



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

A detailed map of the Netherlands is shown, with numerous green and red pushpins placed across it. The map includes labels for various cities and regions, such as Amsterdam, Rotterdam, The Hague, and Utrecht. The pushpins are concentrated in the western and central parts of the country.

Radon, thoron en gammastraling *op* *werkplekken* en in *publiek toegankelijke* *gebouwen* in Nederland

Resultaten RIVM-meetcampagne
2016-2017



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

**Radon, thoron en gammastraling op
werkplekken en in publiek toegankelijke
gebouwen in Nederland**

Resultaten RIVM-meetcampagne 2016-2017

RIVM-Rapport 2018-0027

Colofon

© RIVM 2018

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.

DOI 10.21945/RIVM-2018-0027

P. Goemans (auteur), RIVM
I.R. de Waard (auteur), RIVM
R.O. Blaauboer (auteur), RIVM
R.C.G.M. Smetsers (auteur), RIVM
G.M. de Groot (auteur), RIVM

Contact:
Pauline Goemans
RIVM
radon@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW), directie Gezond en Veilig werken, in het kader van het project Radon op de werkplek (Z/110029) en de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS), in het kader van het programma stralingsbescherming (M/390012).

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Radon, thoron en gammastraling op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen in Nederland

Resultaten RIVM-meetcampagne 2016-2017

Op vrijwel alle werkplekken en in openbare gebouwen zijn de gemeten radonconcentraties laag, gemiddeld $15,9 \text{ Bq/m}^3$ (Becquerel per kubieke meter). Wereldwijd bedraagt de gemiddelde radonconcentratie in gebouwen ongeveer 40 Bq/m^3 .

Slechts in enkele zeer specifieke gevallen in dit onderzoek zijn de radonconcentraties hoger dan 300 Bq/m^3 . Bijvoorbeeld bij enkele grondwater-zuiveringsstations bij drinkwaterbedrijven en ondergrondse ruimten zoals grotten. De radonconcentraties zijn, net als in woningen, iets hoger in Zuid-Limburg en het Rivierengebied dan in de rest van Nederland. Dit komt doordat er in deze gebieden van nature meer radon vrijkomt uit de bodem.

Dit blijkt uit een meetcampagne die het RIVM in de periode 2016-2017 heeft uitgevoerd op enkele honderden werkplekken en openbare gebouwen in Nederland. De resultaten van de meetcampagne geven een beeld van de radonconcentraties in gebouwen in Nederland. Dit is onder andere nodig om Europese regelgeving te implementeren. Een van de Europese verplichtingen is om nationale referentieniveaus vast te stellen voor radon op werkplekken en voor radon in openbare gebouwen. Beide referentieniveaus zijn in Nederland sinds 6 februari 2018 in het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming vastgesteld op 100 Bq/m^3 .

Behalve naar radon is onderzoek gedaan naar zogeheten thorondochters en naar gammastraling. Deze dragen net als radon bij aan de blootstelling aan natuurlijke radioactiviteit in gebouwen. De thorondochterconcentraties die nu op Nederlandse werkplekken en in openbare gebouwen zijn gemeten, liggen in lijn met de waarden die volgens internationale organisaties in gebouwen verwacht kunnen worden. De resultaten van de metingen naar gammastraling zijn vergelijkbaar met die in eerder uitgevoerde onderzoeken in Nederland en zijn laag ten opzichte van het vastgestelde referentieniveau voor gammastraling uit bouwmaterialen.

Radon en thoron zijn radioactieve edelgassen die van nature ontstaan in de bodem en in bouwmaterialen die daarvan worden gemaakt. Radon kan vanuit de bodem en bouwmaterialen in gebouwen terechtkomen. Thoron in gebouwen komt met name uit materialen waarmee de muren en plafonds zijn afgewerkt. De radioactieve stoffen die ontstaan als radon en thoron vervallen, vergroten het risico op het krijgen van longkanker, vooral bij rokers. Gammastraling in gebouwen komt uit bouwmaterialen en uit het buitenmilieu (al wordt de straling van buiten grotendeels weer door het gebouw afgeschermd) en draagt bij aan de blootstelling aan externe straling in gebouwen.

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW) en de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS).

Kernwoorden: radon, thoron, gammastraling, straling, natuurlijke radioactiviteit, binnenmilieu, arbeidsomstandigheden

Synopsis

Radon, thoron and gamma radiation in Dutch workplaces and public buildings

Results of the RIVM survey 2016-2017

Radon concentrations are low at almost all workplaces and public buildings in the Netherlands. The average radon concentration in workplaces and public buildings within this study is 15,9 Bq/m³ (Becquerel per cubic metre). The average radon concentration in buildings worldwide is around 40 Bq/m³. The radon concentrations exceeded 300 Bq/m³ only in a very few specific cases in this study, such as groundwater treatment stations at water companies, and underground rooms such as caves. As seen in dwellings, the radon concentrations are slightly higher in workplaces and public buildings in the southern part of Limburg and the Meuse-Rhine-Waal river delta. This is due to elevated concentrations of natural radionuclides in the soil.

This was shown by a survey carried out by the RIVM at several hundred workplaces and public buildings in the Netherlands in the period 2016-2017. The reason for this survey was the European obligation to establish national reference levels for both radon in workplaces and radon in public buildings. On 6 February 2018 the Dutch government adopted national radon reference levels of 100 Bq/m³ in the Dutch Decree on Basic Safety Standards Radiation Protection (Bbs). In exceptional cases, the Minister can establish a higher reference level, of up to 300 Bq/m³.

Within this survey, measurements are carried out on radon as well as thoron progeny and gamma radiation. They both contribute, along with radon, to exposure from natural radionuclides in buildings. The results of the current thoron progeny measurements in Dutch workplaces and public buildings are in line with values that, according to international organisations, are to be expected in buildings. The gamma radiation measurements are comparable with those of studies carried out earlier in the Netherlands and are relatively favourable.

Radon and thoron are naturally occurring radioactive noble gasses, which are formed in soil and building materials made from soil. Indoor radon levels in the building arise partly from exhalation of radon from the soil and partly by exhalation of radon from building materials. Thoron in buildings originates from the inner building shell and specifically some applied finishing materials on walls and ceilings. Inhalation of non-gaseous radioactive decay products of radon and thoron contributes to the induction of lung cancer, particularly in smokers.

This study was commissioned by the Ministry of Social Affairs and Employment (SZW) and the Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection (ANVS).

Keywords: radon, thoron, gamma radiation, radiation, natural radioactivity, indoor environment, working conditions

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 11

- 1.1 Aanleiding voor het onderzoek — 11
- 1.1.1 Richtlijn 2013/59/Euratom — 11
- 1.1.2 Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs) — 13
- 1.2 Wat is er bekend uit eerder onderzoek? — 15
- 1.3 Bijdrage Belgische experts — 16
- 1.4 Leeswijzer — 16

2 Radon, thoron en gammastraling — 17

- 2.1 Radon en thoron — 17
- 2.2 Gammastraling — 18
- 2.3 Meetmethoden — 18

3 Opzet meetcampagne 2016-2017 — 21

- 3.1 Selectie van categorieën werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen — 21
 - 3.1.1 Reguliere werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen — 21
 - 3.1.2 Specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen — 22
 - 3.1.2.1 *Selectiecriteria specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen* — 24
- 3.2 Selecteren van bedrijven en instellingen voor deelname — 26
 - 3.2.1 Reguliere werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen — 26
 - 3.2.1.1 *Extra meetlocaties in Zuid-Limburg en het Rivierengebied* — 27
 - 3.2.2 Specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen — 27
- 3.3 Uitvoering meetcampagne — 29
 - 3.3.1 Tijdschema — 30

4 Meetresultaten radonconcentratie in gebouwen — 31

- 4.1 Reguliere werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen — 31
 - 4.1.1 Meetresultaten halfjaarsmeting versus jaarmeting —
 - 4.1.2 Meetresultaten in verschillende gebieden — 33
- 4.2 Specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen — 34
 - 4.2.1 Resultaten halfjaarsmeting versus jaarmeting — 34
- 4.3 Onzekerheid in de meetresultaten — 35

5 Meetresultaten thorondochterconcentratie in gebouwen — 37

- 5.1 Reguliere werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen — 37
 - 5.1.1 Meetresultaten in verschillende gebieden — 38
 - 5.1.2 Thorondochterconcentratie versus radonconcentratie — 39
- 5.2 Specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen — 39
- 5.3 Onzekerheid in de meetresultaten — 40

6 Meetresultaten gammastraling in gebouwen — 41

- 6.1 Omgevingsdosisequivalenttempo in gebouwen — 41
- 6.2 Onzekerheid in de meetresultaten — 42

7 Bespreking meetresultaten — 43

- 7.1 Radon — 44

7.1.1	Werkplekken — 44
7.1.2	Publiek toegankelijke gebouwen — 44
7.1.3	Meetonzekerheid — 45
7.2	Thoron — 45
7.3	Gammastraling — 46
7.4	Maatregelen voor de reductie van radon — 46
7.5	Vervolgonderzoek — 47

8 Conclusie — 49

Literatuur — 51

Bijlage 1 Wat zijn radon en thoron? — 53

Bijlage 2 Blootstelling aan externe straling binnenshuis — 63

Bijlage 3 Overzicht van het aantal deelnemende bedrijven en instellingen per categorie — 67

Samenvatting

Het RIVM heeft in de periode 2016-2017 een meetcampagne uitgevoerd naar radon, thoron en gammastraling op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen in Nederland.

Radon en thoron zijn radioactieve edelgassen die van nature ontstaan in de bodem en in bouwmaterialen die daarvan worden gemaakt. Radon kan vanuit de bodem en bouwmaterialen in gebouwen terechtkomen. Thoron in gebouwen is afkomstig van de buitenste lagen van wanden, vloeren en plafonds (de wandafwerkmaterialen). Wanneer radon en thoron vervallen, ontstaan vaste dochterproducten die zich aan stofdeeltjes in de lucht kunnen hechten. De radon- en thorondochters die via de stofdeeltjes worden ingeademd en in de longen verder vervallen dragen bij aan het risico op het krijgen van longkanker. Voor rokers is dat risico 25 maal groter dan voor niet-rokers.

Gammastraling uit bouwmaterialen draagt bij aan de blootstelling aan externe straling in gebouwen. Tegelijkertijd schermen deze bouwmaterialen de gammastraling uit het buitenmilieu weer grotendeels af. Blootstelling aan externe straling levert een kleine bijdrage aan het risico op het krijgen van kanker.

De Europese richtlijn 2013/59/Euratom¹ verplicht lidstaten onder andere om nationale referentieniveaus² voor radon in gebouwen, waaronder werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen, vast te stellen. Het Ministerie van SZW en de ANVS hebben daarom het RIVM opdracht gegeven om een meetcampagne uit te voeren naar radonconcentraties op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen in Nederland. Daarnaast zijn in deze meetcampagne metingen uitgevoerd naar de thorondochterconcentraties en gammastralingsniveaus op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen.

De metingen zijn uitgevoerd op *reguliere* werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen, zoals kantoren en scholen, en op *specifieke* werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen waar mogelijk hogere radonconcentraties kunnen worden aangetroffen. Bijna 425 bedrijven en instellingen hebben deelgenomen aan de meetcampagne. De deelnemende bedrijven en instellingen hebben zelf de setjes met verschillende typen passieve detectoren voor het meten van radon, thorondochters en gammastraling opgehangen. Afhankelijk van het type detector zijn de detectoren na een halfjaar of na een jaar retour gestuurd naar het RIVM.

¹ [Richtlijn 2013/59/Euratom tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming tegen de gevaren verbonden aan de blootstelling aan ioniserende straling.](#)

² Referentieniveau: 'Waarde voor een effectieve dosis of equivalente dosis of voor een activiteitsconcentratie in een radiologische noodsituatie of in een bestaande blootstellingsituatie waarvan overschrijding zoveel mogelijk wordt voorkomen' (Bijlage 1 Bbs). Het referentieniveau is een instrument voor optimalisatie.

De jaargemiddelde radonconcentratie bedraagt gemiddeld over alle *reguliere* gebouwen in dit onderzoek $15,9 \pm 0,6 \text{ Bq/m}^3$. Op vier van de 572 meetlocaties bij verschillende bedrijven en instellingen is de gemeten waarde hoger dan 100 Bq/m^3 . In Zuid-Limburg en het Rivierengebied vallen de regiogemiddelde waarden iets hoger uit. Dat is in lijn met de resultaten uit het eerdere RIVM-onderzoek (2013-2014) naar radon in woningen.

Er is ook gekeken naar *specifieke* werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen waar mogelijk hogere radonconcentraties kunnen worden verwacht op basis van bijvoorbeeld het type werkzaamheden. Hier zijn op verschillende meetlocaties radonconcentraties van meer dan 100 Bq/m^3 gevonden. Het gaat om meetlocaties bij zeer specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen, die zijn geselecteerd op basis van het type gebouw of type werkzaamheden. Radonconcentraties hoger dan 100 Bq/m^3 zijn onder andere gevonden bij drinkwaterbedrijven, grotten en een bedrijf waar radioactief afval wordt opgeslagen.

De jaargemiddelde thorondochterconcentratie, uitgedrukt in EETC, is bepaald in een iets kleinere groep *reguliere* gebouwen en bedraagt gemiddeld $0,42 \pm 0,02 \text{ Bq/m}^3$. In één geval is een waarde hoger dan 3 Bq/m^3 gevonden.

De gemeten activiteitsconcentraties van thorondochters in de gebouwen zijn lager dan de gemeten activiteitsconcentraties van radon. Wanneer de gezondheidseffecten van langdurige blootstelling aan een radonconcentratie en aan een thorondochterconcentratie worden vergeleken, levert dit echter circa een factor tien verschil op tussen de radonconcentratie en de thorondochterconcentratie. Met andere woorden: het effect van langdurige blootstelling aan een EETC van 10 Bq/m^3 is bijvoorbeeld vergelijkbaar met het effect van langdurige blootstelling aan een radonconcentratie van 100 Bq/m^3 .

Het gammastralingsniveau is bepaald in bijna alle gebouwen in dit onderzoek en de resultaten zijn gezamenlijk geanalyseerd. Hier komt een gemiddeld omgevingsdosisequivalenttempo naar voren van $2,2 \pm 0,4 \mu\text{Sv/dag}$. Deze waarde komt nagenoeg overeen met het gemiddelde natuurlijke niveau van gammastraling in ons land.

In dit onderzoek zijn op een tiental meetlocaties bij zeer specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen radonconcentraties tot meer dan 300 Bq/m^3 gevonden. Uit eerdere onderzoeken is bekend dat er relatief eenvoudige maatregelen kunnen worden genomen om de blootstelling aan radon te reduceren. Meer ventileren zorgt ervoor dat de radonconcentratie in het binnenmilieu afneemt. In een aantal gevallen kan mogelijk met deze maatregel worden volstaan. Daarnaast kan men in de gevallen waar ventileren niet mogelijk is, de blootstelling aan radon beperken door de verblijfsduur te verkorten. Voor specifieke gevallen kan per situatie worden bekeken welke (aanvullende) maatregelen kunnen worden overwogen.

1 Inleiding

In het kort

De Europese richtlijn 2013/59/Euratom verplicht lidstaten onder andere om nationale referentieniveaus voor radon in gebouwen, waaronder werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen, vast te stellen.

Het Ministerie van SZW en de ANVS hebben het RIVM opdracht gegeven een meetcampagne uit te voeren naar radonconcentraties, thorondochterconcentraties en gammastralingsniveaus op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen in Nederland.

In Nederland is niet eerder onderzoek gedaan naar de aanwezigheid van radon en thoron op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen. Een onderzoek naar gammastralingsniveaus op werkplekken heeft sinds de jaren tachtig van de vorige eeuw niet meer plaatsgevonden. Voor woningen zijn wel (recentere) gegevens beschikbaar.

1.1 Aanleiding voor het onderzoek

In de voorbereidingen op de implementatie van richtlijn 2013/59/Euratom heeft het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW) het RIVM eind 2015 opdracht gegeven om een meetcampagne uit te voeren naar radonconcentraties op werkplekken. De Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) heeft zich als opdrachtgever aangesloten bij deze meetcampagne, zodat een onderzoek naar radonconcentraties in publiek toegankelijke gebouwen gelijktijdig kon plaatsvinden. In veel gebouwen zullen bovendien zowel werknemers als leden van de bevolking aanwezig zijn. De beleidsverantwoordelijkheid voor de bescherming van werknemers en het vaststellen van een referentieniveau voor de radonconcentratie in werkruimten ligt bij de minister van SZW. De beleidsverantwoordelijkheid voor de bescherming van leden van de bevolking en het vaststellen van een referentieniveau voor de radonconcentratie in publiek toegankelijke gebouwen ligt bij de staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat (IenW).

De resultaten van deze meetcampagne worden in dit rapport gezamenlijk, voor zowel het Ministerie van SZW als voor de ANVS, besproken. Een aparte beschrijving van de meetresultaten voor enerzijds werkplekken en anderzijds publiek toegankelijke gebouwen is door de opzet van de meetcampagne minder geschikt. Een gezamenlijk rapport geeft bovendien een compleet beeld van de resultaten van dit onderzoek.

1.1.1 Richtlijn 2013/59/Euratom

Eind 2013 heeft de Raad van de Europese Unie richtlijn 2013/59/Euratom (hierna: de richtlijn) aangenomen tot vaststelling van de basishoudingen voor stralingsbescherming. De basishoudingen richten zich op de bescherming van iedereen die te maken heeft met risico's van ioniserende straling: leden van de bevolking, werknemers en patiënten. Er wordt onderscheid gemaakt tussen gepland gebruik van ioniserende straling ('geplande blootstellingsituaties'), ongevallen en incidenten ('radiologische noodsituaties') en ongeplande aanwezigheid van

radioactiviteit ('bestaande blootstellingsituaties'). In de richtlijn zijn, ten opzichte van richtlijn 96/29/Euratom³, (meer specifieke) bepalingen opgenomen over radon in werkruimten, gebouwen en woningen. Deze bepalingen moeten de lidstaten op 6 februari 2018 in hun nationale wetgeving hebben opgenomen.

Nationale referentieniveaus

De richtlijn verplicht alle lidstaten onder andere om nationale referentieniveaus voor radonconcentraties in werkruimten en in gebouwen vast te stellen (zoals bepaald in artikel 54 en 74). Dit is een nieuw instrument voor optimalisatie en hoewel het geen limiet is, moet overschrijding van het referentieniveau zoveel mogelijk worden voorkomen. De referentieniveaus hebben betrekking op radon op werkplekken, in woningen en in publiek toegankelijke gebouwen. Deze referentieniveaus zijn uitgedrukt in een jaargemiddelde activiteitsconcentratie in de lucht, en mogen volgens de richtlijn niet meer bedragen dan 300 Bq/m³. Voor werkplekken kan een overschrijding van dit referentieniveau gerechtvaardigd zijn vanwege nationale omstandigheden.

Nationaal actieprogramma radon

Daarnaast verplicht de richtlijn elke lidstaat om een nationaal actieprogramma radon op te stellen om de langetermijnrisico's van blootstelling aan radon in woningen, publiek toegankelijke gebouwen en op werkplekken aan te pakken c.q. te beheersen. Zoals bepaald in artikel 103 moeten lidstaten 'passende maatregelen' nemen om de radonconcentratie in nieuwe gebouwen te beperken en (indien van toepassing) zones vaststellen waar de radonconcentratie 'in een groot aantal gebouwen' naar verwachting het betreffende nationale referentieniveau zal overschrijden. Bij de opstelling van een nationaal actieprogramma radon moeten onder andere de volgende elementen in aanmerking worden genomen (Bijlage XVIII van de richtlijn):

- *Een inventarisatie van soorten gebouwen en gebieden waarbij sprake is van mogelijk hoge blootstelling aan radon.*
- *Vaststelling van soorten voor het publiek toegankelijke werkplekken en gebouwen, ook in bepaalde gebieden, waar metingen moeten worden verricht op basis van een risicobeoordeling, onder meer rekening houdend met de verblijfsduur.*
- *De grondslag voor de vaststelling van referentieniveaus voor woningen en werkplekken.*
- *De strategie ter beperking van de blootstelling aan radon in woningen en voor het prioriteren van soorten gebouwen en gebieden waarbij sprake is van mogelijk hoge blootstelling aan radon.*
- *Strategieën voor het vergemakkelijken van corrigerende maatregelen na de bouw en om te voorkomen dat radon in nieuwe gebouwen komt, waaronder het inventariseren van bouwmaterialen met een significante radonemissie.*

³ [Richtlijn 96/29/Euratom tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming van de gezondheid der bevolking en der werkers tegen de aan ioniserende straling verbonden gevaren](#). Deze richtlijn is met ingang van 6 februari 2018 ingetrokken.

- *Een communicatiestrategie om het publieke bewustzijn te vergroten en lokale besluitvormers, werkgevers en werknemers te informeren over de risico's van radon, onder meer van radon in combinatie met roken.*
- *Doelstellingen op lange termijn om het risico op longkanker ten gevolge van blootstelling aan radon (voor rokers en niet-rokers) te verkleinen.*

Werkplekken

Voor werkplekken geldt dat lidstaten verplicht zijn om radonmetingen te laten uitvoeren op de benedenverdieping of in de kelder van werkplekken die zich in de vastgestelde zones bevinden. Radonmetingen dienen ook te worden uitgevoerd op specifieke werkplekken die op basis van een risicobeoordeling zijn geïdentificeerd, onder meer rekening houdend met de verblijfsduur.

Daarnaast is opgenomen dat lidstaten kennisgeving eisen van de werkgever wanneer op werkplekken, ondanks genomen maatregelen, het nationale referentieniveau voor de jaargemiddelde radonconcentratie nog steeds wordt overschreden.

Thoron

In de richtlijn is geen verplichting opgenomen voor het vaststellen van referentieniveaus voor thoron(dochters). De richtlijn geeft echter wel aan dat blootstelling aan radon én thoron binnenshuis, op werkplekken, in woningen en andere gebouwen, als bestaande blootstellingsituatie kan worden aangemerkt, indien deze vanuit het oogpunt van de stralingsbescherming niet kan worden verwaarloosd.

Gammastraling

Voor de uitwendige blootstelling binnenshuis aan gammastraling uit bouwmaterialen geldt ook dat deze kan worden aangemerkt als bestaande blootstellingsituatie, indien deze vanuit het oogpunt van de stralingsbescherming niet kan worden verwaarloosd. In de richtlijn is een referentieniveau van maximaal 1 mSv per jaar opgenomen voor de door bouwmaterialen uitgezonden gammastraling 'boven op de externe blootstelling buitenshuis'. Daarbij kunnen door de lidstaten bouwmaterialen worden aangewezen die aandacht behoeven, rekening houdend met de indicatieve lijst van materialen opgenomen in Bijlage XIII van de richtlijn. Het gaat om bouwmaterialen of grondstoffen die veel natuurlijke radioactiviteit bevatten.

1.1.2

Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs)

In Nederland is de Europese richtlijn geïmplementeerd met het in werking treden van het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs) op 6 februari 2018. In de voorbereidingen op de implementatie van de richtlijn hebben het Ministerie van SZW en de ANVS het RIVM opdracht gegeven om een meetcampagne uit te voeren naar radonconcentraties, thorondochterconcentraties en gammastralingniveaus op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen.

Het RIVM heeft de meetcampagne in de periode 2016-2017 uitgevoerd. De belangrijkste onderzoeksvragen waren:

1. Wat is de gemiddelde waarde van de jaargemiddelde radonconcentratie, thorondochterconcentratie en het gammastralingsniveau in de binnenlucht in de Nederlandse gebouwen (werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen) uit dit onderzoek?
2. In welke gebouwen (werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen) zijn de hoogste jaargemiddelde radonconcentraties, thorondochterconcentraties en gammastralingsniveaus te verwachten?
 - a. Wat is de jaargemiddelde radonconcentratie in de binnenlucht in deze gebouwen?
 - b. Wat is de jaargemiddelde thorondochterconcentratie in de binnenlucht in deze gebouwen?
 - c. Wat is het gammastralingsniveau in deze gebouwen?
3. Is een nationaal referentieniveau van 100 Bq/m³ voor Nederlandse werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen haalbaar?⁴
4. Welke maatregelen kunnen redelijkerwijs worden getroffen om de blootstelling van werknemers aan radon (en thorondochters en gammastraling) op de werkplek te reduceren?

Dit onderzoek vond gelijktijdig plaats met de ontwikkeling van het Bbs. De bepalingen over radon die volgen uit de richtlijn zijn, ondersteund door de tussenresultaten van dit onderzoek, in het Bbs vastgesteld (zie paragraaf 3.3.1 van dit rapport). In het Bbs zijn dus referentieniveaus voor de jaargemiddelde radonconcentratie in werkruimten (artikel 7.38), woningen, en publiek toegankelijke gebouwen (artikel 9.10) vastgesteld. In alle gevallen is een waarde van 100 Bq/m³ gekozen. Daarnaast geldt dat via een ministeriële regeling voor aangewezen werkplekken (art. 7.38, lid 8) of voor aangewezen specifieke categorieën van publiek toegankelijke gebouwen (artikel 9.10, lid 7) een hoger referentieniveau voor radon, tot 300 Bq/m³ kan worden vastgesteld. Dit is tot op heden niet gebeurd.

In het Bbs is ook bepaald dat de ANVS belast is met de gecoördineerde voorbereiding, het opstellen en het mede uitvoeren van een nationaal actieprogramma radon (artikel 6.20). De verantwoordelijkheid voor het vaststellen van een nationaal actieprogramma radon ligt bij de ministers van IenW (Infrastructuur en Waterstaat), SZW en VWS (Volksgezondheid, Welzijn en Sport).

Voor thoron en gammastraling zijn de bepalingen met betrekking tot bestaande blootstellingsituaties overgenomen in Bijlage 7 van het Bbs. Voor gammastraling uit bouwmaterialen binnenshuis geldt in Nederland sinds 6 februari 2018 een referentieniveau van maximaal 1 mSv per jaar 'boven op de externe blootstelling buitenshuis' (artikel 9.10 Bbs). In de Regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Rbs) zijn bouwmaterialen aangewezen die aandacht behoeven, omdat ze kunnen leiden tot een overschrijding van het referentieniveau.

⁴ Gedurende het onderzoek zijn de voorlopige resultaten van de halfjaarsmetingen van radon gedeeld met het Ministerie van SZW. Hierdoor was al eerder een goede indicatie beschikbaar van de radonconcentraties op werkplekken. De resultaten van de halfjaarsmeting zijn door het Ministerie van SZW gebruikt voor het vaststellen van een referentieniveau voor radon op werkplekken.

Voor Nederland zijn op dit moment weinig gegevens beschikbaar over thorondochterconcentraties en gammastralingsniveaus op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen. De resultaten van de metingen die nu zijn uitgevoerd kunnen als onderbouwing dienen voor eventueel te ontwikkelen beleid voor de beroepsmatige en/of bevolkingsblootstelling aan thorondochters en/of gammastraling.

1.2 Wat is er bekend uit eerder onderzoek?

In Nederland is niet eerder onderzoek gedaan naar de aanwezigheid van radon en thoron op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen. Voor woningen zijn die gegevens wel beschikbaar.

In de periode 2013-2014 heeft het RIVM een omvangrijk onderzoek uitgevoerd naar de jaargemiddelde radon- en thorondochterconcentratie in Nederlandse woningen die zijn gebouwd vanaf 1930 [1]. In ruim 2500 woningen zijn de radon- en thorondochterconcentraties bepaald. De over alle woningen gemiddelde radonconcentratie bedraagt $15,6 \pm 0,3 \text{ Bq/m}^3$. In 0,4% van de huizen zijn waarden gevonden tussen 100 en 200 Bq/m^3 . De jaargemiddelde thorondochterconcentratie (bepaald in iets minder dan 2500 woningen) is gemiddeld $0,64 \pm 0,01 \text{ Bq/m}^3$. Ongeveer 0,5% van de metingen is hoger dan 3 Bq/m^3 .

In de jaren tachtig van de vorige eeuw heeft in Nederland een onderzoek naar gammastraling op werkplekken plaatsgevonden. Voor woningen zijn recentere gegevens beschikbaar. In 1985 heeft een onderzoek naar de stralingsbelasting van de bevolking en stralingsniveaus in het binnenmilieu plaatsgevonden [2]. Voor dit onderzoek zijn (onder andere) op werkplekken metingen uitgevoerd met gammadosimeters (TLD) gedurende drie maanden en met een hogedruk-ionisatiekamer. Het gemiddelde dosistempo op werkplekken in dat onderzoek, bepaald met de hogedruk-ionisatiekamer, is $9,2 \mu\text{R/h}$ met een standaardafwijking van 16% [2, 3]. NRG heeft dit doorberekend naar een gemiddeld omgevingsdosisequivalenttempo van $2,3 \pm 0,4 \mu\text{Sv/dag}$ [3].

In 2010 is een onderzoek naar de stralingsbelasting in nieuwbouwwoningen door radon en externe straling gepubliceerd⁵ [4]. In circa driehonderd woningen in Nederland is toen in verschillende kamers het externe stralingsniveau bepaald. Het omgevingsdosisequivalenttempo in de woonkamers uit dat onderzoek bedraagt gemiddeld $0,89 \text{ mSv}$ per jaar [4]. Rekening houdend met de bijdrage van kosmische straling en terrestrische straling binnenshuis (na afscherming), wordt in het onderzoek uitgegaan van een bijdrage door gammastraling uit bouwmaterialen in de woonkamer van $0,65 \text{ mSv}$ per jaar [4]. Omgerekend naar effectieve dosis levert gammastraling uit bouwmaterialen een bijdrage van $0,35 \text{ mSv}$ per jaar aan de stralingsdosis voor bewoners [4]. Hierbij is rekening gehouden met de conversiefactor voor het omrekenen naar effectieve dosis en verblijfsduur. Bouwmaterialen dragen niet alleen bij aan de stralingsdosis binnenshuis, maar zorgen ook voor afscherming van terrestrische en kosmische straling uit het buitenmilieu. Die afscherming bedraagt volgens

⁵ Uit dit onderzoek in nieuwbouwwoningen kwam naar voren dat de in het verleden gebruikte radondetectoren gevoelig waren voor zowel radon als thoron.

berekening zo'n 0,30 mSv per jaar. De netto bijdrage van gammastraling uit bouwmaterialen in woningen bedraagt derhalve 0,05 mSv per jaar [5].

1.3 Bijdrage Belgische experts

Voor dit onderzoek zijn twee experts uit België, professor Hans Vanmarcke (SCK-CEN) en dr. Boris Dehandschutter (FANC), gevraagd om deze RIVM-meetcampagne bij bedrijven en instellingen te beoordelen. Beiden waren ook betrokken in de internationale auditcommissie van het RIVM-woningenonderzoek 2013-2014. De experts is gevraagd om een reactie te geven over de opzet en methode van de meetcampagne en over de resultaten en interpretatie hiervan. Ze hebben enkele nuttige aanbevelingen gedaan, die zijn meegenomen in de uitvoering van de meetcampagne en de analyse van de gegevens.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 staat een korte uitleg over radon, thoron en gammastraling en over de detectoren die in dit onderzoek zijn gebruikt voor het meten van radon, thorondochters en gammastraling. Hoofdstuk 3 behandelt de opzet van de meetcampagne, waarbij wordt ingegaan op het selectieproces van werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen en op de uitvoering van het onderzoek. De meetresultaten van het onderzoek zijn weergegeven in hoofdstuk 4 (radon), hoofdstuk 5 (thoron) en hoofdstuk 6 (gammastraling). In hoofdstuk 7 worden de meetresultaten besproken en vergeleken met het woningenonderzoek 2013-2014. In hoofdstuk 8 worden ten slotte de conclusies van het onderzoek weergegeven.

2 Radon, thoron en gammastraling

In het kort

Radon en thoron zijn radioactieve edelgassen die van nature ontstaan in de bodem en in daarvan gemaakte bouwmaterialen, zoals beton, cement, gips, baksteen en natuursteen. Radon kan vanuit de bodem en bouwmaterialen in gebouwen terechtkomen. Thoron is, als gevolg van de korte halveringstijd, afkomstig van de wandafwerkmaterialen. Wanneer radon en thoron vervallen, ontstaan dochterproducten die zich aan stofdeeltjes in de lucht kunnen hechten. De radon- en thorondochters die via de stofdeeltjes worden ingeademd en in de longen verder vervallen, dragen bij aan het risico op het krijgen van longkanker.

Gammastraling uit bouwmaterialen en gammastraling uit het buitenmilieu (die grotendeels weer door de bouwmaterialen wordt afgeschermd) dragen bij aan de blootstelling aan externe straling in gebouwen. Blootstelling aan gammastraling levert een kleine bijdrage aan het risico op het krijgen van kanker.

In deze meetcampagne zijn verschillende typen passieve detectoren gebruikt voor het meten van de radonconcentratie, thorondochterconcentratie en gammastraling in gebouwen.

2.1 Radon en thoron

Radon (Rn-222) en thoron (Rn-220) zijn radioactieve edelgassen die van nature ontstaan in de bodem en in daarvan gemaakte bouwmaterialen, zoals beton, cement, gips, bakstenen en natuursteen. Radon kan vanuit de bodem en bouwmaterialen in gebouwen terechtkomen. Thoron is, als gevolg van de korte halveringstijd, afkomstig van de buitenste lagen van wanden, vloeren en plafonds (de wandafwerkmaterialen). Door radioactief verval van radon en thoron ontstaan dochterproducten die niet gasvormig zijn. Deze niet-gasvormige radioactieve stoffen kunnen zich hechten aan stofdeeltjes in de lucht. Zowel de aan stof gebonden dochters als de niet aan stof gebonden dochters kunnen worden ingeademd. Na inademing blijven ze achter in de longen en geven daar straling af die kan bijdragen aan het ontstaan van longkanker, vooral bij rokers. Met betrekking tot radon en thoron ontstaan de gezondheidseffecten door *inwendige* bestraling van de longen.

Vergelijking van de gezondheidseffecten van langdurige blootstelling aan een radonconcentratie en aan een thorondochterconcentratie levert circa een factor tien verschil op tussen de radonconcentratie en de thorondochterconcentratie, uitgedrukt in EETC [1]. Met andere woorden: Het effect van langdurige blootstelling aan een EETC van 10 Bq/m³ is bijvoorbeeld vergelijkbaar met het effect van langdurige blootstelling aan een radonconcentratie van 100 Bq/m³.

Voor een uitgebreide beschrijving van radon en thoron verwijzen we naar hoofdstuk 2 van het RIVM-rapport *Radon en thoron in Nederlandse*

woningen vanaf 1930, dat ter verduidelijking als Bijlage 1 in dit rapport is opgenomen [1].

2.2 Gammastraling

Bij het vervallen van natuurlijke radionucliden in de bodem of in bouwmaterialen kan alfa-, bèta- en/of gammastraling vrijkomen. De uitgezonden alfa- en bètastraling zal door de bodem of het bouw materiaal zelf worden geabsorbeerd. Gammastraling uit bouwmaterialen zal echter wel een verhoging van het stralingsniveau in een ruimte veroorzaken.

Externe straling in het binnenmilieu is afkomstig van twee bronnen: (1) gammastraling uit bouwmaterialen en (2) kosmische en terrestrische straling vanuit het buitenmilieu. De straling van buiten wordt grotendeels door de bouwmaterialen geabsorbeerd. Dat geldt met name voor terrestrische straling [5]. Ten gevolge van blootstelling aan externe straling ontstaat een verhoogd risico op het krijgen van kanker. Dit risico neemt toe naarmate mensen meer worden blootgesteld. Met betrekking tot gammastraling ontstaan de gezondheidseffecten door *uitwendige* bestraling van het lichaam.

Voor een uitgebreide beschrijving van gammastraling uit bouwmaterialen (specifiek voor woningen) verwijzen we naar hoofdstuk 2 van het RIVM-rapport *Over de regulering van gammastraling door bouwmaterialen in de woning*. Dit rapport is ter verduidelijking als Bijlage 2 in dit rapport opgenomen [5].

2.3 Meetmethoden

Radondetector

De radondetectoren (leverancier: Radonova, Zweden⁶) die gebruikt zijn in dit onderzoek, zitten zo in elkaar dat radon wel in de detector kan doordringen, maar het veel sneller vervallende thoron niet. De radonconcentratie in de detector is gemiddeld genomen evenredig met de concentratie in de ruimte waar de detector is geplaatst. Als radon binnen de detector vervalt, ontstaan er radondochters die niet meer uit de detector kunnen komen. In de detector bevindt zich een doorzichtig plastic plaatje (Figuur 1). De alfastraling die vrijkomt bij het verval van radon en sommige dochters veroorzaakt kleine beschadigingen in dat plaatje. Na afloop van de meetperiode worden deze beschadigingen geteld. Hieruit kan de radonconcentratie in de ruimte, gemiddeld over de meetperiode, worden bepaald [1].

⁶ Radonova Laboratories AB, Uppsala, Zweden: <https://radonovalaboratories.com/>



Figuur 1 Gedemonteerde radondetector (links) en thorondochterdetector (rechts).

Thorondochterdetector

De thorondochterdetector (fabrikant: Flonex, Japan, geleverd door: Radonova, Zweden) is plat en bestaat uit een metalen plaat van ongeveer $5 \times 5 \text{ cm}^2$, waar in vier cirkelvormige uitsparingen kleine kunststofplaatjes verzonken zijn met een laagje Mylar-folie (Figuur 1). Deze plaatjes kunnen ook beschadigd worden door straling, maar het laagje folie is zo dik, dat de meeste alfastraling er niet doorheen komt. Alleen de alfastraling van de thorondochter Po-212 is zo doordringend dat die wel door de folie gaat. Het meetprincipe is verder hetzelfde: door de beschadigingen in de kunststofplaatjes achteraf te tellen, is te herleiden hoeveel Po-212 atomen er gedurende de meettijd op de plaatjes neergeslagen zijn [1].

Een radonmeting geeft rechtstreeks informatie over de radonconcentratie in een gebouw. Het verband tussen de radonconcentratie en de radondochterconcentratie binnenshuis is voldoende bekend. Bij de thoronmeting is van één thorondochter bekend hoeveel er is neergeslagen op de detector. De over de meetperiode gemiddelde concentratie van de thorondochters in de ruimte waar de detector is geplaatst, moet uit deze indirecte meting berekend worden [1]. Deze stap geeft meer onzekerheid in het resultaat. De meetresultaten worden gerapporteerd als evenwichtsequivalente thorondochterconcentratie (EETC).

Gammadosismeter

De gammadosismeter (leverancier: NRG, Nederland⁷) is voorzien van thermoluminescentiedetectoren en is geschikt voor het meten van gammastraling (Figuur 2). De twee detectoren bestaan uit litiumfluoride dat is gedoteerd met magnesium en titaan (LiF:Mg,Ti ; typenaam MTS-100)⁸ [3]. Door gammastraling worden elektronen in het kristalrooster van de detectoren naar een hoger energieniveau gebracht en daar gevangen. Het aantal elektronen dat in het hogere energieniveau wordt opgeslagen is evenredig met de door de detector geabsorbeerde stralingsdosis. Na het uitlezen van de dosimeters, waarbij de detectoren

⁷ Nuclear Research and Consultancy Group (NRG) Dosimetriedienst, Arnhem, Nederland: <https://www.nrg.eu/>

⁸ Door de leverancier van de dosimeters is een derde detector (LiF:Mg,Cu,P ; typenaam MCP) toegevoegd om het gebruik van dit type detector in omgevingsdosimeters te kunnen evalueren. De resultaten van deze MCP-detector worden hier buiten beschouwing gelaten.

worden verwarmd tot ongeveer 200 °C en de opgeslagen energie die vrijkomt in de vorm van licht met een fotomultiplicatorbuis wordt gemeten, wordt het omgevingsdosisequivalenttempo ($H^*(10)$) vastgesteld [3].



*Figuur 2 Gedemonteerde gammadosimeter met rechts de binnenkant van de dosimeter met de twee voor de analyse gebruikte detectoren
(Uit: de Jong, P. 2017)*

3 Opzet meetcampagne 2016-2017

In het kort

Voor de meetcampagne hebben we een selectie gemaakt van zowel *reguliere* werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen als *specifieke* werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen met mogelijk hogere radonconcentraties. Bij reguliere werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen gaat het bijvoorbeeld om kantoorgebouwen, scholen, winkels, industrie, horeca en ziekenhuizen verspreid over heel Nederland. Er zijn extra kinderdagverblijven en scholen in Zuid-Limburg en het Rivierengebied meegenomen, omdat we weten dat daar van nature meer radon in de bodem gevormd wordt. Bij de specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen gaat het bijvoorbeeld om ondergrondse gebouwen (zoals metrostations en ondergrondse musea), grondwater-zuiveringsstations, glastuinbouwbedrijven die gebruikmaken van CO₂-bemesting en gebouwen waar radioactief afval wordt opgeslagen.

Voor het onderzoek zijn bijna 5.000 bedrijven en instellingen aangeschreven met het verzoek om deel te nemen aan de meetcampagne. Ongeveer 425 bedrijven en instellingen hebben aangegeven hieraan mee te willen werken.

In het najaar van 2016 hebben alle deelnemende bedrijven en instellingen één of meerdere detectoren ontvangen. Afhankelijk van het type detector zijn de detectoren circa een halfjaar of een jaar blijven hangen.

3.1 Selectie van categorieën werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen

De werkgelegenheid in Nederland kan grofweg worden verdeeld in de commerciële dienstverlening (groot- en detailhandel, horeca, zakelijke dienstverlening), niet-commerciële dienstverlening (publieke sector, onderwijs, gezondheids- en welzijnszorg) en de industrie en bouw [6]. Binnen deze drie groepen hebben we categorieën werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen in kaart gebracht die meegenomen konden worden in het onderzoek.

Daarnaast hebben we in kaart gebracht op welke werkplekken en in welke publiek toegankelijke gebouwen een verhoogde blootstelling aan radon (en thoron(dochters) en gammastraling) kan worden verwacht.

De selectie van categorieën werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen die in aanmerking kwamen voor het uitvoeren van metingen, is vervolgens voorgelegd aan zowel de inspecties van SZW en de ANVS als de Belgische experts.

3.1.1 *Reguliere werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen*

Voor dit onderzoek zijn *reguliere* werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen geselecteerd om een indicatie te krijgen van de jaargemiddelde radonconcentratie in Nederlandse gebouwen. Het gaat om normale bovengrondse werkplekken en publiek toegankelijke

gebouwen binnen zowel de commerciële als niet-commerciële dienstverlening en de industrie. De verschillende typen werkplekken en gebouwen die in aanmerking komen voor het uitvoeren van metingen zijn te vinden in Tabel 1.

Tabel 1 *Categorieën reguliere werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen*

Categorieën	Subcategorie
Kinderdagverblijven	
Onderwijs	Scholen primair onderwijs, secundair onderwijs en tertiair onderwijs
Ziekenhuizen en zorginstellingen	Ziekenhuizen en verpleeghuizen
Kantoren	
Groothandel	
Detailhandel	
Industrie	
Horeca	Hotels, restaurants, cafés
Cultuur	Musea, bioscopen, theaters en schouwburgen
Openbare bibliotheken	

3.1.2

Specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen

Voor dit onderzoek zijn *specifieke* werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen geselecteerd waar mogelijk hogere radonconcentraties verwacht kunnen worden. Om een selectie te kunnen maken van Nederlandse werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen waar mogelijk verhoogde radonconcentraties kunnen worden gevonden, is gekeken naar:

- buitenlandse onderzoeken;
- wet- en regelgeving in omringende landen betreffende radon op de werkplek;
- resultaten uit het RIVM-woningenonderzoek 2013-2014.

Buitenlandse onderzoeken

Verschillende landen hebben in de afgelopen decennia surveys uitgevoerd naar de radonconcentratie in werkruimten [7]. De resultaten van meerdere surveys zijn verzameld in de IAEA-publicatie *Radiation protection against radon in workplaces other than mines* waarin voorbeelden worden gegeven van werkplekken waar heel hoge radonconcentraties zijn gevonden [7]. Het gaat om plekken waar een grote hoeveelheid radon de ruimte in kan komen, om ruimtes waar de ventilatie gering is, of om plekken waar beide situaties zich voordoen. Dit kunnen ondergrondse faciliteiten zijn zoals metrostations, faciliteiten waar radiumhoudend erts wordt bewerkt, spa's waar radon uit het grondwater of uit spleten in rotswanden vrijkomt, grotten die toegankelijk zijn voor het publiek en grondwater-bewerkings- en opslaginstallaties waar gebruik wordt gemaakt van beluchting [7]. Het gebruik van bouwmaterialen die voor een belangrijk deel bestaan uit (radiumhoudend) bodemmateriaal kan in gebouwen ook tot hogere radonconcentraties leiden [7]. In het buitenland geldt voor het grootste deel van de gebouwen echter dat hoge radonconcentraties worden veroorzaakt door hoge radiumconcentraties in de bodem onder het gebouw [7]. Dit is in Nederland waarschijnlijk minder het geval [4].

Wet- en regelgeving omliggende landen

In richtlijn 96/29/Euratom⁹ is opgenomen dat lidstaten dienen vast te stellen bij welke werkzaamheden de blootstelling van de werkers of van leden van de bevolking vanwege de aanwezigheid van natuurlijke stralingsbronnen significant toeneemt in een mate die vanuit het oogpunt van stralingsbescherming niet mag worden veronachtzaamd. Het gaat hierbij onder andere om:

‘Werkzaamheden waarbij werkers en, indien van toepassing, leden van de bevolking worden blootgesteld aan thoron- of radonochters, aan gammastraling of enige andere blootstelling op werkplekken zoals kuuroorden, grotten, mijnen, ondergrondse werkplekken en bovengrondse werkplekken in nader bepaalde zones.’

Als we kijken naar aangrenzende landen, dan zien we dat zowel Duitsland als België in de nationale wetgeving werkgebieden hebben opgenomen waar mogelijk een hogere blootstelling aan radon (en zijn vervalproducten) kan optreden. In de Duitse *Strahlenschutzverordnung*¹⁰ zijn dit:

- *ondergrondse mijnen en grotten, met inbegrip van bezoekersmijnen;*
- *radonbaden en -mijngangen;*
- *installaties voor waterwinning, -behandeling en -distributie.*

België heeft de volgende werkgebieden opgenomen in het ARBIS¹¹:

- *ondergrondse arbeidsplaatsen, hierin inbegrepen paddenstoelkwekerijen en grotten opengesteld voor bezoekers;*
- *waterbehandelingsinstallaties;*
- *onderwijsinstellingen, kinderdagverblijven, verzorgingsinstellingen, openbare gebouwen en, meer in het algemeen, elk arbeidslokaal, wanneer die zich bevinden in een door het Agentschap gedefinieerde risicozone.*

RIVM-woningenonderzoek 2013-2014

De resultaten van het RIVM-woningenonderzoek 2013-2014 naar radon in Nederlandse woningen laten zien dat de locatie van de woning van invloed is op de gemiddelde radonconcentratie; in Zuid-Limburg en het Rivierengebied is de gemiddelde radonconcentratie in woningen wat hoger dan in andere delen van Nederland [8]. De locatieafhankelijkheid van radon in woningen hangt vooral samen met verschillen in bodemtype [8]. Hierbij zijn twee factoren van belang:

1. De concentratie van radium (Ra-226) in de bodem ter plaatse. De hoeveelheid radium in de bodem bepaalt hoeveel radon wordt gevormd door radioactief verval.
2. De doorlaatbaarheid van de bodem voor het gasvormige radon, wat vooral bepaald wordt door bodemtextuur en vochtigheidsgehalte.

⁹ Deze richtlijn is met ingang van 6 februari 2018 ingetrokken.

¹⁰ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (geldig op 18 oktober 2017, voor de implementatie van de BSS richtlijn)

¹¹ Koninklijk Besluit van 20 juli 2001 houdende algemeen reglement op de bescherming van de bevolking, van de werknemers en het leefmilieu tegen het gevaar van ioniserende stralingen (geldig op 1 januari 2018, voor de implementatie van de BSS-richtlijn)

Beide factoren bepalen hoeveel radon vlak onder het gebouw beschikbaar is, om van daaruit in het gebouw te komen. De eigenschappen van gebouwen (type gebouw, ventilatiesysteem, bodemplaat enzovoort) bepalen vervolgens in welke mate radon ook werkelijk binnen kan komen en op kan bouwen tot een radonconcentratie in de ruimte.

3.1.2.1 *Selectiecriteria specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen*

De informatie uit buitenlandse onderzoeken, wet- en regelgeving in omringende landen en het woningenonderzoek 2013-2014 heeft geresulteerd in drie criteria, op basis waarvan specifieke (categorieën) werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen zijn geselecteerd voor dit onderzoek (Tabel 2).

Tabel 2 Categorieën specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen

Selectie gebaseerd op	Specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen
Type gebouw	Ondergrondse metrostations
	Ondergrondse musea en toeristengrotten
	Justitiële inrichtingen
	Gebouwen van Defensie
	Opslagruimten radioactieve afvalstoffen
Type werkzaamheden	Natuursteenbewerking
	Vervaardiging van producten van beton, gips en cement
	Glastuinbouwbedrijven
	Drinkwaterbedrijven (grondwater-zuiveringsstations)
	Thermaalbaden
Locatie/bodemsoort	Extra <i>reguliere</i> werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen in Zuid-Limburg en Rivierengebied

Type gebouw

Voor alle gebouwen geldt dat radon deels vanuit de bodem en deels vanuit bouwmaterialen in de ruimte terecht kan komen. Zoals beschreven in paragraaf 3.1.2 zijn er (ruimtes in) gebouwen waar de radonconcentratie hoger kan oplopen, bijvoorbeeld in ondergrondse ruimtes, in gebouwen waar in de constructie (meer dan gemiddeld) gebruik is gemaakt van bouwmaterialen die bestaan uit bodemmateriaal of in ruimtes waar de ventilatie gering is. In Nederland zijn dergelijke gebouwen ook aanwezig, denk hierbij bijvoorbeeld aan grotten, ondergrondse metrostations, opslagbunkers en musea met (deels) ondergrondse expositieruimtes.

Type werkzaamheden

Er zijn werkplekken waar de radonconcentratie mogelijk hoger is als gevolg van specifieke werkzaamheden of activiteiten die daar plaatsvinden. Zo kan in grondwater een (licht) verhoogde radonconcentratie voorkomen. Wanneer dit water wordt opgepompt en eventueel wordt gezuiverd en belucht, kan het radon exhaleren. Indien dit in een gesloten ruimte gebeurt, kan daar een verhoogde radonconcentratie in de lucht ontstaan. Dergelijke situaties kunnen zich in

Nederland voordoen bij grondwater-zuiveringsstations en bij thermaalbaden die gebruikmaken van water uit dieptebronnen [9]. Aardgas bevat van nature ook een geringe hoeveelheid radon. Bij de verbranding van aardgas komen verbrandingsgassen vrij waaruit CO₂ kan worden afgevangen. Hiervan wordt gebruikgemaakt in kassen, waar CO₂ wordt gedoseerd (CO₂-bemesting) om de groei van planten te bevorderen [9]. Bij dit proces kan radon uit aardgas deels in de kas terechtkomen, wat mogelijk leidt tot hogere radonconcentraties. Daarnaast zijn werkzaamheden waarbij van bodem gemaakte bouwmaterialen worden toegepast, zoals de bewerking van natuursteen en de vervaardiging van producten van beton, gips en cement, in de selectie meegenomen.

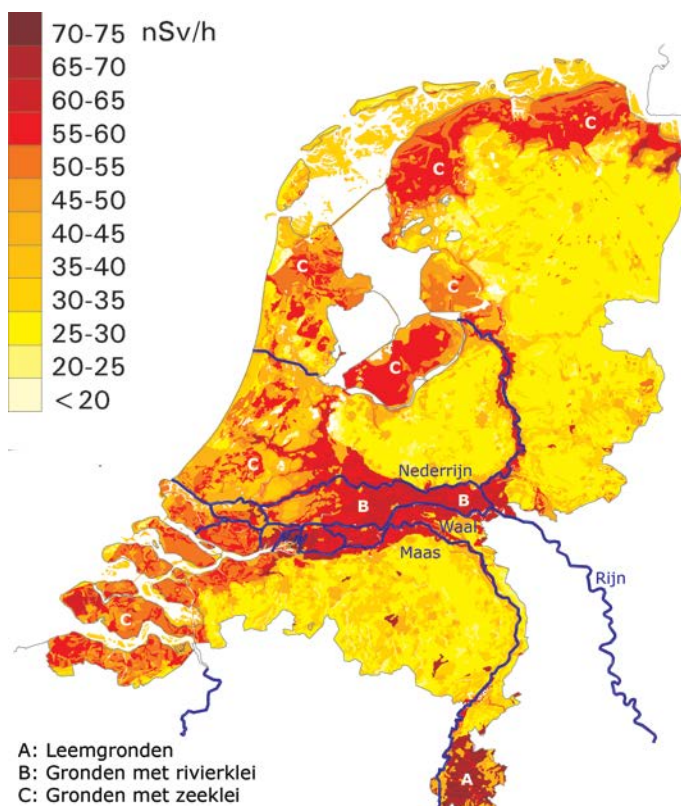
Locatie

In Nederland zijn drie gebieden waar het externe stralingsniveau in het buitenmilieu hoger is dan gemiddeld, onder meer vanwege hogere concentraties radium in de bodem (Figuur 3) [10]. In deze gebieden wordt meer radon in de bodem gevormd dan gemiddeld. Het gaat om:

- A. Zuid-Limburg, waar we voornamelijk leemgronden aantreffen.
- B. De rivierdelta tussen Nederrijn, Waal en Maas, waar bodems deels uit rivierklei bestaan.
- C. Gebieden langs de kust en de provincie Flevoland, waar we bodems aantreffen met een zeker gehalte aan zeeklei.

In het woningenonderzoek 2013-2014 zijn vooral verhoogde radonconcentraties gevonden in woningen in Zuid-Limburg en in iets mindere mate in het Rivierengebied (de rivierdelta tussen Nederrijn, Waal en Maas) [8]. Het gaat dus om regio's die samenvallen met gebieden met hogere concentraties radium in de bodem¹². Deze regio's zijn voor deze meetcampagne afgebakend aan de hand van de postcode, voor Zuid-Limburg zijn dat de tweecijferige postcodegebieden 61, 62, 63 en 64 [8]. Voor het Rivierengebied hebben we in deze meetcampagne de tweecijferige postcodegebieden 40, 41, 53, 65 en 66 genomen.

¹² In de gebieden langs de kust en de provincie Flevoland (gebied C) zijn in woningen geen verhoogde radonconcentraties gevonden.



Figuur 3 Terrestrische stralingskaart van Nederland. Daarin aangegeven gebieden (A,B,C) met een meer dan gemiddelde concentratie aan radium (Ra-226) in de bodem.

Om te kunnen bepalen of in gebouwen in de gebieden Zuid-Limburg en het Rivierengebied ook hogere regiogemiddelde radonconcentraties worden gevonden, maken we gebruik van de meetresultaten van de *reguliere* werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen. Vanwege het aanvankelijk beperkte aantal aanmeldingen in Zuid-Limburg en het Rivierengebied zijn er in deze gebieden extra kinderdagverblijven en scholen benaderd om deel te nemen aan de meetcampagne. Deze categorie instellingen geniet internationaal gezien hoe dan ook speciale interesse, vanwege de lange verblijftijd van kinderen in deze gebouwen.

3.2 Selecteren van bedrijven en instellingen voor deelname

Bijna 5.000 bedrijven en instellingen zijn benaderd om deel te nemen aan de meetcampagne. Een totaal overzicht van het aantal deelnemende bedrijven en instellingen binnen de door ons geselecteerde categorieën werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen is te vinden in Bijlage 3 van dit rapport.

3.2.1 Reguliere werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen

De verschillende categorieën werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen die in aanmerking kwamen voor het uitvoeren van metingen (zie paragraaf 3.1) hebben we gekoppeld aan SBI-codes (Standaard Bedrijfsindeling)¹³. Op basis van de door ons gekozen SBI-codes zijn,

¹³ SBI 2008 – versie 2016. De Standaard Bedrijfsindeling is opgesteld door het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) en is een indeling van economische activiteiten die gebruik wordt om bedrijven in te delen.

middels een steekproef, adressen geselecteerd uit het Handelsregister. Deze steekproef is niet representatief voor de in Nederland aanwezige werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen. Het aantal adressen dat per categorie uit het Handelsregister is geselecteerd is bepaald op basis van het aantal beschikbare detectoren voor deze meetcampagne en een geschat aanmeldpercentage van 20%. Voor kantoorruimtes zijn de adressen geselecteerd uit de BAG (Basisregistratie Adressen en Gebouwen). Om een goede spreiding van meetlocaties over Nederland te krijgen, is binnen een categorie een gelijk aantal adressen per provincie geselecteerd.

De geselecteerde bedrijven en instellingen hebben in de zomer van 2016 een uitnodigingsbrief ontvangen van het RIVM om deel te nemen aan de meetcampagne. Deelname vond plaats op vrijwillige basis en men kon zich opgeven via een online aanmeldformulier.

In totaal hebben ongeveer 280 bedrijven en instellingen positief gereageerd op ons verzoek om deel te nemen aan de meetcampagne, met een redelijke spreiding over Nederland (Figuur 4). Dit aantal ligt rond de beoogde 305 bedrijven en instellingen voor het uitvoeren van metingen op reguliere werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen.

3.2.1.1 *Extra meetlocaties in Zuid-Limburg en het Rivierengebied*

Vanwege het aanvankelijk beperkte aantal aanmeldingen uit de gebieden Zuid-Limburg en het Rivierengebied, is in oktober 2016 besloten om extra scholen en kinderdagverblijven uit deze regio's (op basis van de postcodegebieden) aan te schrijven met het verzoek tot deelname. Dit heeft geleid tot ongeveer negentig extra deelnemers in Zuid-Limburg en het Rivierengebied.

3.2.2 *Specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen*

De specifieke werkplekken zijn geselecteerd op basis van de criteria beschreven in paragraaf 3.1.2. Dit heeft zowel unieke werkplekken (bijvoorbeeld opslagruimtes voor radioactief afval) als categorieën werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen opgeleverd.



Figuur 4 Locatie van de circa 425 bedrijven en instellingen die hebben deelgenomen aan de meetcampagne

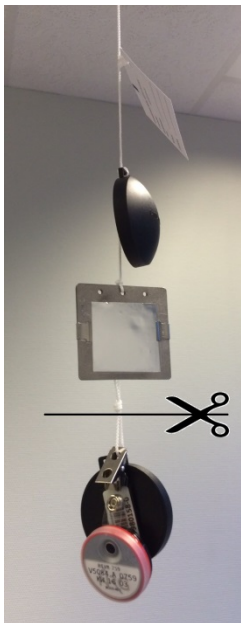
Voor de specifieke werkplekken die konden worden gekoppeld aan SBI-codes zijn middels een steekproef adressen geselecteerd. Dit geldt voor natuursteenbewerking en de vervaardiging van producten van beton, gips en cement. Voor het selecteren van adressen van glastuinbouwbedrijven is gebruikgemaakt van een agrarisch adressenbestand.

Daarnaast hebben we voor de meer unieke werkplekken, adressen en contactgegevens via internet gezocht of binnen het RIVM-netwerk. Het gaat bij deze specifieke werkplekken vaak om enkele locaties binnen Nederland. Zo veel mogelijk van deze bedrijven of instellingen zijn benaderd. Het gaat hierbij onder meer om toeristengrotten, ondergrondse metrostations, thermaalbaden en drinkwaterbedrijven.

De geselecteerde bedrijven hebben in de zomer van 2016 een uitnodigingsbrief ontvangen van het RIVM om deel te nemen aan de meetcampagne. Uiteindelijk hebben we ongeveer 50 van de beoogde 75 bedrijven en instellingen bereid gevonden om mee te werken aan de meetcampagne (Figuur 4).

3.3 Uitvoering meetcampagne

In paragraaf 2.3 zijn de verschillende detectoren beschreven die we voor deze meetcampagne hebben gebruikt. De detectoren zijn zodanig aan elkaar bevestigd dat de deelnemers de detectoren als een setje konden ophangen (Figuur 5). Er zijn twee varianten detectorsetjes verspreid, setjes mét thorondochterdetector en setjes zonder thorondochterdetector (Bijlage 3). De deelnemende scholen en kinderdagverblijven in Zuid-Limburg en het Rivierengebied hebben vanwege de wat kortere meetperiode een enkele radondetector ontvangen (zie paragraaf 3.2.1.1).



Figuur 5 Een compleet setje detectoren. Van boven naar beneden: radondetector en thorondochterdetector (beide 12 mnd), radondetector en gammadosismeter (beide 6 mnd). Na een halfjaar hebben de deelnemers de onderste twee detectoren afgeknipt en teruggestuurd naar het RIVM. De bovenste twee detectoren zijn na een jaar teruggestuurd.

De deelnemende bedrijven en instellingen hebben twee setjes met detectoren ontvangen met de vraag deze in twee verschillende ruimtes op te hangen, bij voorkeur op de laagst aanwezige verdieping. Enkele categorieën gebouwen hebben één setje of meer dan twee setjes ontvangen, afhankelijk van het type gebouw (Bijlage 3). De deelnemers is gevraagd een foto van de opgehangen detectoren naar het RIVM te sturen, samen met de datum van ophangen. Deze informatie kan worden gebruikt om de periode te bepalen waarin de detectoren zijn blootgesteld aan radon, thorondochters en gammastraling. Hiermee konden we ook zien of de detectoren op de juiste manier waren geplaatst.

Daarnaast hebben we de deelnemers gevraagd om een vragenlijst in te vullen, zodat we de meetresultaten kunnen uitsplitsen naar bijvoorbeeld wijze van ventilatie. Dit betrof een digitale vragenlijst waarin is gevraagd om informatie over het gebouw (bouwperiode) en over de specifieke ruimte waarin de detectoren waren opgehangen (grootte van de ruimte, functie van de ruimte, ventilatiewijze).

Niet alle detectorsetjes die naar de deelnemende bedrijven en instellingen zijn opgestuurd, zijn uiteindelijk weer retour gekomen naar het RIVM. Gedurende de meetcampagne is ongeveer 10% van de detectorsetjes om verschillende redenen verloren gegaan.

3.3.1 Tijdschema

De detectoren zijn in het najaar (september-oktober) van 2016 verstuurd. Na een halfjaar, in het voorjaar (maart-april) van 2017, hebben de deelnemers de gammadosimeter en een van de twee radondetectoren teruggestuurd naar het RIVM (Figuur 5). De detectoren zijn vervolgens door de leveranciers uitgelezen. In september 2017 hebben we de deelnemers gevraagd om de tweede radondetector en de (eventueel aanwezige) thorondochterdetector retour te sturen. De radondetectoren van de deelnemende kinderdagverblijven en scholen in Zuid-Limburg en het Rivierengebied zijn enkele maanden later geplaatst (december 2016), maar ook in september 2017 teruggestuurd. De retour gestuurde detectoren hebben we in meerdere delen voor uitlezing naar de leverancier in Zweden verzonden. De laatste detectoren waren eind oktober 2017 binnen op het RIVM. Het RIVM heeft de laatste ruwe meetdata in januari 2018 ontvangen.

In dit onderzoek wilden we de gemiddelde concentratie van radon en thorondochters bepalen door een jaar lang te meten. De concentratie van radon en thorondochters in een gebouw kan door het jaar heen immers sterk variëren, onder andere onder invloed van de seizoenen. Dit laatste komt deels door weersomstandigheden (temperatuur, windkracht), maar ook door bijvoorbeeld ventilatiegedrag. In de winter is er vaak minder sprake van natuurlijke ventilatie via open ramen, waardoor de concentratie in een ruimte kan oplopen. Door de concentratie gedurende een heel jaar te meten, zijn de meetresultaten niet beïnvloed door eventuele seizoensinvloeden. Daarnaast geldt in gebieden met lagere radonconcentraties, die niet ongewoon zijn in Nederland, dat bij een kortere meetperiode de resultaten onder de detectielimiet van de detectoren kunnen komen.

Voor de bepaling van de gammadosis is het niet nodig om een jaar te meten. Daar is nauwelijks sprake van seizoensinvloeden. Een meetperiode van een jaar is voor de gammadosimeters zelfs ongewenst in verband met *fading*-effecten (= verlies van signaal) die optreden bij metingen over een langere periode. *Fading*, waarvoor gecorrigeerd moet worden, levert een grotere onzekerheid op in het vast te stellen omgevingsdosisequivalenttempo. Om deze reden is ervoor gekozen de gammadosimeters al na een halfjaar terug te laten sturen. Daarnaast is er in overleg met de opdrachtgevers besloten om naast een jaarmeting van radon, ook een halfjaarsmeting van radon uit te voeren, zodat er al eerder een goede indicatie beschikbaar kwam van de radonconcentraties op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen. Hiervoor is gekozen, omdat de voorbereidingen van het nieuwe Bbs, met daarin opgenomen een referentieniveau voor radon op werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen, inmiddels in volle gang was.

4 Meetresultaten radonconcentratie in gebouwen

In het kort

De jaargemiddelde radonconcentratie bedraagt gemiddeld over alle *reguliere* gebouwen in dit onderzoek $15,9 \pm 0,6 \text{ Bq/m}^3$. In Zuid-Limburg (31 Bq/m^3) en het Rivierengebied (21 Bq/m^3) zijn, net als bij woningen, iets hogere regiogemiddelde waarden gevonden. Op vier meetlocaties bij verschillende bedrijven en instellingen is de gemeten waarde hoger dan 100 Bq/m^3 .

Bij de *specifieke* werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen waar mogelijk hogere radonconcentraties kunnen worden verwacht, zijn op 26 meetlocaties radonconcentraties van meer dan 100 Bq/m^3 gevonden. De hogere radonconcentraties ($> 100 \text{ Bq/m}^3$) zijn gevonden bij drinkwaterbedrijven en grotten, een bedrijf waar radioactief afval wordt opgeslagen, één glastuinbouwbedrijf en een ondergrondse kantoorruimte (in gebruik als opslagruimte).

In dit onderzoek zijn gedurende een halfjaar en gedurende een jaar radonmetingen uitgevoerd. De halfjaarsmetingen waren bedoeld om al tussentijds een goede indicatie van de radonconcentraties in gebouwen te krijgen (zie paragraaf 3.3.1 van dit rapport). De in dit rapport gepresenteerde resultaten zijn uitsluitend afgeleid van de jaarmetingen.

Radonconcentraties in gebouwen variëren niet alleen door het jaar heen, maar ook binnen een gebouw zelf kan de radonconcentratie per ruimte variëren. Dit onderzoek geeft alleen de meetresultaten voor de ruimte in het gebouw waar de meting daadwerkelijk heeft plaatsgevonden.

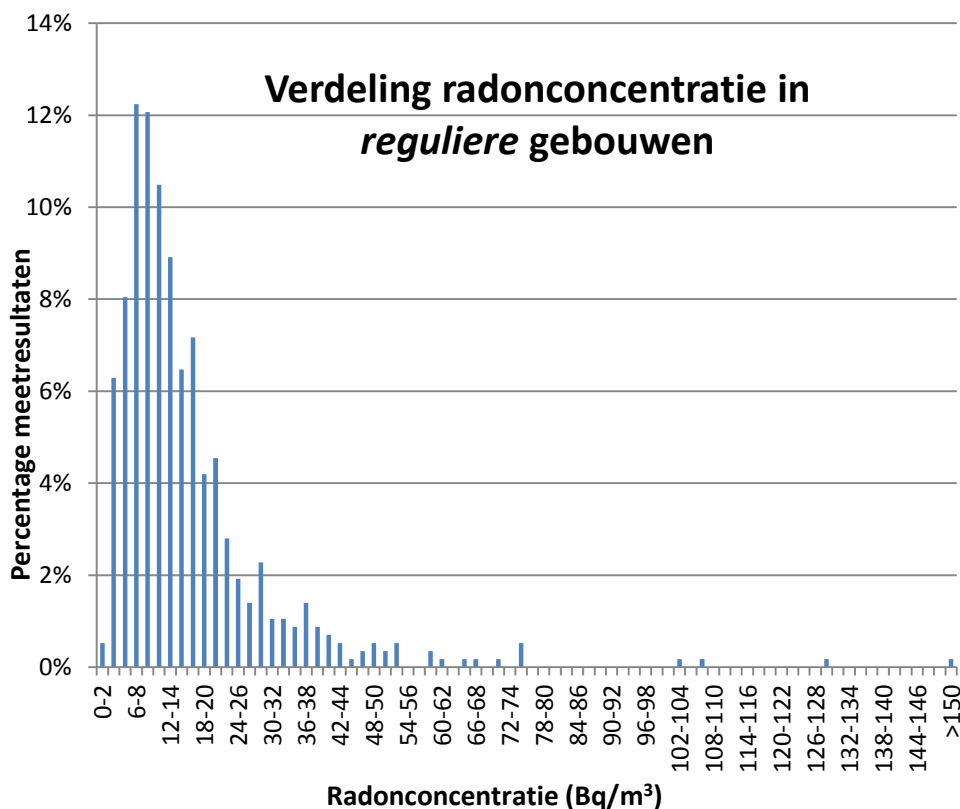
4.1 Reguliere werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen

De groep van ongeveer 370 bedrijven en instellingen waar gemiddeld twee radondetectoren zijn opgehangen (zie bijlage 3) heeft 572 bruikbare meetresultaten opgeleverd. Hierbij zitten ook de meetresultaten van de extra meetlocaties bij kinderdagverblijven en scholen in het Rivierengebied en Zuid-Limburg. Figuur 6 toont de verdeling van de meetresultaten.

De jaargemiddelde radonconcentratie bedraagt gemiddeld over alle *reguliere* gebouwen in dit onderzoek $15,9 \pm 0,6 \text{ Bq/m}^3$.

Op vier verschillende meetlocaties zijn in dit onderzoek radonconcentraties gevonden die hoger zijn dan 100 Bq/m^3 : $102,2 \text{ Bq/m}^3$, $107,3 \text{ Bq/m}^3$, $128,7 \text{ Bq/m}^3$ en $635,7 \text{ Bq/m}^3$. Deze radonconcentraties zijn gevonden bij verschillende bedrijven en instellingen. De meetlocatie waar een radonconcentratie is gemeten van $128,7 \text{ Bq/m}^3$ betreft een kantoorruimte in Zuid-Limburg. Bij twee andere meetlocaties ($102,2 \text{ Bq/m}^3$ en $107,3 \text{ Bq/m}^3$) gaat het om klaslokalen, gelegen op de begane grond, van twee verschillende basisscholen in Zuid-Limburg. Beide scholen zijn gebouwd in de periode 1950-1980; een van de twee scholen heeft na 2000 een grondige renovatie ondergaan.

De meetlocatie waar een radonconcentratie is gemeten van 635,7 Bq/m³ betreft een ruimte in de kelder die geen dienst doet als verblijfsruimte. Het gaat om een kantoor gevestigd in Zuid-Limburg. Deze meting is niet meegenomen in de data-analyse van radonconcentraties in Nederlandse gebouwen.



Figuur 6 Verdeling van de gemeten jaargemiddelde radonconcentraties in reguliere gebouwen. De metingen zijn op 572 meetlocaties verricht. Op vier meetlocaties is de gemeten waarde hoger dan 100 Bq/m³

4.1.1

Meetresultaten halfjaarsmeting versus jaarmeting

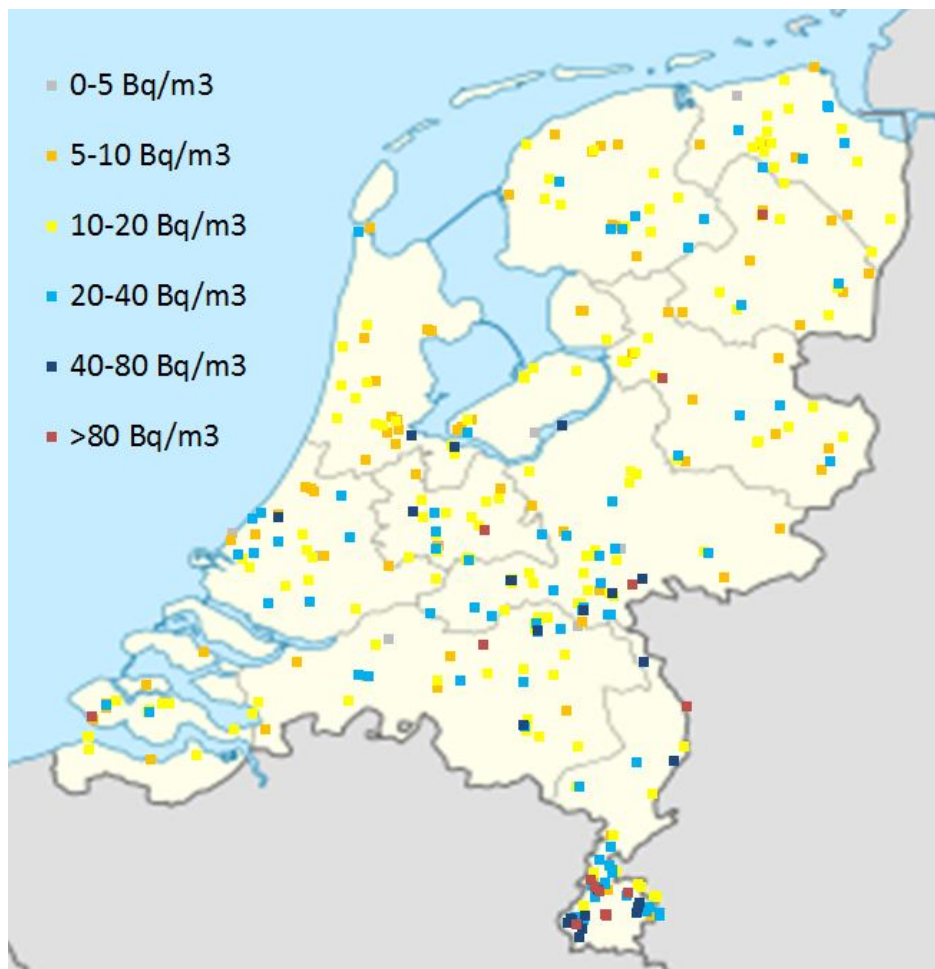
De meetresultaten van de halfjaars- en de jaarmeting zijn met elkaar vergeleken om na te gaan of er grote verschillen zijn in de gemeten radonconcentraties tussen beide meetperiodes. Dit hebben we gedaan voor de meetlocaties waar zowel resultaten van de halfjaarsmeting als de jaarmeting beschikbaar zijn. Dit geldt voor 448 meetlocaties. De jaargemiddelde radonconcentratie op basis van de halfjaarsmetingen binnen deze groep is $15,6 \pm 0,6$ Bq/m³. Op basis van de jaarmetingen komt een jaargemiddelde radonconcentratie naar voren van $14,1 \pm 0,5$ Bq/m³. Gedurende de herfst- en wintermaanden lijkt dus een iets hogere radonconcentratie te zijn gemeten, het verschil tussen beide meetperiodes is echter niet statistisch significant ($z < 1,96$). De meetresultaten hoger dan 100 Bq/m³ zijn in beide meetperiodes op dezelfde meetlocaties gevonden¹⁴.

¹⁴ Van twee meetlocaties met meetresultaten hoger dan 100 Bq/m³ zijn geen halfjaarsmetingen beschikbaar. Dit zijn de meetlocaties bij twee verschillende basisscholen (102,2 Bq/m³ en 107,3 Bq/m³).

4.1.2 Meetresultaten in verschillende gebieden

We hebben binnen de *reguliere* gebouwen gekeken of de locatie van het gebouw van invloed is op de jaargemiddelde radonconcentratie. De jaargemiddelde radonconcentratie in de Nederlandse gebouwen binnen dit onderzoek is gemiddeld $15,9 \pm 0,6$ Bq/m³.

Per regio (op basis van postcodegebied) is een gemiddelde waarde van de jaargemiddelde radonconcentratie in de gebouwen uit dit onderzoek bepaald. Hieruit blijkt dat in het Rivierengebied ($21 \pm 1,8$ Bq/m³) en in Zuid-Limburg ($31 \pm 2,8$ Bq/m³) de gemiddelde radonconcentratie wat hoger ligt dan in de rest van Nederland (Figuur 7). In noord en west Nederland zijn relatief lage waarden (rond de 12 Bq/m³) gevonden. Ook in Noord-Limburg is de gemiddelde waarde wat hoger ($23 \pm 4,2$ Bq/m³), maar dit is gebaseerd op een beperkt aantal meetlocaties en betreft geen significant verschil met het landelijke gemiddelde.

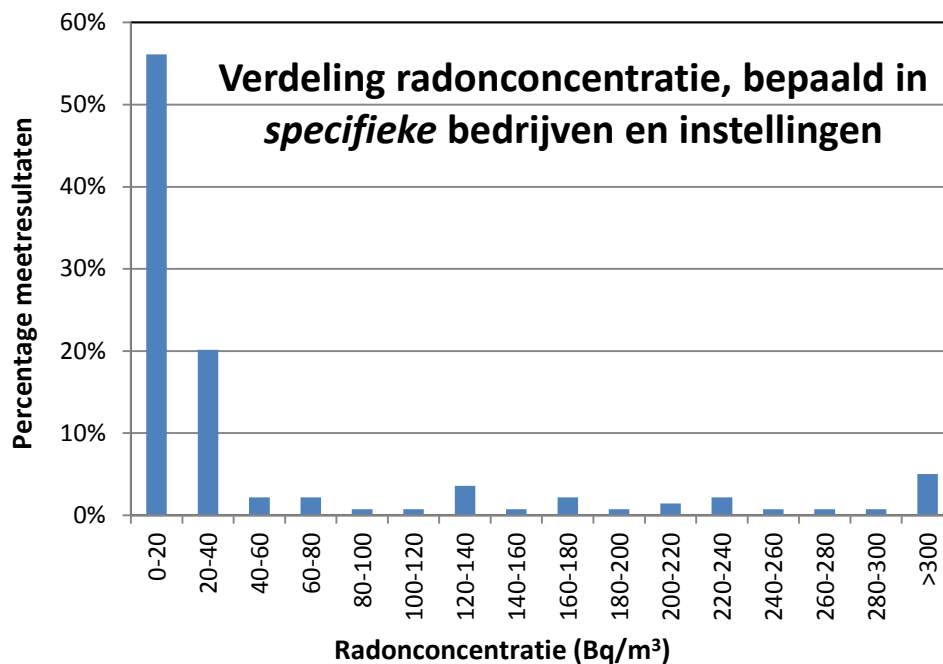


Figuur 7 De gemeten radonconcentratie in reguliere gebouwen

Het verschil in regiogemiddelde waarden komt overeen met de resultaten uit het woningenonderzoek 2013-2014. In dat onderzoek werden ook hogere waarden gevonden in het Rivierengebied en Zuid-Limburg. Hierbij moet worden opgemerkt dat het huidige onderzoek geen representatieve steekproef betreft en er bovendien in deze gebieden extra meetlocaties zijn geselecteerd.

4.2 Specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen

De groep van een kleine vijftig *specifieke* bedrijven en instellingen waar twee of meer radondetectoren zijn opgehangen, heeft 139 bruikbare meetresultaten opgeleverd. Figuur 8 toont de verdeling van de meetresultaten.



Figuur 8 Verdeling van de gemeten radonconcentraties op specifieke meetlocaties. De metingen zijn op 139 meetlocaties verricht. Op 26 meetlocaties is de gemeten radonconcentratie hoger dan 100 Bq/m³ en op zeven daarvan is de gemeten radonconcentratie ook hoger dan 300 Bq/m³.

Op een totaal van 139 meetlocaties zijn er op 26 meetlocaties in dit onderzoek radonconcentraties gevonden die hoger zijn dan 100 Bq/m³, met één uitschieter boven de 5.000 Bq/m³. De hogere radonconcentraties (> 100 Bq/m³) zijn gevonden in beluchtungs- en filtratieruimten van grondwater-zuiveringsstations (drinkwaterbedrijven), grotten, in de ontvangsthallen en de opslagruimten van een gebouw waar radioactief afval wordt opgeslagen, bij één glastuinbouwbedrijf dat gebruikmaakt van CO₂-bemesting en een ondergrondse kantoorruimte (thans in gebruik als opslagruimte).

4.2.1 Resultaten halfjaarsmeting versus jaarmeting

De meetresultaten van de halfjaars- en de jaarmeting zijn globaal met elkaar vergeleken, om na te gaan of er grote verschillen zijn tussen beide meetperiodes in de gemeten radonconcentraties. Dit hebben we gedaan voor de meetlocaties waar zowel resultaten van de halfjaarsmeting als de jaarmeting beschikbaar zijn. Dit geldt voor 125 meetlocaties. Hieruit blijkt dat in de grotten bij de jaarmetingen méér meetlocaties met radonconcentraties boven de 100 Bq/m³ naar voren zijn gekomen dan bij de halfjaarsmetingen. Het gaat hierbij om ruimtes die toegankelijk zijn voor werknemers en publiek. De radonconcentraties liggen op deze meetlocaties bij de jaarmetingen gemiddeld ruim een factor 1,5 hoger

dan bij de halfjaarsmetingen. Gedurende de lente- en zomermaanden lijkt dus een hogere radonconcentratie te zijn gemeten in de grotten.

Een (omgekeerde) seizoenstrend voor wat betreft de radonconcentratie in grotten wordt beschreven in de literatuur. In verschillende buitenlandse onderzoeken is de gemeten radonconcentratie in grotten in de winter het laagst en in de zomer het hoogst [11-13]. De radonconcentratie in grotten kan zowel binnen in een grot als tussen verschillende grotten sterk variëren en is afhankelijk van verschillende factoren, bijvoorbeeld de morfologie van een grot (zoals het aantal ingangen, hoogte van de ingangen), luchtdichtheid binnen en buiten de grot en het vochtgehalte van het gesteente [13]. Een belangrijke factor voor de variatie is ook ventilatie, die veroorzaakt wordt door temperatuur verschillen binnen en buiten de grot.

In de winterperiode, wanneer de buitentemperatuur lager ligt dan de temperatuur in de grot, stroomt de koude buitenlucht langs de bodem de grot binnen, wordt geleidelijk opgewarmd en stroomt langs het plafond weer naar buiten. Door de uitwisseling met de buitenlucht daalt de radonconcentratie in de grot (uitgaande luchtstroom) [12, 13]. De luchtcirculatie is in de zomerperiode, wanneer de buitentemperatuur hoger ligt dan de temperatuur in de grot, omgedraaid. De uitwisseling van de koelere (zwaardere) lucht in de grot met de warmere buitenlucht is echter beperkt, waardoor de radonconcentratie in de grot oploopt [12, 13].

4.3 Onzekerheid in de meetresultaten

De factoren die bijdragen aan de onzekerheid van de resultaten binnen dit onderzoek zijn (onder andere) de onzekerheid van de meetmethode en de onzekerheid in de tijdsperiode (uren) waarover is gemeten.

De gerapporteerde meetresultaten zijn door ons omgerekend naar de jaargemiddelde radonconcentratie (Bq/m^3). Hiervoor moet de tijdsperiode, in uren, bekend zijn waarin de radonconcentratie is gemeten. We hebben de deelnemers daarom gevraagd aan te geven wanneer ze de detectorsetjes hebben opgehangen. Iets minder dan de helft van de deelnemers heeft dit aan ons doorgegeven. Voor een groot deel van de metingen hebben we voor de meetperiode een inschatting moeten maken. De onzekerheid in de meetperiode is naar verwachting minder dan 10%, maar draagt iets bij aan de onzekerheid in de jaargemiddelde radonconcentraties.

Een belangrijke factor die bijdraagt aan de onzekerheid in de jaargemiddelde radonconcentraties is echter de meetonzekerheid van de metingen. Voor de heel lage radonconcentraties geldt dat de gemeten waarde ongeveer even groot is als de meetonzekerheid. Bij de hogere meetresultaten neemt de (relatieve) meetonzekerheid af. Wanneer we bijvoorbeeld kijken naar de meetresultaten die rond de 100 Bq/m^3 liggen, dan ligt de relatieve onzekerheid voor die individuele metingen tussen de 12 en 13%.

5 Meetresultaten thorondochterconcentratie in gebouwen

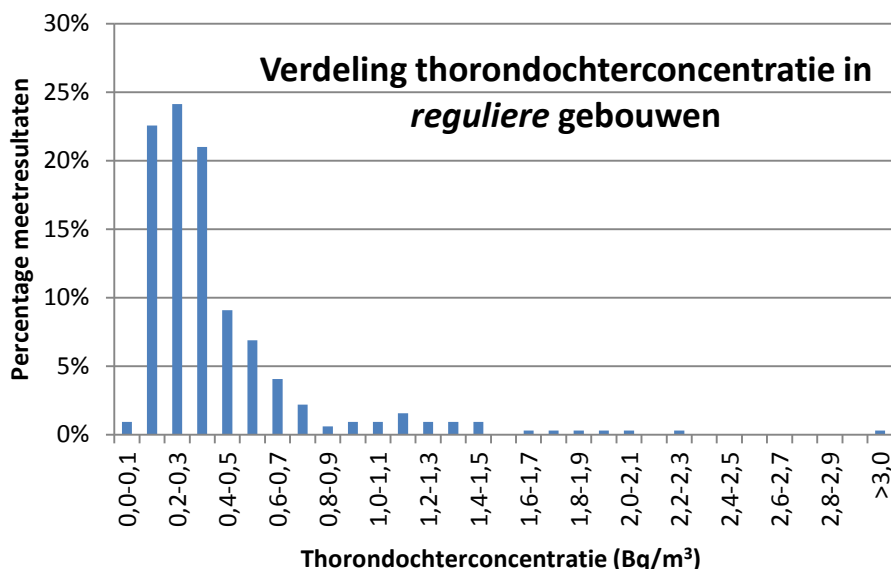
In het kort

De jaargemiddelde thorondochterconcentratie is bepaald in een kleinere groep *reguliere* gebouwen en bedraagt gemiddeld $0,42 \pm 0,02 \text{ Bq/m}^3$. In één geval is een waarde hoger dan 3 Bq/m^3 bepaald. Er is geen verband gevonden tussen de gemeten thorondochterconcentratie en de gemeten radonconcentratie in de *reguliere* gebouwen uit dit onderzoek.

Bij de *specifieke* werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen zijn op zeven meetlocaties thorondochterconcentraties van meer dan 3 Bq/m^3 gevonden. De hogere thorondochterconcentraties ($> 3 \text{ Bq/m}^3$) zijn gevonden bij drinkwaterbedrijven, een bedrijf waar radioactief afval wordt opgeslagen, een metrostation, één glastuinbouwbedrijf en één justitiële inrichting.

5.1 Reguliere werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen

De groep van ongeveer 195 bedrijven en instellingen waar een thorondochterdetector is opgehangen (zie bijlage 3) heeft 319 bruikbare meetresultaten opgeleverd. Figuur 9 toont de verdeling van de meetresultaten.



Figuur 9 Verdeling van de gemeten thorondochterconcentraties (EETC) in reguliere gebouwen. De metingen zijn op 319 meetlocaties verricht. Op één meetlocatie is de gemeten thorondochterconcentratie hoger dan 3 Bq/m^3 .

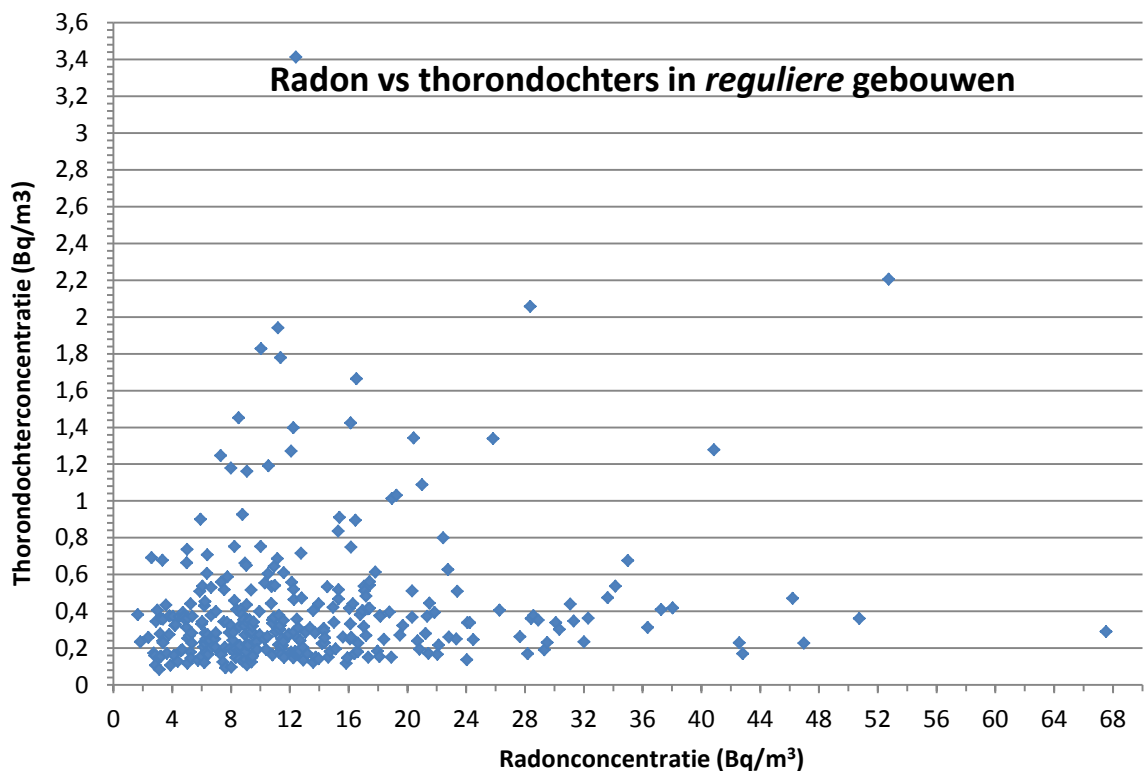
De jaargemiddelde thorondochterconcentratie bedraagt gemiddeld over alle *reguliere* gebouwen in dit onderzoek $0,42 \pm 0,02 \text{ Bq/m}^3$. Op één meetlocatie is de gevonden waarde hoger dan 3 Bq/m^3 . Dit is gemeten in een klaslokaal op een middelbare school.

5.1.1 Meetresultaten in verschillende gebieden

Net als voor de radonconcentratie hebben we binnen de *reguliere* gebouwen gekeken of de locatie van het gebouw van invloed is op de thorondochterconcentratie in de ruimte. De jaargemiddelde thorondochterconcentratie in de Nederlandse gebouwen binnen dit onderzoek is gemiddeld $0,42 \pm 0,02 \text{ Bq/m}^3$.

Voor een aantal gebieden is (op basis van postcodegebied) een gemiddelde waarde van de jaargemiddelde thorondochterconcentratie in gebouwen bepaald. Hieruit volgt dat er in het Rivierengebied ($0,43 \pm 0,11 \text{ Bq/m}^3$) nauwelijks verschil is gemeten met het gemiddelde bepaald in de gebouwen uit dit onderzoek en in Zuid-Limburg ($0,32 \pm 0,07 \text{ Bq/m}^3$) de gemiddelde thorondochterconcentratie wat lager ligt. Het gaat om een beperkt aantal meetresultaten (elf in het Rivierengebied en vijftien in Zuid-Limburg) waarbij de gemiddelde thorondochterconcentraties in deze regio's niet significant verschillen van het landelijk gemiddelde.

Uit het woningenonderzoek 2013-2014 is bekend dat de locatie niet van invloed is op de thorondochterconcentratie in de woning. Dit is te verklaren door het feit dat thoron alleen vanuit wandafwerkmaterialen en niet vanuit de bodem in de ruimte terechtkomt (zie bijlage 1).



Figuur 10 Thorondochterconcentratie versus radonconcentratie. Voor de meetlocaties waar zowel de radonconcentratie als de thorondochterconcentratie kon worden bepaald, zijn de resultaten met elkaar vergeleken. De grafiek laat geen correlatie zien tussen de gemeten thorondochterconcentraties (correlatiecoëfficiënt: 0,15).

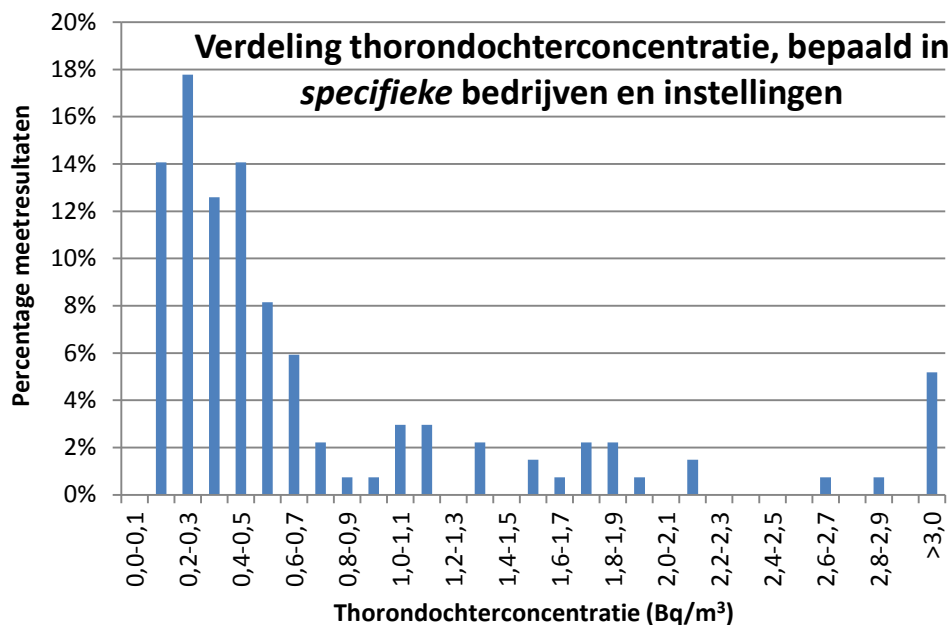
5.1.2 Thorondochterconcentratie versus radonconcentratie

Er is gekeken of er een afhankelijkheid bestaat tussen de thorondochterconcentratie en de radonconcentratie in het binnenmilieu. Radon komt in het binnenmilieu via de bodem en/of via bouwmaterialen die zijn gebruikt voor de constructie van een gebouw. Thoron en thorondochters die in het binnenmilieu worden aangetroffen zijn, als gevolg van de korte halveringstijd, met name afkomstig van de wandafwerkmaterialen.

De gemeten thorondochterconcentraties en radonconcentraties zijn met elkaar vergeleken om een eventueel onderling verband te bepalen. Hieruit volgt dat er geen correlatie bestaat tussen de thorondochterconcentratie en radonconcentratie in de *reguliere* gebouwen uit dit onderzoek (Figuur 10).

5.2 Specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen

De groep van een kleine vijftig *specifieke* bedrijven en instellingen waar een thorondochterdetector is opgehangen, heeft 135 bruikbare meetresultaten opgeleverd. Figuur 11 toont de verdeling van de meetresultaten.



Figuur 11 Verdeling van de gemeten thorondochterconcentratie op specifieke meetlocaties. De metingen zijn op 135 meetlocaties verricht. Op zeven meetlocaties is de gemeten thorondochterconcentraties hoger dan 3 Bq/m³.

Op een totaal van 135 meetlocaties zijn er op zeven meetlocaties in dit onderzoek thorondochterconcentraties gevonden die hoger zijn dan 3 Bq/m³, met een enkele uitschieter boven de 50 Bq/m³. De hogere thorondochterconcentraties (> 3 Bq/m³) zijn gevonden in beluchtungs- en filtratieruimten van grondwater-zuiveringsstations (drinkwaterbedrijven), de ontvangsthal van een gebouw waar radioactief afval wordt opgeslagen, een metrostation, één glastuinbouwbedrijf en één justitiële inrichting.

5.3 Onzekerheid in de meetresultaten

De factoren die bijdragen aan de onzekerheid van de resultaten binnen dit onderzoek, gelden ook voor de thorondochtermetingen. Dit zijn dus (onder andere) de onzekerheid van de meetmethode en de onzekerheid in de tijdsperiode waarover is gemeten.

De gerapporteerde meetresultaten (EETC) zijn door ons omgerekend naar de jaargemiddelde thorondochterconcentratie (Bq/m^3). Hiervoor moet de tijdsperiode, in dagen, bekend zijn waarin de thorondochterconcentratie is gemeten. Voor een groot deel van de metingen hebben we voor de meetperiode een inschatting moeten maken. De onzekerheid in de meetperiode is naar verwachting minder dan 10%, maar draagt iets bij aan de onzekerheid in de jaargemiddelde thorondochterconcentraties.

Een belangrijke factor die bijdraagt aan de onzekerheid in de jaargemiddelde thorondochterconcentraties is echter de meetonzekerheid van de metingen. Voor de hele lage thorondochterconcentraties geldt dat de gemeten waarde in de buurt komt van de meetonzekerheid. Naarmate de thorondochterconcentraties toenemen, neemt de (relatieve) meetonzekerheid af. Deze trend is echter iets minder duidelijk dan voor de radon-meetresultaten. Er zijn ook grotere verschillen in de relatieve onzekerheid van individuele metingen die rond dezelfde meetwaarde liggen.

Daarnaast volgt uit het woningenonderzoek 2013-2014 dat bij dit type metingen ook sprake is van een systematische onzekerheid [1]. Met de thorondochterdetector wordt de concentratie van één thorondochter, Po-212, bepaald. De concentratie van de verschillende thorondochters in een ruimte wordt vervolgens uit deze indirecte meting berekend. Dit geeft een extra onzekerheid in de gerapporteerde thorondochterconcentraties.

6 Meetresultaten gammastraling in gebouwen

In het kort

Het gammastralingsniveau is bepaald in bijna alle gebouwen in dit onderzoek. Alleen op de extra meetlocaties bij kinderdagverblijven en scholen in Zuid-Limburg en het Rivierengebied zijn geen gammadosimeters opgehangen. De resultaten zijn gezamenlijk geanalyseerd. Hier komt een gemiddeld omgevingsdosisequivalenttempo naar voren van $2,2 \pm 0,4 \mu\text{Sv}/\text{dag}$. Er zijn twee uitschieters gevonden van 130 en 220 $\mu\text{Sv}/\text{dag}$ bij opslagruimten voor radioactief afval.

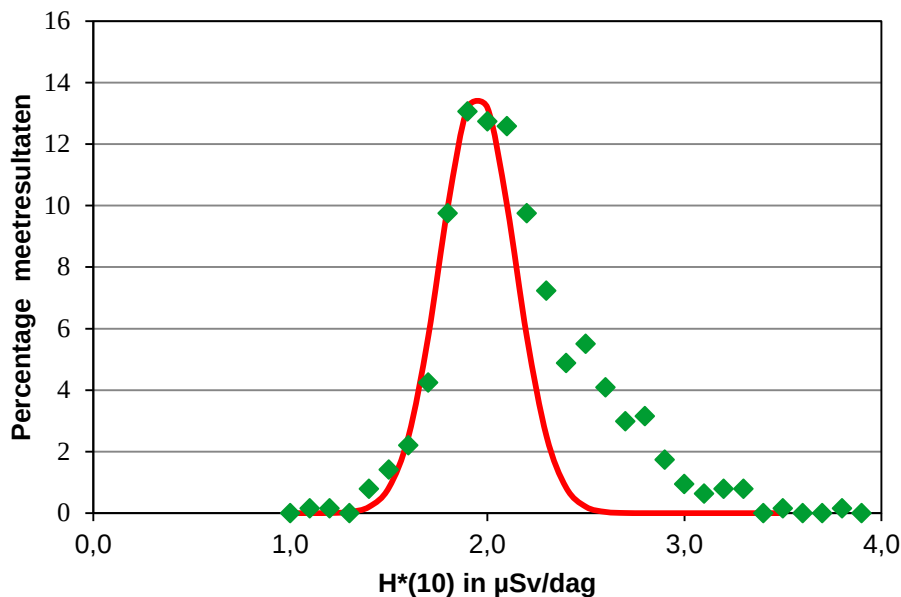
De resultaten komen overeen met de waarden die in eerdere onderzoeken naar dosistempometingen op werkplekken en in woningen zijn gevonden.

Voor dit onderzoek zijn gammadosimeters van NRG gebruikt, om de externe straling in het binnenmilieu van gebouwen te bepalen. NRG heeft de dosimeters uitgelezen en op basis daarvan het omgevingsdosisequivalenttempo ($H^*(10)$) op de meetlocaties bepaald. De resultaten en conclusies zijn aan het RIVM gerapporteerd en worden hier samengevat [3].

6.1 Omgevingsdosisequivalenttempo in gebouwen

De resultaten van alle metingen zijn door NRG gezamenlijk geanalyseerd en gerapporteerd. Hierbij is geen onderscheid gemaakt tussen meetlocaties in *reguliere* gebouwen en *specifieke* gebouwen. We spreken hier dan ook over de meetresultaten van gammastraling in gebouwen.

De groep van ongeveer 330 bedrijven en instellingen waar gemiddeld twee gammadosimeters zijn opgehangen (zie bijlage 3), heeft 638 bruikbare meetresultaten opgeleverd. Alleen op de extra meetlocaties bij kinderdagverblijven en scholen in Zuid-Limburg en het Rivierengebied zijn geen gammadosimeters opgehangen. Figuur 12 toont de verdeling van de meetresultaten.



Figuur 12 Frequentieverdeling van de verkregen resultaten. De metingen zijn op 638 meetlocaties verricht. De getrokken lijn is de best bij de meetpunten aansluitende Gauss-curve. De licht scheve verdeling van de metingen hangt mogelijk samen met de grote verschillen tussen de meetlocaties.

(Uit: De Jong, P. 2017)

Uit de analyse is in de gebouwen in dit onderzoek een gemiddeld omgevingsdosisequivalenttempo naar voren gekomen van $2,2 \pm 0,4 \mu\text{Sv/dag}$.

Er zijn twee uitschieters gevonden van 130 en 220 $\mu\text{Sv/dag}$. Deze zijn niet meegeteld bij de berekening van het gemiddelde. Beide dosimeters waren geplaatst in opslagruimten voor radioactief afval.

NRG heeft aan de hand van de resultaten een vergelijking gemaakt met een eerder onderzoek (1985) naar dosistempometingen op werkplekken. De waarden die destijds werden gevonden, komen goed overeen met de resultaten van deze meetcampagne. Ook heeft NRG gekeken naar eerdere studies in Nederlandse woningen. De verschillen tussen de resultaten zijn klein, waarbij moet worden opgemerkt dat de situatie in woningen niet helemaal vergelijkbaar is met werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen [3]. Dit heeft onder andere te maken met de grootte van de ruimten waarin is gemeten [3].

6.2 Onzekerheid in de meetresultaten

De factoren die bijdragen aan de onzekerheid van de resultaten binnen dit onderzoek zijn (onder andere) de onzekerheid van de meetmethode, temperatuur op de meetlocaties en het omgevingsdosisequivalenttempo tijdens transport.

Voor de verschillende factoren heeft NRG een inschatting gemaakt van de onzekerheid. Wanneer deze onzekerheden worden samengenomen, is de standaardonzekerheid in het gerapporteerde omgevingsdosisequivalenttempo door NRG geschat op ongeveer 15% [3].

7 Bespreking meetresultaten

In het kort

De gemeten radonconcentraties op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen zijn in het algemeen laag. Er zijn enkele reguliere werkplekken in Zuid-Limburg waar jaargemiddelde radonconcentraties van meer dan 100 Bq/m³ zijn gemeten. Daarnaast zijn bij enkele zeer specifieke werkplekken radonconcentraties tot meer dan 300 Bq/m³ gevonden. Hierbij zitten ook werkplekken die tevens toegankelijk zijn voor het publiek.

De resultaten van de radonmetingen zijn in lijn met de resultaten van het woningenonderzoek 2013-2014. Wanneer we de resultaten van de radonmetingen vergelijken met een aantal Europese landen, dan blijkt dat de radonconcentraties op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen in Nederland relatief laag liggen. Dat geldt ook voor de gebieden in Nederland met hogere regiogemiddelde waarden (Rivierengebied en Zuid-Limburg).

Voor de thorondochtermetingen geldt dat de resultaten uit dit onderzoek wat lager liggen, vergeleken met de resultaten uit het woningenonderzoek 2013-2014. In andere landen is nog weinig onderzoek gedaan naar thorondochterconcentraties in gebouwen. De gemeten thorondochterconcentraties op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen in Nederland liggen echter in lijn met de waarden die volgens UNSCEAR en ICRP in het binnenmilieu verwacht kunnen worden.

De resultaten van de metingen naar gammastraling komen goed overeen met de waarden die in een eerder onderzoek naar dosistempometingen op werkplekken en een eerder onderzoek naar externe straling in nieuwbouwwoningen zijn gevonden.

De meetresultaten in dit rapport zijn voor de werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen gezamenlijk weergegeven. In de praktijk zullen in veel van de gebouwen uit dit onderzoek zowel werknemers als leden van de bevolking aanwezig zijn. De beleidsverantwoordelijkheid voor de bescherming van werknemers en het vaststellen van een referentieniveau voor de jaargemiddelde radonconcentratie in werkruimten ligt bij de minister van SZW. De beleidsverantwoordelijkheid voor de bescherming van leden van de bevolking en het vaststellen van een referentieniveau voor de jaargemiddelde radonconcentratie in publiek toegankelijke gebouwen ligt bij de staatssecretaris van IenW.

Voor de daadwerkelijke blootstelling aan radon, thoron of gammastraling speelt de verblijfsduur in de ruimte een belangrijke rol. In de meeste gebouwen in dit onderzoek zullen werknemers langer en vaker aanwezig zijn dan leden van de bevolking. Denk hierbij aan winkels, musea, theaters en toeristengrotten waar werknemers vrijwel dagelijks aanwezig zijn, terwijl leden van de bevolking hier eenmalig enkele uren doorbrengen. Voor scholen is dit verschil minder groot, scholieren en

studenten hebben hier ook een langere verblijfsduur. Daarnaast zijn in de meetcampagne gebouwen meegenomen waar naar verwachting alleen werknemers aanwezig zijn, zoals bij een groot deel van de kantoren, industrie en glastuinbouwbedrijven en bij specifieke werkplekken, zoals drinkwaterbedrijven en opslagruimten voor radioactief afval.

7.1 Radon

Voor de Nederlandse gebouwen uit dit onderzoek is een jaargemiddelde radonconcentratie gevonden van gemiddeld $15,9 \pm 0,6 \text{ Bq/m}^3$, met in Zuid-Limburg een wat hoger gemiddelde van $31 \pm 2,8 \text{ Bq/m}^3$. Deze resultaten zijn vergelijkbaar met de resultaten van de radonmetingen in het woningenonderzoek 2013-2014 [1]. Uit dit eerdere onderzoek is bekend dat, voor wat betreft de radonconcentratie in woningen, in andere Europese landen hogere regiogemiddelde waarden voorkomen [1]. De wereldwijd gemiddelde radonconcentratie in gebouwen bedraagt ongeveer 40 Bq/m^3 [14].

Radonmetingen op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen hebben in andere Europese landen vaak plaatsgevonden in gebieden die zijn geïdentificeerd in verband met de hogere radonconcentraties. Wanneer we de resultaten van deze meetcampagne met die onderzoeken vergelijken, dan blijkt dat de radonconcentraties op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen in Nederland, inclusief het Rivierengebied en Zuid-Limburg, relatief laag liggen [7].

In het Verenigd Koninkrijk is een jaargemiddelde radonconcentratie gevonden van ongeveer 100 Bq/m^3 op werkplekken in gebieden met hogere radonconcentraties [7]. In België kwam een jaargemiddelde radonconcentratie van 110 Bq/m^3 naar voren bij metingen in een kleine groep publiek toegankelijke gebouwen en in Finland had 19% van de gemeten werkplekken een jaargemiddelde radonconcentratie van meer dan 300 Bq/m^3 [7]. Ook voor België en Finland geldt dat de metingen zijn uitgevoerd in gebieden waar eerder hogere regiogemiddelde waarden zijn vastgesteld.

7.1.1 Werkplekken

De gemeten radonconcentraties op werkplekken zijn in vergelijking met andere landen in het algemeen laag. Er zijn enkele kantoren in Zuid-Limburg naar voren gekomen waar radonconcentraties van meer dan 100 Bq/m^3 zijn gemeten. Daarnaast zijn bij verschillende zeer specifieke werkplekken radonconcentraties boven de 100 Bq/m^3 gevonden. Op een tiental meetlocaties bij deze specifieke werkplekken, zoals bij grondwater-zuiveringsstations van drinkwaterbedrijven en grotten, liggen de radonconcentraties ook rond of boven de 300 Bq/m^3 . Dit zijn bijzondere werkplekken, waarbij voor de individuele situaties de werkgever beoordeelt welke maatregelen kunnen worden genomen. Zo zal in sommige gevallen de verblijfsduur van werknemers (en daarmee de blootstelling aan radon) al beperkt zijn of worden er al stralingsbeschermingsmaatregelen genomen.

7.1.2 Publiek toegankelijke gebouwen

Voor de gemeten radonconcentraties in publiek toegankelijke gebouwen geldt ook dat deze in vergelijking met andere landen in het algemeen

laag zijn. Er zijn enkele scholen in Zuid-Limburg naar voren gekomen waar radonconcentraties van meer dan 100 Bq/m^3 zijn gemeten. Daarnaast zijn de toeristengrotten waar hogere radonconcentraties (tot meer dan 300 Bq/m^3) zijn gemeten toegankelijk voor het publiek. In de individuele situaties beoordeelt de ondernemer welke maatregelen kunnen worden genomen.

7.1.3 Meetonzekerheid

Bij het beoordelen van de meetresultaten moet rekening worden gehouden met de meetonzekerheid van de metingen. Uitgaande van een nationaal referentieniveau van 100 Bq/m^3 betekent dit voor individuele metingen dat bij gemeten radonconcentraties rond de 100 Bq/m^3 of hoger maatregelen kunnen worden overwogen om de radonconcentratie te verlagen. Bij de meetresultaten die rond de 100 Bq/m^3 uitkomen, ligt de meetonzekerheid tussen de 12% en 13%.

7.2 Thoron

Voor de Nederlandse gebouwen uit dit onderzoek is een jaargemiddelde thorondochterconcentratie gevonden van gemiddeld $0,42 \pm 0,02 \text{ Bq/m}^3$. In één geval is de meting hoger dan 3 Bq/m^3 . Vergeleken met de radonmetingen hebben de thorondochtermetingen plaatsgevonden in een kleinere groep reguliere gebouwen. De resultaten uit dit onderzoek liggen wat lager, vergeleken met de resultaten uit het woningenonderzoek 2013-2014. Mogelijk komt dit door een gemiddeld ander gebruik van wandafwerkmaterialen op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen of een gemiddeld genomen andere verhouding muuroppervlak/volume in vergelijking met woningen. Dit is echter niet onderzocht.

De gemeten activiteitsconcentraties van thorondochters in de gebouwen zijn lager dan de gemeten activiteitsconcentraties van radon. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat wanneer de gezondheidseffecten van langdurige blootstelling aan een radonconcentratie en aan een thorondochterconcentratie worden vergeleken, dit circa een factor tien verschil oplevert tussen de radonconcentratie en de thorondochterconcentratie. Met andere woorden: Het effect van langdurige blootstelling aan een EETC van 10 Bq/m^3 is bijvoorbeeld vergelijkbaar met het effect van langdurige blootstelling aan een radonconcentratie van 100 Bq/m^3 .

Er is nog weinig onderzoek gedaan naar thorondochterconcentraties in gebouwen in andere landen. Vanuit de Europese richtlijn is er ook geen verplichting voor het vaststellen van referentieniveaus voor thoron(dochters). In zijn algemeenheid is de blootstelling aan thoron(dochters) zowel internationaal als nationaal in beperkte mate onderwerp van wet- en regelgeving.

UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) gaat vooralsnog uit van $0,3 \text{ Bq/m}^3$ als typische waarde voor de thorondochterconcentratie in het binnenmilieu [15]. De ICRP (*International Commission on Radiological Protection*) heeft een schatting gemaakt van $0,04\text{--}2,0 \text{ Bq/m}^3$ voor de thorondochterconcentratie die kan worden verwacht in gebouwen [15, 16]. Wanneer we de resultaten van

deze meetcampagne met deze waarden vergelijken, dan is in drie reguliere gebouwen een thorondochterconcentratie gemeten die buiten de door de ICRP gegeven range valt. Bij de specifieke werkplekken gaat het om een tiental gebouwen die buiten deze range vallen.

7.3 Gammastraling

In de Nederlandse gebouwen in dit onderzoek is een gemiddeld omgevingsdosisequivalenttempo naar voren gekomen van $2,2 \pm 0,4 \mu\text{Sv}/\text{dag}$. De resultaten van deze meetcampagne komen goed overeen met de waarden die in een eerder onderzoek naar dosistempometingen op werkplekken zijn gevonden.

Wanneer we de in dit onderzoek gevonden gemiddelde waarde omrekenen naar een gemiddeld omgevingsdosisequivalenttempo per jaar, blijkt deze waarde van $0,80 \pm 0,15 \text{ mSv}/\text{jaar}$ ook redelijk overeen te komen met de resultaten van het onderzoek naar externe straling in nieuwbouwwoningen in 2008 [4]. Destijds werd het externe stralingsniveau in woonkamers bepaald op gemiddeld $0,89 \text{ mSv}/\text{jaar}$.

Kosmische straling, terrestrische straling en gammastraling uit bouwmaterialen dragen bij aan het gevonden gemiddelde omgevingsdosisequivalenttempo in dit onderzoek. Om specifiek de bijdrage door gammastraling uit bouwmaterialen aan de stralingsdosis per jaar voor werknemers of leden van de bevolking in gebouwen te kunnen bepalen, moet rekening worden gehouden met de bijdrage van kosmische en terrestrische straling in het binnenmilieu (ná afscherming), de conversiefactor voor het omrekenen naar effectieve dosis en verblijftijd. Ter indicatie: voor de gemiddelde situatie in Nederlandse woningen levert gammastraling uit bouwmaterialen een bijdrage van $0,35 \text{ mSv}$ per jaar aan de stralingsdosis voor bewoners [4]. Omdat de afscherming door bouwmaterialen volgens berekening zo'n $0,30 \text{ mSv}$ per jaar bedraagt, is de netto bijdrage van gammastraling uit bouwmaterialen in woningen derhalve $0,05 \text{ mSv}$ per jaar [5].

Er zijn in dit onderzoek twee meetlocaties gevonden met duidelijk verhoogde gammastralingsniveaus. Het gaat om locaties waar radioactief afval wordt opgeslagen en verhoogde niveaus verwacht kunnen worden. De ruimtes zijn niet toegankelijk voor het publiek.

7.4 Maatregelen voor de reductie van radon

Op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen waar de radonconcentratie het referentieniveau overschrijdt, onderneemt de werkgever of ondernemer maatregelen om de blootstelling aan radon te beperken. In eerste instantie is het doel om de radonconcentratie te verlagen. Wanneer dit redelijkerwijs niet mogelijk is, kunnen wellicht stralingsbeschermingsmaatregelen voor werknemers nodig zijn [7].

Welke maatregelen zinvol zijn, is afhankelijk van de precieze situatie. In principe zijn maatregelen die ontwikkeld zijn om radonconcentraties in woningen te verlagen, ook van toepassing op werkplekken [7]. Uit eerdere onderzoeken is bekend dat voor de Nederlandse situatie in woningen relatief eenvoudige maatregelen kunnen worden genomen om de radonconcentratie te reduceren [8]. Het gaat dan bijvoorbeeld om

verbeterde ventilatie door installatie van een mechanisch ventilatiesysteem of door het plaatsen van extra ventilatie-openingen [8].

Daarnaast zijn in de buitenlandse literatuur specifieke situaties beschreven waar mogelijk andere typen maatregelen nodig zijn, zoals in waterzuiveringsstations, toeristengrotten en bezoekersmijnen [7]. Dit zijn ook werkplekken waar in dit onderzoek hogere radonconcentraties (tot meer dan 300 Bq/m³) zijn gevonden. Het IAEA beschrijft dat voor waterzuiveringsstations een sterke ventilatie van de ruimte gecombineerd met beperkte werktijden effectief kunnen zijn [7]. Daarbij wordt al aangegeven dat in de praktijk werknemers alleen voor korte inspecties in die specifieke ruimtes zullen zijn. Voor grotten toegankelijk voor het publiek beschrijft het IAEA dat maatregelen zoals mechanische ventilatiesystemen vaak niet praktisch zijn [7]. Daarbij kunnen deze systemen de luchtvochtigheid in de grot veranderen, wat nadelig kan zijn. Als de radonconcentraties niet kunnen worden verlaagd, kunnen stralingsbeschermingsmaatregelen voor de gidsen en andere werknemers wellicht een optie zijn, waarbij mogelijk de werktijden in de grot moeten worden beperkt [7]. Voor bezoekersmijnen gelden soortgelijke maatregelen, hoewel aanpassingen ten behoeve van ventilatie daar wel een praktische oplossing zouden kunnen zijn [7]. Veranderingen in luchtvochtigheid spelen daar een minder belangrijke rol.

Indien nodig kunnen voorstellen voor maatregelen om de radonconcentratie te verlagen, worden opgenomen in een nationaal actieprogramma radon (artikel 6.20 Bbs). Dit nationaal actieprogramma radon zal door de ministers worden vastgesteld en is bedoeld om de langetermijnrisico's van blootstelling aan radon op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen (en woningen) aan te pakken.

7.5 Vervolgonderzoek

In de meetcampagne is naast een jaarmeting naar de radonconcentratie in gebouwen ook een halfjaarmeting uitgevoerd. Dit is gedaan zodat al tijdens de duur van het onderzoek een indicatie van de radonconcentraties in gebouwen beschikbaar kwam. Deze resultaten kunnen ook worden gebruikt om te onderbouwen wat voor eventuele volgende meetcampagnes een voldoende lange meetperiode zou zijn.

In deze meetcampagne is een aantal specifieke werkplekken met hogere radonconcentraties (tot meer dan 300 Bq/m³) naar voren gekomen. Aanvullend onderzoek naar deze werkplekken kan wellicht meer informatie geven over de specifieke situatie in deze gebouwen en de blootstelling van werknemers aan radon. Hierbij kan worden gedacht aan het uitvoeren van aanvullende metingen en een onderzoek naar (ventilatie)maatregelen, de verblijfsduur van werknemers en de bekendheid op de werkvloer met radon en eventuele maatregelen.

8 Conclusie

In dit rapport zijn de resultaten beschreven van de meetcampagne naar radon op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen in Nederland. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen *reguliere* werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen, zoals kantoren en scholen, en *specifieke* werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen waar mogelijk hogere radonconcentraties kunnen worden verwacht. Bij gelegenheid van dit onderzoek zijn op een deel van de onderzochte locaties ook de thorondochterconcentraties en de gammastralingsniveaus gemeten.

De jaargemiddelde radonconcentratie bedraagt gemiddeld over alle *reguliere* gebouwen in dit onderzoek $15,9 \pm 0,6 \text{ Bq/m}^3$. Op vier van de 572 meetlocaties bij verschillende bedrijven en instellingen is de gemeten waarde hoger dan 100 Bq/m^3 . Daarnaast zijn in Zuid-Limburg en het Rivierengebied hogere regiogemiddelde waarden gevonden. Deze resultaten komen overeen met de resultaten uit het eerdere RIVM-onderzoek (2013-2014) naar radon in woningen.

Er is ook gekeken naar *specifieke* werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen waar mogelijk hogere radonconcentraties kunnen worden verwacht. Hier zijn op verschillende meetlocaties radonconcentraties van meer dan 100 Bq/m^3 gevonden. Het gaat om meetlocaties bij zeer specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen die zijn geselecteerd op basis van het type gebouw of type werkzaamheden. Radonconcentraties hoger dan 100 Bq/m^3 zijn onder andere gevonden bij drinkwaterbedrijven, grotten en een bedrijf waar radioactief afval wordt opgeslagen.

De jaargemiddelde thorondochterconcentratie is bepaald in een iets kleinere groep reguliere gebouwen en bedraagt gemiddeld $0,42 \pm 0,02 \text{ Bq/m}^3$. In één geval is de meting hoger dan 3 Bq/m^3 .

Het gammastralingsniveau is bepaald op bijna alle meetlocaties in dit onderzoek en de resultaten zijn gezamenlijk geanalyseerd. Hier komt een gemiddeld omgevingsdosisequivalenttempo naar voren van $2,2 \pm 0,4 \mu\text{Sv/dag}$.

In dit onderzoek zijn op een tiental meetlocaties bij zeer specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen radonconcentraties tot meer dan 300 Bq/m^3 gevonden. Uit eerdere onderzoeken is bekend dat er relatief eenvoudige maatregelen kunnen worden genomen om de blootstelling aan radon te reduceren. Meer ventileren zorgt ervoor dat de radonconcentratie in het binnenmilieu afneemt. In een aantal gevallen kan mogelijk met deze maatregel worden volstaan. Daarnaast kan in de gevallen waar ventileren bijvoorbeeld niet mogelijk is, het verkorten van de verblijfsduur de blootstelling aan radon beperken. Voor specifieke gevallen kan per situatie worden bekeken welke (aanvullende) maatregelen kunnen worden overwogen.

Literatuur

1. Smetsers, R., Blaauboer, R., Dekkers, F., van der Schaaf, M., Slaper, H., *Radon en thoron in Nederlandse woningen vanaf 1930. Resultaten RIVM-meetcampagne 2013-2014*. 2015. **RIVM Rapport 2015-0087**.
2. Julius, H.W., van Dongen, R., *Stralingsbelasting van de bevolking en stralingsniveaus in het binnenmilieu in Nederland t.g.v. natuurlijke gammabronnen*. 1985. **RIVM rapport 248108002**.
3. de Jong, P., *Omgevingsdosisequivalenttempo op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen*. 2017, NRG.
4. Bader, S., Dekkers, S.A.J., Blaauboer, R.O., *Stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen: Eindrapport ventilatie- en radononderzoek*. 2010. **RIVM Rapport 610790009**.
5. Smetsers, R., Tomas, J., *Over de regulering van gammastraling door bouwmaterialen in de woning. Onderzoek voor de implementatie van richtlijn 2013/59/Euratom*. 2017. **RIVM Rapport 2017-0179**.
6. Centraal Bureau voor de Statistiek, *Werk in Randstadprovincies voor ruim 80 procent in dienstensector*. <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2015/09/werk-in-randstadprovincies-voor-ruim-80-procent-in-dienstensector>, 2015.
7. IAEA, *Radiation protection against radon in workplaces other than mines*. 2003, IAEA: Vienna.
8. Smetsers, R., *Woningen in Nederland met mogelijk hogere radonconcentraties: Onderzoek voor de implementatie van richtlijn 2013/59/Euratom*. 2017. **RIVM Rapport 2017-0032**.
9. Timmermans, C.W.M., van Weers, A.W., *Werkzaamheden met blootstelling aan natuurlijke stralingsbronnen. Actualisering van de inventarisatie van 1999*. 2001.
10. Smetsers, R., Blaauboer, R., *Variations in Outdoor Radiation Levels in the Netherlands (thesis)*. 1996, Rijksuniversiteit Groningen Bilthoven.
11. Tchorz-Trzeciakiewicz, D.E., Parkitny, T., *Radon as a tracer of daily, seasonal and spatial air movements in the Underground Tourist Route "Coal Mine" (SW Poland)*. Journal of Environmental Radioactivity, 2015. **149**: p. 90-98.
12. Dumitru, O.A., Onac, B.P., Fornos, J.J., Cosma, C., Gines, A., Gines, J., Merino, A., *Radon survey in caves from Mallorca Island, Spain*. Science of the Total Environment, 2015. **526**: p. 196-203.
13. Langridge, D., Stokes, R.P., Jackson, C.P., *Monitoring of radon gas in caves of the Yorkshire Dales, United Kingdom*. Journal of Radiological Protection, 2010. **30**: p. 545-546.
14. ICRP, *Radiological protection against radon exposure*. ICRP Publication 126, 2014. **Ann. ICRP 43(3)**.
15. UNSCEAR, *Sources and effects of ionizing radiation*. UNSCEAR 2000 report of the general assembly, with scientific annexes, 2000. **Volume I: Sources**.
16. ICRP, *Protection against radon-222 at home and at work*. ICRP Publication 65, 1993. **Ann. ICRP 22(2)**.
17. Blaauboer, R. and R. Smetsers, *Outdoor Concentrations of the Equilibrium-Equivalent Decay Products of ²²²Rn in the Netherlands*

- and the Effect of Meteorological Variables*. Radiation Protection Dosimetry, 1997. **69(1)**: p. 7-18.
18. Blaauboer, R.O., Dekkers, S.A.J., Slaper, H., Bader, S., *Stralingsbelasting in nieuwbouwwoningen – voorlopige resultaten*. 2008. **RIVM Briefrapport 610790004**.
 19. van Dongen, R., Potma, C., Stoute, J., *Natuurlijke achtergrondstraling in Nederland – Deel 1: Vrije veld metingen*. 1984. **RIVM Rapport 248108001**.
 20. van Dongen, R., Stoute, J., *Outdoor natural background radiation in the Netherlands*. Sci. Total Environ., 1985. **45**: p. 381-388.
 21. Smetsers, R., Blaauboer, R., *Source-dependent probability densities explaining frequency distributions of ambient dose rate in the Netherlands*. Radiation Protection Dosimetry, 1997. **69(1)**: p. 33-42.
 22. de Jong, P., van Dijk, J., *Analyse van het externe dosistempo in woningen*. 2009. **NRG-rapport NRG-K5098/09.97299**.
 23. UNSCEAR, *Effects of Ionizing Radiation – ANNEX E – Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces*. UNSCEAR 2006 report of the general assembly, with scientific annexes 2006. **Volume II**.

Bijlage 1 Wat zijn radon en thoron?

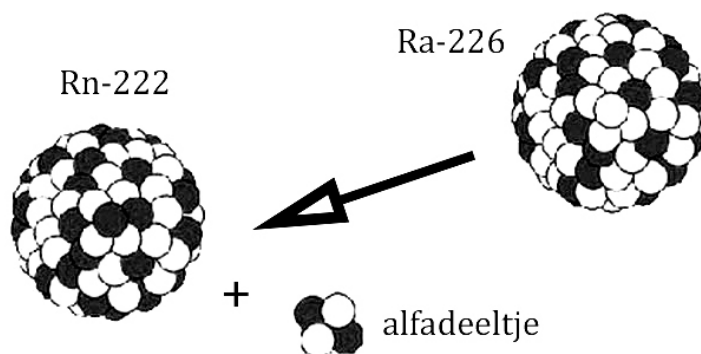
Uit: Smetsers, R., Blaauboer, R., Dekkers, F., van der Schaaf, M., Slaper, H. 2015

Wat zijn radon en thoron en waar komen ze vandaan?

In alle woningen treffen we radon en thoron aan. Soms weinig en soms iets meer. Wat zijn dat precies voor stoffen, en waarom moeten we die goed in de gaten houden? Daarvoor is het nodig om eerst uit te leggen wat radioactiviteit is, en wat natuurlijke radioactieve reeksen zijn.

1.1 Radioactiviteit

Alle stoffen zijn opgebouwd uit atomen. Sommige atomen zijn niet stabiel en zullen vroeg of laat vervallen. Dat betekent dat onder uitzending van straling de samenstelling van de atoomkern verandert. Dit verschijnsel heet *radioactiviteit*. Het nieuwgevormde element noemen we het vervalproduct, maar het wordt ook wel de *dochter* genoemd. De radioactieve stof waaruit de dochter is ontstaan, is de *moeder* (zie Figuur 13).

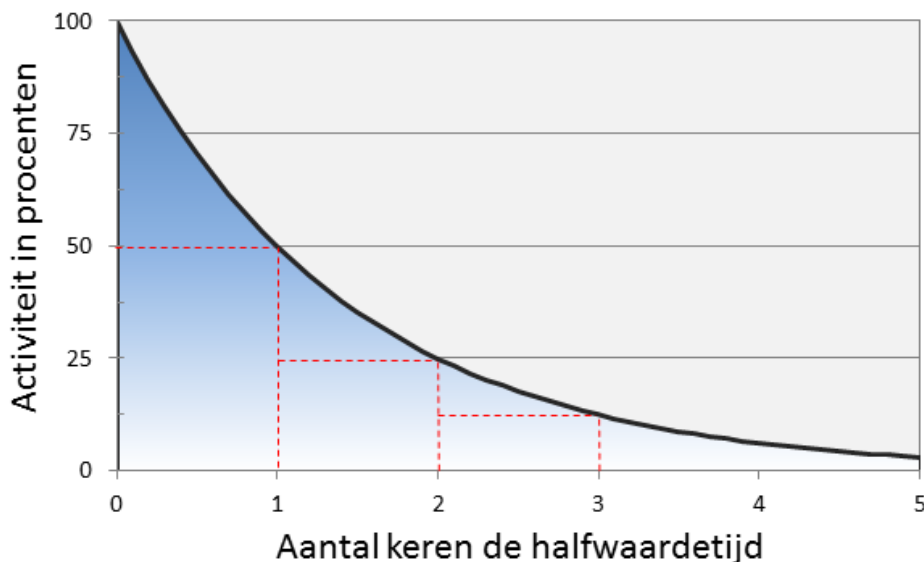


Figuur 13 Voorbeeld radioactief verval. De radiumisotoop Ra-226 (moeder) vervalt naar de radonisotoop Rn-222 (dochter). Bij dit radioactief verval komt alfastraling vrij.

De kern van een atoom is opgebouwd uit een aantal protonen en een aantal neutronen. Het aantal protonen bepaalt met welk chemisch element we van doen hebben. Laten we als voorbeeld radon (Rn) nemen: dat heeft 86 protonen. Maar van radon bestaan er meerdere isotopen, dat wil zeggen atoomkernen met 86 protonen maar met een verschillend aantal neutronen. De som van het aantal protonen en het aantal neutronen wordt het massagetal genoemd. Isotopen zijn elementen met hetzelfde aantal protonen in de kern, maar een verschillend aantal neutronen, en dus een verschillend massagetal. Het massagetal gebruiken we voor de naamgeving van isotopen. De belangrijkste radonisotoop is radon-222, kortweg Rn-222. De naam radon houdt in dat het gaat om een element met 86 protonen. Het massagetal 222 geeft aan dat de kern daarnaast $222 - 86 = 136$ neutronen bevat. Een ander veelvoorkomend radonisotoop is Rn-220. Dat heeft twee neutronen minder dan Rn-222. Historisch hebben deze isotopen aparte namen gekregen: Rn-222 wordt simpelweg *radon* genoemd, en Rn-220 *thoron*.

Het aantal protonen bepaalt de *chemische* eigenschappen van een atoom, maar de combinatie van protonen en neutronen bepaalt de *radioactieve* eigenschappen van dat atoom. Rn-222 en Rn-220 gedragen zich chemisch op precies dezelfde manier: ze zijn allebei een edelgas en reageren dus niet met andere stoffen. Maar hun radioactieve eigenschappen zijn verschillend. Zo vervalt Rn-220 bijna 6.000 keer zo snel als Rn-222.

De *halveringstijd* geeft aan hoe snel (of langzaam) een radioactieve stof vervalt. Gedurende één halveringstijd vervalt de helft van de aanwezige radioactiviteit. Na twee keer de halveringstijd is dus nog één kwart van de oorspronkelijke hoeveelheid over (de 'helft van de helft'), en na vijf keer nog ongeveer 3% (zie Figuur 14). Halveringstijden van radioactieve stoffen kunnen variëren van fracties van een seconde tot vele miljarden jaren. Bijvoorbeeld: Polonium-212 (Po-212) heeft een halveringstijd van 0,0000003 seconde, maar de halveringstijd van uranium-238 (U-238) bedraagt maar liefst 4,5 miljard jaar. En nu we toch bezig zijn: de halveringstijd van Rn-222 is 3,8 dagen, en die van Rn-220 56 seconden. De hoeveelheid radioactiviteit wordt uitgedrukt in becquerel (Bq). Dat is het aantal atomen dat per seconde vervalt. Als we het hebben over een (radio)activiteitsconcentratie (bijvoorbeeld in lucht), dan wordt die uitgedrukt in becquerel per kubieke meter, ofwel Bq/m^3 . Een activiteitsconcentratie van 1 Bq/m^3 in lucht betekent dat er in één kubieke meter lucht per seconde één atoom vervalt.



Figuur 14 Radioactiviteit en halveringstijd. De activiteit van een radioactieve stof halveert na telkens één halveringstijd. Hoe groot die halveringstijd is, hangt af van de radioactieve stof waarmee je van doen hebt.

1.2 Natuurlijke reeksen

Al vanaf het ontstaan van de aarde, nu ongeveer 5 miljard jaar geleden, zitten er stoffen in de bodem die van nature radioactief zijn. Het gaat dan bijvoorbeeld om radioactieve isotopen van kalium (K-40), uranium (U-238) en thorium (Th-232). Alle drie hebben ze een halveringstijd van meer dan een miljard jaar, dus ze zijn sinds het ontstaan van de aarde nog steeds niet helemaal vervallen.

Met U-238 en Th-232 is iets bijzonders aan de hand. Deze isotopen zijn namelijk het startpunt van een lange radioactieve reeks: de vervalproducten ('dochteren') van U-238 en Th-232 zijn zelf ook weer radioactief, en de dochters daarvan ook weer, enzovoort. Bij de uraniumreeks hebben we te maken met dertien radioactieve dochterproducten, totdat er uiteindelijk stabiel lood ontstaat. Binnen de thoriumreeks komen we elf radioactieve dochterproducten tegen.

Als we naar radioactiviteit in de bodem kijken, dan zien we daar dus vele tientallen verschillende radioactieve isotopen zitten. En die radioactieve stoffen zitten ook in materialen die voor een belangrijk deel uit bodembestanddelen bestaan. Denk bijvoorbeeld aan bouwmaterialen als beton, bakstenen, plavuizen en gips. Wel is het zo dat er in sommige bodemsoorten meer natuurlijke radioactiviteit zit dan in andere bodemsoorten, en zo iets geldt ook voor bouwmaterialen.

1.3 Radon en thoron

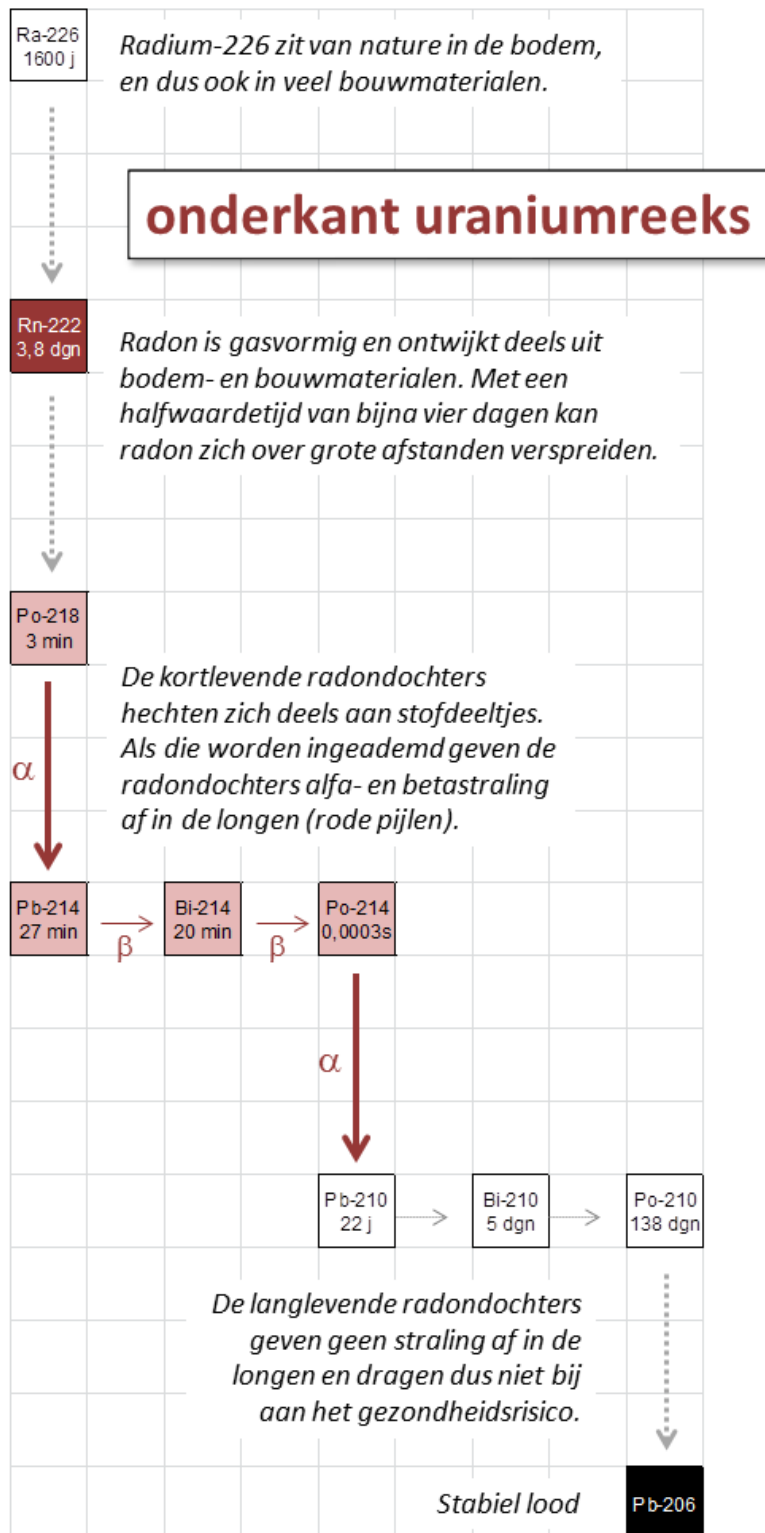
Zolang deze radioactieve stoffen in bodem- of bouwmaterialen blijven zitten, is er weinig aan de hand. Bij het radioactieve verval geven ze weliswaar straling af, maar de meeste straling wordt geabsorbeerd in het bodem- of bouw materiaal. Maar er komen *wel* radioactieve stoffen vrij uit bodem- en bouwmaterialen. Ergens halverwege de uraniumreeks wordt er namelijk Rn-222 gevormd, een isotoop dat we meestal gewoon radon¹⁵ noemen (zie Figuur 15). We hebben al eerder gezien dat radon een edelgas is. En doordat edelgassen zich niet aan andere stoffen binden, zal een deel van het gevormde radon uit het materiaal komen waarbinnen het is ontstaan. We noemen dat *exhalatie*.

Een deel van het gevormde radon komt dus in de lucht terecht. En die lucht ademen we in, dus er komt ook radon in onze longen. Dat is echter niet schadelijk, want we ademen het radon gewoon weer uit. Het is immers een edelgas. Maar radon vervalt zelf ook weer, en het dochterproduct, en ook de dochters daarvan, zijn *niet* gasvormig. Deze dochters slaan deels neer op wanden en voorwerpen, maar een groot deel hecht zich aan stofdeeltjes die in de lucht rondzweven. En stofdeeltjes die worden ingeademd, blijven vaak *wél* achter in de longen. De radondochters die daaraan vastzitten zullen in de longen verder vervallen, en de straling die daarbij vrijkomt, kan in de longen schade veroorzaken.

Bij de thoriumreeks zien we iets dergelijks (zie Figuur 16). Ergens halverwege ontstaat de isotoop Rn-220. Om gemakkelijk onderscheid te maken met Rn-222 wordt deze isotoop thoron¹⁶ genoemd. Voor thoron geldt hetzelfde als voor radon: een deel zal vrijkomen; thoron zelf is niet schadelijk maar de dochters die we inademen *wél*.

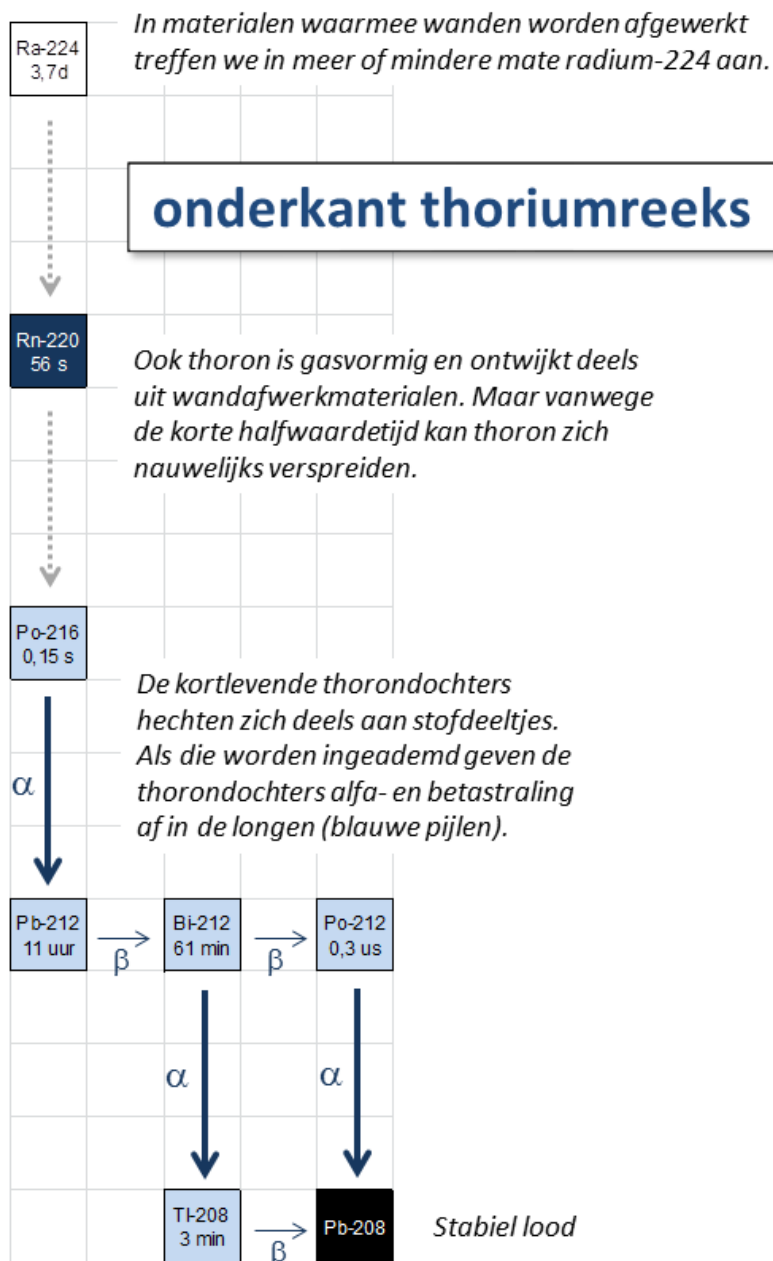
¹⁵ Rn-222 is ontstaan uit de radiumisotoop Ra-226. Radon betekent zoiets als: dochter van radium.

¹⁶ Thoron betekent: dochter van thorium. In werkelijkheid is Rn-220 een achter-achter-kleindochter van Th-232. De moeder van Rn-220 is ook een radiumisotoop, namelijk Ra-224. Maar omdat de naam *radon* al was toebedeeld aan Rn-222, wordt Rn-220 sinds de ontdekking van deze isotoop *thoron* genoemd.



Figuur 15 Onderste gedeelte van de natuurlijke vervalreeks van uranium. Vanuit radium-226 ontstaat het gasvormige radon (donkerrood). Kortlevende radondochters (lichtrood) kunnen worden ingeademd en geven vervolgens straling af in de longen. Vooral de alfastraling levert een gezondheidsrisico op.

Maar tussen radon en thoron zijn ook grote verschillen. En die zijn er omdat de halveringstijden van radon, thoron en hun respectievelijke dochters behoorlijk verschillend zijn. Laten we dat eens preciezer gaan bekijken.



Figuur 16 Onderste gedeelte van de natuurlijke vervalreeks van thorium. In de thoriumreeks ontstaat ergens halverwege het gasvormige thoron (donkerblauw). Ook thorondochters (lichtblauw) leveren na inademing een gezondheidsrisico op.

Als radon ergens in een gesteente of bouw materiaal ontstaat, dan zit het nog niet zomaar in de lucht. Daar zit een ingewikkeld proces tussen. Als het materiaal erg gesloten is, komt er nauwelijks radon vrij, ook al is het gasvormig. Maar veel bodem- en bouwmaterialen zijn min of meer poreus, en radongas kan dan via kleine openingen naar het oppervlak diffunderen, en uiteindelijk vrijkomen in de lucht. Met het begrip *exhalatietempo* geven we aan hoeveel radioactiviteit er per seconde uit een vierkante meter materiaal oppervlak komt. Het exhalatietempo hangt af van de hoeveel radioactiviteit die per seconde in het moedermateriaal gevormd wordt en het gemak waarmee het daaruit ontsnapt.

1.4 Buitenshuis

Radon dat eenmaal in de lucht zit, zal zich vrijuit verder verspreiden. Het is immers een edelgas: het slaat niet neer en het zal ook nergens mee reageren. We treffen radon dan ook overal aan, zowel buiten als binnen. Buitenshuis is de radonconcentratie in Nederland gewoonlijk erg laag: de buitenluchtconcentratie, gemiddeld over een jaar en over heel Nederland, bedraagt ongeveer 3 Bq/m³. Die lage radonconcentratie buitenshuis komt door de bodemsoorten die we hier hebben en het feit dat Nederland aan zee ligt. In veel andere landen zit veel meer radon in de buitenlucht. Met het Nationaal Meetnet Radioactiviteit van het RIVM kunnen we de radonconcentratie buiten goed meten. Die is niet altijd en overal hetzelfde, maar wordt beïnvloed door de weersomstandigheden (windkracht, windrichting, neerslag, stabiliteit van de atmosfeer) en de eigenschappen van de omgeving (bodemsoort, vochtigheid bodem, mate van bebouwing en bestrating, ligging ten opzichte van de zee) [10, 17]. Zo loopt de radonconcentratie tijdens windstille nachten op leefniveau soms op tot tientallen keren de jaargemiddelde waarde. En in Zuid-Limburg meten we een jaargemiddelde radonconcentratie in de buitenlucht die met 5 Bq/m³ iets hoger is dan in de rest van Nederland.

In de buitenlucht speelt thoron geen rol van betekenis. Dat komt door de korte halveringstijd van thoron van 56 seconden: de meeste thoronatonen die in de bodem ontstaan, vervallen nog in de bodem. En dat deel dat nog wel uit de bodem komt, vervalt vlak bij de grond, waarna veel dochters zich hechten aan het bodemoppervlak.

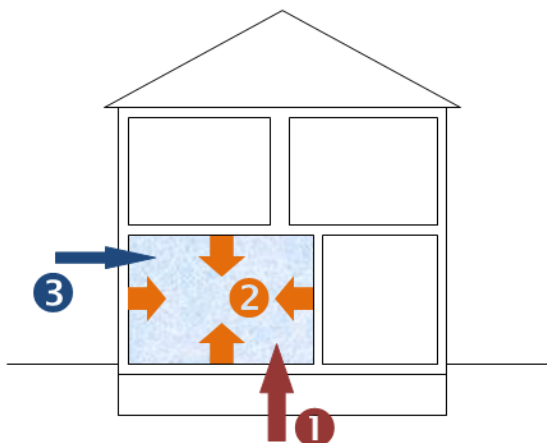
1.5 Binnenshuis

Radon dat vanuit de bodem in de buitenlucht terechtkomt, zal zich doorgaans over een enorm volume verspreiden. Daarom is de radonconcentratie buiten relatief laag. Maar binnenshuis zit het radon veel meer opgesloten, en meten we dus hogere concentraties. Iets dergelijks geldt ook voor de thorondochters. In de volgende hoofdstukken leggen we uit wat we precies gemeten hebben in dit radon/thorononderzoek en wat daarvan de resultaten zijn. Om dat goed te kunnen begrijpen, beschrijven we eerst de processen die bepalend zijn voor de concentraties van radon, thoron en hun dochterproducten in woningen. Vanwege de verschillen tussen radon en thoron doen we dat apart.

1.5.1 *De concentratie van radon en radondochters in woningen*

Radon kan op veel manieren in huis terechtkomen (zie Figuur 17). De belangrijkste zijn:

1. Een deel van het radon dat ontstaat in de bodem onder het huis komt (vaak via de kruipruimte) in de woning.
2. Een deel van het radon dat ontstaat in de bouwmaterialen van het huis komt vrij in de woning.
3. Door ventilatie komt radon van buiten naar binnen (en andersom).



Figuur 17 De herkomst van radon in woningen. Radon kan op verschillende manieren in de woning komen: (1) via de kruipruimte, (2) door exhalatie uit bouwmaterialen en (3) van buiten.

Het hangt van de situatie af welk pad het belangrijkste is. Van huizen uit de periode 1994-2003, met doorgaans een bouwconstructie van beton, weten we dat ongeveer 70% van het radon afkomstig is uit bouwmaterialen [4, 18]. In dat soort nieuwbouwhuizen is veel steenachtig bouw materiaal aanwezig, maar is de kruipruimte vaak goed afgedicht. In veel oude huizen, met een bouwconstructie van hout, speelt radon vanuit de bodem waarschijnlijk een belangrijkere rol, maar dat is in Nederland nooit goed onderzocht. Verder is voor de radonconcentratie in de woning ook de leefstijl van de bewoners van belang. Het gaat dan om zaken als: wordt er gerookt, is er een open haard, hoe wordt er geventileerd en hoe sterk wordt het huis verwarmd¹⁷?

Daarnaast kan er sprake zijn van een bijzondere situatie waarbij bewoners, vaak zonder dat ze dat weten, voorwerpen in huis hebben waaruit veel radon vrijkomt. Je moet dan denken aan verzamelingen van minerale stenen of antieke voorwerpen waar radiumverf gebruikt is om bijvoorbeeld wijzers en cijfers op wijzerplaten op te laten lichten (zie Figuur 18).

Tot nu toe hebben we het steeds over radon, maar zoals eerder gezegd, zijn het de *radondochters* die een gezondheidsrisico vormen. Hoe is nu het verband tussen radon en radondochters in de woning?

¹⁷ Als een huis sterk verwarmd wordt, en de kruipruimte niet goed is afgedicht, dan stroomt er vanwege het zogenoemde schoorsteeneffect meer radon via de kruipruimte het huis in. Dat effect is vooral sterk in landen met een rotsachtige bodem, koude winters en huizen waarvan de kruipruimte in verbinding staat met de rest van de woning. Dat geldt bijvoorbeeld voor een land als Zweden.



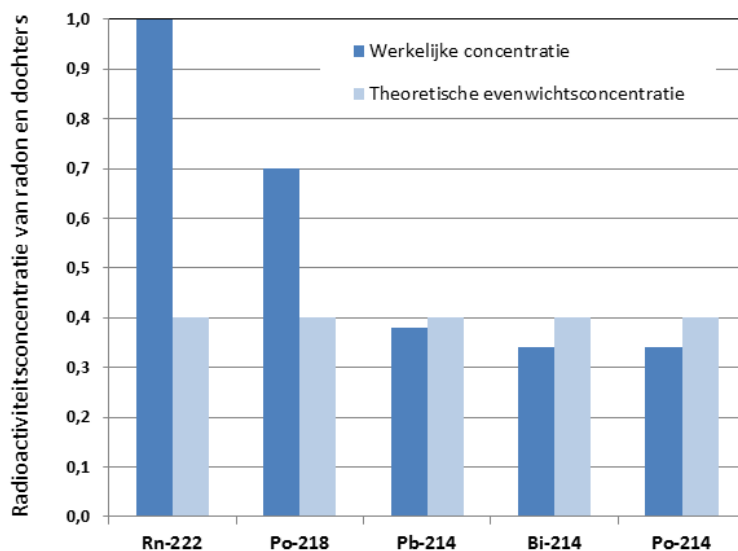
Figuur 18 Twee voorbeelden van oude radioactieve uurwerken. Op de wijzerplaat en de wijzers van deze exemplaren is radiumverf aangebracht waaruit continu radon ontsnapt.

Als radon vervalt, ontstaat er een radioactief poloniumisotoop (Po-218), met een halveringstijd van 3 minuten (zie Figuur 3). Als dat vervalt, ontstaat er een loodisotoop (Pb-214, 27 min), vervolgens een bismuthisotoop (Bi-214, 20 min) en ten slotte een ander poloniumisotoop dat vrijwel meteen vervalt (Po-214, 0,0003 sec). De loodisotoop die dan ontstaat (Pb-210, 22 jaar) heeft zo'n lange halveringstijd dat we daar binnenshuis geen last meer van hebben.

Als de vervalproducten van radon ook edelgassen zouden zijn, dan zouden de radioactiviteitsconcentraties van die stoffen in de lucht hetzelfde zijn als die van radon. Maar polonium, lood en bismuth zijn vaste stoffen. Zo gauw die in de lucht ontstaan, zullen ze zich ergens aan hechten. Dat kan de wand zijn of een willekeurig ander voorwerp. In dat geval dragen ze niet meer bij aan de concentratie in de lucht. Maar de kans is groter dat ze aan een van de vele miljoenen stofdeeltjes blijven plakken die binnenshuis rondzweven. Zolang deze deeltjes in huis rondzweven, dragen de daaraan vastzittende radondochters bij aan de luchtconcentratie. Maar ook stofdeeltjes hechten zich uiteindelijk aan wanden en voorwerpen. Op die manier verdwijnen er dus ook radondochters uit de lucht. Met andere woorden: de concentraties van dochterproducten van radon in lucht zullen altijd kleiner zijn dan die van radon zelf. Bovendien wordt de concentratie van een dochter lager naarmate die dochter in de vervalreeks verder van radon af zit. Dat is schematisch getekend in Figuur 19 (de donkerblauwe balken).

Met vijf verschillende concentraties is het niet handig om de schadelijkheid van de radioactiviteit in lucht aan te duiden. Om die reden is de zogenoemde evenwichtsconcentratie gedefinieerd: dat is het (theoretische) mengsel van radon en dochters, met allemaal dezelfde radioactiviteitsconcentratie, dat evenveel stralingsschade oplevert als het werkelijke mengsel. In Figuur 7 is de evenwichtsconcentratie weergegeven met de lichtblauwe balken. Deze evenwichtsconcentratie is een rechtstreekse maat voor de gezondheidsschade. We weten, na tientallen jaren van onderzoek, dat de evenwichtsconcentratie binnenshuis ruwweg gelijk is aan 40% van de radonconcentratie.

Als we radon meten, kunnen we de evenwichtsconcentratie dus gemakkelijk schatten. Stel, we meten binnenshuis een jaargemiddelde radonconcentratie van 20 Bq/m^3 , dan is de evenwichtsconcentratie van radondochters die daarbij hoort ongeveer $0,4 \times 20 = 8 \text{ Bq/m}^3$.



Figuur 19 Voorbeeld van de radioactiviteitsconcentratie in lucht van de kortlevende radondochters, ten opzichte van radon zelf. In donkerblauw zijn de werkelijke concentraties weergegeven, en in lichtblauw de theoretische evenwichtsconcentratie, die evenveel stralingsschade oplevert als het echte mengsel.

1.5.2

De concentratie van thoron en thorondochters in woningen

De situatie rond radon en radondochters binnenshuis is al behoorlijk complex, maar die van thoron en thorondochters is nóg ingewikkelder. Daar komt bij dat er wereldwijd de afgelopen 25 jaar heel veel onderzoek gedaan is naar radon, maar slechts weinig naar thoron. Bij thoron zijn er dus meer onzekerheden dan bij radon. Het grote verschil komt voort uit het feit dat de halveringstijd van thoron zoveel korter is dan die van radon. Dat heeft een aantal gevolgen:

1. Thoron komt niet uit de kruipruimte en ook niet van buiten. Thoron kan alleen maar in de woning komen door *exhalatie* vanuit de buitenste lagen van wanden, vloeren en plafonds. Het gaat dus vooral om materialen waarmee de woning is afgewerkt (zie het kader voor een overzicht van gangbare wandafwerkmaterialen). In tegenstelling tot radon heeft thoron niet de tijd om bijvoorbeeld diep vanuit steenachtige bouwmaterialen de binnenlucht te bereiken.
2. Thoron vervalt zo snel, dat de thoronconcentratie in een ruimte niet overal hetzelfde is. Vlak bij een wand waar thoron vrijkomt, is de thoronconcentratie veel hoger dan midden in de kamer. (Dit geldt overigens niet voor de dochters van thoron, die bepalend zijn voor de blootstelling aan straling.) Als je dus zomaar ergens in een kamer de thoronconcentratie meet, dan zegt dat niets over de concentratie in de rest van de ruimte.

3. Thoron vervalt heel snel, maar een van de dochters (Pb-212) heeft een halveringstijd van 11 uur. Dat is weer veel langer dan de halveringstijden van de radondochters (maximaal 22 minuten). De concentratie van de thorondochters in een ruimte is dus heel anders dan die van thoron zelf.

Wat verstaan wij onder bouwmaterialen en wandafwerkmaterialen?

Met de term (steenachtige) bouwmaterialen bedoelen we in dit rapport grofstoffelijke materialen die voor een belangrijk deel bestaan uit bodemmateriaal en die vooral gebruikt worden voor de constructie van een woning. Het gaat dan bijvoorbeeld over beton, cement en bakstenen. Maar ook natuursteen, tegels en plavuizen vallen in deze categorie.

Als we het in dit rapport hebben over wandafwerkmaterialen, dan bedoelen we materialen met een minerale oorsprong die in een (relatief) dunne laag worden toegepast om muren en plafonds netjes af te werken. Het gaat dan om gips, leem, granol, *spachtelputz* en andere soorten sierpleister.

Om iets te kunnen zeggen over de schadelijkheid van thoron in de woning, moeten we de evenwichtsconcentratie van de thorondochters kennen. Maar, in tegenstelling tot de situatie bij radon, kunnen we die niet simpel afleiden door de concentratie van thoron te meten. In plaats daarvan moeten we rechtstreeks naar de thorondochters kijken.

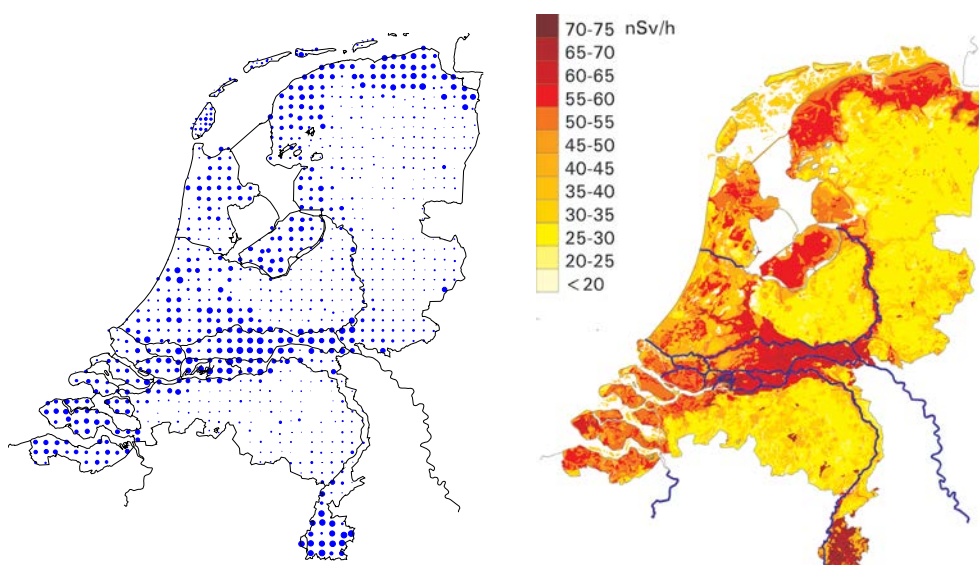
Bijlage 2 Blootstelling aan externe straling binnenshuis

Uit: Smetsers, R., Tomas, J. 2017

Om te weten in hoeverre Nederlandse burgers blootgesteld worden aan straling uit bouwmaterialen van woningen, is het nodig om eerst te kijken naar de natuurlijke stralingsachtergrond in het buitenmilieu. Dit wordt in de volgende paragraaf toegelicht. Vervolgens wordt de invloed van 'bouwen en wonen' op de blootstelling van bewoners aan externe straling beschouwd. Als laatste wordt samengevat wat dat volgens de huidige inzichten betekent voor de gemiddelde stralingsdosis die Nederlandse burgers in de woning ontvangen.

Natuurlijke achtergrondstraling in het buitenmilieu

Begin jaren tachtig van de vorige eeuw is uitvoerig onderzoek gedaan naar natuurlijke (achtergrond)straling in Nederland. Onderdeel van dit zogenoemde SAWORA¹⁸-programma bestond uit de uitvoering van landsdekkende 'vrije veld'-metingen van het exposietempo op een grid¹⁹ van 6x6 km [19, 20]. Na aftrek van de kosmische stralingscomponent leverde dat een set van meetwaarden op die inzicht geeft in de ruimtelijke variatie van de terrestrische straling in Nederland (zie Figuur 1, links). Van Dongen et al. vonden (omgerekend) een gemiddelde waarde voor het omgevingsdosisequivalenttempo van 40 nSv.h⁻¹.



Figuur 20 Grafische weergave van de SAWORA-metgegevens (links) en de daarvan afgeleide terrestrische stralingskaart van Nederland (rechts).

Tien jaar later zijn deze data in een GIS-omgeving gecombineerd met gegevens over bodemsoorten in Nederland [10]. Uit die combinatie is een terrestrische kaart van Nederland geconstrueerd (Figuur 20, rechts). De terrestrische straling in Nederland, uitgedrukt in

¹⁸ SAWORA staat voor: 'Stralingsaspecten van woonhygiëne en verwante radioecologische eigenschappen'.

¹⁹ Op de Waddeneilanden is een 3x3 km grid gehanteerd.

omgevingsdosisequivalenttempo, varieert als gevolg van verschillen in bodemtype tussen 15 en 75 nSv.h⁻¹. Vanwege de beperkte omvang van ons land en de geringe verschillen in hoogte, zien we in Nederland nauwelijks een ruimtelijke variatie in kosmische straling op leefniveau. Wel hebben we te maken met snelle en langzame variaties in de tijd, vanwege verschillen in luchtdruk en de elfjarige zonnecyclus. Maar als gemiddelde waarde kan voor kosmische straling in Nederland een omgevingsdosisequivalenttempo van eveneens 40 nSv.h⁻¹ gehanteerd worden [21].²⁰

Invloed van bouwen en wonen

Woningen beïnvloeden op twee manieren de blootstelling van bewoners aan externe straling. Op de eerste plaats zijn bouwmaterialen zelf een bron van straling. Anderzijds schermen bouwmaterialen straling vanuit het buitenmilieu af. Wat we in een woning meten is dus de resultante van deze twee effecten. Als we de bruto of netto bijdrage van bouwmaterialen aan het externe stralingsniveau in de woning willen weten, dan zullen we die waarden dus moeten berekenen uit (1) meetgegevens in de woning, (2) de hoogte van de kosmische en terrestrische stralingsniveaus in het buitenmilieu en (3) de geschatte mate van afscherming van kosmische en terrestrische straling door de woning.

In 2010 zijn de eindresultaten gerapporteerd van een onderzoek naar de stralingsbelasting in woningen door radon en externe straling [4]. In dat rapport zijn de resultaten samengevat van metingen van het externe stralingsniveau in onder meer de woonkamer, de slaapkamer en de hal van circa driehonderd Nederlandse woningen, gebouwd in de periode 1994 tot en met 2003 [22]. Voor de woonkamer is toen, uitgedrukt in omgevingsdosisequivalenttempo, een gemiddelde waarde gevonden van 0,89 mSv j⁻¹. Voor de slaapkamer en de hal zijn iets lagere waarden gevonden van 0,87 respectievelijk 0,86 mSv j⁻¹.

In [4] is ook beschreven in welke mate de woning afschermt tegen kosmische en terrestrische straling van buiten: kosmische straling wordt voor gemiddeld circa 60% doorgelaten en terrestrische straling voor circa 10%. Er is geen reden om aan te nemen dat deze transmissiefactoren na die tijd significant zijn veranderd.

Als we deze gegevens toepassen, dan leidt dat tot het overzicht zoals weergegeven in Tabel 1.

²⁰ In deze beschouwing wordt een geringe dosis door blootstelling aan neutronen van kosmische oorsprong niet meegenomen.

Tabel 1 Omgevingsdosisequivalent per jaar [mSv j^{-1}] door verschillende natuurlijke bronnen van straling, buiten (linkerkolom) en in de woonkamer (rechterkolom). In alle gevallen is uitgegaan van de gemiddelde situatie in Nederland.

Omgevingsdosisequivalent per jaar [mSv j^{-1}]	Buiten	Binnen
Terrestrische straling	0,35	0,04
Kosmische straling	0,35	0,21
Straling uit bouwmaterialen	0,00	0,64
Totaal	0,70	0,89

Effectieve dosis per jaar door natuurlijke straling in de woning

In Tabel 2 is voor de gemiddelde situatie in Nederland het over een jaar gesommeerde omgevingsdosisequivalent weergegeven, buiten respectievelijk in de woning (woonkamer). Als we op basis hiervan de effectieve dosis willen bepalen, dan moeten we dus rekening houden met de conversie van omgevingsdosisequivalent naar effectieve dosis. Merk op dat die conversie 1 is voor kosmische straling en circa 0,6 voor terrestrische straling en straling uit bouwmaterialen. Daarnaast moet rekening gehouden worden met de verblijftijd. Een persoon in Nederland verblijft gemiddeld circa 90% van de tijd binnen en 10% van de tijd buiten.

Tabel 2 Gemiddelde effectieve stralingsdosis per jaar [mSv j^{-1}] voor een persoon als gevolg van externe straling door verschillende natuurlijke bronnen van straling, voor verschillende aannames over de verblijftijd binnen, respectievelijk buiten. Ter vergelijking is ook een indicatie gegeven van de effectieve stralingsdosis als gevolg van blootstelling aan radon- en thorondochters. In alle gevallen is uitgegaan van de gemiddelde situatie in Nederland.

Effectieve jaardosis [mSv j^{-1}]	100 % buiten	100 % binnen	90 % binnen, 10 % buiten
Vanwege externe straling			
Terrestrische straling	0,21	0,02	0,04
Kosmische straling¹	0,35	0,21	0,22
Bruto bijdrage bouwmaterialen	0,00	0,39	0,35
Totale jaardosis externe straling	0,56	0,62	0,61
Afscherming door bouwmaterialen	0,00	-0,33	-0,30
Netto bijdrage bouwmaterialen	0,00	0,06	0,05
Vanwege inhalatie²			
Als gevolg van radondochters	0,16	0,50	0,47
Als gevolg van thorondochters	0,00	0,22	0,20
Totale jaardosis inhalatie	0,16	0,72	0,66

¹ De stralingsdosis als gevolg van deelnemen aan vliegverkeer is in deze getallen niet meegenomen.

² Gebaseerd op dosisconversiecoëfficiënten volgens [23]. Onderliggende data zijn ontleend aan (Smetsers en Blaauboer 1996, Smetsers et al. 2015).

De resultaten van de omrekening zijn weergegeven in Tabel 2. Ter vergelijking zijn in die tabel ook schattingen²¹ gegeven van de effectieve dosis door de inhalatie van radon- en thorondochters.

Voor de huidige situatie in Nederland vinden we dus dat bouwmaterialen gemiddeld circa 0,35 mSv j⁻¹ bijdragen aan de stralingsdosis²², maar ze schermen aan de andere kant circa 0,30 mSv j⁻¹ af aan kosmische en vooral terrestrische straling. De netto bijdrage van bouwmaterialen aan de effectieve stralingsdosis van de Nederlandse burger bedraagt momenteel dus gemiddeld zo'n 0,05 mSv j⁻¹.

²¹ Hierbij is gebruikgemaakt van dosisconversiecoëfficiënten volgens UNSCEAR (2006). Als vuistregel geldt dan: langdurige blootstelling aan 100 Bq m⁻³ radon of aan een EETC van 10 Bq m⁻³ levert een effectieve jaardosis op van circa 3 mSv. Omdat er momenteel veel discussie is over de daarvoor te hanteren conversiefactoren, zijn deze schattingen onder voorbehoud.

²² In de aanname dat de persoon in kwestie 90% van de tijd binnenshuis en 10% van de tijd buitenshuis verblijft.

Bijlage 3 Overzicht van het aantal deelnemende bedrijven en instellingen per categorie

De ongeveer 35 bedrijven en instellingen die zich hebben aangemeld voor deelname aan de meetcampagne maar de detectorsetjes na ontvangst toch niet hebben opgehangen, zijn in deze tabel niet opgenomen.

Categorie	Aantal deelnemende bedrijven / instellingen	Thorondochterdetector?	Aantal standaard detectorsetjes per bedrijf / instelling
<i>Reguliere werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen</i>			
Detailhandel	21	Ja	1
Groothandel	11	Nee	2
Horeca	10	Ja	2
Industrie	32	Nee	2
Kantoren	44	Nee	2
Kinderdagverblijven	15	Ja	2
Musea	10	Ja	2
Openbare bibliotheken	11	Ja	2
Primair onderwijs	24	Ja	2
Secundair onderwijs	29	Ja	2
Tertiair onderwijs	21	Ja	1-2
Theaters en bioscopen	14	Ja	2
Verpleeghuizen	21	Ja	2
Ziekenhuizen	18	Ja	2-3
Extra kinderdagverblijven en scholen (primair en secundair onderwijs) in Zuid-Limburg en Rivierengebied	91	Nee (geen setje, alleen radondetector)	1

Categorie	Aantal deelnemende bedrijven / instellingen	Thorondochterdetector?	Aantal standaard detectorsetjes per bedrijf / instelling
<i>Specifieke werkplekken en publiek toegankelijke gebouwen</i>			
Opslagruimten radioactieve afvalstoffen	1	Ja	5
Gebouwen van Defensie	1	Ja	20 (2 x 10 meetlocaties)
Drinkwaterbedrijven	4	Ja	3-5
Glastuinbouwbedrijven	21	Ja	2
Justitiële inrichtingen	3	Ja	3
Metrostations	2	Ja	5
Ondergrondse musea & grotten	5	Ja	3
Ondergrondse faciliteiten	1	Ja	3
Thermaalbaden	1	Ja	4
Natuursteenbewerking en vervaardiging van producten van beton, gips en cement	12	Ja	2

.....
P. Goemans | I.R. de Waard | R.O. Blaauboer |
R.C.G.M. Smetsers | G.M. de Groot
.....

RIVM rapport 2018-0027

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

juli 2018

De zorg voor morgen
begint vandaag

