

rivm

Rapport 610790009/2010

S. Bader | S.A.J. Dekkers | R.O. Blaauboer

Stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen

Eindrapport ventilatie- en radononderzoek

RIVM Rapport 610790009/2010

Stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen Eindrapport ventilatie- en radononderzoek

S. Bader
S.A.J. Dekkers
R.O. Blaauboer

Contact:
S. Bader
Laboratorium voor Stralingsonderzoek
Sam.Bader@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, Directoraat Generaal Milieu, Directie Risicobeleid in het kader van het project 'Beleidsondersteuning Straling'.

© RIVM 2010

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'.

Rapport in het kort

Stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen

De rol van thoron in de totale stralingsbelasting binnenshuis is waarschijnlijk groter dan steeds gedacht. Radonconcentraties in Nederlandse woningen zijn lager dan in het verleden gerapporteerd, doordat gangbare meettechnieken van toen radonconcentraties opleverden die, naar nu blijkt, gedeeltelijk moeten worden toegeschreven aan thoron.

Dit volgt uit onderzoek van het RIVM naar de stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen en de invloed van ventilatie hierop. In Nederland leidt blootstelling aan radon en thoron binnenshuis jaarlijks tot enkele honderden gevallen van longkanker. Het onderzoek bevestigt de verwachting dat ventileren bijdraagt aan een lagere radonconcentratie in woningen.

Thoron (^{220}Rn) en radon (^{222}Rn) zijn isotopen van het chemische element radon (Rn) die van nature voorkomen in de bodem en uit bodemmateriaal vervaardigde bouwmaterialen. Omdat dit element gasvormig is, komt een deel ervan in de binnenlucht terecht. Voor zowel radon als thoron geldt dat de vervalproducten, die zelf ook weer radioactief zijn en zich hechten aan stofdeeltjes, na inademing schadelijk zijn voor de gezondheid. Het is nog onduidelijk in welke mate bewoners vervalproducten van thoron inademen. Er is daarom nader onderzoek nodig naar de concentratie van thoron en de vervalproducten in Nederlandse woningen. Hiermee kan meer inzicht worden verkregen in de totale stralingsdosis die mensen binnenshuis oplopen.

Dit is het eindrapport van de eerste survey in het project Ventilatie en Radon (VERA). Het belangrijkste doel van dit project is om de standstill van de stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen te evalueren. Er zijn geen aanwijzingen dat de dosis door radon en externe straling uit bouwmaterialen in woningen gebouwd tussen 1994 en 2003 significant is veranderd.

Trefwoorden: radon, ventilatie, thoron, binnenmilieu, externe straling

Abstract

Radiation dose in newly built dwellings in the Netherlands

The contribution of thoron to the total indoor radiation dose is likely to be larger than previously assumed. In contrast, radon concentrations in Dutch dwellings are actually lower than those reported in the past. It now appears that the indoor concentrations of radon measured previously using then standard measurement techniques have to be partly attributed to thoron.

These are some of the results of a study carried out by the RIVM on the ionizing radiation dose in newly built dwellings in the Netherlands and the role of ventilation. In the Netherlands, exposure to indoor radon and thoron leads to hundreds of cases of lung cancer each year. The results of this study confirm that improvements in ventilation will contribute to lower indoor radon concentrations.

Thoron (^{220}Rn) and radon (^{222}Rn) are isotopes of the chemical element radon (Rn) that occur naturally as radioactive gases in the ground and in building materials of natural origin. As gases, they are able to emanate from these materials and subsequently enter the living environment. Their decay products are radioactive and are able to adhere to dust particles which, when inhaled, are detrimental to human health. The amounts of radioactive decay products of thoron inhaled by inhabitants of Dutch dwellings remain as yet unclear. Therefore, future studies should focus on the concentration of thoron and its decay products in Dutch dwellings in order to gain better insight into the total indoor radiation dose.

This is the final report of the first survey of the project 'Ventilatie en Radon' (VERA). The foremost goal of this project is to evaluate the standstill of indoor radiation dose in newly built dwellings in the Netherlands. There are no indications of significant changes in the indoor radiation dose due to radon and external radiation from building material in houses built between 1994 and 2003.

Key words: radon, ventilation, thoron, indoor environment, external radiation

Inhoud

Samenvatting		6
1	Inleiding	7
1.1	Onderzoek naar radon in Nederlandse woningen	7
1.2	Vraagstelling VERA	8
1.3	Publicaties	8
1.4	Leeswijzer	9
2	Opzet	10
2.1	Woningselectie	10
2.2	Meetprogramma	10
2.2.1	Meetlocaties	10
2.2.2	Uitgevoerde metingen	10
2.3	Communicatie	11
3	Resultaten van metingen en analyses	13
3.1	Resultaten - radon	13
3.1.1	Radonmetingen	13
3.2	Ventilatie	15
3.2.1	Mechanische ventilatie	15
3.3	Radon en ventilatie	16
3.4	Bronnen van radon	17
3.5	Externe straling	17
4	Radon en thoron	18
4.1	Verklaringen voor verschil radonconcentraties	18
4.2	Radon versus thoron	19
4.3	Interpretatie van meetresultaten in eerdere surveys	20
4.3.1	Herkomst thoron	21
5	Stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen	22
5.1	Algemene aannames	22
5.1.1	Dosisconversiecoëfficiënten	22
5.2	Radon	22
5.3	Thoron	23
5.4	Externe straling	23
5.5	Totale stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen	24
5.5.1	Standstill van de stralingsbelasting	24
6	Antwoorden op onderzoeksvragen	25
7	Conclusies	27

Samenvatting

De afgelopen jaren heeft het RIVM in het kader van het project Ventilatie en Radon (VERA) onderzoek gedaan naar de radonconcentratie in Nederlandse nieuwbouwwoningen en de invloed van ventilatie hierop. Het belangrijkste doel van het VERA-onderzoek is om de *standstill* van de stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen te evalueren. Deze *standstill* is afgesproken in een convenant opgesteld door het ministerie van VROM en de bouwbranche, vertegenwoordigd door de werkgeversorganisatie VNO-NCW.

In de eerste survey van het VERA-onderzoek zijn de ventilatie, externe straling en radonconcentratie gemeten in Nederlandse nieuwbouwwoningen gebouwd in de periode 1994-2003. In ruim 300 woningen zijn jaargemiddelde radonconcentraties en externe stralingsniveaus bepaald in diverse ruimten en is de ventilatie en luchtuitwisseling tussen die ruimten bepaald. Daarnaast is in circa 800 woningen de radonconcentratie uitsluitend in de woonkamer gemeten.

Uit de resultaten van het onderzoek blijkt onder andere dat meer ventileren samenhangt met een lagere radonconcentratie en dat radon voornamelijk afkomstig is uit bouwmaterialen. Het onderzoek heeft inzicht verschaft in de radonconcentratie in Nederlandse woningen, en heeft ook duidelijk gemaakt dat in het verleden, alsook in het buitenland, radonconcentraties zijn gemeten die deels toegeschreven moeten worden aan thoron.

Het chemische element radon (Rn) kent verschillende isotopen. ^{222}Rn noemen we doorgaans radon en ^{220}Rn thoron. Thoron is dus een isotoop van het element radon, die op een andere manier en in een andere mate bijdraagt aan de stralingsbelasting binnenshuis dan de isotoop die we radon noemen. Uit recent onderzoek blijkt dat radondetectoren die in het verleden zijn gebruikt niet alleen radon, maar ook thoron hebben gemeten en dat als radon hebben geregistreerd. Dit maakt dat de werkelijke radonconcentraties die zijn gemeten in dit onderzoek lager zijn dan de radonconcentraties gerapporteerd in het verleden.

De thoronconcentraties binnenshuis zijn waarschijnlijk beduidend hoger dan voorheen gedacht, en hetzelfde geldt voor het aandeel van thoron in de stralingsbelasting in Nederlandse woningen.

Het onderzoek heeft aangetoond dat de dosis door externe straling binnenshuis niet significant is veranderd ten opzichte van eerdere metingen. De dosis door blootstelling aan radon is lager dan in eerder onderzoek aangegeven. Echter, de bijdrage van thoron aan de totale in de woning ontvangen stralingsdosis is groter dan voorheen werd verondersteld. De thoronconcentratie wordt door de korte levensduur van thoron vooral bepaald door de buitenste laag van het bouw materiaal en het gebruikte stucmateriaal. Nader onderzoek naar de concentratie van thoron en thorondochters in Nederlandse woningen is nodig om meer inzicht te krijgen in de totale stralingsdosis die de Nederlandse bevolking binnenshuis oploopt en de trends die daarin optreden.

1 Inleiding

De Nederlandse bevolking wordt blootgesteld aan diverse bronnen van ioniserende straling. Een aanzienlijk deel van deze stralingsbelasting loopt de Nederlander binnenshuis op. De belangrijkste componenten van de stralingsbelasting komen van radon en de externe straling uit bouwmaterialen, zoals baksteen en beton.

Radon is een radioactief edelgas dat ontsnapt uit muren en de bodem. De vervalproducten van dit gas kunnen worden ingeademd en in de longen een stralingsdosis afgeven. Het chemische element radon bestaat uit verschillende isotopen, waarvan de isotoop ^{222}Rn zelf ook radon wordt genoemd. De isotoop ^{220}Rn wordt thoron genoemd. Waar in dit rapport zonder verder commentaar over radon wordt gesproken wordt de isotoop ^{222}Rn van het element radon bedoeld.

Hoewel radon en thoron beide van nature in bodem en bouwmaterialen voorkomen, is vanwege de korte halfwaardetijd van thoron (56 sec) in verhouding tot radon (3,8 dagen) altijd aangenomen dat radon de belangrijkste isotoop voor de stralingsbelasting is. De relatieve bijdrage van thoron werd voorheen geschat op ongeveer 10% van die van radon [1]. Onderzoek naar de stralingsbelasting in woningen heeft zich daarom, ook internationaal, steeds toegespitst op de meting van radonconcentraties en externe stralingsniveaus.

In voorgaande onderzoeken naar de stralingsbelasting in Nederlandse woningen is een stijging van de radonconcentratie in nieuwbouwwoningen gerapporteerd [2], [3]. Het beleid in Nederland is erop gericht de stralingsbelasting in woningen niet verder te laten toenemen. Daarom is in 2004 een convenant opgesteld waarin het ministerie van VROM en VNO-NCW hebben afgesproken te streven naar een *standstill* van de stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen.

Als onderdeel van dit convenant is onder meer afgesproken om de ontwikkelingen in de radonconcentraties te evalueren in een aantal surveys. In dit kader heeft het RIVM in 2004 de opdracht gekregen voor het onderzoeksproject VERA: Ventilatie en Radon. Dit rapport bevat een samenvatting van de resultaten van dit onderzoek.

1.1 Onderzoek naar radon in Nederlandse woningen

Het VERA-project is niet het eerste onderzoek naar radon in Nederlandse woningen. In de jaren tachtig is door het Kernfysisch Versneller Instituut de studie SAWORA [2] uitgevoerd, waarbij in duizend woningen de radonconcentraties zijn gemeten. De woningen vormden een representatieve selectie van het totale woningbestand. Uit de onderzoeksgegevens bleken de radonconcentraties in de woningen te stijgen met het bouwjaar, met name voor de woningen die in de jaren zeventig waren gebouwd.

In de jaren negentig is de tweede nationale radonsurvey [3] uitgevoerd door het RIVM. Dit onderzoek had tot doel de mogelijke trend in de radonconcentratie te beschrijven en het relatieve belang van de diverse bronnen van radon in de woning te kwantificeren. In beperkte mate is in dit project ook onderzoek gedaan naar de invloed van ventilatie op de radonconcentratie. De resultaten - voor woningen gebouwd van 1985 tot en met 1993 - bevestigden de hoge radonconcentraties die in de vorige studies voor de nieuwste huizen waren gevonden. De radonconcentraties leken echter niet meer verder te stijgen met het bouwjaar, en stabiliseerden zich ongeveer op het niveau van 1982. De studie liet tevens zien dat het radon in woonkamers voornamelijk uit de bouwmaterialen afkomstig was.

In het project VERA is de derde radonsurvey uitgevoerd. In dit project zijn in meer detail de ventilatie en radonconcentraties in Nederlandse nieuwbouwwoningen uit de periode 1994-2003 onderzocht. Deze opzet is gekozen om te kunnen bepalen hoe de ventilatie van invloed is op de radonconcentratie en of de eerder waargenomen toename van de radonconcentratie gerelateerd kan worden aan (veranderingen in) de manier waarop mensen hun huizen ventileren.

Daarnaast is met metingen vastgesteld wat de dosis door externe straling is die mensen binnenshuis ontvangen.

1.2 Vraagstelling VERA

De belangrijkste doelstellingen van het VERA-onderzoek waren het vaststellen van de ontwikkeling in radonconcentratie in Nederlandse nieuwbouwwoningen en het verkrijgen van inzicht in de factoren die de radonconcentratie, en daarmee de stralingsbelasting beïnvloeden. De hoofdvragen in de survey zijn daarom de volgende geweest [4]:

1. Wat is de ontwikkeling van de radonconcentratie en externe straling in nieuwbouwwoningen in Nederland?
2. Wat is de bijdrage van buitenlucht, kruipruimte en bouwmaterialen aan de radonconcentratie in de woonkamer?
3. Wat is de effectieve ventilatie in relatie tot de kwaliteit van het binnenmilieu in het algemeen en wat zijn de optredende radonconcentraties in het bijzonder, ofwel: hangt een eventuele verandering in de radonconcentratie samen met gewijzigde ventilatie, of met wijzigingen in de bronterm uit bouwmaterialen?
4. Is er, wat betreft de radonconcentratie, onderscheid te maken naar het type woning?
5. Hoe hangt de (effectieve) ventilatie van de woonkamer en hoofdslaapkamer samen met het type woning, het toegepaste ventilatiesysteem, het door bewoners aangegeven gedrag met betrekking tot ventilatie en het gebruik van het ventilatiesysteem, en eventuele andere factoren?

In Hoofdstuk 6 worden de antwoorden op deze specifieke vragen gegeven.

1.3 Publicaties

Dit rapport geeft een samenvattend overzicht van de resultaten uit het VERA-onderzoek. In eerdere rapporten zijn deelresultaten gepubliceerd. Zo bevat **RIVM-rapport 610790002 - Opzet van het Ventilatie Radononderzoek** een beschrijving van de metingen en de projectinformatie van het Ventilatie Radononderzoek. Hierin worden bijvoorbeeld de details weergegeven van de steekproef die gebruikt is om de woningen te selecteren en is de enquête opgenomen die bewoners van die woningen hebben ingevuld om informatie te verschaffen over onder meer hun ventilatiegedrag.

RIVM-briefrapport 610790004 - Stralingsbelasting in nieuwbouwwoningen - voorlopige resultaten laat de eerste, voorlopige resultaten zien van de metingen aan radon en externe straling. Dit briefrapport bevat vooral gedetailleerde informatie over de gemeten radonconcentraties en de temperatuurmetingen.

De resultaten en evaluatie van de ventilatiemetingen worden behandeld in het **RIVM-rapport 610790006 - Ventilatie en de samenhang met radon in nieuwbouwwoningen in Nederland**. De herkomst van radon in de woonkamer komt hier aan bod, en de correlatie tussen ventileren en radonconcentratie.

De recente bevindingen van het deelonderzoek naar thoron zijn gepubliceerd in het rapport **RIVM-Rapport 610790011 - Meting van ^{220}Rn en consequenties voor eerdere ^{222}Rn surveys**.

Ten slotte is een rapport verschenen over de metingen van externe straling: **NRG-rapport NRG-K5098/09.97299. Analyse van het externe dosistempo in woningen**.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport heeft de volgende indeling: hoofdstuk 2 laat zien hoe het onderzoek is opgezet en welke metingen er zijn verricht. Hoofdstuk 3 behandelt de resultaten van het onderzoek naar ventilatie, radon en externe straling en in hoofdstuk 4 wordt beschreven welke rol thoron speelt. In hoofdstuk 5 wordt gekeken welke nieuwe inzichten de VERA-studie heeft gegeven over de stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen, en hoofdstuk 6 beantwoordt de specifieke onderzoeksvragen uit paragraaf 1.2. Hoofdstuk 7 sluit af met de conclusies van het onderzoek.

2 Opzet

2.1 Woningselectie

Het onderzoek is uitgevoerd in woningen gebouwd in de periode 1994 tot en met 2003. Het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) heeft een selectie gemaakt van 5000 woningen uit deze periode, waarin circa 800.000 woningen zijn gebouwd. Om logistieke redenen is ervoor gekozen deze steekproef te beperken tot de twintig gemeenten waar in deze periode de meeste woningen zijn gebouwd. Bij het uitvoeren van de steekproef is door het CBS rekening gehouden met een representatieve verdeling over een- en meergezinswoningen.

2.2 Meetprogramma

De metingen voor de VERA-survey zijn gefaseerd uitgevoerd. Van de 5000 woningen uit de selectie van het CBS zijn 1000 bewoners aangeschreven om mee te doen in de eerste fase van het onderzoek en 4000 in de tweede fase. In de eerste fase is in circa 300 woningen een intensief meetprogramma uitgevoerd waarbij in vier ruimten radon, externe straling en luchtuitwisseling is gemeten. In de tweede fase is in circa 800 woningen een beperkt meetprogramma opgezet waarbij alleen de radonconcentratie in de woonkamer is gemeten. Voor beide meetprogramma's was een meetperiode van 1 jaar noodzakelijk om uitspraken mogelijk te maken over jaargemiddelde radonconcentraties.

2.2.1 Meetlocaties

Het intensieve meetprogramma is uitgevoerd in vier vertrekken: de woonkamer, de slaapkamer, de hal en de kruipruimte in eengezinswoningen, en de woonkamer, de slaapkamer, de hal en de centrale toegangshal in meergezinswoningen.

2.2.2 Uitgevoerde metingen

Er zijn in het VERA-onderzoek verscheidene typen metingen uitgevoerd. Hieronder volgt een opsomming van deze metingen. Meer details zijn te vinden in het rapport [4] dat de opzet van het VERA-onderzoek beschrijft.

- De radonmetingen zijn uitgevoerd met radondetectoren die werken met de zogeheten 'alpha trackmethode'. De hiervoor toegepaste detectoren zijn van de firma Gammadata uit Zweden.
- De externe straling afkomstig van bouwmaterialen en bodem is gemeten met thermoluminescentiedosimeters (TLD's). Deze zijn verkregen via NRG-Arnhem.
- De capaciteit van de mechanische ventilatie is gemeten met een zogeheten vleugelradanemometer. Deze metingen zijn verricht door het ingenieursbureau Lichtveld, Buis & Partners.
- Voor het bepalen van de luchtstromen in de woningen is, net als in een vorige radonsurvey [3], gebruik gemaakt van de zogeheten PFT (Perfluorocarbon Tracer)-methode. Door tracers los te laten en te registreren in vier verschillende ruimten van een huis zijn de luchtstromen tussen die verschillende ruimten vastgesteld. Deze specialistische methode (met vier verschillende tracers) werd alleen door Brookhaven National Laboratory (BNL) aangeboden.
- De snelheid waarmee de tracerbronnen, die bij de PFT-methode worden gebruikt, het tracergas afgeven, hangt af van de temperatuur. Dit heeft invloed op de resultaten voor de luchtstromen. Om

de resultaten van de ventilatiemetingen te kunnen corrigeren voor temperatuursvariaties, is in 75 woningen daarom uurlijks de temperatuur gemeten.

- In de tuinen van deelnemers aan de survey en bij de meetposten van het Nationaal Meetnet Radioactiviteit (NMR) zijn extra radonmetingen uitgevoerd om de radonconcentratie in de buitenlucht vast te kunnen stellen. Er zijn bovendien metingen verricht om de afscherming van het verpakkingsmateriaal te controleren en er zijn radondetectors in een proefopstelling op verschillende afstanden van een betonnen muur gehangen.

De metingen in de survey gingen gepaard met een enquête naar woningspecificaties en bewonersgedrag, ook ten aanzien van het gebruik van ventilatievoorzieningen. In het opzetrapport [4] is deze enquête opgenomen als bijlage.

2.3 Communicatie

Om deelnemers aan de survey van informatie te voorzien is een folder gemaakt, een e-mailadres voor reacties ingesteld en er is een speciale website (www.rivm.nl/radon) opgezet, waarvan in Figuur 1 de openingpagina te zien is.



Figuur 1. Openingspagina radonwebsite VERA.

3 Resultaten van metingen en analyses

Er zijn in het project VERA op drie hoofdthema's metingen uitgevoerd: radon, ventilatie en externe straling. De resultaten en de analyses van de metingen zijn samengevat in dit hoofdstuk. In andere rapporten [5], [6] staan de details en de evaluaties van deze metingen.

3.1 Resultaten - radon

In het VERA-onderzoek zijn in honderden Nederlandse nieuwbouwwoningen radonconcentraties gemeten, in de woonkamer, de slaapkamer, de hal, de kruipruimte en de centrale toegang van appartementen. Bovendien zijn in de tuinen van een aantal woningen metingen gedaan naar de concentratie van radon in de buitenlucht.

3.1.1 Radonmetingen

Tabel 1 geeft een samenvatting van de resultaten van de radonmetingen in het VERA-onderzoek. In deze tabel staan de radonconcentraties in Nederlandse nieuwbouwwoningen gebouwd in de periode 1994-2003.

Tabel 1. Radonconcentraties (Bq/m³) in Nederlandse nieuwbouwwoningen gebouwd in de periode 1994-2003.

	Woonkamer	Slaapkamer	Hal	Centrale hal	Kruipruimte	Tuin	Woonkamer 2e fase
Aantal metingen	301	296	292	47	149	303	710
Gemiddelde	13,8	13,0	15,6	12,9	45,4	3,3	13,4
Mediaan	12,2	10,8	12,5	9,9	28,4	2,3	11,6
95-percentiel	28,4	30,8	32,1	35,0	106,0	9,8	29,9

In een tweede fase van het onderzoek is alleen in woonkamers gemeten, waarbij de deelnemers van het onderzoek de radonbekers per post kregen opgestuurd. De in deze periode gemeten concentraties wijken niet significant af van die in de eerste fase (gemiddeld in de eerste en tweede fase respectievelijk $13,8 \pm 0,5$ Bq/m³ en $13,4 \pm 0,4$ Bq/m³). Hieruit kan worden geconcludeerd dat een grote survey van alleen radonbekers in woonkamers relatief eenvoudig en goedkoop kan worden uitgevoerd door de detectors per post toe te sturen. Voor de eerste en tweede fase samen zijn de gemiddelde en mediane radonconcentraties respectievelijk: $13,5$ Bq/m³ en $11,8$ Bq/m³.

Voor het totale bestand van ruim duizend woningen uit de gehele survey is meer specifiek gekeken naar de radonconcentratie in woonkamer en slaapkamer van eengezins- en meergezinswoningen. Deze resultaten staan in Tabel 2. In deze tabel zijn voor de woonkamer de resultaten van fase 1 en fase 2 gecombineerd. De getallen wijken iets af van die in het Briefrapport over de voorlopige resultaten [6] omdat van meer woningen het type bekend is geworden.

In overeenstemming met resultaten van eerdere surveys blijkt de radonconcentratie in meergezinswoningen iets hoger dan in eengezinswoningen. De verklaring hiervoor is dat meergezinswoningen, bijvoorbeeld appartementen in flats, doorgaans zijn omringd door andere woningen. Radon komt daardoor niet alleen uit de bouwmaterialen in de eigen woning maar ook uit de bouwmaterialen in de woningen van naaste en bovenburen.

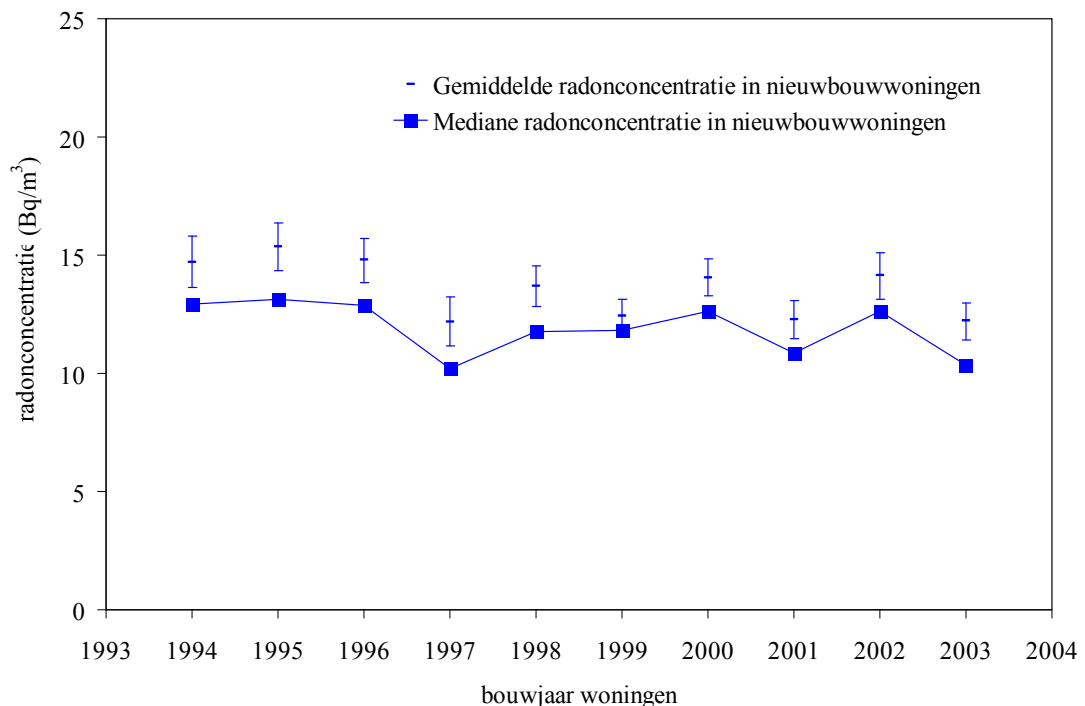
Tabel 2. Overzicht van resultaten van de radonmetingen (Bq/m³) in een- en meergezinswoningen.

	Eengezinswoningen		Meergezinswoningen	
	Woonkamer	Slaapkamer	Woonkamer	Slaapkamer
Gemiddelde	12,9	12,1	15,1	15,7
Mediaan	11,4	9,6	13,2	13,8
95-percentiel	28,2	27,6	32,3	33,1
Aantal woningen	708	222	297	74

Enkele conclusies die volgen uit de resultaten van de radonmetingen in de VERA-survey zijn:

- De gemiddelde radonconcentratie in de woonkamer is vergelijkbaar met die in de hal, de eventuele centrale toegangshal en de slaapkamer.
- De gemiddelde radonconcentratie in de kruipruimte is significant hoger dan in de andere genoemde ruimten. Dit is te verwachten omdat de kruipruimte vaak in directe verbinding staat met de bodem en er meestal niet actief wordt geventileerd.
- De gemiddelde radonconcentratie in meergezinswoningen is hoger dan die in eengezinswoningen.

Een belangrijke vraag in het VERA-project betrof het verband tussen bouwjaar en radonconcentratie: is er een ontwikkeling te ontdekken in de radonconcentratie in nieuwbouwwoningen?



Figuur 2. Ontwikkeling van de gemiddelde en mediane radonconcentratie (en standaardafwijking) voor woningen uit de VERA-survey.

Uit de grafiek in Figuur 2 blijkt dat een trend in de gemiddelde radonconcentratie in woningen gebouwd van 1994 tot en met 2003 niet aantoonbaar is. Dit suggereert dat de gemiddelde radonconcentratie in deze periode niet significant is veranderd met het bouwjaar.

Opvallend is wel dat de radonconcentratie in de VERA-survey beduidend lager is dan in de vorige survey [3], waar een gemiddelde radonconcentratie van 30 Bq/m³ is gemeten. In hoofdstuk 4 wordt verder ingegaan op dit onderwerp.

3.2 Ventilatie

In het VERA-onderzoek zijn metingen gedaan om de capaciteit van de mechanische ventilatiesystemen te bepalen en er zijn tracermetingen uitgevoerd om de luchtstromen in woningen vast te stellen. Bij de tracermetingen zijn in verschillende ruimten concentraties van tracergassen gemeten. Deze zijn met een eenvoudig stromingsmodel omgerekend naar luchtstromen. Deze methode is uitvoerig beschreven en geëvalueerd in het RIVM-rapport ‘Ventilatie en de samenhang met radon in nieuwbouwwoningen in Nederland’ [5].

In Tabel 3 zijn de gemiddelde luchtstromen gegeven in Nederlandse eengezinswoningen gebouwd in de periode 1994-2003. De gegevens hebben betrekking op een selectie van 107 woningen waarin de methode toepasbaar bleek voor de vier ruimten waarin is gemeten. Een gedetailleerde evaluatie van de resultaten is te vinden in het RIVM-rapport over de ventilatiemetingen [5].

Tabel 3. Gemiddelde luchtstromen (m³/h) in Nederlandse eengezinswoningen uit de periode 1994-2003.

		van:				
		Kruipruimte	Woonkamer	Slaapkamer	Hal	Buiten
naar:	Kruipruimte	-	0	0	1	24
	Woonkamer	2	-	2	41	60
	Slaapkamer	0	3	-	33	37
	Hal	9	50	40	-	90
	Buiten	14	52	31	114	-

Omdat de volumes van de ruimten zijn bepaald, is met de getallen uit Tabel 3 ook het ventilatievoud in de ruimten te berekenen. Het ventilatievoud is bepaald door de luchtstromen te delen op de volumes van de ruimten. Het resultaat hiervan is in Tabel 4 af te lezen.

Tabel 4. Resultaten ventilatievoud gemiddelde woning.

Ventilatievoud totaal (1/h)	Woonkamer	Slaapkamer	Hal	Kruipruimte	Totaal
Gemiddelde woning	0,9 (0,9*)	1,3	3,1	0,6 (1,1*)	0,7

* de waarden tussen haakjes komen, ter vergelijking, uit een rapportage over de vorige radonsurvey [3].

3.2.1 Mechanische ventilatie

In vrijwel alle woningen in de survey worden mechanische ventilatiesystemen gebruikt. Het type dat in het grootste deel van de woningen is toegepast is het mechanische afvoersysteem, gecombineerd met natuurlijke toevoer. Het gaat dan veelal om een driestandensysteem, waarbij ook in de laagste stand de ventilatie nog werkt.

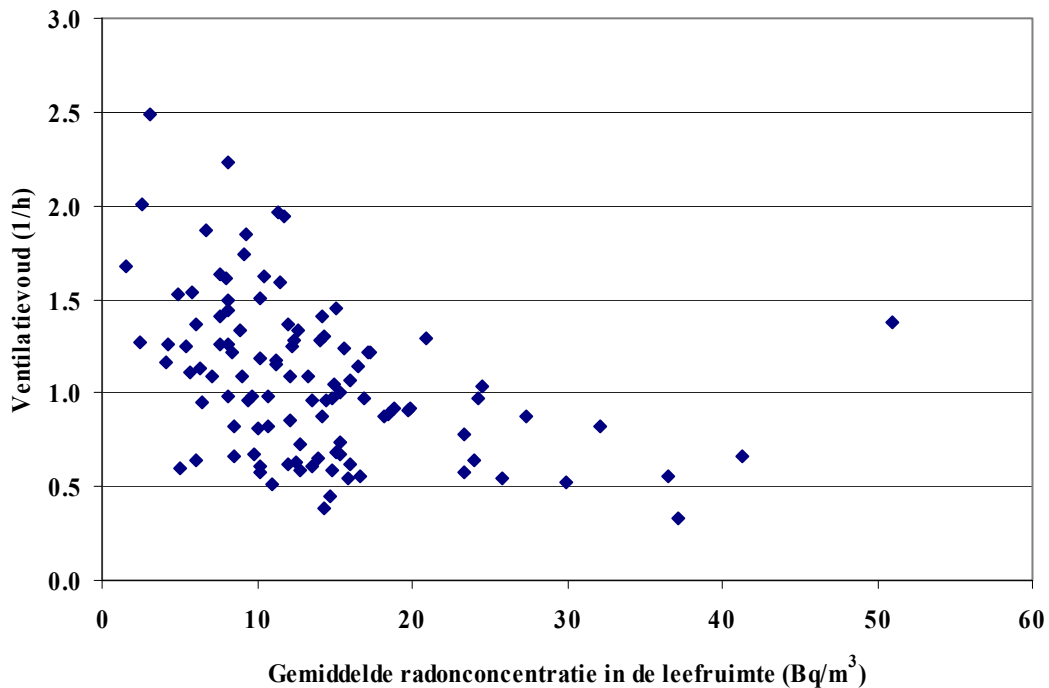
Uit de enquêtes is informatie over het gebruik van de mechanische ventilatie beschikbaar. Door dit te combineren met de gemeten capaciteit van de mechanische ventilatie is een daggemiddelde ventilatie afgeleid. In Tabel 5 staan hiervan de resultaten voor 288 woonkamers in de woningen uit de survey.

Tabel 5. Luchtafvoer via mechanische ventilatiesystemen in woonkamers.

Luchtafvoer	Capaciteit in laagste stand (m ³ /h)	Daggemiddelde luchtafvoer (m ³ /h)
Gemiddelde	30	33
Mediaan	25	30
95-percentiel	68	130

3.3 Radon en ventilatie

Verwacht mag worden dat meer ventileren de radonconcentratie in woningen verlaagt. Dit is steeds een uitgangspunt geweest in de beleidsvorming betreffende radon. In het VERA-onderzoek is deze hypothese getoetst (zie ook het RIVM-rapport over de ventilatiemetingen [5]) door het ventilatievoud uit te zetten tegen de gemiddelde radonconcentratie in de leefruimten (woonkamer, hal en slaapkamer). In Figuur 3 is hiervan het resultaat gegeven.



Figuur 3. Ventilatievoud versus radonconcentratie.

Deze grafiek laat zien dat er een omgekeerde correlatie bestaat tussen ventilatievoud en radonconcentratie: in veel huizen met een hoge radonconcentratie is het ventilatievoud relatief laag en vice versa. Meer details over dit resultaat zijn te vinden in het RIVM-rapport ‘Ventilatie en de samenhang met radon in nieuwbouwwoningen in Nederland’ [5]. Hoewel met deze gegevens geen causaal verband aangetoond kan worden, geeft de grafiek wel een duidelijke indicatie dat in beter geventileerde woningen de radonconcentratie lager is.

3.4 Bronnen van radon

Uit een analyse van de luchtstromen en de gemeten radonconcentraties [5] is vastgesteld hoe groot de productie van radon in de verschillende ruimten in een woning is. Uit dit resultaat is ook te achterhalen wat de herkomst van het radon is in bijvoorbeeld de woonkamer: in welke verhouding het van buiten, uit de kruipruimte en uit de leefruimte komt. In Tabel 6 is deze verdeling weergegeven voor een mediane woning en wordt het resultaat vergeleken met dat uit de tweede survey [3].

Tabel 6. Bijdrage aan radonconcentratie in de woonkamer uit verschillende bronnen.

	Leefruimte	Buiten	Kruipruimte
Huidige studie (1994-2003)	67%	23%	10%
Tweede radonsurvey (1985-1993) [3]	69%	17%	14%

Duidelijk is dat het verschil met de resultaten van de tweede radonsurvey [3] beperkt is. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat ‘buiten’ in de tweede radonsurvey verwijst naar de buitenlucht en in de VERA-studie refereert naar: ‘alles buiten de meetruimten’. Hier vallen dus ook bijvoorbeeld een tweede en derde slaapkamer onder. Verder moet worden vermeld dat in de tweede radonsurvey [3] de radonconcentratie in de buitenlucht relatief hoog is verondersteld en de radonconcentratie binnen overschat werd omdat naast radon ook thoron is gemeten - zie ook Hoofdstuk 4.

3.5 Externe straling

Tabel 7 bevat de resultaten van de metingen van de externe straling vanuit de bouwmaterialen in vijf ruimten in Nederlandse nieuwbouwwoningen, gebouwd in de periode 1994 tot en met 2003. In deze tabel is het omgevingsdosisequivalenttempo [7] weergegeven. In hoofdstuk 5 staat hoe dit vertaald kan worden naar een effectieve jaardosis voor bewoners van deze huizen.

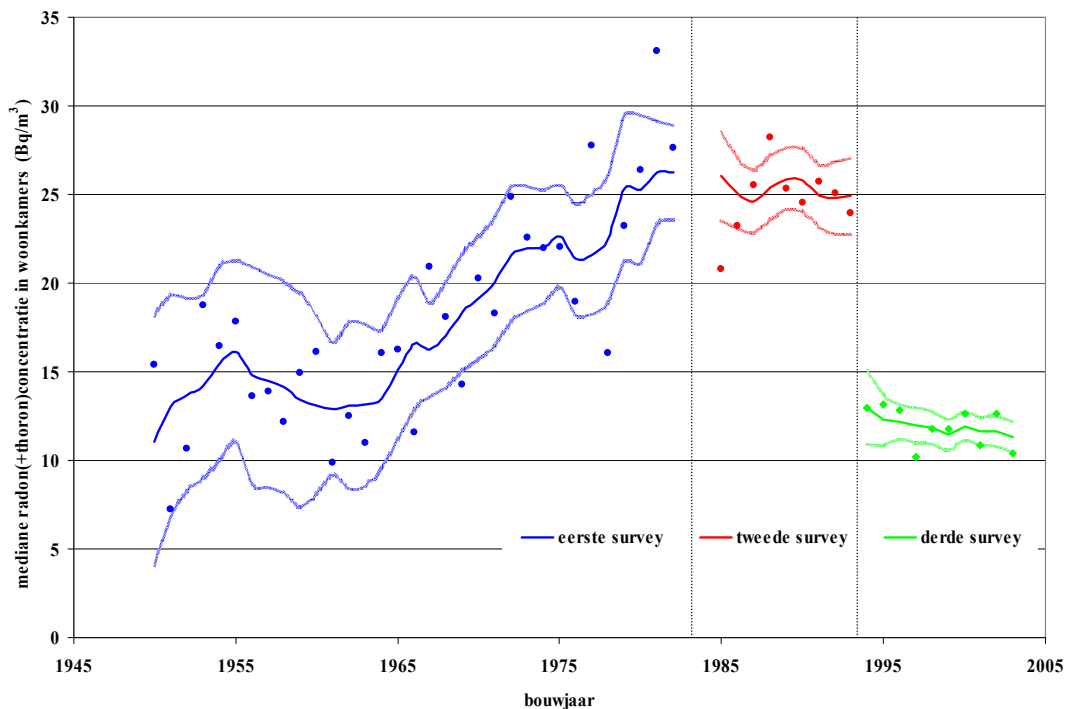
Tabel 7. Externe stralingsdosistempo (omgevingsdosisequivalenttempo) in vijf ruimten in Nederlandse nieuwbouwwoningen uit de periode 1994-2003.

Dosistempo	Woonkamer	Slaapkamer	Hal	Centrale Hal	Kruipruimte
Gemiddelde (mSv/a)	0,89	0,87	0,86	0,77	0,79
Mediaan (mSv/a)	0,88	0,85	0,84	0,76	0,78
Aantal woningen	298	295	299	47	149

De resultaten in Tabel 7 wijken af van de resultaten in [6] omdat in de loop van 2009 NRG de resultaten van haar eigen TLD-analyse heeft gerectificeerd. Hierover heeft NRG zelf het rapport ‘Analyse van het externe dosistempo in woningen’ [7] gepubliceerd. In dit rapport wordt tevens een vergelijking gemaakt tussen deze resultaten en die uit eerdere studies [8] en [9] naar de externe straling in Nederlandse woonkamers. De verschillen tussen deze resultaten zijn klein. Dit geeft een indicatie dat de dosis door externe straling uit bouwmaterialen in Nederland de laatste decennia amper is veranderd.

4 Radon en thoron

Eén van de belangrijkste resultaten van het VERA-onderzoek is dat er een onverwacht groot verschil is geconstateerd tussen de gemiddelde radonconcentratie in de VERA-survey en die in de survey ervoor. In Figuur 4 is de ontwikkeling van de radonconcentratie met het bouwjaar sinds de jaren vijftig afgebeeld. In deze figuur is het vijfjarig lopende gemiddelde van de mediane concentraties weergegeven, samen met een bandbreedte die de onzekerheid van de metingen representeert, en de mediane concentraties zelf. In de eerste survey, gedaan in de jaren tachtig, zijn radonmetingen uitgevoerd in huizen van verschillende bouwjaren uit de tweede helft van de twintigste eeuw. In hierop volgende surveys zijn de metingen uitgevoerd in woningen die in de tussenliggende jaren zijn gebouwd.



Figuur 4. Ontwikkeling van radon(+thoron)concentratie tijdens de eerste tot en met derde survey. Getoond is het vijfjarig lopende gemiddelde +/- een standaarddeviatie.

4.1 Verklaringen voor verschil radonconcentraties

Toen het verschil tussen de radonconcentraties van de tweede en derde radonsurvey duidelijk werd, is uitgebreid onderzoek gedaan naar de oorzaken ervan. Uiteindelijk zijn vier mogelijke verklaringen gevonden. Een apart rapport [10] gaat dieper op deze verklaringen in; hier volgt een korte samenvatting:

1. Trendbreuk in radonconcentratie?

Een theoretische mogelijkheid is dat er een werkelijke trendbreuk in de radonconcentratie was. De radonconcentratie in woningen gebouwd tot en met 1993 zou daadwerkelijk kunnen verschillen van die in woningen van daarna. Dit verschil in concentratie zou echter alleen kunnen optreden bij een plotselinge verandering in bouwwijze, gebruik van bouwmaterialen of plotselinge toename van de ventilatie in nieuwbouwwoningen. Doorgaans zijn dit soort veranderingen echter niet zo abrupt. Deze verklaring is dan ook niet waarschijnlijk.

2. Andere detector?

Er is in de nieuwe survey gebruikgemaakt van een ander merk detector (van het bedrijf Gammadata) dan in de surveys daarvoor, omdat de oorspronkelijke fabrikant (FzK) de levering niet kon garanderen [4]. Bij metingen in gecontroleerde omstandigheden, waar alleen radon (^{222}Rn) aangetroffen kan worden, waren de gemeten radonconcentraties voor de nieuwe en oude detector identiek. Het merk detector alleen lijkt daarom niet de verklaring te zijn voor het verschil in radonconcentratie, als het gaat om situaties waar alleen radon wordt aangetroffen.

3. Problemen nieuwe detectoren?

Er zouden analyseproblemen kunnen zijn opgetreden bij de detectoren die in de nieuwe survey zijn gebruikt. Deze nieuwe detectoren zijn afkomstig van het bedrijf Gammadata. Om dit nader te onderzoeken is bij Gammadata (in Zweden) zelf onderzoek gedaan naar de diverse procedures. Hierin werden geen onvolkomenheden aangetroffen.

4. Onbedoeld meten van thoron door FzK-detector?

De meest plausibele verklaring voor het verschil in de radonconcentraties is de volgende: waarschijnlijk hebben de radondetectoren van FzK die in de vorige surveys zijn gebruikt, thoron aangezien voor radon en ook als radon geregistreerd.

In de volgende paragrafen wordt uitgelegd waarom de laatste optie de meest waarschijnlijke verklaring voor het gevonden meetverschil is.

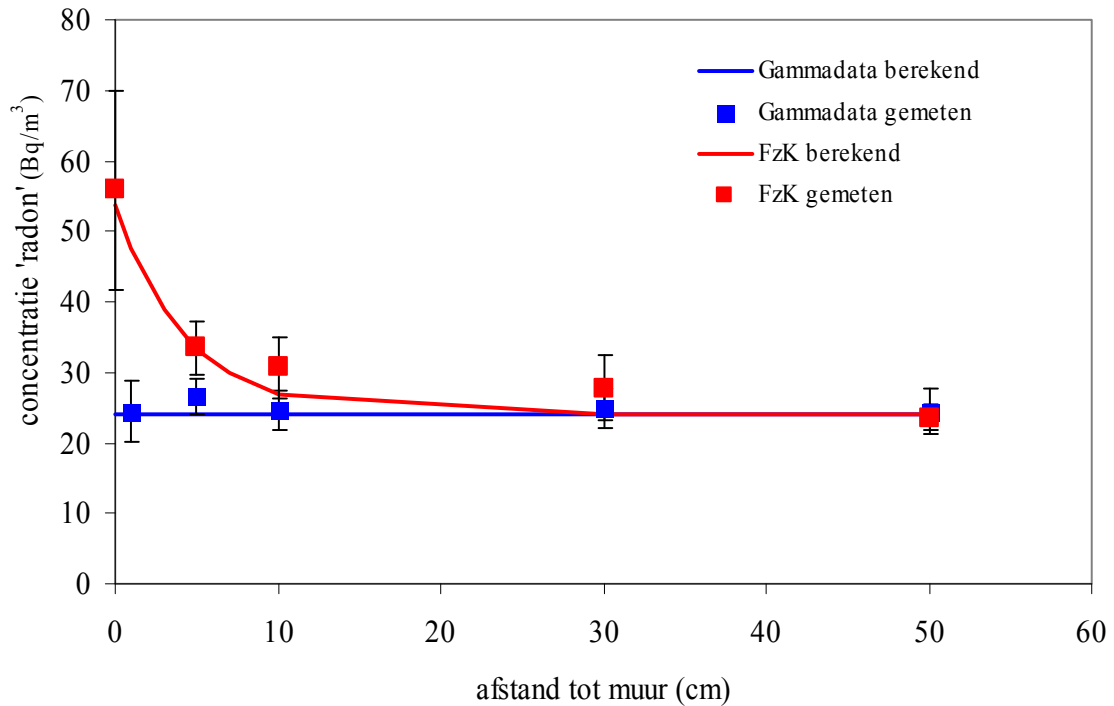
4.2 Radon versus thoron

Thoron is een isotoop 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 dan radon. Tot nog niet zo lang geleden werd ervan uitgegaan dat de bijdrage van thoron aan de totale blootstelling aan radonisotopen beperkt was [1]. In landen waar hoge radonconcentraties voorkomen speelt thoron meestal ook een minder belangrijke rol. In die landen levert de bodem een veel grotere bijdrage aan de radonconcentratie in woningen dan de bouwmaterialen, en is er daarom minder aandacht voor de bouwmaterialen. Thoron is vanwege de korte halveringstijd juist haast exclusief uit bouwmaterialen afkomstig omdat het grotendeels vervallen zal zijn voordat het de woning binnen kan komen.

In sommige radondetectoren kan naast radon ook thoron in de detector binnendringen. Bij de radondetector van FzK heeft het thoron de tijd om de detector binnen te komen en geregistreerd te worden (als radon). Bij de detector van Gammadata heeft het thoron deze tijd niet. De detectoren van Gammadata hebben daarom geen thoron gemeten, in tegenstelling tot de detectoren van FzK die in de vorige surveys zijn gebruikt.

Recente publicaties [11], [12], [13] ondersteunen het vermoeden dat thoron een rol speelt in de metingen van radon. Door FzK zelf is inmiddels vastgesteld dat de detectoren in het verleden naast radon ook thoron hebben gemeten [14]. Volgens FzK wordt 1 Bq/m^3 thoron daarbij aangezien voor iets

meer dan $0,5 \text{ Bq/m}^3$ radon. Dit kan het verschil tussen de waargenomen radonconcentraties van de verschillende surveys verklaren.



Figuur 5. Meetresultaten van de radonconcentratie uitgevoerd met detectoren van zowel FzK als Gammadata op verschillende afstanden van een betonnen muur.

Om meer zekerheid en inzicht te krijgen over deze verklaring voor de verschillen in radonconcentraties is aanvullend onderzoek gestart (zie ook een separaat RIVM-rapport over thoron [10]). Hiervoor zijn radon en thoron gemeten op verschillende afstanden tot een muur. Zoals in Figuur 5 is te zien, neemt de door de FzK-detectoren gemeten radonconcentratie toe als ze zich dichterbij de betonnen muur bevinden. De concentratie van radon die is gemeten met een detector van Gammadata hangt niet van de afstand tot de muur af.

We kunnen daarom concluderen dat de hogere concentraties uit de eerste en tweede survey zijn toe te schrijven aan het niet onderscheiden van radon en thoron door de FzK-radondetectoren.

4.3 Interpretatie van meetresultaten in eerdere surveys

Zoals in Figuur 4 te zien is, stijgt de radon+thoronconcentratie met het bouwjaar, met name in de jaren zeventig. Nu duidelijk is dat in de eerste en tweede survey naast radon ook thoron is gemeten, komt de vraag op of de stijging in de jaren zeventig het gevolg was van een toename van de radon- of van de thoronconcentratie, of misschien wel van allebei.

De conclusie van de vorige radonsurveys [2],[3] was dat in de jaren zeventig de radonconcentratie was gestegen. Hiervoor werden als verklaringen genoemd de toegenomen isolatie van woningen en de stijging van het gebruik van betonproducten in de bouw van huizen [3]. Een toegenomen isolatie van

woningen zou de ventilatie hebben doen afnemen en een stijging van de radonconcentratie tot gevolg hebben gehad.

We kunnen voor de resultaten van de eerste en tweede survey geen onderscheid meer maken tussen radon en thoron. In de Nederlandse radonsurveys is nooit geregistreerd waar precies de radondetectoren zijn geplaatst. Daarom is niet achteraf te bepalen hoe hoog de thoronconcentraties zijn geweest.

Er is niet met zekerheid vast te stellen of in Figuur 4 de radonconcentratie toeneemt met het bouwjaar, de thoronconcentratie, of allebei. Wel is duidelijk dat de som van radon- en thoronconcentratie toeneemt met het bouwjaar. Recent beschikbaar gekomen technieken maken het voor verder onderzoek wel mogelijk om onderscheid te maken tussen radon- en thoronconcentraties.

4.3.1 Herkomst thoron

Bij een eventuele stijging van de thoronconcentratie met het bouwjaar kan het toegenomen gebruik van bouwmaterialen die specifiek thoron exhaleren een rol hebben gespeeld. Als thoron in bouwmaterialen aanwezig is, kan het door de korte vervaltijd alleen uit de buitenste laag van de muur ontsnappen. Thoron kan daarom uit een kale muur afkomstig zijn, of uit aangebracht pleisterwerk.

Muren zijn in Nederland vaak afgewerkt met gips, dat in drie belangrijke soorten voorkomt: natuurgips, ruwe gips en fosfogips. Vooral pleisterwerk waarin fosfogips is verwerkt wordt geassocieerd met verhoogde thoronconcentraties omdat fosfogips verhoogde gehalten aan natuurlijke radionucliden zoals radium en thorium kan bevatten [15]. Fosfogips is een bijproduct uit de fosforindustrie. Het gehalte aan radionucliden in het fosfogips hangt sterk af van de herkomst van het fosfaaterts dat wordt gebruikt.

Overeenkomstig informatie van de Nederlandse Branchevereniging Gips zijn de herkomst van het fosfaaterts en de toepassing ervan in woningen uit de verschillende surveys sterk aan verandering onderhevig geweest. De toename van de radon+thoronconcentratie in de jaren zeventig zoals die in Figuur 4 is te zien, zou daarom goed het gevolg kunnen zijn van een verandering in het gebruik van specifieke bouwmaterialen zoals fosfogips.

Het bovenstaande geeft aanleiding om bij vervolgonderzoek naar radon- en thoronconcentraties in Nederlandse woningen ook stil te staan bij de toepassing van verschillende bouwmaterialen en, in het geval van fosfogips, naar aspecten zoals de verspreiding en de periode van gebruik. Het RIVM-rapport over thoron [10] gaat dieper in op het vervolgonderzoek dat uitgevoerd moet worden om meer inzicht te krijgen in de stralingsbelasting in Nederlandse woningen.

5 Stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen

In Nederland is door het ministerie van VROM en VNO-NCW (namens de bouwsector) in een convenant afgesproken dat een stijging van de stralingsbelasting in nieuwbouwwoningen vermeden dient te worden [16]. Hierbij werd destijds verondersteld dat radon en externe straling de grootste bijdragen leverden aan deze stralingsbelasting en thoron slechts een beperkte. Het belangrijkste doel van het VERA-onderzoek is om vast te stellen of deze *standstill* wordt gerealiseerd.

In dit hoofdstuk worden de (onder meer) uit het VERA-project voortkomende nieuwe inzichten over stralingsbelasting in nieuwbouwwoningen samengevat. Deze nieuwe inzichten geven aanleiding om naast radon en externe straling ook thoron te beschouwen bij de analyse van de stralingsbelasting binnenshuis.

5.1 Algemene aannames

In dit rapport is de stralingsbelasting berekend die is toe te schrijven aan radon, thoron en externe straling uit bouwmaterialen, van een persoon die 90% van zijn tijd verblijft in de woonkamer van een woning gebouwd in Nederland tussen 1994 en 2003. De aanname voor de verblijftijd van 90% is afkomstig uit het RIVM-rapport 'Ionising radiation exposure in the Netherlands' [1].

5.1.1 Dosisconversiecoëfficiënten

De isotopen radon (^{222}Rn) en thoron (^{220}Rn) hebben vanuit het oogpunt van stralingsbescherming enkele belangrijke overeenkomsten: het zijn de dochternucliden die gezondheidsschade veroorzaken, en in beide gevallen treedt met name schade op in de longen. UNSCEAR [22] schat de dosisconversiecoëfficiënt voor blootstelling van de longen aan thoron in evenwicht met dochters op $40 \text{ (nSv/h)/(Bq/m}^3\text{)}$, voor radon is dit $9 \text{ (nSv/h)/(Bq/m}^3\text{)}$. Overigens wijzen recente publicaties van de ICRP [17],[18] erop dat de dosisconversiecoëfficiënten in de nabije toekomst waarschijnlijk naar boven zullen worden bijgesteld.

5.2 Radon

De gemiddelde radonconcentratie in de woonkamer van Nederlandse woningen gebouwd tussen 1994 en 2003 bedraagt $13,5 \text{ Bq/m}^3$, zie paragraaf 3.1. Omdat de gezondheidseffecten samenhangen met de concentratie van de dochterproducten wordt de zogeheten Equivalente Evenwichtsconcentratie (EEC) gebruikt om de vertaling naar een effectieve dosis te kunnen maken. Hiervoor wordt de radonconcentratie vermenigvuldigd met een evenwichtsfactor, die in het geval van radon 0,4 bedraagt [22]. De EEC voor radon in evenwicht met zijn dochterproducten in woonkamers van nieuwbouwwoningen is dan $5,4 \text{ Bq/m}^3$. Met de aanname van 90% verblijftijd en bovenstaande dosisconversiecoëfficiënten komen we op een jaardosis door blootstelling aan radon in de woningen uit de VERA-survey van 0,39 mSv. Hier is ook een kleine bijdrage ten gevolge van de opname van radon in bloed opgenomen.

5.3 Thoron

Er zijn vanuit het oogpunt van stralingsbescherming ook enkele belangrijke verschillen tussen radon en thoron. Radon heeft een halveringstijd van bijna vier dagen, terwijl de halveringstijd van thoron minder dan een minuut bedraagt. Thoron dat binnenshuis vrijkomt uit bouwmaterialen vervalst dan ook vaak dicht bij de muur, de vloer of het plafond waaruit het is vrijgekomen, en de concentratie thoron neemt dan snel af in de buurt van de bron. De thoronconcentratie is dus sterk plaatsafhankelijk, terwijl de concentratie van het veel langer levende radon (vrijwel) overal in een ruimte hetzelfde zal zijn. Het is daarom goed mogelijk op grond van een meting van de radonconcentratie op één plaats in een ruimte uitspraken te doen over de stralingsbelasting, terwijl dat voor de thoronconcentratie niet kan. Meestal wordt daarom van thoron alleen de EEC gerapporteerd. Wereldwijde schattingen voor de EEC van thoron in het binnenmilieu lopen uiteen van 0,2 Bq/m³ tot 12 Bq/m³ [22]. Hierbij moet worden opgemerkt dat de hoogste waarden in gebieden met vulkanisch gesteente worden bereikt en dat in met Nederland vergelijkbare landen de waarden tussen 0,2 en 1,1 Bq/m³ liggen. De corresponderende schattingen voor de jaarlijks opgelopen effectieve dosis ten gevolge van blootstelling aan thoron binnenshuis liggen (met de aanname van 90% verblijftijd) tussen 0,06 mSv en 0,35 mSv.

In ICRP 50 [19] en UNSCEAR 2006 [20] wordt voor woningen een typische EEC van thoron van 0,5 Bq/m³ gerapporteerd. Dit leidt met de aanname van 90% verblijftijd tot een jaardosis door blootstelling aan thoron van 0,16 mSv.

In deze schatting is het eventuele effect van bouwmaterialen zoals bepaalde soorten van fosfogips op de thoronconcentratie niet meegenomen. Het is denkbaar dat de thoronconcentratie - en daarmee ook de stralingsbelasting - groter is in woningen waar de muren met dergelijk fosfogips zijn gestuukt. In het RIVM-rapport over thoron [10] wordt aangegeven dat wanneer in een worstcasescenario wordt gerekend met de aanname dat de muren zijn gestuukt met een bepaald type fosfogips, een effectieve jaardosis van 3 mSv door blootstelling aan thoron bereikt kan worden.

5.4 Externe straling

In Tabel 7 staat dat het omgevingsdosisequivalenttempo in de woonkamers van woningen uit de survey gemiddeld 0,89 mSv per jaar bedraagt. Om de effectieve jaardosis te berekenen moet het omgevingsdosisequivalent worden omgerekend en moet het aandeel van straling uit bouwmaterialen in de dosis worden vastgesteld. De totale dosis door externe straling binnenshuis is namelijk afkomstig van kosmische straling, terrestrische straling en straling uit bouwmaterialen.

Kosmische straling is hoogenergetisch: het omgevingsdosisequivalent in een jaar is daarom numeriek gelijk aan de effectieve dosis [21]. Voor terrestrische straling en straling uit bouwmaterialen moet een factor van 0,59 worden gehanteerd [21] om omgevingsdosisequivalent in effectieve dosis om te rekenen.

Terrestrische en kosmische straling worden voor een deel afgeschermd door de bouwmaterialen. In Nederland is nog weinig onderzoek gedaan naar de afscherming van kosmische straling door bouwmaterialen. In het UNSCEAR 2000-rapport [22] wordt uitgegaan van een wereldgemiddelde transmissiefactor van 0,8. In de bepaling van dit gemiddelde zijn echter ook de transmissiefactoren van houten huizen meegenomen. In Nederland wordt doorgaans met beton en baksteen gebouwd, waarvan de transmissiefactor veel lager is. We nemen daarom, zoals ook in een NRG-rapport [7] is gebeurd, een gemiddelde waarde van 0,6 aan. Een Nederlander die 100% van de tijd buiten staat, ontvangt een jaardosis door kosmische straling van 0,35 mSv [1]. Met de transmissiefactor 0,6 reduceert dit tot 0,21 mSv binnenshuis. Deze waarde is numeriek gelijk aan die van het omgevingsdosisequivalent.

De transmissiefactor van terrestrische straling is 0,1 [1]. De bijdrage van terrestrische straling aan het omgevingsdosisequivalent is daarmee 0,03 mSv.

Door de bijdragen van kosmische en terrestrische straling af te trekken van het totale omgevingsdosisequivalent door externe straling binnenshuis kan de bijdrage van straling uit bouwmaterialen berekend worden. Deze bedraagt 0,65 mSv, naar effectieve dosis omgerekend is dit 0,39 mSv. Voor een bewoner van een huis uit de survey die 90% van de tijd in zijn woonkamer verblijft, reduceert dit tot een jaardosis van 0,35 mSv.

5.5 Totale stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen

De totale stralingsdosis die toe te schrijven is aan radon, thoron en externe straling uit bouwmaterialen van een persoon die 90 % van zijn tijd verblijft in de woonkamer van een woning gebouwd tussen 1994 en 2003, bedraagt 0,90 mSv. Dit is lager dan de waarde van 1,3 mSv die is af te leiden voor de stralingsbelasting in woningen uit de vorige survey en tevens lager dan de waarde van 1,1 mSv die geldt voor het gehele Nederlandse woningbestand en die is vermeld in het rapport over de stralingsbelasting van de Nederlandse bevolking [1]. Deze resultaten zijn samengevat in Tabel 8.

Tabel 8. Vergelijking van jaardosiswaarden (mSv) binnenshuis (radon, thoron en externe straling uit bouwmaterialen) voor de huidige en vorige survey [3] en uit het overzicht van de stralingsbelasting in Nederland uit 2003 [1].

	Stralingsbelasting in Nederland 2003 [1]	Vorige survey [3]	Huidige survey
	Gehele Nederlandse woningbestand	Bouwperiode 1985-1993	Bouwperiode 1994-2003
Radon	0,70	0,83	0,39
Thoron*	0,10	0,16	0,16 (0,06-0,35)
Externe straling	0,34	0,34**	0,35
Totaal	1,1	1,3	0,90 (0,80-1,1)

* de getallen voor thoron zijn niet gebaseerd op meetresultaten – vermelde dosiswaarden zijn gebaseerd op inzichten ontleend aan UNSCEAR, in het geval van de surveys de meest recente inzichten [22]

** in de vorige survey zijn geen metingen verricht aan de externe straling uit bouwmaterialen. De vermelde waarde is overgenomen uit het overzicht van de stralingsbelasting in Nederland [1].

De getallen uit de vorige rapportages waren gebaseerd op radonmetingen uit de vorige radonsurvey, waar - zoals gesteld - radondetectoren ook thoron hebben gemeten. Voor thoron is een onzekerheidsmarge gegeven op basis van metingen van de EEC van thoron zoals gerapporteerd door UNSCEAR [22]. De eventuele bijdrage van afwerkingsmateriaal aan de thoronconcentratie is hier buiten beschouwing gelaten.

Voorgaande studies over de stralingsbelasting in Nederland gaven in de som van radon en thoron binnenshuis een relatief belang van thoron van 15 % [23] en 13 % [1]. Uit de resultaten van dit rapport blijkt echter een relatief belang van 29 % als de eventuele bijdrage van afwerkingsmateriaal aan de thoronconcentratie buiten beschouwing wordt gelaten.

5.5.1 Standstill van de stralingsbelasting

Eén van de oorspronkelijke doelstellingen van het VERA-onderzoek was het vaststellen van de stralingsbelasting in woningen en de eventuele veranderingen in de tijd.

Er zijn geen aanwijzingen dat de radonconcentratie en dosis door externe straling in woningen gebouwd tussen 1994 en 2003 significant zijn veranderd. Uit dit onderzoek volgt dat thoron waarschijnlijk een groter belang in de stralingsbelasting heeft dan voorheen werd gedacht. Nader onderzoek moet uitwijzen wat de thoronconcentraties in Nederlandse woningen zijn en hoe deze concentratie zich in de tijd heeft ontwikkeld.

6 Antwoorden op onderzoeksvragen

Dit hoofdstuk geeft de antwoorden op de specifieke vragen die aan het begin van het project zijn gesteld.

1. *Wat is de ontwikkeling van de radonconcentratie en externe straling in nieuwbouwwoningen in Nederland?*

De radonconcentratie in Nederlandse nieuwbouwwoningen is in de periode 1994-2003 niet gestegen. Een vergelijking met de periode ervoor is moeilijk omdat is gebleken dat in vorige surveys radondetectoren ook thoron hebben gemeten.

De totale bijdrage van externe straling binnenshuis is niet significant veranderd ten opzichte van voorgaande studies. Er zijn geen aanwijzingen dat de bijdrage van de bouwmaterialen is veranderd.

2. *Wat is de bijdrage van buitenlucht, kruipruimte en bouwmaterialen aan de radonconcentratie in de woonkamer?*

Uit de analyses van de ventilatie- en radonmetingen is gebleken dat tweederde van het radon in de woonkamer uit de bouwmaterialen komt, ongeveer 10 % uit de kruipruimte en de rest - bijna een kwart - van buiten. Deze resultaten wijken nauwelijks af van de resultaten uit de vorige survey.

3. *Wat is de effectieve ventilatie in relatie tot de kwaliteit van het binnenmilieu in het algemeen en wat zijn de optredende radonconcentraties in het bijzonder, ofwel: hangt een eventuele verandering in de radonconcentratie samen met gewijzigde ventilatie, of met wijzigingen in de bronterm uit bouwmaterialen?*

De verandering in de radonconcentratie van de VERA-survey ten opzichte van die in de vorige survey hangt samen met de meetmethode: in vorige surveys hebben radondetectoren naast radon ook thoron geregistreerd.

Echter, deze studie heeft laten zien (zie Figuur 3) dat er een omgekeerde correlatie bestaat tussen ventileren en radonconcentratie in woningen. Hoewel dit geen causaal verband bewijst, ondersteunt dit resultaat de verwachting dat meer ventileren leidt tot lagere radonconcentraties.

4. *Is er, wat betreft de radonconcentratie, onderscheid te maken naar het type woning?*

Er is in het onderzoek gebleken dat de radonconcentratie in eengezinswoningen afwijkt van die in meergezinswoningen. In Tabel 2 staat dat de gemiddelde radonconcentratie in woonkamers van eengezinswoningen met 12,9 Bq/m³ lager is dan die in de woonkamers van meergezinswoningen, waar de gemiddelde radonconcentratie 15,1 Bq/m³ bedraagt.

5. *Hoe hangt de (effectieve) ventilatie van de woonkamer en hoofdslaapkamer samen met het type woning, het toegepaste ventilatiesysteem, het door bewoners aangegeven gedrag met betrekking tot ventilatie en het gebruik van het ventilatiesysteem, en eventuele andere factoren?*

In veel meergezinswoningen is de PFT-methode niet toepasbaar gebleken in alle ruimten waarin gemeten is, waardoor te weinig resultaten overbleven om ook over het verschil voor eengezins- en meergezinswoningen een uitspraak over ventilatie te kunnen doen. Daarnaast was er in het

ventilatiegedrag en de toegepaste ventilatiesystemen zo weinig variatie, dat ook hier geen verband met de werkelijke ventilatie gevonden kon worden.

7 Conclusies

Er zijn geen aanwijzingen dat de dosis door radon en externe straling uit bouwmaterialen in woningen gebouwd tussen 1994 en 2003 significant is veranderd. Dit is de belangrijkste uitkomst van de eerste survey van het VERA-onderzoek, een onderzoek dat tot doel heeft de *standstill* van de stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen te evalueren.

De resultaten van de ventilatiemetingen die in het VERA-project zijn uitgevoerd geven aan dat meer ventileren samenhangt met een lagere radonconcentratie. De ventilatiemetingen hebben bovendien inzicht gegeven in de herkomst van radon in de woonkamer. Dit bevestigt eerdere bevindingen dat radon met name uit de bouwmaterialen afkomstig is.

In het project is ook bekend geworden dat in voorgaande radonsurveys in Nederland radondetectoren zijn gebruikt die naast radon ook thoron hebben gemeten, en bovendien thoron als radon hebben geregistreerd. De gemiddelde radonconcentratie in nieuwbouwwoningen gemeten in het VERA-onderzoek, hoewel nagenoeg constant over de meetperiode, is hierdoor aanzienlijk lager dan de radonconcentraties die in vorige surveys zijn gerapporteerd.

De rol van thoron in de stralingsbelasting in Nederlandse woningen is waarschijnlijk groter dan oorspronkelijk werd aangenomen. Het is bovendien goed mogelijk dat de in de vorige studies vastgestelde toename van de radonconcentratie in de jaren zeventig voor een deel kan worden toegeschreven aan een toename van de thoronconcentratie. De ontwikkeling van de radonconcentratie in woningen van voor de VERA-survey (1994-2003) is niet goed te bepalen met de gegevens uit voorgaande surveys.

Een volledig beeld van de stralingsbelasting binnenshuis wordt gegeven als alle componenten daarin worden meegenomen. Vervolgonderzoek moet daarom gericht zijn op het krijgen van inzicht in de thoronconcentratie en de bijdrage van thoron in de stralingsbelasting in Nederlandse woningen.

Literatuur

1. Eleveld H - Ionizing radiation exposure in the Netherlands. RIVM-rapport 861020002 (2003).
2. Put LW, Veldhuizen A, De Meijer RJ – Radonconcentraties in Nederland, Verslag van SAWORA – project A2, rapport KVI-111i, Groningen (1985).
3. Stoop P, Glastra P, Hiemstra Y, De Vries L, Lembrechts J – Results of the second Dutch national survey on radon in dwellings. RIVM-rapport 610058006, Bilthoven (1998).
4. Blaauboer RO - Opzet van het Ventilatie Radononderzoek. RIVM-rapport 610790002 (2008).
5. Bader S, Dekkers SAJ, Blaauboer RO. Ventilatie en de samenhang met radon in nieuwbouwwoningen in Nederland. RIVM-rapport 610790006 (2009).
6. Blaauboer RO, Dekkers SAJ, Slaper H, Bader S - Stralingsbelasting in nieuwbouwwoningen - voorlopige resultaten. RIVM-briefrapport 610790004 (2008).
7. De Jong P, van Dijk JWE. Analyse van het externe dosistempo in woningen. NRG-rapport NRG-K5098/09.97299 (2009).
8. Julius HW, van Dongen R - Stralingsbelasting van de bevolking t.g.v. natuurlijke gammabronnen. Stralenbeschermingsreeks 10. Ministerie van VROM, Den Haag (1985).
9. De Meijer RJ, Put LW, Veldhuizen A - Radonconcentraties in Nederland. Stralenbeschermingsreeks 14. Ministerie van VROM, Den Haag (1986).
10. Blaauboer RO - Meting van ^{220}Rn en consequenties voor eerdere ^{222}Rn surveys. RIVM-rapport 610790011 (2010).
11. Vargas A, Ortega X – Influence of environmental changes on integrating radon detectors: results of an intercomparison exercise, Radiation Protection Dosimetry. 123(4) 529-536 (2007)
12. Tokonami S, Yang M, Sanada T – Contribution from thoron on the response of passive radon detectors. Health Physics 80(6) (2001)
13. Doi K, Tokonami S, Yonehara H, Yoshinaga S - A Simulation Study of Radon and Thoron Discrimination Problem in Case-Control Studies. Journal of Radiation Research. 50(6) 495-506 (2009)
14. BMU - Thoron Kalibrierung der Radon/Thoron-Monitore und der Einfluss auf Kernspur-Radondosimeter. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Arbeitsgruppe RS I 1, 2004-648, Bonn (2004).
15. De Jong P, Van Dijk W, Burger HP - ^{226}Ra and ^{228}Ra concentrations in gypsum plasters and mortars used in the Netherlands. Proceedings of the Second International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM II). 10-13 november, Krefeld, Duitsland.(1998)
16. Correspondentie ministerie van VROM en VNO-NCW december 2003
17. ICRP Publication 103 - Recommendations of the ICRP, Annals of the ICRP, Volume 37(2-4)
18. ICRP Statement on Radon, 28 november 2009
19. ICRP Publication 50 - Lung Cancer risk from indoor exposures to radon daughters, Annals of the ICRP, Volume 17(1)
20. UNSCEAR - Sources and Effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2006 report to the General Assembly. United Nations, New York (2006)
21. Bos AJJ, Draaisma FS, Okx WJC, Rasmussen CE - Inleiding tot de Stralingshygiëne, Elsevier Maarssen (2000)
22. UNSCEAR - Sources and Effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2000 report to the General Assembly. Volume I: Sources. United Nations, New York (2000)
23. Blaauboer RO, Vaas LH, Leenhouts HP - Stralenbelasting in Nederland in 1988. Publicatiereeks stralenbescherming nr 1992/56, Ministerie van VROM, Den Haag (1992)

RIVM
Rijksinstituut
voor Volksgezondheid
en Milieu

Postbus 1
3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl