

Rapport nr. 243505001

**Bepaling van de geabsorbeerde dosis en
dosisverdeling in water voor
laag- en medium-energetische fotonen**

J.H.Bultman mei 1990

RIJKSINSTITUUT VOOR VOLKSGEZONDHEID EN MILIEUHYGIENE
BILTHOVEN

Rapport nr. 243505001

Bepaling van de geabsorbeerde dosis en
dosisverdeling in water voor
laag- en medium-energetische fotonen

J.H.Bultman mei 1990

Dit onderzoek is verricht in opdracht van het Ministerie van Welzijn,
Volksgezondheid en Cultuur

VERZENDLIJST

1	Ministerie van WVC
2	Directeur-Generaal van de Volksgezondheid
3	Dr. B.J. Mijnheer
4	Dr. Ir. H. Meertens
5	Ir. J.L.M. Venselaar
6	Dr. A.G. Visser
7	Dr. B. Thierens
8	Dr. J. Seuntjes
9	Ir. F.W. Wittkämper
10	Depot van Nederlandse publicaties en Nederlandse bibliografie
11	Directie RIVM
12	Dr. J.E.T. Moen
13	Drs. A.H.L. Aalbers
14	Laboratorium voor Stralingsonderzoek
15	Informatie- en Documentatie centrum
16	Auteur
17-18	Bibliotheek RIVM
19	Projecten en rapporten registratie
20-25	Reserve exemplaren

INHOUDSOPGAVE

	blz.
Verzendlijst	ii
Inhoudsopgave	iii
Abstract	iv
Samenvatting	1
1. Inleiding	2
2. Methoden om de geabsorbeerde dosis in water te bepalen	3
2.1 Methode bij hoog-energetische fotonen	3
2.2 Bepaling van de intreedosis en de dosis op diepte door in lucht meting	5
2.3 Meting van de geabsorbeerde dosis op diepte d in water	7
2.3.1 Ionometrische bepaling	7
2.3.2 Calorimetrische bepaling	10
2.4 Vergelijking van de methoden	11
3. Onderzoeksvelden	12
3.1 Doelstellingen en randvoorwaarden voor verder onderzoek	12
3.2 Energieresponsie van ionisatiekamers	13
3.3 Verstoring van het stralingsveld door de ionisatiekamer	15
3.4 Invloed van de steel	17
3.5 Vergelijking van de methode in lucht en in water	18
4. Conclusie	19
Literatuurlijst	20
Bijlage Afleiding van k_m en P_{wall}	24

ABSTRACT

The methods to determine the absorbed dose to water for low and medium energy photons were studied. Large differences between the results of these methods exists. So, a research proposition has been made to explain these differences. The goal of this research will be the development of a method to determine the absorbed dose below approximately 400 keV with an ionisation chamber calibrated at ^{60}Co gamma radiation.

To explain the differences between the set of methods, some causes were proposed, like the influence of the ionisation chamber on the measurement in water. Also, some methods to determine the factors are proposed.

SAMENVATTING

In deze studie zijn de methoden om de geabsorbeerde dosis in water voor laag en medium-energetische fotonen te bepalen geïnventariseerd. Gebleken is dat duidelijke verschillen bestaan in de resultaten van de verschillende methoden. Daarom is een onderzoekspad uitgezet waarlangs de oplossing van de problemen zich kan begeven. Doel van dit onderzoek is om een methode te ontwikkelen waardoor een ionisatiekamer die bij ^{60}Co gamma straling gecalibreerd is gebruikt kan worden voor fotonen met een energie beneden circa 400 keV. Om de verschillen tussen de methoden te verklaren worden een aantal oorzaken gegeven, zoals invloed van de ionisatiekamer op het meetsignaal in water. Ook worden methoden voorgesteld om deze factoren te bepalen.

1 INLEIDING

Doel van deze studie is het maken van een overzicht van de methoden en de bijbehorende problemen om de geabsorbeerde dosis in een waterfantom te bepalen. Dit is gedaan voor laag en medium energetische fotonstraling met een energie beneden 400 keV. Deze fotonstraling wordt toegepast bij orthovolttherapie, brachytherapie en medische röntgendiagnostiek. Allereerst zijn de gebruikelijke methoden bestudeerd door het uitvoeren van een literatuurstudie. In dit rapport worden op grond van dit literatuuronderzoek een aantal uitbreidingen geformuleerd op de nu bekende formalismen om de dosis te bepalen met ionisatiekamers. Tevens worden voorstellen gedaan om dit aangepaste formalisme te onderzoeken.

2 METHODEN OM DE GEABSORBEERDE DOSIS IN WATER TE BEPALEN

Uitgegaan is van het gebruik van een vrij in lucht gecalibreerde ionisatiekamer met calibratiefactor N_K bepaald bij ^{60}Co gamma straling of bij een röntgenkwaliteit. Deze kamer wordt gebruikt om de gebruikers "bundel" te calibreren. (Voor brachytherapie is sprake van een bron i.p.v. een bundel, het principe is verder hetzelfde).

2.1 Methode bij hoog-energetische fotonen

De geabsorbeerde dosis $D(d)$ in water op de positie van de ionisatiekamer als de ionisatiekamer vervangen is door water wordt volgens het NCS code of practice for high-energy photons (1) gegeven door:

$$D(d) = M N_K (1-g) \Pi k_i \left(\frac{L/\rho}{\text{lucht}} \right)^{\text{water}} \Pi p_i \quad 1$$

met

- M is de afleeswaarde van het instrument bij standaardtemperatuur en -druk en gecorrigeerd voor polariteit, luchtvochtigheid en recombinatie verliezen
- N_K is de luchtkerna calibratiefactor bepaald bij ^{60}Co . Deze is bepaald door de ionisatiekamer te plaatsen in een stralingsveld van een ^{60}Co bron waarvan het luchtkernatempo in lucht exact bekend is.
- g is de fraktie van de energie van de secundaire geladen deeltjes die omgezet wordt in remstraling in lucht bij de calibratie-kwaliteit ($g=0,003$ voor ^{60}Co straling)
- Πk_i is het produkt van een aantal korrektiefactoren die toegepast moeten worden op de luchtkerna calibratiefactor
- $\left(\frac{L/\rho}{\text{lucht}} \right)^{\text{water}}$ is de verhouding van de restricted collision stoppingpower verhouding van water en lucht bij de gebruikers-kwaliteit
- Πp_i is het product van een aantal korrektiefactoren toe te passen op de metingen in water bij de gebruikers-stralingskwaliteit

De korrektiefactoren k_i zijn:

k_{att} korrekte voor absorptie en verstrooing in de wand en de build-up cap van de ionisatiekamer. Door deze korrekte wordt de wand en de build-up cap die het luchtkermatempo van het veld verstoren in rekening gebracht.

k_m is de korrekte voor verschil in samenstelling tussen wand, build-up cap en lucht gegeven door:

$$k_m = [\alpha (L/\rho)_{lucht}^{wand} (\mu_{en}/\rho)_{wand}^{lucht} + (1-\alpha) (L/\rho)_{lucht}^{cap} (\mu_{en}/\rho)_{cap}^{lucht}]^{-1}$$

met α is de fraktie van de ionisatie in de kamer ten gevolge van elektronen ontstaan in de wand

$(\mu_{en}/\rho)_{wand}^{lucht}$ en $(\mu_{en}/\rho)_{cap}^{lucht}$ zijn de verhoudingen van de massieke energie-absorptie coëfficiënten van lucht en wandmateriaal en van lucht en build-up cap materiaal

$(L/\rho)_{lucht}^{wand}$ en $(L/\rho)_{lucht}^{cap}$ zijn de verhoudingen van de massieke stoppingpowers van wandmateriaal en lucht en van build-up cap materiaal en lucht

k_{st} is een korrekte voor het steel effect voor de gebruikte veldgrootte

k_{ce} is een korrekte voor het effect van de centrale electrode op de responsie van de kamer tijdens de calibratie

Het produkt van de factoren p_i bestaat uit:

p_{wall} korrekte voor het verschil in samenstelling tussen de ionisatiekamerwand en water en is gegeven door:

$$p_{wall} = \alpha (L/\rho)_{water}^{wand} (\mu_{en}/\rho)_{wand}^{water} + (1-\alpha)$$

p_d is de displacementkorrekte factor die de verplaatsing van het effectieve centrum van de ionisatiekamer in rekening brengt. Daarbij wordt het verschil in ionisatie tussen de diepte van het effectief meetpunt en de diepte waar de dosis gespecificeerd wordt in rekening gebracht. Deze factor is een funktie van de fotonenergie en de straal van de ionisatiekamer.

p_{ce} is de korrekte voor het effect van de centrale electrode op de responsie van de kamer gedurende de meting in het waterfantoom

De volgende factoren p_i worden in het NCS-protocol niet beschouwd:

P_{att} is de correctie voor het verschil in absorptie en verstrooiing in de wand opgebouwd uit wandmateriaal en uit water en is gegeven door $k_{att}(\text{water})/k_{att}(\text{wand})$

P_{st} is de correctie voor de invloed van de steel op de meting in water. De invloed is tweeledig: -verhoging van het meetsignaal door verstrooiing aan de steel ($p_{st,sc}$). -verlaging van het signaal door de hoekafhankelijkheid van de ionisatiekamer, waardoor fotonen die door verstrooiing uit de richting van de steel komen een lager ionisatiestroom teweeg brengen ($p_{st,hoek}$)

Voor p_{wall} en k_{\square} worden in de literatuur meerdere uitdrukkingen gebruikt. In bijlage 1 is een afleiding gegeven, en worden de verschillende factoren met elkaar vergeleken.

Bovenstaand formalisme berust op het feit dat de ionisatiekamer voor hoog-energetisch fotonen in een medium elektronen detecteert die zijn ontstaan in het medium. Een kleine correctie is nodig voor elektronen die vanuit de kamervand komen. Voor ^{60}Co straling is ook een ander formalisme mogelijk. Als namelijk bij de meting in water ook de build-up cap geplaatst wordt, dan worden door de kamer met build-up cap de fotonen gedetecteerd. De dosis in water wordt dan gegeven door

$$D(d) = M N_K (1-g) (\mu_{en}/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{water}} p'_d p_p \quad 2$$

met p'_d de displacementscorrectie voor de ionisatiekamer met build-up cap en p_p een correctie voor de verstoring van het stralingsveld door de kamer met build-up cap. Uit experimentele gegevens van Almond en collega's blijkt dat voor ^{60}Co gamma-straling p'_d ongeveer gelijk is aan de factor $p_d k_{att}$ (2).

2.2 Bepaling van de intreedomdosis en de dosis op diepte door in lucht meting

De bepaling van de dosis gebeurt in drie stappen:

1- Bepaling van het luchtkerma in lucht K_a van de bundel op een vastgestelde plaats volgens:

$$K_a = M N_K \Pi k_i \Pi k_i^u \quad 3$$

met Πk_i^u is het produkt van korrektiefactoren voor de meting in lucht bij de gebruikerskwaliteit. De volgende factoren zijn anders dan in 2.1:

k_{wall}^u korrektie voor het verschil in samenstelling tussen de ionisatiekamerwand en lucht en is gegeven door (bij verwijderen van de build-up-cap):

$$k_{wall}^u = \alpha \left(\frac{L}{\rho} \right)_{lucht}^{wand} \left(\mu_{en} / \rho \right)_{wand}^{lucht} + (1-\alpha)$$

k_d^u is de displacementkorrektie factor. Deze factor wordt gereduceerd tot een korrektie voor de verplaatsing ten gevolge van de dosisgradiënt. In lucht voor een redelijke afstand tussen kamer en bron is deze korrektie 1.

k_{ce}^u is de korrektie voor het effect van de centrale electrode op de responsie van de kamer voor de meting in lucht.

k_{att}^u is de korrektie voor het verschil in absorptie en verstrooiing in de wand opgebouwd uit wandmateriaal en uit lucht en is gegeven door $k_{att}^u(lucht)/k_{att}^u(wand)$

k_t^u is de korrektie voor de invloed van de steel op de meting in lucht.

Als de calibratie-kwaliteit dezelfde is als de gebruikerskwaliteit dan zullen de factoren k_i en k_i^u tegen elkaar wegvallen (behoudens de invloed van de build-up cap).

2 - Gebruik gemeten of berekende backscatter factor B (verhoging van het luchtkerma door achter het meetpunt een waterfantoom/mens te plaatsen) en bepaal het luchtkerma in water op een diepte d door het toepassen van een gemeten of berekende procentuele diepte dosiscurve PDD (d).

3- Voer conversie van luchtkerma naar geabsorbeerde dosis uit door de toepassing van de factor F gegeven door verhouding van de massieke energie-absorptiecoëfficiënten voor water en lucht gemiddeld over het foton-energiespectrum bij intreding van het waterfantoom

De geabsorbeerde dosis D(d) op diepte d is dan:

$$D(d) = K_a B PDD(d) F$$

waarbij de factor g verwaarloosd is, omdat deze erg klein is in het laag en medium energie gebied.

Voor brachytherapie wordt door de Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie (NCS) in rapport 4 deze werkwijze aanbevolen (3). Bij brachytherapie wordt de factor $B PDD(d) F$ vervangen door de correctie voor verzwakking en verstrooiing in water $S(d)$ die het verband geeft tussen het luchtkerma in lucht en in water op diepte d maal $F(d)$ de factor F bepaald voor het fotonenspectrum op diepte d .

Voor de backscatterfactor B wordt meestal een waarde gebruikt, die het gemiddelde is van een groot aantal experimentele gegevens zoals bijvoorbeeld gegeven zijn in referentie 5. Recent zijn door Klevenhagen experimenten, uitgevoerd, waarbij de nieuwe waarden berekend door Grosswendt met de Monte-Carlo methode ondersteund worden (4,5). Deze waarden verschillen tot 10% met waarden zoals gebruikt in het tot nu toe veel gehanteerde BJR Supplement 17 (6).

De procentuele diepte dosis curve kan bepaald worden met een ionisatiekamer. In protocollen zoals van het IAEA wordt daarom aanbevolen de PDD zelf te bepalen en gebruik te maken van literatuurgegevens voor de backscatter factor. Echter veel van de problemen die in de volgende paragrafen besproken worden zijn ook van belang voor deze relatieve metingen.

2.3 Meting van de geabsorbeerde dosis op diepte d in water

2.3.1 Ionometrische bepaling

Bij de bepaling van de geabsorbeerde dosis om een bepaalde diepte kunnen drie stappen onderscheiden worden:

- * bepaal het meetsignaal op diepte d
- * corrigeer voor de verstoring van het primaire en secundaire stralingsveld door het inbrengen van de ionisatiekamer met de factoren Πp_1
- * pas de omrekeningsfactor $F(d)$ toe

De geabsorbeerde dosis op diepte d in water is dan

$$D(d) = M N_K \Pi k_i F(d) \Pi p_i$$

waarbij g zoals gedefinieerd in formule 1 verwaarloosd is. De dosis op een willekeurige andere diepte x volgt voor beide methoden uit toepassing van de relatieve diepte dosis curve $RDD(x) = PDD(x)/PDD(d)$.

Voor de factoren $F(d)$, Πk_i en Πp_i worden op dit moment een aantal formalismen gebruikt:

1 ICRU-formalisme (7)

Door het ICRU wordt gesteld dat de dosis in water bepaald kan worden volgens

$$D(d) = M N_K^{OV} F(d) \qquad 6$$

met N_K^{OV} de luchtkerma-calibratiefactor voor de betreffende orthovolt-kwaliteit en $F(d) = (\mu_{en}(\bar{E})/\rho)_{air}^{water}$ met \bar{E} is de gemiddelde fotonenergie van het fotonenspectrum op diepte d in water. Verder wordt aangenomen dat de verstoring van de dosis door de ionisatiekamer kleiner is dan 1%, als de afmetingen van de ionisatiekamer beperkt zijn. Dit formalisme houdt in dat met zo'n ionisatiekamer in water direkt het luchtkerma in water bepaald kan worden. Een eenvoudige factor is nodig om de geabsorbeerde dosis in water te berekenen.

2 IAEA-formalisme (8)

Door het IAEA wordt eenzelfde formalisme gehanteerd. Hierbij zijn de waarden van de gemiddelde massieke energie-absorptiecoëfficiënten aangepast. Deze zijn bepaald door de verhouding over het fotonenspectrum te middelen. Recentelijk hebben Seuntjes en kollega's met de resultaten van Monte-Carlo berekeningen de nieuwe waarden ondersteund (9). Een correctie voor de verstoring van het stralingsveld door de ionisatiekamer is ingevoerd, de zogenaamde perturbatiecorrectie p_u . Op basis van referentie 10 zijn perturbaties van de meting in water tot 9% ingevoerd. Een extra correctie k_u die de invloed op de meting in water door de verandering van de stralingskwaliteit geeft, waardoor bijvoorbeeld de calibratiefactor van de kamer moet worden aangepast, wordt ingevoerd.

Dit formalisme geeft aan dat de ionisatiekamer het luchtkerma in water bepaalt behoudens een correctie voor de verstoring van het kerma door de ionisatiekamer zelf.

3 Mijnheer/Chin -formalisme (11)

Om de dosis uitgaande van een ^{60}Co calibratie te bepalen is door Mijnheer en Chin het volgende formalisme opgesteld (op basis van het formalisme voor hoog-energetische fotonen):

$$D(d) = M N_K \prod k_i (L/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{wand}} (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{wand}}^{\text{water}} P_{\text{repl}} \quad 7$$

met $(L/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{wand}}$ is de verhouding van de gemiddelde restricted collision stoppingpower voor wand en lucht en P_{repl} is de replacement korrektiefactor, die de invloed weergeeft van de vervanging van water door kamermateriaal en de luchtholte. In deze vergelijking wordt verondersteld dat de energie-afhankelijkheid van de ionisatiekamer volledig wordt beschreven door $(L/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{wand}}$ en $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{wand}}^{\text{water}}$. Verder wordt verondersteld dat alle ionen worden vrijgemaakt door elektronen ontstaan in de kamerwand. In dit formalisme worden de eigenschappen van de ionisatiekamer meegenomen. Duidelijk verschil met de twee vorige formalismen is dat elektronenprocessen invloed op de metingen wordt toegedacht.

4 Uitgebreide formalisme op basis van het formalisme voor hoog-energetische fotonen

In dit rapport wordt op basis van de gedachte van Mijnheer en Chin een vollediger formalisme voorgesteld. De geabsorbeerde dosis in water wordt gegeven door

$$D(d) = M N_K \prod k_i \prod p_i [\alpha_{\text{wand}} (L/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{wand}} (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{wand}}^{\text{water}} + \alpha_{\text{cav}} (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{water}} + \alpha_{\text{water}} (L/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{water}}] / (\alpha_{\text{water}} + \alpha_{\text{wand}} + \alpha_{\text{cav}}) \quad 8$$

met α_{wand} het aantal ionen ontstaan door elektronen vrijgemaakt in de wand, α_{cav} het aantal ionen dat is vrijgemaakt door elektronen ontstaan in de luchtholte en α_{water} het aantal ionen vrijgemaakt door elektronen afkomstig uit het water rond de ionisatiekamer. Voor laag- en medium-energetische fotonen is de wanddikte van de ionisatiekamer zo groot dat elektronen van buiten de kamer niet door de wand dringen zodat α_{wand} op nul gesteld mag worden. De korrektiefactoren $\prod p_i$ bestaan uit p_d , de correctie voor displacement, P_{repl} , de correctie voor vervanging van water door lucht

terplaatse van de luchtholte, p_{ce} (centrale elektrode), p_{att} en p_{st} . Deze vergelijking kan dan geschreven worden in de vorm zoals door het IAEA en de ICRU wordt gebruikt volgens

$$D(d) = M N_K \prod k_i \prod p_i K (\mu_{en}/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{water}} \quad 9$$

met $K = \alpha (L/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{wand}} (\mu_{en}/\rho)_{\text{wand}}^{\text{lucht}} + (1-\alpha)$ en $\alpha = \alpha_{\text{wand}} / (\alpha_{\text{wand}} + \alpha_{\text{cav}})$.

In feite wordt in het uitgebreide formalisme behalve een aantal extra korrektiefactoren ook een correctie voor de bijdrage aan het meetsignaal vanuit de luchtholte in rekening gebracht.

Als de eerste twee formalismen vergeleken worden met de laatste twee dan valt de rol van de verzwakking in de wand op. Als bij de gebruikte kwaliteit in lucht gecalibreerd wordt en vervolgens de kamer in water gebruikt wordt, is de rol van de kamerwand veranderd. In lucht wordt de invloed van de kamerwand beschreven door k_{att}^u . In water is die invloed gegeven door p_{att} , die vaak op 1 gesteld wordt. Dit leidt tot de conclusie dat in de eerste twee formalismen wordt de kamerwand niet juist in rekening wordt gebracht. Bij het IAEA-formalisme is het mogelijk dat een en ander wordt verrekend in de algemene korrektiefactor p_u . Verduidelijkend werkt dit echter niet.

2.3.2 Calorimetrische bepaling

Om de problemen met de invloed van de ionisatiekamer op de meting te vermijden wordt gedacht aan een methode om direct de geabsorbeerde energie in water te bepalen. Daarom is de watercalorimeter ontwikkeld. De geabsorbeerde energie wordt bepaald door de temperatuurstijging ten gevolge van de bestraling te meten. Deze stijging wordt gemeten met thermistors. Domen heeft bepaald dat een nauwkeurigheid van 1% haalbaar is (12). Een belangrijk probleem bij deze methode is het warmte-effect van exotherme reacties in het water. Voorlopig worden deze op (3,5 +/- 1,5)% geschat.

2.4 Vergelijking van de methoden

Uit experimenten van Kubo en Mattson blijkt een verhouding van 1,04 tot 1,07 tussen watercalorimetrie en ionometrie (gebruikmakend van de verhouding van de massieke energie-absorptiecoëfficiënten van de IAEA) (13,14). Seuntjes en kollega's vonden een verhouding van 1,10 (15). Na toepassing van de correctie voor het warmte-effect bij de calorimeter (exotherme reacties geven een overschatting van de temperatuur dus van de geabsorbeerde energie) wordt een verhouding van 1,02 tot 1,06 gevonden (16). Tussen het ICRU en het IAEA formalismen bestaan verschillen tot 12% voor één type kamer (11). Bij metingen met verschillende ionisatiekamers volgens het ICRU formalisme worden verschillen tot 7,5% gevonden. Voor ionisatiekamers die niet aan de maximale afmetingen gesteld door het ICRU voldeden zijn verschillen oplopend tot 40% gevonden (11).

In de literatuur zijn geen gegevens bekend over de vergelijking van de directe meting van de geabsorbeerde dosis in water en de bepaling van de dosis door het bepalen van de intree-dosis voor fotonenergieën beneden 1 MeV. Over het algemeen wordt aangenomen dat voor laag-energetische fotonen de onzekerheid in de factoren p_i zo is toegenomen dat de methode door bepaling van de intree-dosis preveleert.

Voor brachytherapie zijn gegevens bekend over de vergelijking van metingen in lucht en in water (17,18). Voor ^{192}Ir is binnen 1% overeenkomst gevonden.

3 ONDERZOEKSVELDEN

3.1 Doelstellingen en randvoorwaarden voor verder onderzoek

In de voorgaande hoofdstukken zijn de problemen bij de dosisbepaling bij laag- en medium energetische fotonen uiteengezet. In dit hoofdstuk wordt besproken hoe deze problemen onderzocht kunnen worden om tot een oplossing te komen. In feite gaat het daarbij om drie methoden: calorimetrisch, ionometrisch in lucht en ionometrisch in water. In dit rapport zal verder niet in gegaan worden op de calorimetrische methode omdat hiervoor de expertise op het RIVM ontbreekt. Wel is verder onderzoek naar deze methode nodig, ondermeer om het warmte-effect beter te bepalen. Gestreefd wordt om dit in samenwerking op te lossen. De vergelijking van de twee ionometrische methoden behelst het rekenkundig en het meetkundig bepalen van de dosis op diepte. De backscatter factoren berekend door Grosswendt en kollega's lijken voldoende betrouwbaar. Het berekenen van diepte-dosiskurven omvat geen ingewikkelder rekenkundige problemen zodat goede hoop bestaat dat dit ook mogelijk is. Dan bestaan alleen nog problemen bij de experimentele methode. De vraag is of deze opgelost moeten worden als het mogelijk is om de dosis te berekenen. Metingen zijn echter de basis waarop in de praktijk de dosis bepaald wordt, omdat dan bundelparameters niet volledig bekend zijn, verschillen in de geometrie kunnen optreden, etc. Dus de berekeningen dienen alleen om eenmalig de meetkundige methode te testen.

Het meten van de dosis op diepte kan op grond van een aantal formalismen. Als uitgangspunt voor het onderzoek wordt uitgegaan van het formalisme op basis van een calibratie bij ^{60}Co gamma-straling. Als eerste moet daarom een formalisme opgesteld worden waarmee de energie-afhankelijkheid van ionisatiekamers in lucht verklaard kan worden, zodat zekerheid bestaat dat het formalisme voor lagere foton-energieën werkt. Vervolgens moeten de correctiefactoren die nodig zijn voor de in water meting bepaald worden. Dit is onafhankelijk van welk formalisme gekozen wordt. Uiteindelijk moeten de berekeningen kloppen met de metingen van de dosis in water. Dit onderzoek moet uitgevoerd worden aan een beperkt aantal typen ionisatiekamers. Vooral de ionisatiekamers die in de praktijk gebruikt worden, zoals de NE 2561 en de NE 2571 zijn belangrijk.

3.2 Energieresponsie van ionisatiekamers

Uitgaande van een calibratie bij ^{60}Co gamma-straling, zal in het formalisme om de geabsorbeerde dosis te bepalen, de energie-afhankelijkheid van de ionisatiekamer in rekening gebracht moeten worden.

Uitgaande van het Nijrheer en Chin formalisme, is de energie-afhankelijkheid in lucht $R(E)$ gegeven door

$$R(E) = \Pi k_i p_{\text{repl}} (\mu_{\text{en}}(E)/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{lucht}} (\mu_{\text{en}}(E)/\rho)_{\text{wand}}^{\text{wand}} \quad 9$$

In lucht kan p_{repl} beschouwd worden als een set van korrektiefactoren, gelijkwaardig aan k_i voor ^{60}Co .

Volgens het uitgebreide formalisme kan de energie-afhankelijkheid beschreven worden door

$$R(E) = \Pi k_i \Pi k_i^u(E) K(E) \quad 10$$

met $K(E) = (1 - \alpha_{\text{cav}}(E)) (\mu_{\text{en}}(E)/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{lucht}} (\mu_{\text{en}}(E)/\rho)_{\text{wand}}^{\text{wand}} + \alpha_{\text{cav}}(E)$ en $\Pi k_i^u(E)$ de korrektiefactoren bij energie E in lucht.

In bovenstaande vergelijkingen is uitgegaan van een kamer gemaakt van één materiaal. Een aantal veel gebruikte ionisatiekamers heeft echter een wand gemaakt van grafiet en een centrale electrode gemaakt van aluminium. Hiervoor kan gecorrigeerd worden volgens

$$k_{\text{ce}}(E) = \alpha_{\text{wand}} / (\alpha_{\text{wand}} + \alpha_{\text{ce}}) R_{\text{wand}}(E) + \alpha_{\text{ce}} / (\alpha_{\text{wand}} + \alpha_{\text{ce}}) R_{\text{ce}}(E) \quad 11$$

waarbij R_{wand} de responsie in lucht is van de ionisatiekamer volledig gemaakt van het wandmateriaal en R_{ce} de responsie in lucht is van de ionisatiekamer volledig gemaakt van centrale-elektrode materiaal. In eerste benadering kan voor de verhouding van $\alpha_{\text{wand}}/\alpha_{\text{ce}}$ de verhouding van de oppervlakte van de wand (aan de zijde van de luchtholte) en de oppervlakte van de centrale elektrode genomen worden. Daarbij wordt aangenomen dat de verhouding van deze twee factoren onafhankelijk is van de fotonenergie.

De verklaring van de responsie van ionisatiekamers wordt bemoeilijkt door de grootte van de factoren α . Daarom wordt voorgesteld om drie typen kamers te onderzoeken:

1- ionisatiekamers gemaakt van lucht-equivalent C552 plastic (ontwikkeld door Shonka). Voor dit type geldt dat binnen circa 0,1% de stopping power en de energie-absorptiecoëfficiënt over een groot energiegebied met de coëfficiënten van lucht overeenkomen. De energiereponsie volgens het Mijnheer en Chin formalisme en volgens het uitgebreide formalisme wordt gegeven door:

$$R(E) = k_{att} k_{st} k_{att}^u k_{st}^u \quad 12$$

2- ionisatiekamers gemaakt van een materiaal waarvan de stoppingpower en de energie-absorptiecoëfficiënt duidelijk van lucht verschillen. Voorgesteld wordt een ionisatiekamer gemaakt van grafiet.

3- ionisatiekamers waarvan de eigenschappen van de centrale elektrode en de kamerwand van elkaar verschillen. Voorgesteld worden ionisatiekamers met een wand gemaakt van grafiet en een centrale elektrode gemaakt van aluminium.

Uit de type 1 kamers kan de methode om de verzwakking in de wand en de steelcorrectie te bepalen getest worden. Met de type 2 kamer kan de methode om α_{cav} te bepalen gecontroleerd en eventueel aangepast worden. En met het laatste type kan de correctie voor de invloed van de centrale elektrode bepaald worden.

De correctie voor verzwakking in de wand kan berekend worden met behulp van de monte-carlo methode, door de verhouding van het luchtkerma in lucht in aanwezigheid en in afwezigheid van het kamermateriaal te bepalen.

De steelcorrectie wordt doorgaans bepaald door de signaalverhouding van de meting met en zonder dummysteel te bepalen. Deze dummysteel wordt aan de tegenoverliggende zijde van de echte steel geplaatst.

3.3 Verstoring van het stralingsveld door de ionisatiekamer

Over het algemeen wordt de verstoring van de meting in water met een ionisatiekamer in de literatuur beschreven door drie termen:

- 1- Replacement: Door het plaatsen van de kamer wordt water vervangen door lucht en kamermateriaal. Hierdoor ontstaat een ander verzwakkingspatroon ten opzichte van de situatie zonder ionisatiekamer in het water
- 2- Displacement: Doordat in het meetvolume van de ionisatiekamer de elektronenproduktie niet konstant is en/of geen isotrope hoekverdeling heeft kan de plaats waar gemiddeld de elektronen worden geproduceerd verschillen van het geometrisch centrum van de ionisatiekamer. Het meetpunt van de ionisatiekamer is dan verschoven ten opzichte van dit centrum.
- 3- Perturbatie: De vervanging van water door lucht en kamermateriaal heeft niet alleen een directe verandering van de geabsorbeerde dosis in water terplaatse van de kamer tot gevolg maar ook een indirecte verandering. Door de verstoring van het verzwakkingspatroon door het inbrengen van de kamer wordt de dosis buiten de kamer beïnvloed. De straling die vanuit dit gebied opnieuw de kamer intreedt veroorzaakt een veranderde energie-afgifte. Dit effect is dus een tweede en hogere orde effect.

Het produkt van deze factoren is de verstoring. Dit onderzoek heeft tot doel deze factor te bepalen. Om de werking van de korrektiefactoren te verduidelijken worden de volgende gevallen beschouwd (voor het gemak wordt uitgegaan van een calibratie bij de kwaliteit OV):

- 1 Stel de kamerwand is gemaakt van water. Wat is nu de invloed van variatie van de wanddikte:

De reading M in water is onafhankelijk van de dikte x van de wand, zo ook de steelkorrekties en de kwaliteitskorrektie. Er moet dus gelden:

$$N_k^{OV}(r) k_{att}(r) P_{att}(r) P_p(r) P_g(r) P_{repl}(r) = \text{konstant}$$

waarbij $p_p(r)$ de perturbatie factor en p_g de displacement factor is. De calibratiefactor verandert doordat de verstrooiing en absorptie in de wand gegeven door k_{att} afhankelijk is van de wanddikte. De correctie p_{att} brengt het verschil in effectieve verzwakking tussen wand en water in rekening en is dus één. De perturbatie van het veld wordt alleen beïnvloed door de grootte van de luchtholte, net als de overgebleven factoren. Het probleem wordt volledig beschreven door k_{att} .

- 2 Stel de wand is gemaakt van lucht. Wat is nu de invloed van variatie van de wanddikte:

De calibratiefactor en $k_{att}(r)$ zijn konstant ($k_{att}(r) = 1$). De factor $p_{att}(r)$ is gelijk aan $k_{att}(\text{water}, r) / k_{att}(\text{lucht}, r) = k_{att}(\text{water}, r)$. De factor $p_{repl}(r)$ is onafhankelijk van r en is in feite een uitbreiding van $p_{att}(r)$ over het luchtvolume met straal R . Dus $p_{att}(r) p_{repl}$ wordt gegeven door $k_{att}(\text{water}, R+r)$. De middelingscorrectie is opnieuw onafhankelijk van de wanddikte uitgaande van de situatie met voldoende build-up in de kamerwand. De factor p_p wordt wel beïnvloed door de wanddikte. De verstoring als functie van de wanddikte wordt dan volledig beschreven door

$$k_{att}^{-1}(\text{water}, R+r) p_p(r) = \text{konstant}$$

- 3 Stel dat de wand gemaakt is van materiaal m , verschillend van lucht en water. Wat is nu de invloed van variatie van de wanddikte:

De calibratiefactor $N_k^{OV}(r)$ varieert volgens $k_{att}(\text{wand}, r)$. De factor p_{repl} wordt gegeven door $k_{att}(\text{water}, R)$ en $p_{att}(r) = k_{att}(\text{water}, r) / k_{att}(\text{wand}, r)$. De perturbatiefactor p_p is opgebouwd uit een factor die de verstoring door de trilholte beschrijft en de factor die de verstoring door de kamerwand geeft. De middelingsfactor is onafhankelijk van de dikte van de kamerwand.

De conclusies die uit deze voorbeelden volgen zijn:

- de factoren k_{att} , p_{att} en p_{repl} kunnen weergegeven worden door $k_{att}(\text{water}, R+r)$ die onafhankelijk is van het materiaal waarvan de wand gemaakt is.
- de factor $p_g(R)$ is onafhankelijk van de wanddikte bij voldoende build-up
- de perturbatiefactor p_p is afhankelijk van de grootte van de luchtholte, het materiaal en de dikte van de wand.

Om de invloed van de grootte van de ionisatiekamer te bepalen kan gewerkt worden met perturbatie-kamers. Dit zijn ionisatiekamers die dezelfde opbouw hebben met verschillend volume. Voorgesteld wordt om met zulke kamers de energie-afhankelijkheid en de "diepte in water"-afhankelijkheid van de combinatie van de perturbatie en de displacement correctie te bepalen. De displacement correctie kan op een onafhankelijke wijze worden uitgerekend met behulp van de methode van Kondo en Randolph (19,20). De factor $k_{att}(\text{water}, R+r)$ kan berekend worden met behulp van de Monte-Carlo techniek.

3.4 Invloed van de steel

In 2.1 is de invloed van de steel op de geabsorbeerde dosis in water meting besproken. Deze factor kan vrij eenvoudig bepaald worden door het plaatsen van een dummysteel met dezelfde eigenschappen als de echte steel. De verhouding van het signaal met en zonder dummysteel is de steelcorrectie.

Geopperd wordt dat de hoekafhankelijkheid van de ionisatiekamer van belang kan zijn voor de meting in water. Voorlopig wordt verondersteld dat de steel die hoekafhankelijkheid bepaalt. Om deze veronderstelling te onderbouwen lijkt berekening van de invloed van de hoekafhankelijkheid van belang. Uit eerste berekeningen uitgevoerd door Seuntjes blijkt een verlaging van het signaal door de steel van 5-7% voor een NE 2571 ionisatiekamer. Uit eerste metingen van het steel effect blijkt een verlaging van het meetsignaal door het plaatsen van een dummysteel van circa 3% in water voor een NE 2561 kamer.

3.5 Vergelijking van de methode in lucht en in water

De recent berekende en gemeten backscatter factoren lijken goed overeen te komen. Hetzelfde zou ook kunnen gelden voor de diepte-dosiscurven. De nog uit te rekenen curven kunnen gebruikt worden voor de dosisbepaling volgens de methode met behulp van de bepaling van de intreedosis. Deze berekende dosis zou overeen moeten komen met de geabsorbeerde dosis bepaald door de meting in water met een ionisatiekamer. Op deze manier is het mogelijk om te bepalen of alle korrektiefactoren juist bepaald zijn. Daarbij lijkt een vergelijking van berekende en gemeten dieptedosis curven noodzakelijk. Dit geeft informatie over de diepte-afhankelijkheid van een aantal korrektiefactoren.

4 CONCLUSIE

In dit rapport zijn de methoden gebruikelijk om de geabsorbeerde dosis in water te bepalen uiteengezet. Uit een literatuurstudie is gebleken dat nog geen overeenkomst bestaat tussen de besproken methoden in het laag- en medium-energiegebied. Daarom wordt voorgesteld verder onderzoek te verrichten naar de invloed van het ionisatiekamer-volume, de hoekafhankelijkheid en de energieafhankelijkheid van een ionisatiekamer. De waarden van de correctiefactoren zullen worden gebruikt om de verschillende methoden te vergelijken en te komen tot een nieuwe 'code of practice'.

LITERATUUR

- 1 Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie
Code of practice for the dosimetry of high-energy photon beams
Bilthoven: NCS, 1986; NCS rapport 2

- 2 Almond PR, Mendez A, Behmond M
Ionization-chamber-dependent factors for calibration of megavoltage X-ray
and electron beam therapy machines
In: IAEA. Proceedings of National and International Standardization of
Radiation Dosimetry
Vienna IAEA, 1978; Vol II, IAEA-SM-220/20:271-89

- 3 Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie
Aanbevelingen voor dosimetrie en kwaliteitscontrole voor radioactieve
bronnen bij brachytherapie
Bilthoven: NCS, 1989; NCS rapport 4

- 4 Klevenhagen SC
Experimentally determined back scatter factors for X-rays generated at
voltages between 10 and 140 kV
Phys.Med.Biol. 1989;34:1871-82

- 5 Grosswendt B
Back scatter factors for X-rays generated at voltages between 10 and 100
kV
Phys.Med.Biol. 1984;29:579-91

- 6 BJR
Central axis depth dose data for use in radiotherapy
Br.J.Radiol. 1983; Suppl. 17

- 7 International Commission on Radiation and Measurements
Measurement of absorbed dose in a phantom irradiated by a single beam of X
or gamma rays
Bethesda, Maryland (USA) ICRU 1973, ICRU report 23
- 8 Andreo P, Cunningham JR, Hohlfield K, Thomsen H
Absorbed dose determination in Photon and Electron beams: An international
code of practice
Vienna IAEA 1987, IAEA Techn. reports series 277
- 9 Seuntjes J, Thierens H, Plaetsen van der A, Segaert O
Determination of absorbed dose to water with ionisation chambers
calibrated in free air for medium energy X-rays
Phys.Med.Biol. 1988;33:1171-85
- 10 Schneider U
Bestimmung des Wasser-Energiedosis in Wasserphantom mit frei in luft
kalibrierten Ionisationskammer
Braunschweig: Physikalisch Technische Bundesanstalt, 1986; Jahresbericht
1985
- 11 Mijnheer BJ, Chin LM
Dosimetry of orthovoltage beams
In: IAEA. Proceedings of Dosimetry in Radiotherapy
Vienna IAEA, 1988, IAEA-SM-298/78:128-40
- 12 Domen SR
An absorbed dose water calorimeter: Theory, design and performance
J.Res.NBS 1982;87:211-35
- 13 Kubo H
Water calorimetric determination of absorbed dose by 280 kV_p orthovoltage
X-rays
Radiother.Oncol. 1985;4:275-81

- 14 Mattson LO
Comparison of water calorimetry and ionization chamber dosimetry in 100 and 200 kV X-ray beams
Paris CCEMRI, 1985, Report CCEMRI (I)/85-15
- 15 Seuntjes J, Thierens H, Poffijn A, Segaert O
Watercalorimetry in medium energy X-ray beams
Proceedings of the workshop on water calorimetry
Ottawa, Canada 1989: 101-107
- 16 Rosser KE
Measurement of absorbed dose in water for medium X-ray energies using an ionization chamber calibrated in exposure
London, 1988, Report of the medical college of st. Bartholomew's Hospital
London E.C.I.
- 17 Ezzell G
Evaluation of calibration techniques for the MicroSelectron HDR
In: Mould RF, eds. Brachytherapy 2, proceedings Brachytherapy Working Conference 5th international Selectron Users' Meeting 1988
Leersum (Netherlands): Nucletron International b.v., 1989: 61-9
- 18 Jones CH, Bidmead AM
Calibration of the MicroSelectron HDR system
In: Mould RF, eds. Brachytherapy 2, proceedings Brachytherapy Working Conference 5th international Selectron Users' Meeting 1988
Leersum (Netherlands): Nucletron International b.v., 1989: 75-82
- 19 Kondo S, Randolph ML
Effect of finite size of ionization chambers on measurements of small photon sources
Rad. Res. 1960;13:37-60

- 20 Bielajew AF
An analytic theory of the point source non-uniformity correction factor
for thick-walled ionisation chambers in photon beams
submitted to Phys.Med.Biol.
- 21 American Association of Physicist in Medicine task group 21
A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon
and electron beams
Med.Phys. 1983;10:741-71
- 22 Greening JR
Fundamentals of radiation dosimetry
1st ed. Bristol: Adam Hilger Ltd, 1981:95
- 23 Shiragai A
A proposal concerning the absorbed dose conversion factor
Phys.Med.Biol. 1978;23:245-52
- 29 Shiragai A
Effective mass stopping power ratio in photon dosimetry
Phys.Med.Biol.1978: correspondence: 452

BIJLAGE 1 AFLEIDING VAN k_m EN p_{wall}

De uitdrukking waaruit k_m en p_{wall} berekend worden zijn verschillend voor de verschillende protocollen (1,8,11). In 2.1 worden de uitdrukkingen van de NCS en het AAPM protocol gegeven. In deze bijlage wordt een afleiding gegeven waaruit de formulering voor k_m van het IAEA volgt. Voor p_{wall} wordt een andere formulering gevonden. Deze afleidingen zijn gebaseerd op referentie 22.

Bij de calibratie vrij in lucht voor ^{60}Co straling wordt gebruik gemaakt van een build-up cap. Dit is nodig om elektronen-evenwicht te bewerkstelligen. Dit betekent dat alle elektronen vrijgemaakt worden in de kamerwand of de build-up cap: De kamer met cap is een "fotonen detector". Bij de meting van de geabsorbeerde dosis in water voor hoog-energetische fotonen wordt de build-up cap verwijderd. Een groot gedeelte van de elektronen wordt vrijgemaakt in water. Om de calibratiefactor voor deze meting te kunnen gebruiken moet van zowel de calibratie als de meting in water een elektronenbeschouwing gedaan worden:

- bij de calibratie wordt een gedeelte van de elektronen vrijgemaakt in de build-up cap, die niet dezelfde eigenschappen hoeft te hebben als water.
- het aantal elektronen vrijgemaakt in de wand is tijdens de calibratie niet hetzelfde als tijdens de meting. Ook de eigenschappen van wand en water hoeven niet hetzelfde te zijn.

Uitgangspunt voor de afleiding is de energieafgifte in de luchtholte:

- 1- Ionisatie J_{lucht} door elektronen uit de wand, kamer is geplaatst in materiaal m.

$$\text{energieafgifte in holte} = J_{lucht} W/e = D_{wand} (L/\rho)_{wand}^{lucht} =$$

$$D_m (L/\rho)_{wand}^{lucht} (\mu_{en}/\rho)_m^{wand}$$

- 2- Ionisatie J_{lucht} door elektronen uit de build-up cap, kamer is geplaatst in materiaal m.

$$\text{energieafgifte in holte} = J_{lucht} W/e = D_{cap} (L/\rho)_{cap}^{lucht} =$$

$$D_m (L/\rho)_{cap}^{lucht} (\mu_{en}/\rho)_m^{cap}$$

3- Ionisatie J_{lucht} door elektronen uit de materiaal m , kamer is geplaatst in materiaal m .

$$\text{energieafgifte in holte} = J_{\text{lucht}} W/e = D_m (L/\rho)_m^{\text{lucht}}$$

De volgende twee situaties worden beschouwd:

1- De build-up cap is geplaatst, het materiaal m is lucht en een fractie α van de ionisatie in de luchtholte zijn het gevolg van elektronen uit de wand en $(1-\alpha)$ is afkomstig uit de build-up cap. Aangenomen wordt dat geen ionen door elektronen ontstaan die in lucht zijn vrijgemaakt. Voor ^{60}Co gammastraling is deze aanname gerechtvaardigd. Dan is de energieafgifte in de holte bepaald volgens 1 en 2 gelijk aan:

$$J_{\text{lucht}} W/e = D_{\text{lucht}} \left[\alpha (L/\rho)_{\text{wand}}^{\text{lucht}} (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{wand}} + (1-\alpha) (L/\rho)_{\text{cap}}^{\text{lucht}} (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{cap}} \right] \\ = D_{\text{lucht}} k_m \text{ met}$$

$$k_m = \alpha (L/\rho)_{\text{wand}}^{\text{lucht}} (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{wand}} + (1-\alpha) (L/\rho)_{\text{cap}}^{\text{lucht}} (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{lucht}}^{\text{cap}}$$

2- De build-up cap is niet geplaatst, het materiaal m is water en een fractie β van de ionisatie in de luchtholte zijn het gevolg van elektronen uit de wand en $(1-\beta)$ is afkomstig uit het water. Dan is de energieafgifte in de holte volgend uit 1 en 3 gelijk aan:

$$J_{\text{lucht}} W/e = D_{\text{water}} \left[\beta (L/\rho)_{\text{wand}}^{\text{lucht}} (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{water}}^{\text{wand}} + (1-\beta) (L/\rho)_{\text{water}}^{\text{lucht}} \right] =$$

$$D_{\text{water}} (L/\rho)_{\text{water}}^{\text{lucht}} \left[\beta (L/\rho)_{\text{wand}}^{\text{water}} (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{water}}^{\text{wand}} + (1-\beta) \right] =$$

$$D_{\text{water}} (L/\rho)_{\text{water}}^{\text{lucht}} P_{\text{wall}}^{-1} \text{ met}$$

$$P_{\text{wall}} = \left[\beta (L/\rho)_{\text{wand}}^{\text{water}} (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{water}}^{\text{wand}} + (1-\beta) \right]^{-1}$$

Voor de meting van ^{60}Co in lucht geldt dat $D_{\text{lucht}} = MN_c = J_{\text{lucht}} W/e k_m^{-1}$ dus

$$D_{\text{water}} = M N_c \left(\frac{L}{\rho} \right)_{\text{lucht}}^{\text{water}} p_{\text{wall}} k_m$$

In 1978 is na een korte discussie duidelijk geworden dat de afleiding zoals hierboven gegeven is de juiste is (23,24). Wel blijkt dat tussen de verschillende uitdrukkingen geen noemenswaardige numerieke verschillen gevonden kunnen worden.