



National Institute for Public Health
and the Environment
Ministry of Health, Welfare and Sport

Meetmethode thoron in survey

Meetmethoden thoron in survey

VERA onderzoek



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Meetmethoden thoron in survey

VERA-onderzoek

RIVM Rapport 610890001/2012

Colofon

© RIVM 2012

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave'.

R.O. Blaauboer

Contact:
R.O. Blaauboer
Laboratorium voor Stralingsonderzoek
Roelf.Blaauboer@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van VROM/DGM/Directie Risicobeleid, nu EL&I/DGETM/Programmadirectie Nucleaire Installaties en Veiligheid, in het kader van het WEST-programma.

Rapport in het kort

Meetmethoden thoron in survey

In sommige Nederlandse woningen is waarschijnlijk meer radioactief thorongas (Rn-220) aanwezig dan tot nu toe werd aangenomen. Onlangs bleek dat zich in nieuwbouwwoningen minder radioactief radongas (Rn-222) bevindt dan eerder werd aangenomen. Nieuw onderzoek van het RIVM laat zien dat deze resultaten verband met elkaar houden: de in het verleden gebruikte radondetectoren blijken een combinatie van de hoeveelheid radon en thoron te laten zien. Om te kunnen bepalen wat de concentraties van beide gassen afzonderlijk in woningen zijn, zijn nieuwe metingen nodig. Dat is sinds kort mogelijk, doordat een detector beschikbaar is gekomen die de schadelijke vervalproducten van thoron registreert.

Dit blijkt uit onderzoek van het RIVM dat is uitgevoerd ter voorbereiding van een survey naar radon en thoron in woningen. De survey gaat halverwege 2012 van start en zal bovenstaande bevindingen nader onderzoeken. De resultaten worden in 2014 verwacht. Vanaf 2006 hebben al een survey en kleinschalig onderzoek plaatsgevonden naar de stralingsbelasting in Nederlandse woningen die tussen 1994 en 2003 zijn gebouwd. Deze brachten aan het licht dat radondetectoren ook gevoelig zijn voor thoron, waardoor de oudere registraties minder nauwkeurig blijken.

Ook vervalproducten thoron schadelijk voor gezondheid

Thoron en radon zijn radioactieve isotopen van het element radon. Thoron heeft echter een veel kortere halveringstijd, waardoor het snel vervalt naar radioactieve zware metalen, zoals lood en polonium die aan stofdeeltjes blijven 'plakken'. Als deze stofdeeltjes worden ingeademd, kunnen ze het longweefsel beschadigen en, eventueel nog sterker in combinatie met roken, op termijn longkanker veroorzaken. De dosis door radon veroorzaakt zo naar schatting enkele honderden doden per jaar en voor thoron zou dit van een zelfde orde van grootte kunnen zijn. Voor de volksgezondheid is het daarom van belang ook deze thoronvervalproducten te meten.

Bouwmaterialen belangrijkste bron thoron en radon

Nederlandse burgers staan in hun huis bloot aan straling. Dit is ruwweg de helft van de totale stralingbelasting die zij gemiddeld gedurende een jaar oplopen. Een groot deel van de straling binnenshuis is een gevolg van het inademen van de radioactieve vervalproducten van radon en thoron. Deze edelgassen zijn afkomstig uit bouwmaterialen die gemaakt zijn van gesteente waarin radon en thoron van nature voorkomen. Voor thoron gaat het daarbij vooral om de lagen waarmee beton en bakstenen worden afgewerkt.

Trefwoorden: 220Rn, thoron, meetmethode, detector

Abstract

Thoron measurement methods for a survey

The level of the radioactive gas thoron (Rn-220) in some Dutch dwellings is likely to be higher than previously assumed. In contrast, the results of a new survey indicate that the level of its sister isotope, the radioactive gas radon (Rn-222), in newly built dwellings in the Netherlands is lower than previously assumed. A recent investigation carried out by the RIVM demonstrates that these results are closely linked to each other: it would now appear that the detectors used to measure radon levels in past surveys actually measured a combination of thoron and radon concentrations. New measurements are therefore needed in order that the true concentrations of each gas in Dutch dwellings can be determined. The technology for such measurements has only recently become available with the development of a detector that can register lung-damaging decay products of thoron.

These are the results of a preliminary investigation performed by the RIVM prior to the launching of a new survey of radon and thoron concentrations in Dutch dwellings. The aim of this new survey, which is planned to start in mid-2012, is to investigate the results of the RIVM study in greater depth. The survey results are expected in 2014. A small-scale investigation on the levels of ionizing radiation in Dutch dwellings built between 1994 and 2003 has been on-going since 2006. It was this investigation which determined that the radon detectors used were also sensitive to thoron, with the result that the registered concentrations of each radioactive gas were less precise than expected.

Thoron decay products are also hazardous to human health

Thoron and radon are radioactive 'sister isotopes' of the element radon. Thoron has a far shorter half-life than radon and, consequently, decays rapidly into radioactive heavy metal isotopes, such as those of lead and polonium, which in turn can become affixed ('stuck') to dust particles. Inhalation of these dust particles has the potential to cause lung damage and, over the long term, lung cancer; in combination with smoking this effect may even be increased. It has been estimated that exposure to hazardous levels of radon causes a few hundred deaths in the Netherlands annually, and it is possible that the number of thoron-related mortalities is of the same order of magnitude. Within the framework of public health, it is therefore important that the levels of these thoron decay products also be measured.

Building material is the most important source of thoron and radon

Dutch citizens are exposed to ionizing radiation in their homes. This indoor radiation accounts for roughly one-half of the average total radiation dose that each person will be exposed to each year. A large proportion of this indoor radiation dose is due to the inhalation of radon and thoron decay products. Thoron and radon are noble gases that can be found in building materials originating from stony or soil materials, in which both radon and thoron occur naturally. The concentration of thoron emanating from such building material depends primarily on how the layers of cement and building bricks are finished off.

Keywords: 220Rn, thoron, measuring method, detector

Inhoud

Samenvatting—6

1 Inleiding—7

- 1.1 Probleemstelling—7
- 1.2 Doelstelling—7

2 Te meten grootheden—8

- 2.1 Halveringstijd en vervalproducten—8
- 2.2 Thoronconcentratie—10
 - 2.2.1 Gemiddelde thoronconcentratie—10
 - 2.2.2 Gemiddelde vervalproductconcentratie—10
 - 2.2.3 Dynamische thoron (vervalproduct)concentratie—10
- 2.3 Exhalatiesnelheid—10

3 Thorondetectoren—12

- 3.1 Typen detectoren—12
- 3.2 Dynamisch meten—13
 - 3.2.1 Thoron—13
 - 3.2.2 Thoronvervalproducten—13
- 3.3 Passief meten—14
 - 3.3.1 Thoron—14
 - 3.3.2 Thoronvervalproducten—16
- 3.4 Meting van exhalatie—18
 - 3.4.1 Dynamische methoden—18
 - 3.4.2 Passieve methoden—18

4 Resultaten—19

- 4.1 Dynamisch meten—19
 - 4.1.1 Thoron—19
 - 4.1.2 Thoronvervalproducten—20
- 4.2 Passief meten—20
 - 4.2.1 Thoron—20
 - 4.2.2 Thoronvervalproducten—22
- 4.3 Vergelijking van metingen van thoron en thoronvervalproducten—24
- 4.4 Conversie van thoron naar thoronvervalproducten—25
 - 4.4.1 Conversies van thoron naar EETC—26
 - 4.4.2 EETC op basis van thoronexhalatie—26
 - 4.4.3 Thoronexhalatie op basis van thoronconcentratie op 50 cm van muur—26
 - 4.4.4 EETC als functie van ruimtegemiddelde thoronconcentratie—26

5 Dosis door thoron(verval)producten—29

6 Conclusies—31

- 6.1 Meetmethode—31
- 6.2 Meetresultaten—31
- 6.3 Conversies en modellering—32
- 6.4 Dosis—32

7 Literatuur—33

Samenvatting

Uit de eerste survey in het kader van het VERA-programma bleek dat er minder radioactief radongas (Rn-222) in nieuwbouwwoningen voor komt dan op basis van eerdere radonsurveys werd aangenomen. Bij nader onderzoek bleken de radondetectoren in de vroegere surveys ook thoron (Rn-220) te hebben meegemeten. Deze detectoren waren echter niet gekalibreerd voor het meten van thoron. Voor een goed beeld van de radon- en thoronconcentraties in Nederlandse woningen zouden in een nieuwe survey dan ook radon en thoron apart gemeten moeten worden.

In een nader onderzoek zijn voor toepassing in een (nieuwe) survey enkele methoden voor het passief en dynamisch meten van thoron en de daaruit ontstane vervalproducten onderzocht.

Thoron is evenals radon een radioactief isotoop van het element radon. Thoron heeft echter een veel kortere halveringstijd. In Nederland komt in woningen een belangrijk deel van de radon en zeker ook van de thoron uit de bouwmaterialen. Gezien de korte halveringstijd van nog geen minuut voor thoron zal de concentratie in tegenstelling tot die van radon in een (woon)ruimte verre van homogeen zijn en vooral nabij wanden of plafonds te meten. De ook weer radioactieve vervalproducten zijn vanwege hun deels langere halveringstijd, niet in evenwicht met thoron. Omdat de dosis door thoron, net als bij radon overigens, door de vervalproducten wordt veroorzaakt en niet door het edelgas zelf, wordt de schatting van de dosis voor de mens daarmee extra bemoeilijkt.

Als het doel van het onderzoek is *het vaststellen van de dosis voor de mens*, dan dienen dus eigenlijk de vervalproducten zelf te worden gemeten of moet uit de thoronconcentratie via een conversiemodel de dosis door de vervalproducten worden geschat. Als het *vaststellen van de bronterm* (wand, plafond en dergelijke) van thoron het doel van het onderzoek is, dan is het meten van de thoronconcentratie van belang.

Voor het meten in een survey van thoron uit bouw materiaal is een geschikte meetmethode gevonden in de halfopen detectoren van Gammadata^{#)}, die in combinaties van twee thorondetectoren en één radondetector tevens meting van exhalatie mogelijk maakt. Als geschikte methode voor het meten van vervalproducten is de detector van Xrawn uit Japan een goede optie.

Voor kortdurende metingen, bijvoorbeeld voor het vaststellen of er een 'thoronprobleem' is, of voor het volgen van de effectiviteit van tegenmaatregelen (ventilatie, andere afwerking muur), kan beter een dynamische meetmethode worden toegepast. Ook daarvoor zijn in dit rapport voorstellen gedaan.

^{#)} Het deel van Gammadata dat zich bezighoudt met de productie en uitlezing van radon- en thorondetectoren is recent opgegaan in Landauer Nordic, Uppsala, Zweden

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

In nieuwbouwwoningen is tijdens twee eerdere surveys de radonconcentratie gemeten. Voor de bouwperiode van begin jaren zeventig tot begin jaren negentig van de vorige eeuw volgde uit die onderzoeken een toename van 20 Bq m^{-3} naar 30 Bq m^{-3} [1, 2]. Naar aanleiding van een recente derde survey (VERA) in woningen gebouwd in de periode 1994-2003 is gebleken [3] dat de radonconcentratie in die woningen slechts ongeveer 13 Bq m^{-3} bedraagt. Uit verschillende aanwijzingen ontstond het beeld dat een belangrijk deel van de eerder aan radon (^{222}Rn) toegewezen concentratie in werkelijkheid werd veroorzaakt door thoron (^{220}Rn), een ander isotoop van het element radon. Onduidelijk was echter wat nu de werkelijke concentraties van deze isotopen van radon in het verleden waren geweest. Beide isotopen van radon dragen bij aan de stralingsbelasting en dus aan het risico op longkanker.

De in de eerdere surveys gehanteerde meetmethode bleek niet geschikt voor het apart meten van radon en thoron. Inmiddels is bij de VERA-survey gebruik gemaakt van een methode die alleen het isotoop radon meet. Nu is een methode nodig om datzelfde te doen met thoron.

1.2 Doelstelling

Naar aanleiding van de resultaten van de VERA-survey was een nader onderzoek naar vooral de onderbouwing van de bijdrage van thoron gewenst. Dit heeft plaatsgevonden in het rapport *Meting van ^{220}Rn en consequenties voor eerdere ^{222}Rn surveys* [4].

Omdat is gebleken dat thoron een andere rol speelt in de stralingsbelasting dan tot nu toe aangenomen, is het van belang om ook meer specifiek naar deze bijdrage te kijken. In een nieuw onderzoek is het dan ook van belang om een specifiek voor thoron geschikte meetmethode toe te passen. In het huidige rapport wordt een overzicht gegeven van de mogelijkheden op dat gebied. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen twee typen meetmethoden, namelijk:

- passieve meetmethoden (waar radionucliden naar binnen diffunderen en daar op detectiemateriaal vallen; gewoonlijk integrerend over de tijd); en
- actieve of dynamische meetmethoden (voor het real-time meten van een concentratie, veelal door het door een filter pompen van radionucliden bevattende lucht).

Voor de uitvoering in een survey is het van belang een representatief beeld te schetsen van de gemiddelde jaarconcentratie. Omdat de concentraties van zowel radon en thoron, als van vervalproducten in verschillende mate onderhevig zijn aan seizoensvariaties, is een passieve meetmethode hiervoor het meest geschikt. Wanneer het echter gaat om het vinden van bijvoorbeeld bouwmaterialen met een hoge thoronexhalatie, kan het nuttig zijn hiervoor een dynamische methode in te zetten. Dat geldt ook voor het vaststellen van de (grootte van de) variaties in concentratie.

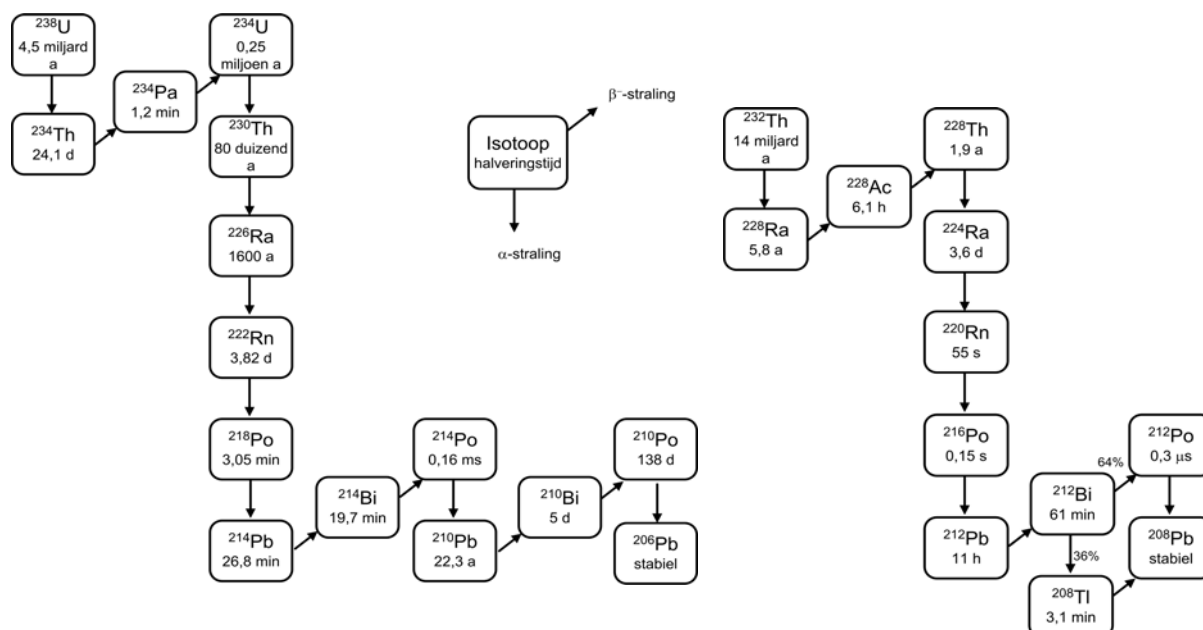
Uiteindelijk sluit het rapport af met enkele adviezen voor toepassing van meetmethoden bij toekomstig onderzoek in gecombineerde radon-thoronsurveys.

2 Te meten grootheden

Het element radon is een edelgas. Voor de isotopen radon en thoron (zie 2.1) geldt dat deze kunnen voorkomen in de lucht en daar voor de mens een belasting vormen, maar dat ze afkomstig zijn uit bodem of (uit de bodem afkomstig) bouw materiaal. Het meten van beide isotopen is dan ook gericht op het vaststellen van de concentratie in de lucht en de mate waarin ze uit een materiaal (bodem, bouw materiaal) vrijkomen of exhaleren. Voor deze twee doeleinden zijn aparte benaderingen nodig. De in dit rapport beschreven methoden zijn specifiek bedoeld voor de meting van thoron en/of eventuele vervalproducten in een survey. Met een survey wordt hier bedoeld een onderzoek in een aanzienlijk aantal woningen en dus niet in een laboratoriumopstelling. Voor meting van thoron in een laboratoriumopstelling zijn de mogelijkheden veelal uitgebreider, ook voor het meten van de exhalatie uit bouw materiaal. Zie hiervoor bijvoorbeeld het recente rapport van de Nuclear Research and consultancy Group (NRG) [5]. Voor meting van het isotoop radon zijn reeds geschikte methoden voorhanden.

2.1 Halveringstijd en vervalproducten

Thoron en radon zijn beide isotopen van het element radon. Waar we de isotoop ^{222}Rn altijd simpelweg aanduiden met radon, wordt de isotoop ^{220}Rn thoron genoemd. Thoron heeft een veel kortere halveringstijd (ongeveer 56 seconden) dan radon (ongeveer 3,8 dagen). Radon en thoron zijn afkomstig uit respectievelijk de uranium (^{238}U) en thorium (^{232}Th) vervalreeksen (zie Figuur 1). Omdat radionucliden van deze reeksen voorkomen in de bodem en dus in veel (bouw)materialen afkomstig uit die bodem (beton, baksteen, kalkzandsteen enzovoort), zullen radon en thoron ook in dergelijke bouwmaterialen ontstaan. Het element radon is een edelgas en kan daarom ontwijken uit de bodem of het bouw materiaal. Beide isotopen zijn chemisch gelijk en dragen dus allebei bij aan de stralingsbelasting.



Figuur 1 De radioactieve vervalreeksen van ^{238}U en ^{232}Th waarin respectievelijk ^{222}Rn (radon) en ^{220}Rn (thoron) ontstaan

Voor de blootstelling van de mens aan radon en thoron zijn de kortlevende vervalproducten van deze isotopen van belang. Deze ook weer radioactieve producten zijn zware metalen. Deze kunnen bij inademing in de longen terechtkomen en daar hun straling afgeven, wat uiteindelijk tot longkanker kan leiden. Het isotoop radon kan in het binnenmilieu vanwege zijn relatief lange halveringstijd zowel van de bodem als van bouwmaterialen afkomstig zijn. Voor thoron zullen dit voornamelijk de bouwmaterialen zijn.

Indien alleen halveringstijden in ogenschouw worden genomen zijn de kortlevende vervalproducten van ^{222}Rn en ^{220}Rn in de lucht deels in radioactief evenwicht met hun desbetreffende moedernucliden. Omdat die vervalproducten chemisch actief zijn, hechten ze zich gemakkelijk aan stofdeeltjes en vindt er door *plate-out* (het hechten aan wanden en voorwerpen) een daling plaats van de vervalproductconcentraties in lucht en is een eventueel evenwicht verstoord. Afhankelijk van onder andere stofconcentratie en ventilatie kan een radonactiviteit in lucht dus in verschillende concentraties aan vervalproducten in lucht resulteren. Omdat de stralingsbelasting door radon bij de mens vooral door deze vervalproducten wordt veroorzaakt, is een omrekening naar een evenwichtsequivalente concentratie (EEC) gewenst. Deze EEC is gedefinieerd als die concentratie van ^{222}Rn of ^{220}Rn in evenwicht met de kortlevende vervalproducten die dezelfde potentiële α -energie van de vervalproducten vertegenwoordigt als het mengsel dat niet in evenwicht is. Het is namelijk de in weefsel gedissipeerde α -energie die de dosis levert. Hierbij is de potentiële α -energie van een vervalproduct de totale α -energie die wordt uitgezonden tot de nuclide vervallen is tot ^{208}Pb (in geval van ^{220}Rn) of ^{210}Pb (in geval van ^{222}Rn). De evenwichtsfactor f is gedefinieerd als de verhouding van de EEC en de werkelijke concentratie van de moedernuclide:

$$f_{\text{Rn}-222} = \text{EEC}_{\text{Rn}-222} \cdot [\text{Rn} - 222]^{-1} \quad 2-1$$

$$f_{\text{Rn}-220} = \text{EEC}_{\text{Rn}-220} \cdot [\text{Rn} - 220]^{-1} \quad 2-2$$

Omrekening van de radonconcentraties naar evenwichtsequivalente concentraties komt dus neer op het berekenen of schatten van de factor f . Zie voor de berekening bijvoorbeeld [6]. Wanneer de potentiële α -energieën per isotoop als gewichtsfactoren worden toegepast, kan de evenwichtskoncentratie ook uitgedrukt worden in de concentraties van de belangrijkste vervalproducten:

$$\text{EEC}_{\text{Rn}-222} \cong 0,105 \cdot [\text{Po} - 218] + 0,514 \cdot [\text{Pb} - 214] + 0,381 \cdot [\text{Bi} - 214] \quad 2-3$$

$$\text{EEC}_{\text{Rn}-220} \cong 0,913 \cdot [\text{Pb} - 212] + 0,087 \cdot [\text{Bi} - 212] \quad 2-4$$

De belangrijkste kortlevende vervalproducten van ^{222}Rn leven circa een halfuur. In een stabiele situatie ontstaat spoedig een soort evenwicht, ook wel seculier evenwicht genoemd, tussen ^{222}Rn en deze vervalproducten. Voor het binnenmilieu is een $f_{\text{Rn}-222}$ vastgesteld van ongeveer 0,4.

Voor thoron (^{220}Rn) is het niet goed mogelijk om van een evenwicht te spreken. Gezien de korte halveringstijd zal dit gas voornamelijk worden aangetroffen nabij de bron (bodem, bouw materiaal) en zal de concentratie onder niet-turbulente omstandigheden sterk afnemen als functie van de afstand tot die bron (halvering van de concentratie binnen enkele centimeters). Met name het vervalproduct ^{212}Pb leeft echter veel langer (circa 10 uur) en kan zich veel homogener door een ruimte verspreiden. Evenwicht tussen ^{220}Rn en ^{212}Pb in een woonkamer zal dus niet gauw optreden. Dit geeft ook meteen het grote verschil tussen het meten van thoron en radon weer: het meten van radon zegt vrij

direct iets over de dosis door vervalproducten, maar bij het meten van thoron is nog een extra 'vertaling' nodig naar de voor de stralingsbelasting relevante vervalproducten.

2.2 Thoronconcentratie

2.2.1 Gemiddelde thoronconcentratie

Omdat thoron een korte halveringstijd heeft, zal in tegenstelling tot bij radon de concentratie sterk afhangen van de plek waar gemeten wordt. In de directe nabijheid van een bouw materiaal kan de concentratie tot tientallen of honderden Bq m⁻³ oplopen, terwijl in het midden van een kamer de concentratie tot onder de Bq m⁻³ kan afnemen. Voor het meten van de thoronconcentratie is het dan ook zeer belangrijk de exacte meetpositie ten opzichte van wanden, plafond en vloer te kennen. Tegelijkertijd kan er sprake zijn van variaties in de concentratie door bijvoorbeeld luchtstromingen. Het is dan ook veelal gewoonte om net als bij radon gedurende langere tijd te meten, zodat een gemiddelde of voor de woonruimte representatieve waarde gevonden kan worden.

2.2.2 Gemiddelde vervalproductconcentratie

Een andere mogelijkheid is het meten van de vervalproductconcentratie (zie 2.1). Zoals te zien is in vergelijking 2-4, wordt de EEC (en daarmee de dosis) vooral bepaald door de concentratie van ²¹²Pb. Omdat dit vervalproduct een veel langere halveringstijd heeft dan thoron (circa 10 uur) zal het veel homogener verdeeld zijn in een woonruimte. Omdat de dosis door thoron bij de mens, net als bij radon, veroorzaakt wordt door inhalatie van de vervalproducten, is het het meest direct om deze vervalproducten te meten. Een hiervoor toegepaste meetmethode zal de voorkeur hebben boven de meer indirecte meting van thoron waarvoor nog een, al eerder genoemde, extra 'vertaling' nodig is.

2.2.3 Dynamische thoron (vervalproduct)concentratie

Naast de vaststelling van gemiddelde concentraties van thoron of vervalproducten kan het nodig zijn om een beeld te krijgen van bijvoorbeeld de variatie van de concentratie in de tijd. Daarvoor is een dynamische meetmethode aangewezen. Deze dynamische benadering levert wel informatie over de thoronconcentratie in de tijd op, bijvoorbeeld in combinatie met ventilatie(gedrag) of temperatuurwisseling, maar levert geen representatief beeld van de gemiddelde concentratie die voor de dosis van belang is, tenzij deze veelal complexere meetmethode langdurig wordt ingezet.

2.3 Exhalatiesnelheid

Voordat thoron door een bouw materiaal wordt geëxhaleerd, vindt er een proces plaats dat emanatie heet. Emanatie is het proces van vrijmaking van de thoronatomen uit het moedermateriaal. Na emanatie uit het moedermateriaal kan transport van het edelgas in het bouw materiaal plaatsvinden via convectie en diffusie.

Bij emanatie is een aantal zaken van belang, zoals vochtgehalte, porositeit en deeltjesgrootte. Voor bouwmaterialen ligt de emanatiefractie (het deel dat vrijkomt voor transport) in het bereik 0,002 - 0,2 [7]. Zie voor een nadere beschrijving van dit proces bijvoorbeeld [6].

Van exhalatie spreekt men op het moment dat het edelgas uit het bouw materiaal wordt getransporteerd. Belangrijk voor de grootte van de exhalatie uit een bouw materiaal zijn: radiumconcentratie (hieruit ontstaat thoron via radioactief verval), temperatuur, drukverschillen, permeabiliteit, vochtgehalte, porositeit en natuurlijk de emanatie.

Als drukverschillen geen grote rol spelen, zal thoron via diffusie uit het materiaal komen. Voor bouw materiaal in de vorm van een muur kan deze exhalatie (E in $\text{Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) als volgt worden geschreven [7, 8]:

$$E_{\text{bouw materiaal}} = \lambda_{Rn} \cdot \eta \cdot C_{Ra, \text{bouw m}} \cdot \rho_{\text{bouw m}} \cdot \sqrt{\frac{D_{Rn}}{\lambda_{Rn}}} \cdot \tanh\left(\frac{d_{\text{bouw m}}}{2} \sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D_{Rn}}}\right) \quad 2-5$$

Hierbij zijn:

- η (-) de emanatiefractie,
- λ_{Rn} (s^{-1}) en D_{Rn} ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) respectievelijk de vervalconstante en diffusiecoëfficiënt van thoron in het bouw materiaal,
- ρ (kg m^{-3}) en d (m) respectievelijk de dichtheid en dikte van het bouw materiaal en
- $C_{Ra, \text{bouw m}}$ (Bq kg^{-1}) de concentratie van het moedernuclide ^{224}Ra , waaruit thoron ontstaat, in het bouw materiaal.

Bij diktes van het bouw materiaal vanaf ongeveer 1 cm wordt de $\tanh$ factor 1 en is de exhalatie niet meer afhankelijk van de dikte van de wand. Verder ligt de exhalatie van thoron veelal meer dan een factor 100 hoger dan die van radon (zie vergelijking 2-5). Dit komt vooral door het verschil in halveringstijd.

Voor de exhalatie van thoron vanuit de bodem wordt door UNSCEAR een bereik gegeven van $0,015 - 5,3 \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [7]. Voor de exhalatie vanuit bouw materialen worden door Folkerts et al. [9] bereiken opgegeven van $0,01 - 0,1 \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ voor ^{220}Rn . Deze waarden zijn veelal lager dan bij de bodem, vanwege de lagere emanatie in het over het algemeen drogere bouw materiaal.

3 Thorondetectoren

3.1 Typen detectoren

Voor het meten van radon en ook thoron zijn diverse typen detectoren beschikbaar. Hier kan een onderverdeling gemaakt worden naar grofweg drie typen van bemonstering:

- steekmonsters ofwel grab sampling;
- continue meetmethode;
- integrerende techniek.

Deze drie typen leveren resultaten van momentaan aan de ene kant van het spectrum tot jaargemiddelden aan de andere kant. Dergelijke typen bemonstering zijn voor zowel thoron als voor de vervalproducten beschikbaar.

Het nemen van steekmonsters bij het meten van thoron betreft dan meestal het bemonsteren van de vervalproducten van thoron op een filter en het vervolgens meten met bijvoorbeeld een gammaspectrometrische methode (zie ook 3.2.2). Deze methode kan ingezet worden om met een bemonstering van veelal enkele uren een idee te krijgen van de concentratie in een ruimte. Voordeel is een redelijk snelle en nauwkeurige meting. Nadeel is echter dat enerzijds de dynamiek van de thoronconcentratie in de tijd niet goed te volgen is (uit de meting volgt niet de variatie in die uren) en anderzijds de representativiteit van het monster voor de blootstelling aan thoron door de relatief korte bemonstertijd zeer beperkt is (niet goed te vergelijken met de gemiddelde jaarconcentratie). Een voorbeeld is een scintillatiemeting met een Lucas-cel [10]. Voor het meten van vervalproducten wordt wel gebruikgemaakt van solidstatedetectoren in combinatie met α -spectroscopie [11].

Een continue meetmethode heeft als voordeel dat de tijdsafhankelijke concentratie gevolgd kan worden (dynamisch meten). Dit is nuttig bij diverse onderzoeken en tests van bijvoorbeeld de effectiviteit van radon- en/of thoron-reducerende maatregelen. Ook kan het handig zijn om snel een indicatie te hebben van de grootte van eventuele 'bronnen' (bouw materiaal of opening naar de bodem (vooral bij radon)). Een voorbeeld is de toepassing van een solidstatedetector en α -spectroscopie. Hiermee kunnen zowel radon als thoron worden gemeten met hun vervalproducten met een tijdsresolutie van enkele uren (= gemiddelde over ten minste enkele uren). Nadeel is ook hier dat het vaststellen van een representatieve concentratie voor langdurige blootstelling (bijvoorbeeld een jaar) niet goed mogelijk is en in ieder geval tamelijk kostbaar en omslachtig. Voor vervalproducten wordt wel gebruik gemaakt van automatische steekmonsters, zoals die bijvoorbeeld in het ongevallenmeetnet NMR (Nationaal Meetnet Radioactiviteit) beschikbaar zijn [12].

De integrerende techniek is de meest gebruikte in surveys, omdat deze passieve methode uitermate geschikt is voor langdurige bemonstering. Meest gebruikt zijn de zogenaamde Solid State Nuclear Track Detectoren (SSNTD) veelal gemaakt van het CR-39 polymeer, en de geactiveerde koolstofadsorptietechniek. Bij de eerste methode worden sporen (tracks) in het polymeer veroorzaakt door de uitgezonden α -deeltjes. Deze worden met een etstechniek zichtbaar gemaakt. Het aantal tracks is een maat voor de concentratie. In de koolstofadsorptietechniek, vooral geschikt voor radon, wordt gammaspectroscopie gebruikt om de concentratie te meten, of wordt na

desorptie een scintillatiemeting uitgevoerd. Deze laatste meetmethode is vanwege invloed van bijvoorbeeld temperatuur en vochtigheid en ook radioactief verval geschikt voor bemonsteringen van maximaal een week. De SSNTD-methode is echter voor blootstellingen gedurende een jaar goed te gebruiken en daarmee geschikt voor representatieve metingen voor blootstelling van de mens aan zowel radon als thoron. Ook voor thoronvervalproducten is sinds enige tijd een SSNTD-methode beschikbaar die specifiek de concentratie van ^{212}Po meet (zie 3.3.2). Ook de relatief lage kosten en de robuustheid van de SSNTD-techniek maakt toepassing hiervan in surveys uitermate geschikt. Uitgebreide informatie over deze methode is bijvoorbeeld te vinden in [13].

3.2 Dynamisch meten

3.2.1 Thoron

Voor het meten van thoron zijn er diverse methoden beschikbaar. Het is hierbij belangrijk om onderscheid te maken tussen passieve methoden en actieve methoden. Een voordeel van actieve of ook wel dynamische methoden is de (vrijwel) directe beschikbaarheid van de meetresultaten. Hiermee is het mogelijk om de methode in te zetten als snuffelmethode voor het relatief snel vinden van bronnen van thoron (exhalerende bouwmaterialen) in een ruimte. Een voorbeeld van een instrument is de RAD7 van DurrIDGE Company (Cambridge MA), zie Figuur 2.

Nadeel van een actieve methode is dat de meetgegevens niet representatief zijn voor de gemiddelde blootstelling van een persoon aan thoron gedurende het jaar. Het meetbereik is 4 tot $4 \times 10^5 \text{ Bq m}^{-3}$. De ingebouwde luchtpomp heeft een capaciteit van 1 L min^{-1} . Indien de concentratie van thoron niet homogeen is, en dat is zeker het geval nabij een bouw materiaal, is de gemeten concentratie van thoron slechts een indicatie. Bovendien zuigt het instrument een hoeveelheid lucht aan, waarmee het de concentratie op locatie beïnvloedt.



Figuur 2 RAD7 α -spectrometer van DurrIDGE Company (Cambridge, MA)

3.2.2 Thoronvervalproducten

De luchtstofbemonstering gebeurt met een Hi-Q luchtstofbemonsteringseenheid en duurt 2 uur met een debiet van $\sim 8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ door het filter en op een hoogte van 75 cm boven de vloer (zie Figuur 3). De pomp is gekalibreerd op het RIVM met een DigitalAirFlow Calibrator, D-828EV.2-1. De afgelezen volumina zijn omgerekend naar het gekalibreerde volume. Van het filter is vervolgens op het RIVM een gammaspectrum opgenomen met een germanium

halfgeleiderdetector, een pulssorteerder (DSA-1000, Canberra B.V.) van 16384 kanalen en de softwarepakketten APEX en Genie-2000 (Canberra B.V.). Naast het gerapporteerde ^{212}Pb en ^{214}Pb worden ook de thorondochters ^{212}Bi en ^{208}Tl dan aangetroffen. Door de korte halveringstijd van deze nucliden is het niet zinvol de concentratie hiervan te herleiden uit de meting van deze nucliden op het filter: de gemeten concentratie wordt immers vrijwel volledig bepaald door het instellen van het evenwicht na de bemonstering.



Figuur 3 Opstelling van aanzuigsysteem met filter voor meting thoronvervalproducten

Enkele nadelen van deze methode zijn:

- de tijd die tussen bemonstering en analyse ligt. Gezien de veelal korte halveringstijden werkt dit vooral met het iets langer levende thoronvervalproduct ^{212}Pb ;
- dynamische meetresultaten zijn niet representatief voor het bepalen van de jaargemiddelde concentratie;
- de meting is arbeidsintensief en dus kostbaar, zeker als die in een uitgebreide survey zou moeten worden uitgevoerd.

Voordeel is echter dat relatief snel een vrij nauwkeurig bekende concentratie van het belangrijkste vervalproduct van thoron verkregen wordt. Zeker voor het testen van eventuele tegenmaatregelen levert dit een krachtig meetinstrument voor het snel bepalen van de effectiviteit daarvan.

3.3 Passief meten

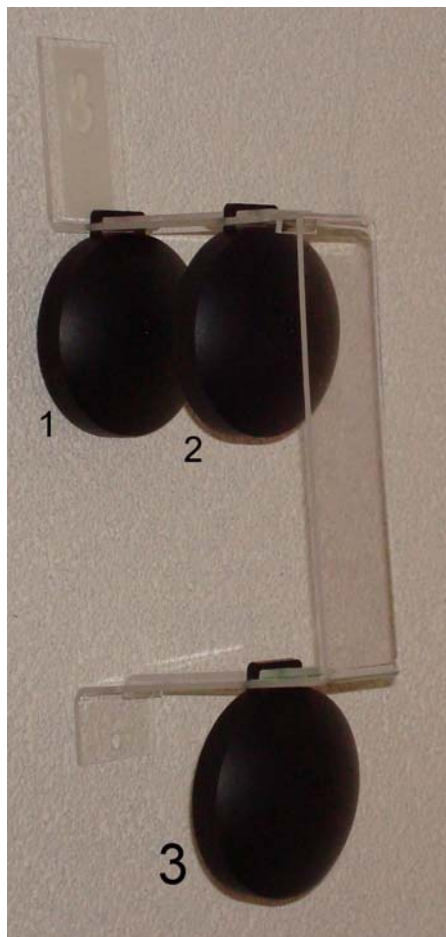
3.3.1 Thoron

Een bekend voorbeeld van een passieve methode is de 'open/gesloten' radondetector, ook wel meetbeker genoemd, voorzien van een filter (voor het afvangen van vervalproducten), op basis van een CR39 etched track detector (SSNTD). Door combinatie van een gesloten beker (alleen radon) en een open beker (radon en thoron) kan dan ook thoron (verschilmeting) worden vastgesteld voor meetperioden tot een jaar. Voorbeelden zijn de Raduet van de

firma Radosys, Hongarije (zie Figuur 4) en de radon/thoron detectoren van Gammadata¹ (GD), Zweden (zie Figuur 5).



Figuur 4 Raduets, een radon- en thoronbeker (zie een filteropening bij de pijl in de thoronbeker) van de firma Radosys



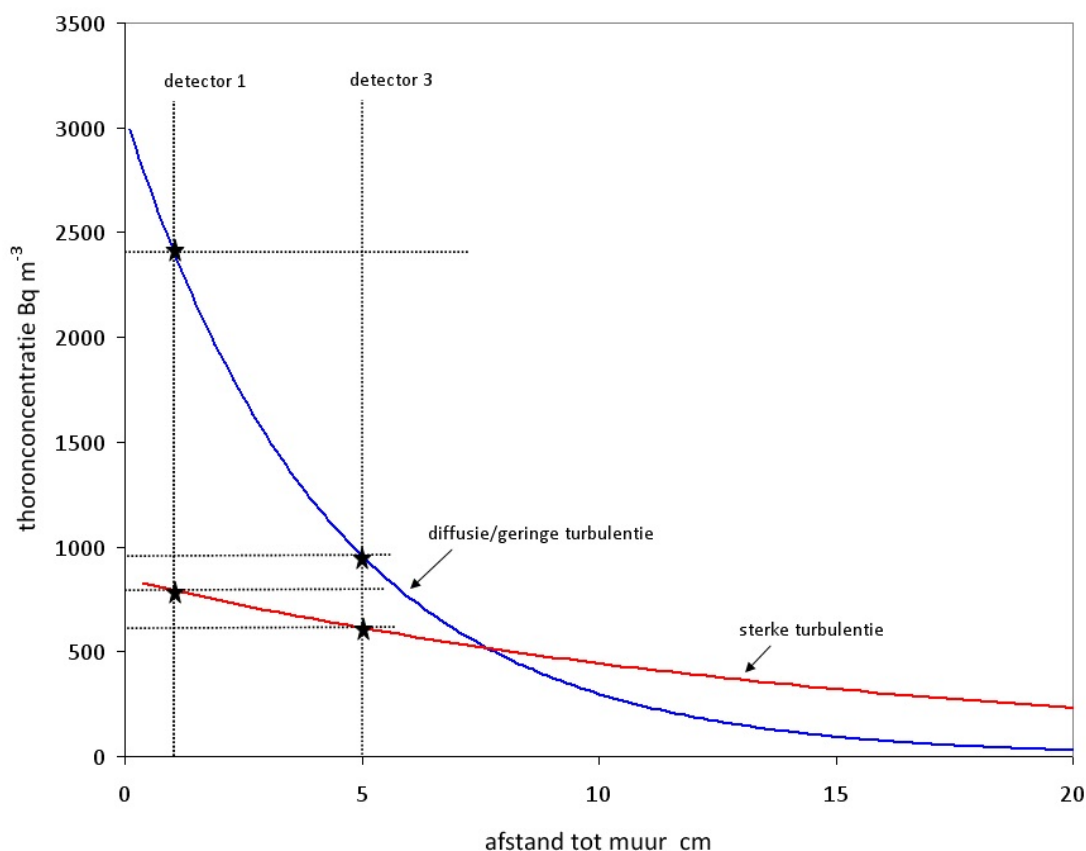
Figuur 5 Gammadata (GD) thoron (1 en 3) en radon (2) detectoren in speciale detectorhouder voor meten van exhalatie

Omdat thoron, nadat dat uit een bouw materiaal vrijkomt, snel vervalt, is de afstand van de detector tot het thoron exhalerende oppervlak een belangrijke maat. Thoronmeetresultaten zonder afstand tot een bouw materiaal zijn dus zinloos (zie Figuur 6).

Indien met twee detectoren op een vaste maar verschillende afstand van een muur wordt gemeten, zijn naast de concentratie ook de exhalatie en de (turbulente) diffusie te bepalen. Omdat de GD-thorondetectoren hun openingen richting de muur hebben, is met deze detectoren in tegenstelling tot metingen met de Raduets een betere meting loodrecht op de muur uit te voeren. Door de uitvoering met twee thorondetectoren (Figuur 5) zijn de genoemde exhalatie en turbulente diffusie te bepalen, grootheden die iets meer zeggen dan de thoronconcentratie alleen (zie 3.4). Nadeel van het meten van thoron is het eerder genoemde feit dat de blootstelling van de mens wordt bepaald door de

¹ Het deel van Gammadata dat zich bezighoudt met de productie en uitlezing van radon- en thorondetectoren is recent opgegaan in Landauer Nordic, Uppsala, Zweden

kortlevende vervalproducten van thoron en dat deze verre van 'in evenwicht' met thoron zijn. Deze conversie van thoronconcentratie naar blootstelling wordt mede bepaald door de grootte van de ruimte, de mix van bouwmaterialen in die ruimte, ventilatie en stromingsprocessen evenals depositieprocessen van de vervalproducten op stofdeeltjes en oppervlakken.

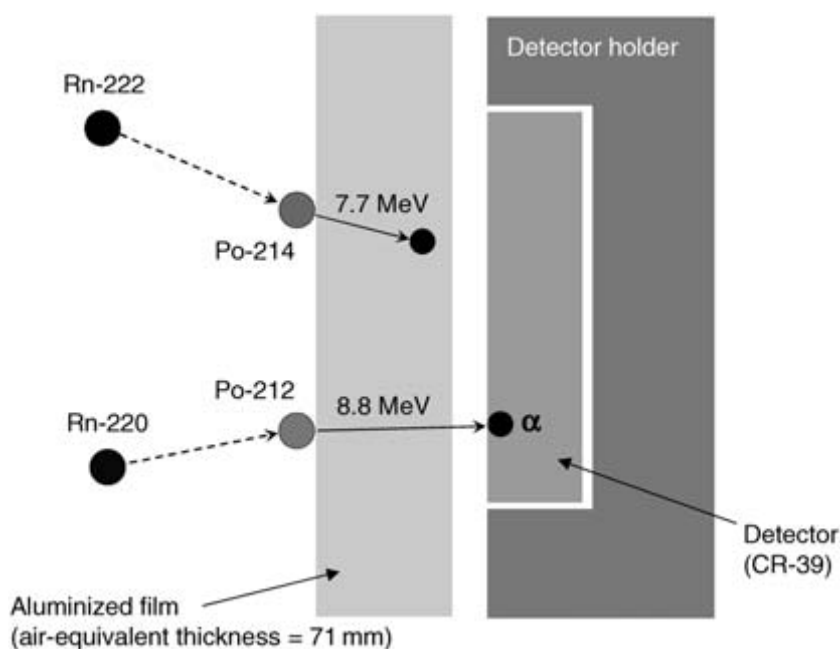


Figuur 6 Voorbeeld van gemeten concentraties met de in Figuur 5 weergegeven detectoren

3.3.2 Thoronvervalproducten

De genoemde nadelen heeft de volgende passieve meetmethode niet, namelijk het direct meten van de vervalproductconcentratie via de harde α (8,78 MeV) van ^{212}Po .

De hier toegepaste, in Japan geproduceerde, thoronvervalproductdetectoren (Xrawn Co., Ltd, Yokohama, Kanagawa, Japan) zijn tamelijk nieuw. Net als de in eerdere surveys gebruikte radondetectoren bevatten ze kleine stukjes (CR-39) polymeer waarin α -deeltjes sporen nalaten. Dit plastic is afgedekt met een folie die de straling van alle vervalproducten van radon en thoron tegenhoudt, met uitzondering van de door ^{212}Po (vervalproduct van thoron) uitgezonden 8,78 MeV α 's. Als de detector wordt blootgesteld aan lucht, zal op de detector neergeslagen thoronvervalproduct sporen in het detectormateriaal veroorzaken (zie Figuur 7 en Figuur 8).



Figuur 7 Schematische weergave van Japanse progeny detector; totale dikte detector is slechts circa 0,5 cm



Figuur 8 Foto van Japanse progeny detector

De omstandigheden waaronder de detectoren zijn geijkt, zullen naar verwachting niet sterk afwijken van die in de woningen in een survey. Het is niet volledig bekend hoe de respons van deze detectoren bij extreem schone of vieze lucht is. Dit is echter, impliciet, ook een probleem als thorondetectoren gebruikt zouden worden: het speelt dan een rol in de nog uit te voeren conversie van thoronconcentratie naar dosis.

Detectoren van dit type in een ruimte, meer dan een meter verwijderd van muren of andere thoron exhalerende oppervlakken, ontvangen wat thoronverval betreft vooral depositie van ^{212}Pb en ^{212}Bi op de folie. Gezien de halveringstijden van beide radionucliden mag verondersteld worden dat deze *attached* zijn aan aerosolen (zie bijvoorbeeld [14] en [16]). Alleen de 8,78 MeV α van ^{212}Po (vervalproduct van ^{212}Bi met een branching factor van 0,64) wordt gemeten. De door Xrawn gerapporteerde concentratie is de EEC van thoron (ook wel EETC met de T van thoron) (Bq m^{-3}), zie 2.1.

3.4 Meting van exhalatie

3.4.1 Dynamische methoden

Voor het meten van de exhalatiesnelheid vanuit een bouw materiaal is een dynamische detectie een aangewezen methode. Doorgaans wordt voor een exhalatiemeting de concentratie voor het bouw materiaal gemeten. Omdat het thoron snel vervalt, is een meetresultaat sterk afhankelijk van de afstand tot het exhalerende oppervlak. Daar komt bij dat door het bemonsteren van de lucht het thoron van verschillende kanten en dus afstanden, wordt aangezogen. Een dergelijke methode kan dan ook niet meer zijn dan een snuffelmethode die een indruk geeft van de concentratie nabij een wand en daarmee van de exhalatie uit die wand. Er is echter een methode in ontwikkeling om de exhalatie in een afgesloten meetruimte, waarin zich een stuk bouw materiaal bevindt, te meten [15]. Voordeel hiervan is dat op een geconditioneerde wijze de exhalatie van bouw materiaal kan worden gemeten, maar nadeel is dat dit voor een muur op locatie niet mogelijk is.

3.4.2 Passieve methoden

Omdat thoron, nadat dat uit een bouw materiaal komt, vrij snel vervallen is, is de afstand van de detector tot het thoron exhalerende oppervlak zoals al eerder aangegeven een belangrijke maat. Thoronmeetresultaten zonder afstand tot een bouw materiaal zijn dus zinloos.

Voor de concentratie van thoron C_{Rn220} (Bq m^{-3}) spelen naast de afstand tot de muur twee zaken een rol: de exhalatiesnelheid E_{Rn220} ($\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$) vanuit de wand en de (turbulente) diffusie met diffusiecoëfficiënt D ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) in de lucht. Door Katase et al. is die als volgt uit de diffusievergelijking afgeleid [16]:

$$C_{Rn220}(z) = \frac{E_{Rn220}}{\sqrt{\lambda_{Rn220} \cdot D}} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\lambda_{Rn220}}{D}} z\right) \quad 3-1$$

waarbij λ_{Rn220} (s^{-1}) de vervalconstante van thoron is en z (m) de afstand tot de wand.

Omdat zowel de exhalatie als de (turbulente) diffusie onbekend zijn, kunnen deze met twee metingen op verschillende afstanden van het wandoppervlak worden geschat. Omdat de concentratie snel afneemt met de afstand tot de wand (bij alleen diffusie een halvering iedere 2 cm) moeten beide metingen wel nabij die wand zijn om toch nog resultaten met enige nauwkeurigheid te verkrijgen. Een voorbeeld kan dit verduidelijken. Stel een voor een betonnen wand representatief exhalatietempo van $0,03 \text{ Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ voor thoron [9]. Met een diffusiecoëfficiënt van $10^{-5} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ levert dit dan een concentratie van ongeveer 60 Bq m^{-3} op 1 cm van de muur. Iedere 2 cm verder weg halveert die concentratie. Om die reden is gekozen voor twee detectoren op afstanden 1 en 5 cm van de wand. Op 5 cm afstand zou in het voorbeeld de concentratie nog slechts 15 Bq m^{-3} bedragen. Bij de gekozen afstanden zouden onder normale omstandigheden de concentraties thoron nog goed te meten moeten zijn, ook als er sprake is van enige turbulentie waardoor de concentratie nog iets lager zou kunnen uitvallen.

4 Resultaten

4.1 Dynamisch meten

4.1.1 Thoron

Om een eerste indruk te krijgen of thoron een rol speelt bij de blootstelling in een woning, is in een kleine steekproef van woningen op een aantal plaatsen nabij muren en plafonds gemeten met de RAD-7. Bij de metingen met de RAD-7 is gebruikgemaakt van het zogenaamde thoronprotocol [17].

Het instrument zuigt ongeveer 1 liter lucht per minuut aan. Gezien de concentratieverdeling van thoron nabij een muur (bij alleen diffusie een afname met 50% binnen enkele centimeters) beïnvloedt deze aanzuiging het te meten luchtmonster. De resultaten zijn dan ook slechts een indicatie van de ter plaatse aanwezige concentratie.

Bij een 'normale' betonnen muur (met een gemiddelde concentratie van radionucliden uit de uranium- en thoriumreeksen) zal een thoronconcentratie in de eerste centimeters aanwezig zijn van gemiddeld enkele tientallen Bq m^{-3} . Omdat een beperkt volume wordt aangezogen in de meettijd (5 min., oftewel 5 L) bij het standaard thoronprotocol, zal deze concentratie in werkelijkheid ergens tussen 0 en 137 (curie gerelateerde eenheid) Bq m^{-3} liggen (de enkele passerende α 's worden wel of niet gemeten). Nauwkeuriger meetresultaten zijn mogelijk met een langere meettijd. Gezien de beïnvloeding van het meetvolume en de aanwezige turbulentie, blijven het echter indicaties van de werkelijke concentratie, zogenaamde snuffelmetingen. In Tabel 1 zijn van de metingen die zijn uitgevoerd in de woningen in de pilotsteekproef de meetresultaten weergegeven. Als de concentratie enkele honderden Bq m^{-3} (oranje) bedraagt, is er sprake van een verhoging en bij concentraties in de buurt van de duizend Bq m^{-3} (rood) van een aanzienlijke verhoging.

Tabel 1 Thoronconcentratie (Bq m^{-3}) volgens thoronprotocol gemeten met RAD7 (geel is grens normale waarden, oranje is verhoogd en rood is aanzienlijk verhoogd)

Woning	Meting 1	Meting 2	Meting 3	Meting 4	Meting 5	Meting 6	Meting 7
W1	0	0	68	68	0		
W2	1370	960	552	478	137	0	
W3	341	205	0	0			
W4	273	409	69	137			
W5	0	0	69	0			
W6	0	0	68				
W7	137	0	0	0	0		
W8	205	137	0	0			
W9	0	68					
W10	0	68	68	0			
W11	0	68	0	0			
W12	0	0	0				
W13	0	0	0	0	68		
W14	68	0	68	137	0	0	68

Het relatief grote aantal verhoogde thoronconcentratiemetingen was, gezien de beperkte steekproef wel enigszins verrassend. Voor het meten met passieve thorondetectoren is een selectie van de veertien genoemde woningen gebruikt (aangegeven met een sterretje in Tabel 1). Bij deze selectie is uitgegaan van een breed spectrum aan concentraties om een beeld te krijgen van het functioneren van deze passieve methode onder verschillende omstandigheden, zoals die in een survey te verwachten zijn.

4.1.2 Thoronvervalproducten

Naast de snuffelmetingen is in een beperkt aantal woningen de vervalproduct-concentratie gemeten in de woonkamer door met een pomp lucht over een filter te bemonsteren. Deze filters zijn vervolgens op het RIVM gammaspectrometrisch geanalyseerd (zie 3.2.2). De metingen zijn uitgevoerd op enige afstand van een muur of van enig ander bouw materiaal, zodat invloed van eventuele processen nabij een wand geen invloed hebben op de meting (zie Tabel 2).

Tabel 2 Bemonsteringsdatum en minimale en maximale afstand tot muur ($Z_{\min}$ en $Z_{\max}$) en de gemeten ^{212}Pb ^{#)} concentratie, gecorrigeerd naar de activiteit aan het eind van de bemonstering

	Datum	$Z_{\min}$ (m)	$Z_{\max}$ (m)	^{212}Pb (Bq m ⁻³)
W2	10/2/11	0,9	3,5	1,44 ± 0,07
	26/10/11			1,06 ± 0,06
W4	27/1/11	1,0	1,5	0,249 ± 0,018
	28/10/11			0,80 ± 0,05
W6	18/1/11	1,3	8,0	0,147 ± 0,011
W8	25/1/11	1,7	4,6	0,63 ± 0,04
	27/10/11			1,61 ± 0,09

^{#)} ^{212}Pb is van dezelfde orde van grootte als de EE(T)C (zie vergelijking 2-4)

Voordeel van deze meetmethode is de nauwkeurigheid en de snelheid waarmee een resultaat beschikbaar is. Het is daarmee een belangrijk hulpmiddel voor het op korte termijn testen van eventuele maatregelen of de invloed van verschillende parameters zoals ventilatie, turbulentie en dergelijke. Een belangrijk nadeel is ook in Tabel 2 te zien: de gemeten concentratie kan in de tijd sterk variëren en geeft dus geen representatief beeld van de jaargemiddelde concentratie en daarmee de dosis voor de bewoner. De metingen bevestigen overigens de eerdere metingen met de RAD-7 wat betreft de verhoging.

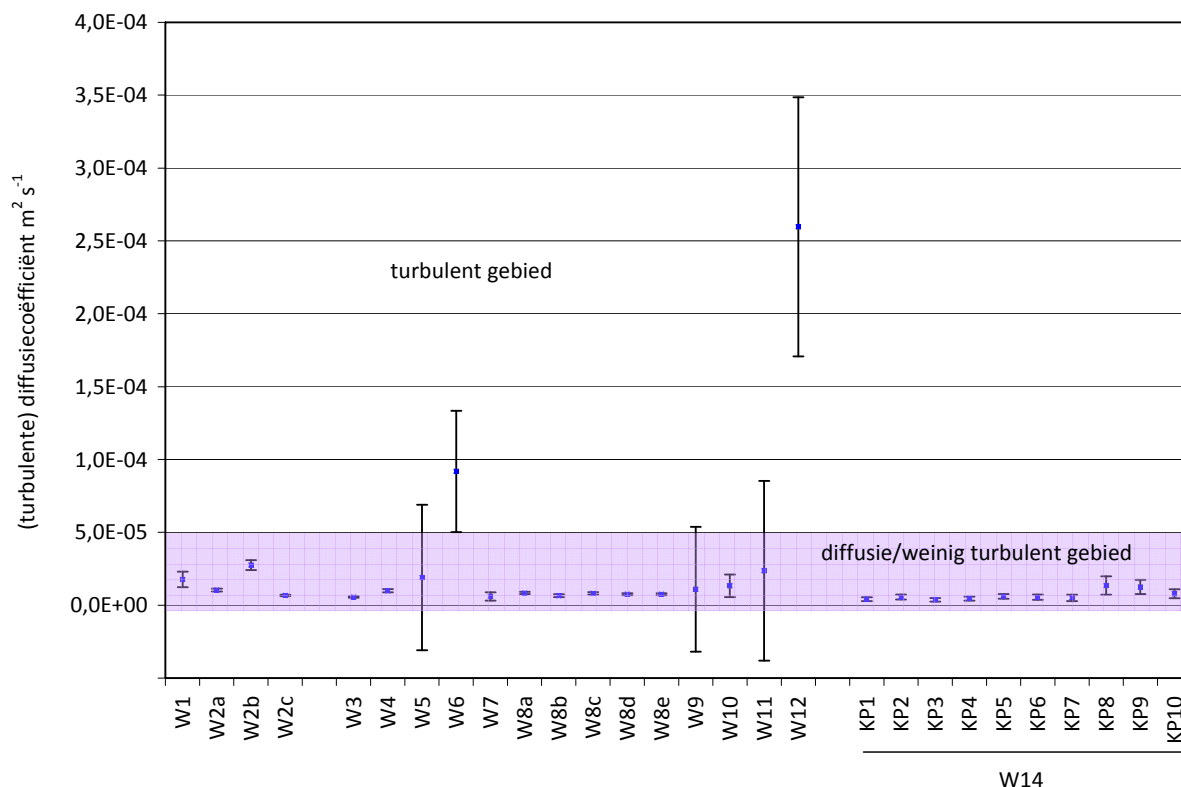
4.2 Passief meten

4.2.1 Thoron

Voor het meten van thoron nabij de muur, in feite de grootste bron van thoron in de meeste woonkamers, is een set van detectoren gebruikt (zie Figuur 5). Omdat zowel de exhalatie als de (turbulente) diffusie onbekend zijn, kunnen deze met twee metingen (zie Figuur 6) op verschillende afstanden van het wandoppervlak worden geschat (zie Figuur 9 en Figuur 10). De detectoren hebben gemiddeld 8,5 maanden ter plaatse gehangen.

Op een enkele uitzondering na zijn de in het pilotonderzoek bepaalde diffusiecoëfficiënten voor het merendeel door pure diffusie (circa $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) bepaald en slechts in beperkte mate door turbulentie. De exhalatie loopt echter

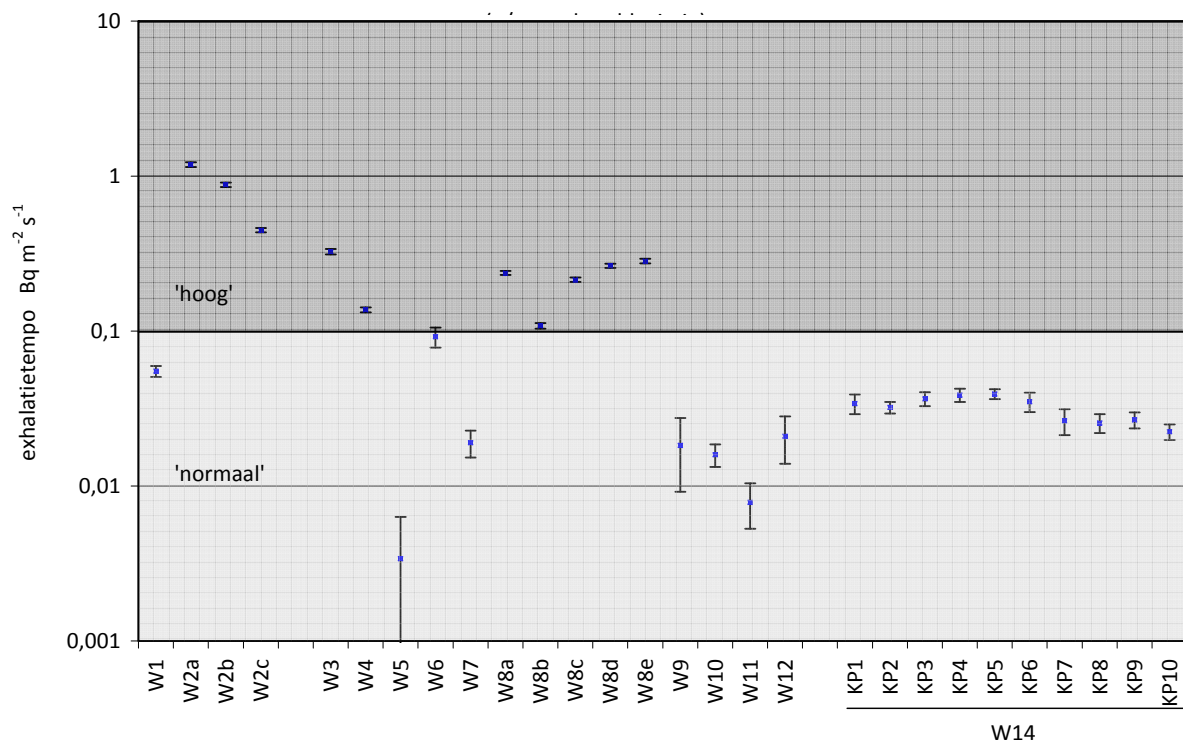
sterk uiteen en is zoals verwacht sterk afhankelijk van het type bouw materiaal en/of afwerkingsmateriaal van de wand waarvoor de meting plaatsvindt.



Figuur 9 (Turbulente) diffusiecoëfficiënt zoals bepaald met de dubbele thoron-meting van Gammadata (GD) op verschillende meetpunten (a, b, c enzovoort) in verschillende woningen (Wx) en keldermeetpunten (KPx) in woning 14. De grootte van de fout wordt enerzijds bepaald door de onzekerheid in de afzonderlijke concentratiemetingen en die zijn soms aanzienlijk bij lage concentraties en anderzijds door het feit dat de diffusiecoëfficiënt wordt bepaald met twee concentratiemetingen (zie Figuur 6)

Bij normale exhalatie, dat wil zeggen exhalatie vanuit een bouw materiaal waarin gemiddelde concentraties van de moedernucliden van thoron worden aangetroffen, is een mediaan exhalatietempo van circa $0,045 \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ te verwachten [9]. De meetresultaten laten exhalatietempi zien die tot een factor 30 keer zo hoog zijn. Dit geldt vooral voor de woningen 2, 3, 4 en 8, niet toevallig dezelfde als waarvoor de eerder besproken snuffelmetingen ook al de verhogingen te zien gaven. Van W2 is bekend dat het toegepaste afwerkingsmateriaal concentraties thorium bevat die meer dan een factor 10 boven die van regulier bouw materiaal liggen [4].

De 'keldermetingen' (KP1-10) laten zien dat de herhaalbaarheid van concentratiemetingen, maar ook exhalatie- en diffusiebepalingen goed is (zie Figuur 9 en Figuur 10). Deze metingen vonden plaats nabij een betonnen muur in een beperkt geventileerde ruimte.

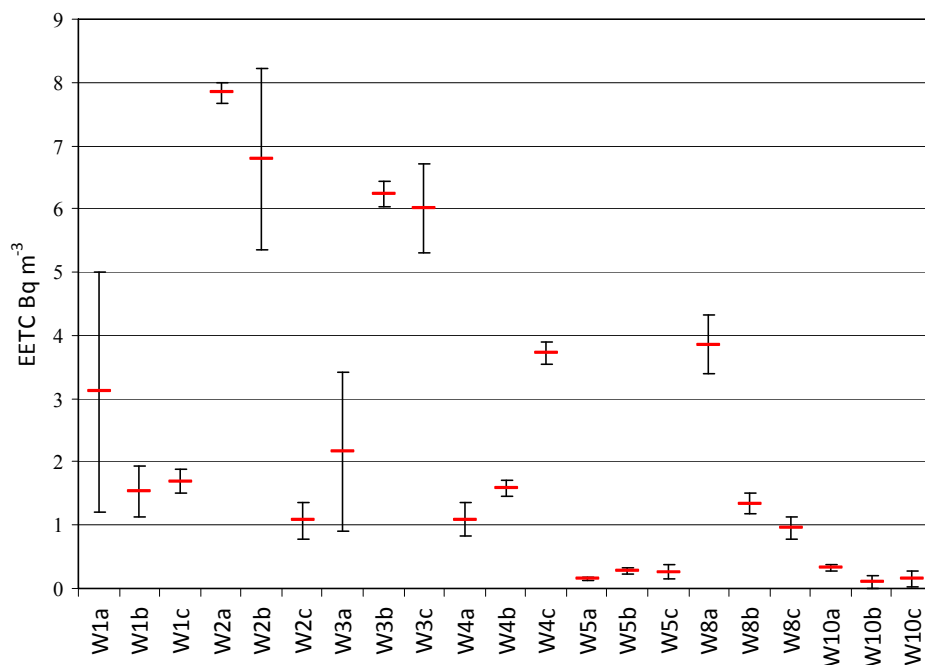


Figuur 10 Exhalatietempo zoals bepaald met de dubbele thoronmeting van GD op verschillende meetpunten (a, b, c enzovoort) in verschillende woningen (Wx) en keldermeetpunten (KPx) in woning 14. De grootte van de fout wordt enerzijds bepaald door de onzekerheid in de afzonderlijke concentratiemetingen en die zijn soms aanzienlijk bij lage concentraties en anderzijds door het feit dat het exhalatietempo wordt bepaald met twee concentratiemetingen (zie Figuur 6)

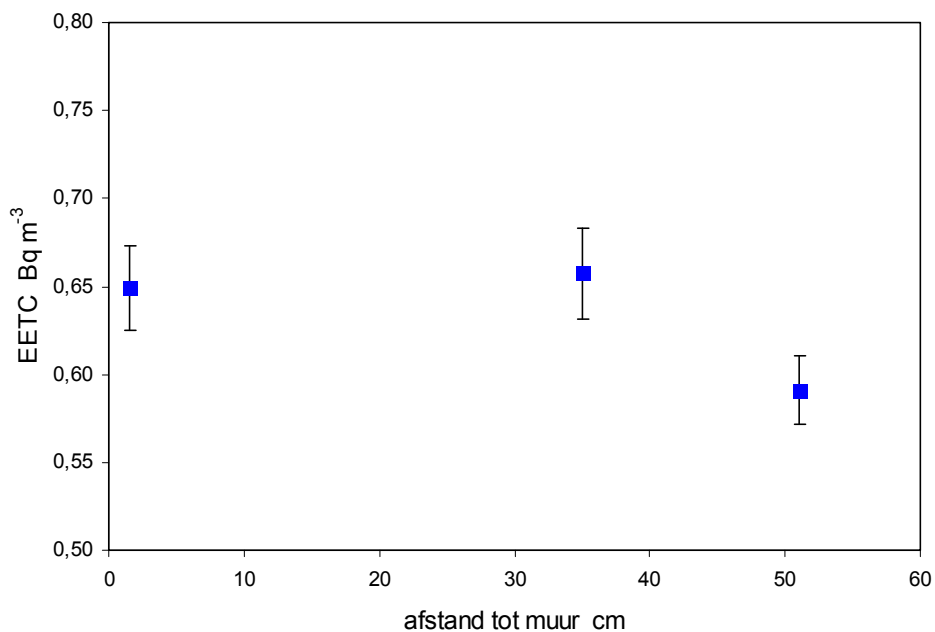
4.2.2 Thoronvervalproducten

Gedurende ruim drie maanden hebben de Japanse thoronvervalproductdetectors in zeven woningen op drie locaties per woning gehangen, deels op de plaats van de eerdere Gammadata-detectors (voor het meten van radon en thoron), soms in andere ruimten. In Figuur 11 zijn de resultaten van die metingen weergegeven. Volgens verwachting zijn de concentraties weer laag in de woningen waar ook al weinig thoron werd gemeten en hoog waar juist veel thoron werd gemeten. De waarden zijn hoger dan de eerdere dynamische metingen te zien gaven, die natuurlijk, inherent aan de methode, een momentopname gaven waar de huidige metingen een gemiddelde over ongeveer drie maanden betreffen.

Met een dertigtal detectoren is vastgesteld dat de afstand van de meting tot de wand geen aanzienlijke invloed ($\pm 4\%$) heeft op het resultaat (zie Figuur 12). Metingen van de vervalproductconcentratie kunnen dus zowel nabij een wand als op grotere afstand in een woonkamer plaatsvinden.

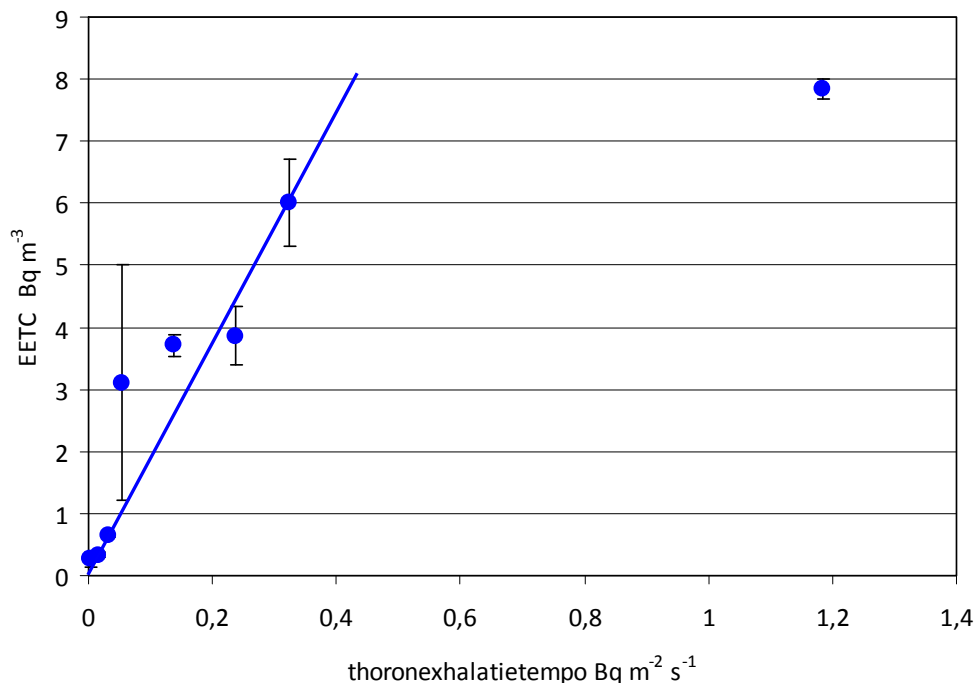


Figuur 11 De EETC (Bq m^{-3}) zoals gemeten met de Japanse vervalproduct-detectors in de verschillende woningen Wx uit de steekproef. De verticale balk geeft de gemeten fout per meting



Figuur 12 De EETC (Bq m^{-3}) zoals gemeten met de Japanse vervalproduct-detectors in de kelder van W14, op verschillende afstanden van de muur

Wanneer de EETC wordt uitgezet tegen de exhalatiesnelheid, zoals gemeten met de thorondetectoren (zie Figuur 10) dan komt er een veel overzichtelijker beeld (zie Figuur 13) dan in Figuur 11.



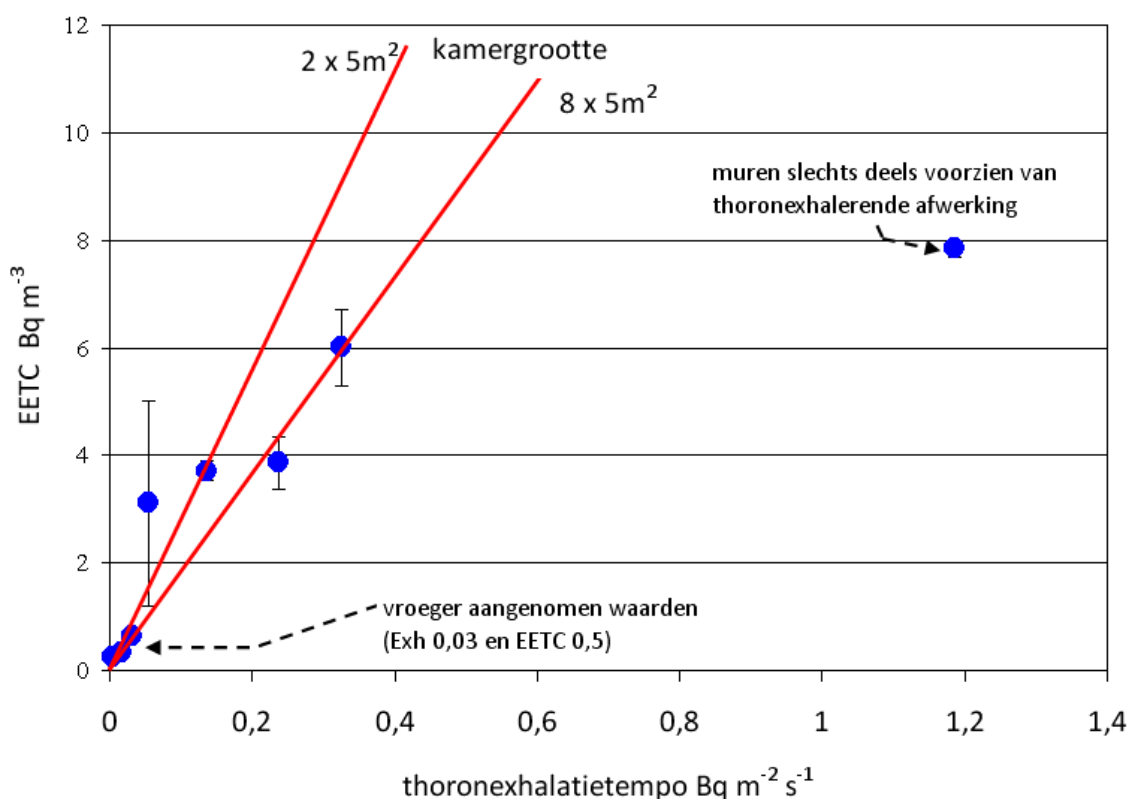
Figuur 13 EETC als functie van de thoronexhalatiesnelheid. De lijn geeft een lineair verband door de oorsprong (geen exhalatie dan EETC=0)

De blauwe lijn geeft een lineair verband. De relatief grote afwijking hiervan voor het meetpunt bij $1,2 \text{ Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ wordt veroorzaakt door het feit dat in dat geval slechts een (klein) deel van de aanwezige muur is voorzien van afwerkingsmateriaal waaruit een verhoogde thoronexhalatie plaatsvindt. De exhalatie is daar dus wel hoog, maar de EETC in de aangrenzende ruimte wordt mede door andere wanden bepaald en is dan ook lager dan op basis van dat ene stuk muur alleen. De overige ruimten zijn alle redelijk homogeen wat wand(bedekking) betreft.

4.3

Vergelijking van metingen van thoron en thoronvervalproducten

Op basis van een simpele berekening (zie 4.4.4) kan een schatting gemaakt worden van de thoronvervalproductconcentratie EETC als functie van de thoronexhalatie uit de bouwmaterialen die een ruimte, bijvoorbeeld een woonkamer, omgeven. Door het berekenen van het totale oppervlak aan exhalerende wanden of plafonds en vermenigvuldiging met het exhalatietempo, deling door het volume en vermenigvuldiging met $1/\lambda$ (voor de evenwichtsconcentratie) en vermenigvuldiging met de 'evenwichtsfactor' (gemeten vervalproductconcentratie EETC gedeeld door berekende volumieke thoronconcentratie $f \approx 0,15$) wordt de vervalproductconcentratie geschat. In Figuur 14 is dit gedaan voor twee ruimten: één van $2 \times 5 \text{ m}^2$ (een kleine ruimte, bijvoorbeeld een keuken) en één van $8 \times 5 \text{ m}^2$ (bijvoorbeeld een woonkamer), beide 2,5 m hoog. De bemeten ruimten vallen alle in dit bereik.



Figuur 14 EETC als functie van de thoronexhalatie met (theoretische) resultaten voor twee standaard ruimten; tevens is aangegeven van welke waarden voor beide tot voor kort vanuit werd gegaan; de twee hoge waarden voor een exhalatie onder $0,2 \text{ Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ zijn van een keuken en kleine kamer en twee andere hoge waarden tussen $0,2$ en $0,4 \text{ Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ van twee grote kamers; voor de hoogste waarde (bij $1,2 \text{ Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$) zie alinea onder Figuur 13

Beide typen uitkomsten (thoronexhalatie en EETC) zijn redelijk met elkaar in overeenstemming of wijken daar om begrijpelijke redenen vanaf (slechts gedeeltelijke toepassing van thoron exhalerend afwerkingsmateriaal). In ieder geval geeft het een redelijk vertrouwen voor het toepassen van de 'nieuwe' Japanse *progeny* detectoren in de volgende survey. Omdat woonruimten van elkaar verschillen, zal de omrekening van thoronexhalatie naar thoronvervalproducten of EETC daarvan afhankelijk zijn. Het direct meten van de vervalproducten heeft dan ook verreweg de voorkeur.

4.4 Conversie van thoron naar thoronvervalproducten

Voor het schatten van de dosis bij de mens door blootstelling aan thoron moet uitgaande van een woonkamer en de samenstellende bouwmaterialen een berekening gemaakt worden van:

- de thoronexhalatie;
- de verspreiding van thoron in de ruimte, inclusief ventilatie met (buiten)lucht;
- het verval van thoron naar de vervalproducten (^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi en ^{212}Po);
- de hechting (attachment) van de vervalproducten aan stofdeeltjes en oppervlakken;
- de inhalatie van vervalproducten door de mens;
- de dosis door deze producten in de longen.

4.4.1 *Conversies van thoron naar EETC*

Voor de modellering van thoron en vervalproducten en de EETC (evenwichtsequivalente thoronconcentratie) zijn in de loop der tijd diverse methoden toegepast. Voorbeelden zijn: compartimentmodellen [18], 1- en 2-dimensionale analytische beschrijvingen [16, 19] en een relatief nieuwe is de zogenaamde CFD (Computational Fluid Dynamics) benadering [20]. Deze laatste is ook recent nog toegepast door NRG voor Nederland [21]. Verder zijn er in de praktijk ontwikkelde vuistregels ook wel conversieregels genoemd [22].

Omdat veel van de informatie die benodigd is voor een (complex) model in niet-laboratorium omstandigheden, zoals een survey, niet beschikbaar is, wordt hier iets nader ingegaan op de conversieregels uit referentie [22].

4.4.2 *EETC op basis van thoronexhalatie*

Op basis van experimentele gegevens kan de EETC bepaald worden met:

$$EETC = 3,35 \times E_{Rn-220} \times S / V \quad 4-1$$

waarbij E_{Rn-220} de thoronexhalatie is vanuit de wanden van de betreffende ruimte, S het oppervlak van die wanden en V het volume van de ruimte.

Het exhalatietempo van thoron kan bepaald worden met de 'galgjesmeting' van Gammadata (GD) (zie 3.4.2). Op basis van alleen een dubbele thoronmeting is dan een schatting te maken van de vervalproductconcentratie (zie onder **Conv 1** in Tabel 3). De zo gevonden waarden blijken vooral bij één woonlocatie hoger dan de gemeten waarden. Dit wordt zeer waarschijnlijk veroorzaakt door de daar slechts deels toegepaste afwerkingslaag met een verhoogde thoron exhalatie. Over het algemeen levert deze methode echter een te lage schatting van de EETC op (zie ook Figuur 15).

4.4.3 *Thoronexhalatie op basis van thoronconcentratie op 50 cm van muur*

Op basis van experimentele gegevens blijkt dat de thoronconcentratie op circa 50 cm van een wand iets zegt over het exhalatietempo van thoron met:

$$E_{Rn-220} = 0,0174 \times CTn-50 \quad 4-2$$

waarbij $CTn-50$ de thoronconcentratie op 50 cm van de betreffende wand is.

In een eerder onderzoek [4] is de thoronconcentratie op onder andere 50 cm van de muur gemeten met Raduetectoren (zie resultaten van deze conversie onder **Conv 2** in Tabel 3). De op 50 cm van een wand gemeten thoronconcentratie is onder normale omstandigheden (geen verhoogde thoronexhalatie) echter dusdanig laag en daarmee onzeker, dat een afleiding van het exhalatietempo ook grote onzekerheid met zich mee zal brengen. Dit lijkt voor het schatten van de thoronexhalatie dan ook geen optie.

4.4.4 *EETC als functie van ruimtegemiddelde thoronconcentratie*

Op basis van de thoronexhalatie en het totale oppervlak van exhalerende wanden kan een totale thoronbronterm voor een ruimte worden vastgesteld. Met een evenwichtsfactor van 0,15 (best fit) kan hieruit een EETC worden bepaald (zie onder **Conv 3** in Tabel 3). Deze methode geeft een redelijke benadering van de gemeten EETC. Het enige meetpunt dat hier sterk van afwijkt, is het meetpunt bij een muur waarop slechts deels een afwerkingsmateriaal is aangebracht dat sterk thoron exhalerend is. Deze laatste conversiemethode lijkt een goede kandidaat voor het schatten van de thoron-> EETC conversie.

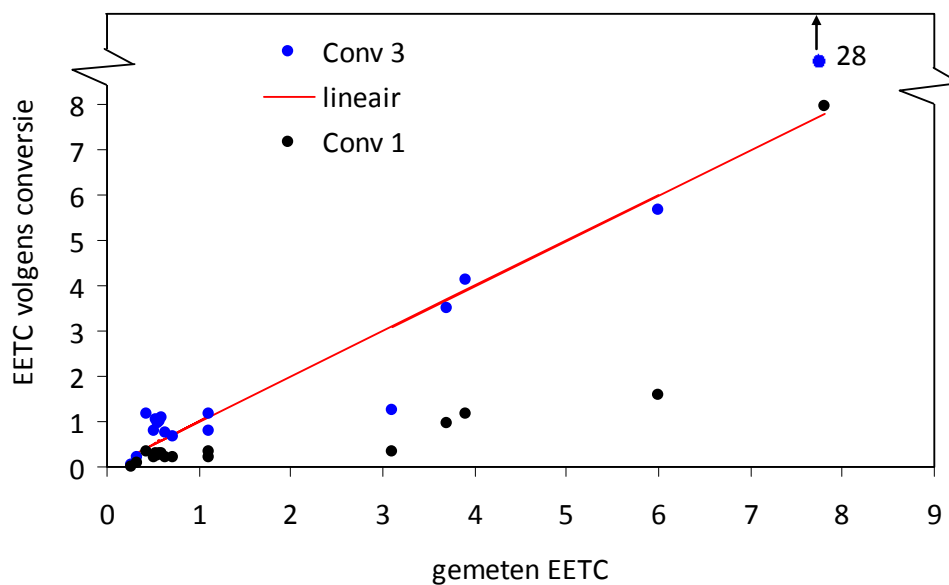
Tabel 3 Meet- en conversiegegevens voor de drie genoemde conversiemethoden aangevuld met meetgegevens

	Exhalatie GD-galgjes	Oppervlak *	Volume *	Conv 1			²²⁰ Rn _{50cm} Radnet meting [§]	Conv 2 Exhalatie $\bar{E}_{Rn-220}$	Conv 3 EETC
				EETC	²¹² Pb filter	EETC Jap.progeny defectoren			
	Bq m ⁻² s ⁻¹	m ²	m ³	Bq m ⁻³	Bq m ⁻³	Bq m ⁻³	Bq m ⁻³	Bq m ⁻² s ⁻¹	Bq m ⁻³
W1a	5,5E-02	70	37,5	0,34		3,1			1,23
W2a	1,2E+00	62,5	31,25	7,94	1,44	7,8			28,44
W2b	8,8E-01	62,5	31,25	5,89	1,44				21,10
W3c	3,3E-01	145	100	1,58		6,0			5,66
W4c	1,4E-01	48	22,5	0,98	0,249	3,7			3,51
W5c	3,4E-03	145	100	0,017		0,26			0,06
W6	9,2E-02	145	100	0,45	0,147				1,60
W8a	2,4E-01	145	100	1,15	0,63	3,9			4,12
W8b	1,1E-01	145	100	0,52	0,63				1,88
W8c	2,1E-01	145	100	1,04	0,63				3,72
W8d	2,6E-01	145	100	1,28	0,63				4,59
W8e	2,8E-01	145	100	1,37	0,63				4,92
W10	1,6E-02	150	125	0,06		0,33			0,23
KP1	3,4E-02	40	16	0,28		0,58	3,4	5,9E-02	1,02
KP2	3,2E-02	40	16	0,27		0,56	3,4	5,9E-02	0,96
KP3	3,7E-02	40	16	0,31		0,60	3,4	5,9E-02	1,10
KP4	3,9E-02	40	16	0,32		1,11	3,4	5,9E-02	1,16
KP5	3,9E-02	40	16	0,33		0,43	3,4	5,9E-02	1,18
KP6	3,5E-02	40	16	0,29		0,53	3,4	5,9E-02	1,05
KP7	2,6E-02	40	16	0,22		0,52	3,4	5,9E-02	0,79
KP8	2,6E-02	40	16	0,21		0,63	3,4	5,9E-02	0,77
KP9	2,7E-02	40	16	0,22		1,11	3,4	5,9E-02	0,80
KP10	2,2E-02	40	16	0,19		0,71	3,4	5,9E-02	0,67

* Geschatte afmetingen

[§] De thoronconcentraties op 50 cm zijn zeer onzeker (standaarddeviatie circa 5 Bq m⁻³), zie [4]

Uit de combinatie van beide typen metingen (thoron en vervalproducten van thoron) is het via deze handreiking ook mogelijk om na te gaan of een representatieve thoronmeting is uitgevoerd, of dat er sprake is van andere materialen die veel meer of juist minder thoron exhaleren.



Figuur 15 Resultaten van twee conversies thoron->EETC uitgezet tegen de gemeten EETC (japanse vervalproduct detectoren); rode lijn geeft conversie = gemeten

5 Dosis door thoron(verval)producten

Voor de doses en risico's door blootstelling van de bevolking aan radon, en dan specifiek de isotopen ^{222}Rn en ^{220}Rn , is het niet voldoende om de concentraties daarvan te kennen. Het voert te ver voor dit rapport om volledig inzicht te verschaffen in de dosimetrie en epidemiologie rond dit onderwerp. Wel is het van belang enkele ontwikkelingen op dosisgebied te onderkennen, omdat deze verschillende gevolgen hebben voor beide isotopen, en daarmee de vergelijkbaarheid (het onder één noemer brengen van beide) beïnvloeden.

Het ICRP heeft in 1990 (ICRP 60 [23]) aanbevelingen uitgebracht die de jaren erna zijn verwerkt in specifieke publicaties, onder meer met betrekking tot radon. Het zijn deze aanbevelingen die nog steeds verankerd zijn in Nederlandse wetgeving. Het is echter niet zo dat de wetenschap stilstaat. Veelal lopen de wetenschappelijke resultaten en aanbevelingen jaren vóór op de daadwerkelijke implementatie in Europese en nationale wetgeving. Zo zijn in 2007 nieuwe aanbevelingen uitgevaardigd, in het document ICRP 103 [24].

Voor radon geldt dat er een jarenlange controverse is geweest tussen de epidemiologische en dosimetrische aanpak. In ICRP 65 [25] werd een dosiswaarde van 6 nSv h^{-1} per Bq m^{-3} EEC Radon gegeven op basis van epidemiologische gegevens, in ICRP 66 [26] een waarde van 15 nSv h^{-1} per Bq m^{-3} .

UNSCEAR kwam in 2000 [27] met een waarde van 9 nSv h^{-1} per Bq m^{-3} , gebaseerd op (verouderde) dosimetrische studies. Nieuwe studies gaven hogere waarden aan ($\sim 15 \text{ nSv h}^{-1}$ per Bq m^{-3}). Echter, omdat epidemiologische studies een waarde van 6 nSv h^{-1} per Bq m^{-3} gaven, heeft UNSCEAR toen de waarde van 9 nSv h^{-1} per Bq m^{-3} EEC aangehouden.

In een artikel van Marsh [28] worden ook epidemiologische en dosimetrische resultaten vergeleken. Nieuwe epidemiologische studies wijzen in de richting van 10-20 mSv/WLM (WLM= working level month, een maat van blootstelling aan radon en radonvervalproducten, zie bijvoorbeeld [25]) en resultaten van dosimetrische studies variëren van 6 tot 20 mSv/WLM. Er is niet meer een duidelijk gat tussen epidemiologische en dosimetrische resultaten. Hierom wordt door ICRP nu overgestapt naar de dosimetrische benadering op basis van het HRTM (nieuwe longmodel), zoals dat voor de meeste andere radioactieve nucliden ook al het geval is. In hun recente Statement on Radon [36] wordt nu een typische waarde gehanteerd van 13 mSv/WLM, hetgeen overeenkomt met een dosisconversiecoëfficiënt (DCC) van ruim 20 nSv h^{-1} per Bq m^{-3} .

Dit betekent dat de stralingsbelasting door het isotoop radon ^{222}Rn in Nederland verandert van $0,39 \text{ mSv a}^{-1}$ naar **$0,87 \text{ mSv a}^{-1}$** (uitgaande van de recente VERA-resultaten voor ^{222}Rn en een verblijf binnenshuis gedurende 90% van de tijd).

Voor thoron is in UNSCEAR 2006 nog een DCC van 40 nSv h^{-1} per Bq m^{-3} EETC bevestigd [29]. In onderzoek van de afgelopen jaren zijn nieuwe inzichten over de effecten van straling op de longen verwerkt in bestaande modellen, zoals in de artikelen van Ishikawa, Tokonami en Nemeth [30] en Kendall en Philips [31]. Hieruit blijkt eerder een DCC van ongeveer 116 nSv h^{-1} per Bq m^{-3} . In het

recente Statement on Radon van de ICRP is deze zienswijze overgenomen voor thoron.

Met deze waarde voor de DCC van thoron betekent dit dat de stralingsbelasting door thoron in Nederland geschat kan worden op **0,46 mSv a⁻¹** in plaats van 0,16 mSv a⁻¹ (uitgaande van de tot voor kort gehanteerde concentratie van thoron en een verblijf binnenshuis gedurende 90% van de tijd).

Radon en thoron zouden dan samen op 1,33 mSv a⁻¹ uitkomen. De totale gemiddelde individuele stralingsbelasting in Nederland gaat dan van 2,4 naar 3,2 mSv a⁻¹.

Indien in woningen een EETC van 1 Bq m⁻³ kan worden gemeten (waar nu 0,5 Bq m⁻³ als gemiddelde voor Nederland wordt aangenomen), hetgeen gezien de gemeten concentraties in het pilotonderzoek niet onwaarschijnlijk is, dan is dus de dosisbijdrage van thoron reeds groter dan de bijdrage die gemiddeld door radon wordt veroorzaakt.

6 Conclusies

6.1 Meetmethode

Een nieuwe survey is gericht op het verkrijgen van een beeld van de dosis voor de bevolking door de blootstelling aan radon en thoron. Voor het uitvoeren van een dergelijke survey moet gebruikgemaakt worden van detectoren die aan een aantal criteria voldoen:

- De meetresultaten moeten representatief zijn.
- De meetresultaten moeten robuust zijn, dat wil zeggen zo min mogelijk afhankelijk van omgevingsfactoren of locatie.
- Gezien de omvang van een survey moeten de metingen goedkoop zijn.
- Gezien de omvang van een survey zou het plaatsen liefst door de bewoner dienen te gebeuren.

Ten behoeve van representativiteit voor de situatie in Nederland dient een survey ten minste enkele duizenden metingen te omvatten die gezien seizoensinvloeden gedurende een jaar moeten plaatsvinden. Voor het meten van radon is in de vorige survey goede ervaring opgedaan met de Gammadatadetectoren die aan de bovengenoemde criteria voldoen. Voor thoron waren tot voor kort alleen (goedkope) metingen beschikbaar van het gas zelf. De dosis wordt echter voornamelijk bepaald door de kortlevende vervalproducten. De afleiding van deze concentraties uit de thoronconcentratie is om een groot aantal redenen complex en in ieder geval onzeker. Het kunnen meten van de vervalproducten is dan ook een grote stap vooruit. De ervaringen die in het hier beschreven onderzoek zijn opgedaan met de Japanse vervalproductdetectoren en de ervaringen die in Ierland zijn opgedaan door McLaughlin [32, 33, 34] geven vertrouwen in deze nieuwe meettechniek.

Als de thoronvervalproductconcentratie wordt gemeten, zegt dat alleen in algemene termen iets over de thoronproductie in een ruimte, of dit nu een woonkamer of een andere ruimte is. Om een beter inzicht te krijgen in deze 'bronterm', is het meten van thoron en dan vooral de exhalatie met de hier beschreven 'galgjes' van Gammadata een oplossing. Deze meetapparatuur dient echter met meer zorg te worden geplaatst dan de Japanse detectoren. Daarnaast zijn de meetresultaten specifiek voor de wand waarop de detectoren zijn aangebracht. In het geval van het testen van woningen of specifieke bouwmaterialen op de aanwezigheid van verhoogde thoronexhalatie is het gebruik van een apparaat als de RAD-7 een zeer geschikte optie.

6.2 Meetresultaten

In het hier beschreven onderzoek is slechts sprake geweest van een zeer beperkte steekproef. Toch is het aantal woningen (circa 50%) waarin (sterk) verhoogde thoron- en thoronvervalproductconcentraties werden aangetroffen, onverwacht groot. Beide kwamen diverse keren tot circa tienmaal zo hoge waarden als voorheen aangenomen. De verwachting is dan ook dat dergelijke verhogingen relatief veel zouden kunnen optreden in een deel van het woningbestand. In de nieuwe survey zal dit natuurlijk duidelijker moeten worden.

De resultaten van de RAD-7 zijn meer indicatief gebleken. Dit is eenvoudig te verklaren door het feit dat het meetinstrument door zijn werking (aanzuigen van lucht naar het detectorvolume) direct de concentratie van thoron op de

meetlocatie beïnvloedt. Toch is dit een geschikt apparaat gebleken voor het snel identificeren van 'probleem'situaties (snuffelmethode), of het kunnen uitsluiten daarvan.

6.3 Conversies en modellering

Naast het direct meten van de thoronvervalproductconcentratie kan natuurlijk ook de thoronexhalatie vanuit de verschillende wanden en andere oppervlakken, die een ruimte omgeven, worden afgeleid. Er is dan een vrij complex model nodig om deze meetresultaten om te rekenen naar de vervalproductconcentratie en uiteindelijk de dosis (zie bijvoorbeeld [21]). Een deel van de benodigde parameters is onzeker of zelfs geheel onbekend. Op basis van de praktijk zijn wel diverse vuistregels gepubliceerd waarmee deze conversie kan worden benaderd. De vuistregel die het best lijkt te werken, bevat slechts enkele parameters, namelijk: de evenwichtsfactor (f), de vervalconstante van thoron (λ), het exhalatietempo (E_{Rn-220}), het volume van de meetruimte (V) en het oppervlak van de thoron exhalerende wanden (S), zie 4.4.2:

$$EETC = f / \lambda \times E_{Rn-220} \times S / V \quad 6-1$$

Ook hier is voorzichtigheid geboden, want het exhalatietempo hoeft natuurlijk niet gelijk te zijn voor alle oppervlakken. Tevens kunnen bijvoorbeeld ventilatie en afwijkende stofconcentraties hun invloed hebben. Als vuistregel kan dit echter een eerste-orde benadering geven en geeft een evenwichtsfactor van 0,15 het beste resultaat. Deze waarde is relatief hoog, maar is voor een laag ventilatievoud van minder dan $0,5 \text{ h}^{-1}$ zeer wel mogelijk [35].

6.4 Dosis

Tot voor kort werd, op basis van UNSCEAR-getallen, aangenomen dat de EETC van de orde van $0,5 \text{ Bq m}^{-3}$ was. Bij een constante concentratie in het binnenmilieu leverde dit een jaardosis voor leden van de bevolking op van circa $0,16 \text{ mSv}$. Uit de resultaten die in dit onderzoek beschikbaar zijn gekomen, volgt dat deze dosis ook een factor 10 keer zo hoog zou kunnen uitvallen. Het lijkt waarschijnlijk, gezien de (beperkte) steekproef, dat dit zelfs niet uitzonderlijk is. Hiermee zou de dosis door thoron en vervalproducten in dergelijke situaties aanzienlijk groter zijn dan die door radon. Daarbij moet worden opgemerkt dat, in tegenstelling tot wat het geval is bij radon, de bijdrage door thoron aanzienlijk beter reguleerbaar is door keuze in afwerkingsmateriaal op wanden en plafonds.

Behalve de wijzigingen in de dosis bij de blootstelling aan radon en thoron zijn er ook wetenschappelijke aanwijzingen voor een gewijzigde dosisconversie-coëfficiënt (DCC) voor zowel radon als thoron. Volgens een recent beleidsstandpunt van de ICRP [36] zal de DCC voor radon circa 100% hoger uitvallen dan tot op heden gehanteerd in Nederland en zal de DCC voor thoron zelfs meer dan 100% hoger worden. De belangrijkste verschuiving voor beide DCC's is de trend naar een hogere dosis op epidemiologische gronden, waardoor de epidemiologische en dosimetrische benadering meer met elkaar vergelijkbaar zijn geworden.

7 Literatuur

- [1] Put LW, Veldhuizen A, De Meijer RJ – Radonconcentraties in Nederland, Verslag van SAWORA – project A2, rapport KVI-111i, Groningen (1985)
- [2] Stoop P, Glastra P, Hiemstra Y, De Vries L, Lembrechts J – Results of the second Dutch national survey on radon in dwellings, RIVM Report 610058006, Bilthoven (1998)
- [3] Blaauboer RO, Dekkers SAJ, Slaper H, Bader S - Stralingsbelasting in nieuwbouwwoningen - voorlopige resultaten. RIVM briefrapport 610790004, RIVM, Bilthoven (2008)
- [4] Blaauboer RO - Meting van ^{220}Rn en consequenties voor eerdere ^{222}Rn surveys, RIVM Rapport 610790011, RIVM, Bilthoven (2010)
- [5] De With G, De Jong P - Literatuuroverzicht van meetmethoden voor het bepalen van de thoronexhalatiesnelheid, rapport 912291/10.100195, NRG, Arnhem (concept 2010)
- [6] Vaas LH, Kal HB, De Jong P, Slooff W (eds.) - Basisdocument Radon, RIVM Rapport 710401014, RIVM, Bilthoven (1991)
- [7] Sources, effects and risks of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 1988 report to the General Assembly, with annexes, United Nations, New York, NY (1988)
- [8] Nazaroff WW, Nero AV (eds.) – Radon and its decay products in indoor air, Wiley Interscience, New York, NY (1988)
- [9] Folkerts KH, Keller G, Muth H - Experimental investigations on diffusion and exhalation of Rn-222 and Rn-220 from building materials, Radiation Protection Dosimetry 7(1-4): 41-44 (1984)
- [10] Eappen KP, Nair RN, Mayya YS - Simultaneous measurement of radon and thoron using Lucas scintillation cell, Radiation Measurements 43(1): 91-97 (2008)
- [11] Burgkhardt B, Kupschus A, Vilgis M, Piesch E, Dörschel B - Polycarbonate track etched detectors for qualitative alpha spectroscopy in radon environments, Radiation Protection Dosimetry 66(1-4): 331-334 (1996)
- [12] Blaauboer RO, Smetters RCGM - Outdoor Concentrations of the Equilibrium-Equivalent Decay Products of ^{222}Rn in the Netherlands and the Effect of Meteorological Variables, Radiation Protection Dosimetry 69(1): 7-18 (1997)
- [13] Durrani SA, Ilic R - Radon measurements by etched track detectors, World Scientific, Singapore (1997)
- [14] Porstendörfer J - Physical parameters and dose factors of the radon and thoron decay products, Radiation Protection Dosimetry 94(4): 365-373 (2001)
- [15] De With G - Meetmethode voor thoronexhalatiesnelheid, NRG, Arnhem (2012)
- [16] Katase A, Matsumoto Y, Sakae T, Ishibashi K - Indoor concentrations of Rn-220 and its decay products, Health Physics 54(3): 283-286 (1988)
- [17] Manual RAD7 detector 2000-04-01, v6.0.1, DurrIDGE Company Inc., 7 Railroad Avenue, Suite D, Bedford, MA 01730

- [18] Tschiersch J, Li WB, Meisenberg O - Increased indoor thoron concentrations and implication to inhalation dosimetry, *Radiation Protection Dosimetry* 127(1-4): 73-78 (2007)
- [19] Yamasaki T, Guo Q, Iida T - Distributions of thoron progeny concentrations in dwellings, *Radiation Protection Dosimetry* 59(2): 135-140 (1995)
- [20] Zhuo W, Iida T, Moriizumi J, Aoyagi T, Takahashi I - Simulation of the concentrations and distributions of indoor radon and thoron, *Radiation Protection Dosimetry* 93(4): 357-368 (2001)
- [21] De With G, De Jong P - Modelleren van de thoron- en thorondochter-concentraties in het binnenmilieu, NRG, NRG-912089/09.93696, Arnhem (2009)
- [22] Zhuo W, Tokonami S - Convenient methods for evaluation of indoor thoron progeny concentrations, *International Congress Series*, 1276: 219-220 (2005)
- [23] ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Annals of the ICRP* 21(1-3), ICRP Publication 60 (1991)
- [24] ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Annals of the ICRP* 37(2-4), ICRP Publication 103 (2007)
- [25] ICRP, Protection against radon-222 at home and at work, *Annals of the ICRP* 23(2), ICRP Publication 65 (1993)
- [26] ICRP, Human respiratory tract model for radiological protection, *Annals of the ICRP* 24(1-3), ICRP Publication 66 (1994)
- [27] Sources and effects of ionizing radiation, 2000 Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with annexes, United Nations, New York, NY (2000)
- [28] Marsh JW, Harrison JD, Laurier D, Blanchardon E, Paquet F, Tirmarche M - Dose conversion factors for radon: Recent developments, *Health Physics* 99(4): 511-516 (2010)
- [29] Effects of ionizing radiation, 2006 Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with annexes, United Nations, New York, NY (2006)
- [30] Ishikawa T, Tokonami S, Nemeth C - Calculation of dose conversion factors for thoron decay products, *Journal of Radiological Protection* 27(4): 447-456 (2007)
- [31] Kendall GM, Phipps AW - Effective and organ doses from thoron decay products at different ages, *Journal of Radiological Protection* 27(4): 427-435 (2007)
- [32] Choncubhair ÓN, McLaughlin JP, Tokonami S - Passive measurements of thoron and its progeny in some dwellings in Ireland, *The Natural Radiation Environment*, 8th International Symposium (NRE VIII), Rio de Janeiro 7-12 Oct. 2007, AIP Proceedings 1034: 16-19, Melville (NY) (2008)
- [33] McLaughlin JP, Murray M, Currivan L, Pollard D, Smith V, Tokonami S, Sorimachi A, Janik M - Thoron and its airborne progeny in Irish dwellings, *Third European IRPA Congress Helsinki 14-18 June 2010*, IRPA (2010)
- [34] McLaughlin J, Murray M, Currivan L, Pollard D, Smith V, Tokonami S, Sorimachi A, Janik M - Long-term measurements of thoron, its airborne progeny and radon in 205 dwellings in Ireland, *Radiation Protection Dosimetry* 145(2-3): 189-193 (2011)

- [35] Meisenberg O, Tschiersch J – Thoron in indoor air: modeling for a better exposure estimate, *Indoor Air* 21: 240-252 (2011)
- [36] Tirmarche M, Harrison JD, Laurier D, Paquet F, Blanchardon E, Marsh JW - Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon, *Annals of the ICRP* 40(1), ICRP Publication 115 (2010)

.....

R.O. Blaauboer

.....

RIVM report 610890001/2012

This is a publication of:

**National Institute for Public Health
and the Environment**

P.O. Box 1 | 3720 BA Bilthoven
The Netherlands
www.rivm.nl

July 2012

