dosisverdeling t.o.v. TLD B00237 |
|------------|-----------------|---|
| A2 00218 | 1,09 | 89 % |
| A1 00215 | 1,06 | 87 % |
| A4 00216 | 1,04 | 85 % |
| A5 00214 | 1,20 | 98 % |
| A3 00221 | 1,04 | 85 % |
| B2 00223 | 1,02 | 84 % |
| B1 00232 | 1,03 | 84 % |
| B4 00240 | 1,04 | 85 % |
| B5 00237 | 1,22 | 100 % |
| B3 00230 | 1,02 | 84 % |
| C5 00233 | 1,19 | 98 % |
| C3 00224 | 1,04 | 85 % |
| C4 00236 | 1,02 | 84 % |
| C1 00234 | 1 02 | 94 % |
| C2 00229 | 1,07 | 88 % |
| Gemiddeld: | 1,07 | Max.: +0% |
| σ : | 6,6% | Min.: -16% |

Tabel 5: Resultaten van de bepaling van de dosisbijdrage door het in- en uitdraaien van de bestralingskamer.

| Klok BBF | \dot{D}_w [Gy] | 1σ [%] |
|----------|---------------------|------------------|
| 0001 | 1,335 | 3,8 |
| 0002 | 2,455 | 3,0 |
| 0003 | 3,702 | 5,4 |
| 0004 | 4,346 | 3,9 |
| 0005 | 5,538 | 7,5 |

| |
|-------------------------|
| $Y = a_0 + a_1 \cdot X$ |
| $a_0 = 0,386$ |
| $a_1 = 1,030$ |

Tabel 6: Resultaat van de klokcontrole van de BBF.

| Ingestelde tijd BBF-Klok | Aanwijzing van de Laboratorium-timer |
|-----------------------------|---|
| 0002 | 2 min 00,1 s |
| 0002 | 1 min 59,9 s |
| 0002 | 1 min 59,9 s |
| 0002 | 2 min 00,0 s |
| 0004 | 4 min 00,0 s |
| 0006 | 6 min 00,0 s |
| 0008 | 7 min 59,9 s |
| 0010 | 10 min 00,0 s |

Tabel 7: Parameters en hun bijdragende onzekerheid in de bepaling van de dosis in water.

| Parameter | Onzekerheden op 1σ [%] | |
|-------------------------------------|--|-----------------|
| | Type A s_i (ν_i) | Type B u_j |
| Standaarddosimetrie | - | 0,6 |
| Herhaalbaarheid | - | 3,0 |
| (1-g) | - | 0,1 |
| $S_{w,pmma}$ | 0,3 | 3,0 |
| $(\mu_{en}/\rho)_{pmma,air}$ | 1,0 | 0,3 |
| Lineieke verzwakking (μ) | - | 0,3 |
| Bepaling gemiddelde dosis | 5,5 | - |
| Kwadratische Sommatie (1σ) | 5,6% | 4,3% |
| Totale onzekerheid (1σ) | $\sqrt{\sum s_i^2 + \sum u_j^2} = 7,1\%$ | |

Bijlage 1: Instelparameters van de ALNOR Dosacus TLD-Reader.

Operational Parameters F1

Position : 1 and 2
Material : A
Sensitivity : 1.0
Background : 0
Heating Time : 20.0 s
Preheat Time : 4.0 s
Postheat Time : 0 s
Second Reading : Yes

Measurement Parameters F2

Stability : 37000 counts
Background val. : 0 counts
HV (PM-tube) : 1050 volt
PM temp : 22 °C
PM tolerance : 5 °C
Preheating Pos. : 0 mm
F₂ Temperature : 250 °C (flow 5.5)
Scaling Factor : 1.0
Albedo Factor : 1.0
Dose Calculation: 1.0 / 1.0 / 6
Cassette Out : default

Bijlage 2: Instelparameters van de Vinten annealoven.

Instelling

- Klok 1: 02.2
- Klok 2: 00.0
- Temperature 1: preset 2 (400 °C)
- Temperature 2: off
- Alarm : off

Bijlage 3: De verantwoording van het aangehouden formalisme voor de bepaling van de dosis in water met gebruik van TLD.

De geabsorbeerde dosis in water D_w , is berekend volgens vergelijking (1).

$$D_w = M_{w,tld} \cdot N_{K,tld} \cdot C_{w,tld} \quad [\text{Gy}] \quad (1)$$

waarin: $M_{w,tld}$ - het meetsignaal van de TLD in water, [cts]

$N_{K,tld}$ - de luchtkerma-kalibratiefactor van de TLD, [$\text{Gy} \cdot \text{cts}^{-1}$]

$C_{w,tld}$ - de factor voor de conversie van de luchtkerma naar de dosis in water, bij gebruik van TLD.

De luchtkerma-kalibratiefactor N_K van de TLD is berekend volgens vergelijking (2).

$$N_{K,tld} = \dot{K}_{\text{air,ref}} \cdot M_{tld}^{-1} \cdot dt \quad [\text{Gy} \cdot \text{cts}^{-1}] \quad (2)$$

waarin: $\dot{K}_{\text{air,ref}}$ - het referentie-luchtkermatempo herleid naar de kalibratiecondities, [$\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$]

M_{tld} - de meetwaarde van de TLD, [cts]

dt - de bestralingstijd, [s]

De factor $C_{w,tld}$, voor de conversie van de luchtkerma naar de dosis in water bij gebruik van TLD, is berekend volgens vergelijking (3).

$$C_{w,tld} = (1-g) \cdot \Pi k_i \cdot S_{w,\text{air}} \cdot \Pi p_i \quad (3)$$

waarin: $(1-g)$ - correctie voor de remstraling van ^{137}Cs -gammastraling,

Πk_i - het product van een aantal correctiefactoren tijdens de kalibratie van de TLD's,

$S_{w,air}$ - de stopping-power verhouding voor water en lucht in de ^{137}Cs -bundel van de BBF,

Πp_i - het product van een aantal correctiefactoren tijdens de bestraling van de TLD's in de BBF.

Het product van de correctiefactoren Πk_i tijdens de kalibratie van de TLD's in de ^{137}Cs -referentieopstelling is berekend volgens vergelijking (4) en (5). Bij gebruik van TLD is α gelijk aan 0 omdat er geen detectorwand aanwezig is. Hierdoor wordt de eerste term van formule (8) uit NCS Report 2 (1986) gelijk aan 0.

$$\Pi k_i = k_{att} \cdot k_m \quad (4)$$

$$\approx e^{-(\mu \cdot d)} \cdot [(1-\alpha) \cdot S_{\text{pmma,air}} \cdot (\mu_{en}/\rho)_{\text{air,pmma}}]^{-1} \quad (5)$$

Waarin: k_{att} - de correctie voor de verzwakking (absorptie en verstrooiing) van ^{137}Cs -gammastraling in het buildup materiaal (pmma),

k_m - de correctie voor het verschil in materiaalsamenstelling van de buildup (pmma) en lucht (air),

μ - de lineieke verzwakking in pmma per mm

d - de dikte van de buildup in mm,

$S_{\text{pmma,air}}$ - de stopping-power verhouding van pmma en lucht

$(\mu_{en}/\rho)_{\text{air,pmma}}$ - de massieke energieabsorptiecoëfficiënten van lucht (air) en perspex (pmma).

Het produkt van de correctiefactoren Π_i tijdens de bestraling van de TLD's in water in de BBF is berekend conform formule (9) en (10) uit NCS Report 2 (1986). Bij gebruik van TLD is α gelijk aan 0, waardoor de term Π_i gelijk wordt aan 1.

Vergelijking (1) kan nu herschreven worden als vergelijking (6).

$$D_w = M_{w,tld} \cdot N_{K,tld} \cdot (1-g) \cdot e^{-(\mu \cdot d)} \cdot S_{w,pmma} \cdot (\mu_{en}/\rho)_{pmma,air} \text{ [Gy]} \quad (6)$$

Bijlage 4: Gebruikte fysische parameters en constanten.

STP = 295,15 K en 101,325 kPa

| Fysische parameters en constanten | Numerieke waarde |
|--|---|
| $\rho(\text{lucht})$ STP | 1,196 56 kg.m ⁻³ |
| $\rho(\text{water})$ STP | 998,22 kg.m ⁻³ |
| $\rho(\text{pmma})$ | 1190 kg.m ⁻³ |
| E_{γ} (¹³⁷ Cs) | 661,62 keV |
| $E_{e,\text{max}}$ (¹³⁷ Cs) | 478 keV |
| $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{water}}$ (¹³⁷ Cs) | 3,264.10 ⁻³ m ² .kg ⁻¹ |
| $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{lucht}}$ (¹³⁷ Cs) | 2,935.10 ⁻³ m ² .kg ⁻¹ |
| $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{pmma}}$ (¹³⁷ Cs) | 3,172.10 ⁻³ m ² .kg ⁻¹ |
| $(\mu/\rho)_{\text{pmma}}$ (¹³⁷ Cs) | 8,333.10 ⁻³ m ² .kg ⁻¹ |
| $S_{w,\text{air}}$ | 1,130 |
| $S_{\text{pmma},\text{air}}$ | 1,100 |
| $S_{w,\text{pmma}}$ | 1,028 |
| Remstralingsfractie, g (¹³⁷ Cs) | 0,001 |
| Desintegratieconstante, λ (¹³⁷ Cs) | 7,2206.10 ⁻¹⁰ s ⁻¹ |