



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

Radon op specifieke werkplekken

Onderzoek bij mergelgrotten en drinkwaterbedrijven

Radon op specifieke werkplekken

Onderzoek bij mergelgrotten en drinkwaterbedrijven

RIVM-rapport 2024-0193

Colofon

© RIVM 2025

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-2024-0193

M. Velsma (auteur), RIVM
M. van der Linden (auteur), RIVM

Contact:
Marloes Velsma
Stralingsonderzoek, Kennis en Beleid
marloes.velsma@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van SZW in het kader van Kennisborging

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

Publiekssamenvatting

Radon op specifieke werkplekken

Onderzoek bij mergelgrotten en drinkwaterbedrijven

In Nederland is de concentratie radon in de meeste woningen en gebouwen laag door de samenstelling van de bodem. De overheid heeft daarom gekozen voor een laag referentieniveau. Dat is geen harde grenswaarde maar overschrijdingen moeten zo veel mogelijk worden voorkomen. Op bepaalde soorten werkplekken is de kans groter dat het referentieniveau wordt overschreden. De overheid kan deze aanwijzen als specifieke soorten werkplekken. Werkgevers zijn dan verplicht om de radonconcentratie te meten. Bij hogere concentratie dan het referentieniveau, moet de werkgever uitzoeken hoe de blootstelling van werknemers kan worden verlaagd. De blootstelling hangt af van de radonconcentratie en hoelang mensen op een locatie werken.

Het RIVM heeft de radonconcentraties gemeten in 7 mergelgrotten in Zuid-Limburg en 65 productiestations voor drinkwaterzuivering. Bij grotten is weinig ventilatie. Bij productiestations worden grote hoeveelheden water in afgesloten ruimtes gezuiverd, waarbij radon kan vrijkomen. Het RIVM heeft ook berekend wat de blootstelling is voor de werknemers. Op basis van deze informatie kan het ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW) beslissen of deze typen werklocaties als specifieke werkplekken moeten worden aangewezen.

In bijna alle onderzochte mergelgrotten waren de gemeten concentraties hoger dan het referentieniveau. Bij de drinkwaterbedrijven was dat bij ongeveer een derde van de metingen zo. Op beide locaties werken mensen meestal niet fulltime, bijvoorbeeld alleen voor een rondleiding in de grotten of voor onderhoud bij de productiestations. Daarom is de blootstelling van de meeste werknemers aan radon naar schatting laag. Bijna 30 procent van de werknemers heeft wel een hogere blootstelling. Deze is te vergelijken met werknemers die via andere beroepen blootstaan aan straling, zoals ziekenhuispersoneel of piloten.

Het RIVM deed dit onderzoek in opdracht van SZW. Bij een eerdere meetcampagne (2016/2017) waren hoge radonconcentraties in enkele grotten en productiestations gemeten. Elke Europese lidstaat is verplicht om een actieprogramma voor radon op te stellen om gezondheidseffecten zo veel mogelijk te beperken.

Radon is een radioactief gas dat van nature vrijkomt uit de bodem en bodemstoffen, zoals bouwmaterialen en grondwater. Als er binnen veel radon vrijkomt en te weinig wordt geventileerd, kan de radonconcentratie hoog worden. Mensen die jarenlang blootstaan aan hoge radonconcentraties, hebben een grotere kans om longkanker te krijgen. Deze kans is voor rokers veel groter dan voor niet-rokers.

Kernwoorden: radon, metingen, mergelgrotten, drinkwaterbedrijven, drinkwaterzuivering, actieprogramma radon, specifieke werkplekken

Synopsis

Radon in specific types of workplaces

Study of marl quarry caves and drinking water companies

Radon concentrations are low in the majority of Dutch homes and buildings due to the composition of the soil. For this reason, the government has established a low reference level. This is not a strict limit but exceedance should be avoided as much as possible. In certain types of workplaces, the radon concentration is liable to exceed the reference level. The government can identify these as specific types of workplaces. This requires employers to carry out radon measurements. If the concentration exceeds the reference level, the employer must investigate how the exposure of workers can be reduced. The level of exposure depends on the radon concentration and how long people work at a location.

The Dutch National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) has measured the radon concentrations in 7 marl quarry caves in South Limburg and 65 production stations for drinking water purification. In caves, there is little ventilation. At production stations, large volumes of water are purified in enclosed areas – a process during which radon may be released. RIVM also calculated the exposure of people who work there. On the basis of this information, the Ministry of Social Affairs and Employment (SZW) can decide whether these types of workplaces should be identified as specific workplaces.

In almost all the investigated marl quarry caves, the measured concentrations exceeded the reference level. The same applies for around a third of measurements at drinking water companies. Most people who work at these locations do not work full-time, for instance, they are only present to conduct tours of the caves or to carry out maintenance at the production stations. As a result, the exposure of most workers to radon is estimated to be low. However, almost 30 percent of workers are exposed to higher levels. These levels are comparable to those of workers who are exposed to radiation through other occupations, such as hospital staff or pilots.

RIVM was commissioned by SZW to conduct this study. An earlier measurement campaign (2016–2017) found high radon concentrations in a number of caves and production stations. Every EU Member State is obliged to prepare a national action plan for radon in order to address its health effects and reduce them as much as possible.

Radon is a naturally occurring radioactive gas that is released by soil and soil materials, such as construction materials and groundwater. If high levels of radon are released and the area is poorly ventilated, the radon concentration may become high. People who are exposed to high radon concentrations for many years run a higher risk of developing lung cancer. This risk is higher for smokers than for non-smokers.

Keywords: radon, measurements, marl quarry caves, drinking water companies, drinking water purification, radon action plan, specific workplaces

Inhoudsopgave

Samenvatting — 11

1 Inleiding — 15

- 1.1 Aanleiding en onderzoeksvraag — 15
- 1.2 Doel — 15
- 1.3 Afbakening — 16
- 1.4 Leeswijzer — 16
- 1.5 Dankwoord — 17

Deel A – Algemene informatie — 19

2 Achtergrondinformatie — 21

- 2.1 Over radon — 21
- 2.1.1 Gezondheidsrisico's van radonblootstelling — 22
- 2.2 Blootstelling aan radon — 23
- 2.2.1 Radonconcentratie en blootstellingstijd — 23
- 2.2.2 De dosisconversiecoëfficiënt — 24
- 2.2.3 De evenwichtsfactor — 25
- 2.3 Wet- en regelgeving — 26
- 2.3.1 Referentieniveaus — 26
- 2.3.2 Nationaal Actieprogramma Radon (NAR) — 26
- 2.3.3 Wet- en regelgeving radon op de werkplek — 26
- 2.3.4 Het gebruik van een over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon — 27

3 Meetmethoden radon — 29

- 3.1 Passieve radonmetingen — 30
- 3.1.1 Gebruikte apparatuur — 31
- 3.2 Persoonsgebonden radonmetingen — 31
- 3.2.1 Gebruikte apparatuur — 32
- 3.3 Continue metingen — 32
- 3.3.1 Gebruikte apparatuur — 33

Deel B – Groeven — 35

4 Over groeven — 37

- 4.1 Gebruik van de groeven — 37
- 4.2 Verwachte radonconcentraties — 38
- 4.3 Verwachte evenwichtsfactor — 39

5 Onderzoeksopzet groeven — 41

- 5.1 Werving deelnemers — 41
- 5.2 Vragenlijst — 41
- 5.3 Werkbezoeken — 42
- 5.4 Passieve metingen — 43
- 5.5 Persoonsgebonden radonmetingen — 43
- 5.6 Continue metingen — 44
- 5.7 Blootstelling van de werknemers — 44

6 Resultaten groeven — 47

6.1	Overzicht deelnemende groeven — 47
6.2	Resultaten vragenlijst — 47
6.2.1	Over de groeven — 47
6.2.2	Over de werknemers — 48
6.3	Resultaten passieve metingen — 49
6.4	Resultaten persoonsgebonden radonmetingen — 51
6.5	Resultaten continue metingen — 52
6.6	Blootstelling van de werknemers — 53
6.6.1	Effectieve dosis — 54
6.6.2	Over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon — 56

7 Discussie — 59

7.1	Representativiteit van de deelnemende groeven — 59
7.2	Over de meetresultaten — 59
7.3	Verlaging van blootstelling — 60
7.4	Het gebruik van persoonsgebonden radonmeters — 61

Deel C – Drinkwaterbedrijven — 63

8 Over drinkwaterbedrijven — 65

8.1	Drinkwaterzuivering in Nederland — 65
8.2	Relevante werknemers — 67
8.3	Verwachte radonconcentraties — 68
8.4	Verwachte evenwichtsfactor — 69

9 Onderzoekopzet drinkwaterbedrijven — 71

9.1	Werving deelnemers — 71
9.1.1	Selectie productiestations — 71
9.2	Bedrijfsvragenlijst — 72
9.3	Werkbezoeken — 72
9.4	Passieve metingen — 73
9.5	Vragenlijsten bij de metingen — 74
9.6	Continue metingen — 75
9.6.1	Continue metingen 1: onderhoud sproeikoppen (klein onderhoud) — 76
9.6.2	Continue metingen 2: onderhoud nafiltruimte (groot onderhoud) — 77
9.7	Blootstelling van de werknemers — 78

10 Resultaten drinkwaterbedrijven — 81

10.1	Overzicht deelnemende drinkwaterbedrijven — 81
10.2	Resultaten vragenlijsten — 81
10.2.1	Over de drinkwaterbedrijven en productiestations — 81
10.2.2	Over de werknemers — 82
10.3	Resultaten passieve metingen — 82
10.3.1	Distributie van radonmeters — 82
10.3.2	Gemetten radonconcentraties — 83
10.3.3	Karakteristieken van meetlocaties met hoge en lage radonconcentraties — 87
10.4	Werknemers op de meetlocaties — 88
10.5	Resultaten continue metingen — 89
10.5.1	Continue metingen 1: onderhoud sproeikoppen (klein onderhoud) — 90
10.5.2	Continue metingen 2: reinigen van nafiltruimte (groot onderhoud) — 92
10.6	Blootstelling van werknemers — 94
10.6.1	Over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon — 94

10.6.2 Effectieve dosis — 97

11 Discussie — 101

11.1 Representativiteit van de deelnemende productiestations — 101

11.2 Over de meetresultaten — 101

11.3 Verlaging van blootstelling — 102

11.4 Het gebruik van persoonsgebonden radonmeters — 104

Deel D – Algemene conclusies – 107

12 Conclusies — 109

13 Literatuur — 113

14 Bijlage onderzoeksmethode, groeven — 119

14.1 Instructie plaatsen passieve radonmeters — 119

14.2 Bedrijfsvragenlijst — 120

15 Bijlage resultaten, groeven — 127

15.1 Passieve radonmetingen — 127

15.2 Persoonsgebonden radonmetingen — 132

15.3 Effectieve dosis — 133

16 Bijlage onderzoeksmethode, drinkwaterbedrijven — 135

16.1 Instructie plaatsen passieve radonmeters — 135

16.2 Algemene informatie voorafgaand aan de bedrijfsvragenlijsten en vragenlijst A — 137

16.3 Bedrijfsvragenlijst — 139

16.4 Vragenlijst A: Vragenlijst bij eerste radonmetingen in productiestations — 144

16.5 Vragenlijst B: Vragenlijst bij de tweede radonmetingen in (drink)waterproductiestations — 147

16.6 Vragenlijst C: Vragenlijst terugsturen radonmeters tweede meetperiode productiestations — 148

17 Bijlage resultaten, drinkwaterbedrijven — 150

17.1 Passieve radonmetingen — 150

17.2 Locaties met hoge en lage radonconcentratie — 152

17.3 Over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon — 155

17.4 Effectieve dosis — 159

Samenvatting

Radon is een radioactief gas dat van nature vrijkomt uit de bodem en uit bodemstoffen. Als radon hieruit vrijkomt, kan het zich ophopen in ruimtes met beperkte ventilatie. De radioactieve stoffen die ontstaan als radon vervalft, dragen bij aan het risico op het krijgen van longkanker. Blootstelling aan (de vervalproducten van) radon kan leiden tot gezondheidsschade. Hoe hoger de radonconcentratie en hoe langer de blootstellingstijd, des te groter de kans op gezondheidsschade. Voor rokers die blootstaan aan radon is deze kans groter dan voor niet-rokers die blootstaan aan radon. Het Nationaal Actieprogramma Radon is opgesteld om de gezondheidsrisico's van radon zo laag als redelijkerwijs mogelijk te houden [1]. Volgens de richtlijn 2013/59/Euratom moeten lidstaten een referentieniveau vaststellen voor radon, dat maximaal 300 Bq/m³ mag zijn. In Nederland heeft het ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid het referentieniveau voor werkplekken vastgesteld op 100 Bq/m³.

Uit een eerdere meetcampagne van het RIVM blijkt dat er werkplekken zijn waar dit referentieniveau wordt overschreden [2]. Tijdens deze eerdere meetcampagne zijn slechts enkele metingen gedaan per soort werkplek. Het ministerie van Sociale en Werkgelegenheid (SZW) heeft daarom het RIVM opdracht gegeven om aanvullende metingen te doen van de radonconcentratie op twee van deze werkplekken, te weten: de mergelgroeven in Zuid-Limburg en de productiestations van drinkwaterbedrijven.

In dit onderzoek is voornamelijk gebruikgemaakt van passieve radonmetingen, waarbij de gemiddelde radonconcentratie over een periode wordt bepaald. Ook is onderzocht wat de gemeten radonconcentraties betekenen voor de jaarlijkse blootstelling van de werknemers. De blootstelling is uitgedrukt als effectieve dosis (in mSv), of als de over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon (in kBq·h/m³). Hierbij is voor zowel de groeven als de drinkwaterbedrijven de blootstelling vergeleken met twee afkapwaarden: 200 en 600 kBq·h/m³. Deze komen overeen met een jaar voltijds (2000 uur) werken bij het Nederlandse (100 Bq/m³) en maximale Europese referentieniveau (300 Bq/m³). De effectieve dosis bij de afkapwaarden is 0,4–4,0 mSv (voor 200 kBq·h /m³) en 1,1–12,0 mSv (voor 600 kBq·h/m³), afhankelijk van de gebruikte dosisconversiecoëfficiënt en de evenwichtsfactor. Een (beperkte) overschrijding van de afkapwaarden (in een jaar) betekent daarom dat de effectieve jaardosis van de werknemers lager is dan de dosislimiet voor blootgestelde werknemers (20 mSv/jaar).

Het ministerie van SZW kan op basis van de resultaten van dit onderzoek besluiten of de werkplekken moeten worden opgenomen als specifieke (soorten) werkplekken in het Nationaal Actieprogramma Radon.

Mergelgroeven in Zuid-Limburg

Een aantal Zuid-Limburgse mergelgroeven is tegenwoordig in gebruik als toeristische attractie, bijvoorbeeld voor rondleidingen. In een enkele groeve vindt nog mergelwinning plaats. Vanwege de ondergrondse ligging en de beperkte ventilatie (alleen natuurlijke ventilatie), kan radon dat vrijkomt uit het gesteente niet makkelijk weg uit de ruimte. Voor bezoekers van de groeven is de radonblootstelling zeer laag, omdat zij maar kort ondergronds zijn (enkele uren per jaar).

Voor dit onderzoek zijn in totaal 203 geldige passieve radonmetingen gedaan, gedurende twee meetperioden (een jaarmeting en een halfjaarmeting van oktober tot april). De metingen zijn gedaan op 102 verschillende locaties, bij 7 verschillende groeven.

Bij alle 7 deelnemende groeven zijn radonconcentraties boven het Nederlandse referentieniveau van 100 Bq/m³ gevonden. Op de meeste locaties was de radonconcentratie hoger dan 100 Bq/m³ (94% van de jaarmetingen en 84% van de halfjaarmetingen). Op bijna de helft van deze locaties was de radonconcentratie ook hoger dan 300 Bq/m³. Er bestaan grote verschillen in radonconcentraties tussen de groeven, en ook binnen afzonderlijke groeven. In buitenlandse grotten en groeven zijn over het algemeen hogere radonconcentraties aangetroffen dan bij de metingen in deze meetcampagne.

De deelnemende groeven hebben in totaal ongeveer 160 werknemers in dienst. Zij werken vrijwel nooit voltijds ondergronds. Van de werknemers werkt 95% maximaal 800 uur per jaar ondergronds. Ongeveer 75% werkt maximaal 400 uur per jaar ondergronds. Uit de opgegeven werktijden, en uit de gemiddelde en mediaan gemeten radonconcentratie in elke groeve, is een schatting gemaakt van de blootstelling van de werknemers. Ongeveer 25% van de werknemers heeft een blootstelling die hoger is dan 200 kBq·h/m³. Blootstelling boven 600 kBq·h/m³ wordt bij bijna 5% van de werknemers verwacht. Externe werknemers, zoals de verkopers op de ondergrondse kerstmarkten in Valkenburg, zijn niet meegenomen in deze analyse.

Verkennde metingen met persoonsgebonden radonmeters bleken in de praktijk lastig en hebben geen bruikbare gegevens over de jaarlijkse blootstelling opgeleverd. Hiervoor zijn de meters te kort gedragen of was de gemiddelde radonconcentratie te hoog op de plek waar de persoonsgebonden radonmeter buiten de werkzaamheden om werd opgeborgen; die mag niet meer zijn dan 50 Bq/m³.

Drinkwaterbedrijven

Nederland heeft 10 drinkwaterbedrijven, met in totaal 225 productiestations, waar ruw water wordt gezuiverd tot drinkwater. Het ruwe water bevat radon. Radon komt gedeeltelijk vrij tijdens het zuiveringsproces; het kan zich ophopen in de ruimte waar het vrijkomt en zich ook verder verspreiden naar andere ruimtes binnen het productiestation. Dit onderzoek is gericht op het schatten van de blootstelling van werknemers aan radon in de lucht; er zijn geen metingen gedaan van het drinkwater zelf (dit wordt gedaan in een apart monitoringsprogramma; hieruit blijkt dat de radonconcentratie in het

drinkwater zelf laag is, zodat aanvullend stralingsonderzoek naar gezondheidsrisico's niet nodig is).

De contactpersonen bij de drinkwaterproductiestations is gevraagd om de radonmeters op te hangen in drie ruimtes: de ruimtes waar de eerste en de tweede stap in het zuiveringsproces plaatsvinden en een ruimte waar medewerkers langere tijd verblijven (bijvoorbeeld een kantoor of bedieningsruimte).

Voor dit onderzoek zijn gedurende twee meetperioden (ruwweg: herfst/winter en lente/zomer) in totaal 348 geldige passieve radonmetingen gedaan. De metingen zijn gedaan bij 192 unieke meetlocaties, verdeeld over 65 verschillende productiestations van 7 drinkwaterbedrijven. Van de metingen lag 35% boven 100 Bq/m³. Deze radonconcentraties boven het Nederlandse referentieniveau zijn gevonden bij 64% van de productiestations bij alle 7 drinkwaterbedrijven waar geldige metingen zijn gedaan. Ongeveer 15% van de metingen lag boven 300 Bq/m³. Ook in het buitenland worden hogere radonconcentraties gemeten bij de drinkwaterproductiestations.

De gemeten radonconcentraties tonen een grote spreiding. Op veel meetlocaties is de radonconcentratie relatief laag, terwijl op een klein aantal locaties (zeer) hoge radonconcentraties zijn gemeten. Dit blijkt uit het verschil tussen de mediane (61 en 68 Bq/m³) en de gemiddelde (375 en 398 Bq/m³) radonconcentraties in de twee meetperioden. De hoogste radonconcentraties worden gevonden in ruimtes met installaties voor het zuiveren van water. Kantoren en bedieningsruimtes hebben over het algemeen een lagere radonconcentratie, maar ook hier zijn radonconcentraties boven het referentieniveau gevonden.

De werktijd van werknemers in de ruimtes met veel radon is vaak kort: soms maar enkele uren per jaar. Echter, omdat de werknemers in meerdere ruimtes en bij verschillende productiestations komen, geeft de werktijd per ruimte geen goed beeld van de blootstelling. In dit onderzoek is de blootstelling geschat met behulp van een Monte-Carlomethode, waarbij de blootstelling van een werknemer bij een aantal willekeurig getrokken productiestations wordt gesommeerd. De drinkwaterbedrijven zelf hebben opgegeven op hoeveel stations een werknemer gemiddeld genomen werkzaamheden uitvoert. Aangenomen wordt dat de op deze manier berekende blootstellingen dezelfde distributie hebben als de werkelijke blootstellingen van de werknemers. Op deze manier is geschat dat ongeveer 25-30% van de werknemers een blootstelling heeft boven 200 kBq·h/m³. Blootstelling boven 600 kBq·h/m³ wordt bij ruwweg 5-10% van de werknemers verwacht, waarbij wordt opgemerkt dat dit (in de berekening) vrijwel uitsluitend komt door de hoge blootstelling bij enkele productiestations.

Uit verkennende metingen met continue radonmeters blijkt dat de radonconcentratie tijdens onderhoudswerkzaamheden weliswaar varieert, maar redelijk overeenkomt met de radonconcentratie die is gemeten met passieve radonmeters. Het is echter niet uit te sluiten dat er situaties zijn waarbij de radonconcentratie tijdens onderhoud – wanneer werknemers de ruimte betreden – sterk afwijkt van de gemiddelde radonconcentratie die met een passieve meter is gemeten.

Te denken valt aan langdurig grootschalig onderhoud, waarbij de waterstroom uit staat (en dus de toevoer van radon afneemt), in een ruimte met een hoge ($> 300 \text{ Bq/m}^3$) gemiddelde radonconcentratie. Voor deze situatie zijn geen continue metingen gedaan.

Conclusies en handelingsperspectieven

Concluderend zijn bij beide soorten werkplekken – groeven en drinkwaterbedrijven – radonconcentraties boven het Nederlandse referentieniveau gevonden. Bij beide soorten werkplekken werken de werknemers minder dan voltijds op de locaties met de hoogste radonconcentratie (ondergronds bij de groeven, in de procesruimtes bij de drinkwaterbedrijven). Toch is te verwachten dat een deel van de werknemers een blootstelling heeft boven $200 \text{ kBq}\cdot\text{h/m}^3$. Voor de drinkwaterbedrijven gaat dit naar schatting om ongeveer 25-30% van de werknemers, voor de groeven gaat het om een vergelijkbaar deel van de werknemers (ruwweg 25%). Ook zullen er naar verwachting werknemers zijn met een blootstelling boven $600 \text{ kBq}\cdot\text{h/m}^3$. Overschrijding van de dosislimiet voor blootgestelde werknemers (20 mSv/jaar) komt naar verwachting niet voor bij de deelnemende groeven en productiestations.

Mogelijke vervolgonderzoeken, eventueel door de groeven en drinkwaterbedrijven zelf, kunnen zich richten op het meten van de radonconcentratie op locaties waar nog geen metingen hebben plaatsgevonden, het beter in kaart brengen van de blootstelling van individuele werknemers of het verlagen van de blootstelling.

De blootstelling van individuele werknemers kan worden bepaald door per werknemer de werktijden op verschillende locaties (beter) te registreren, in combinatie met passieve radonmetingen op deze locaties. Dit levert nauwkeurigere informatie op over de blootstelling per individuele werknemer dan de schattingen in dit rapport. Vervolgens kan worden gekeken welke werknemers de hoogste blootstelling hebben, en of verlaging wenselijk is. Het is ook mogelijk om met persoonsgebonden radonmeters de blootstelling van individuele werknemers te bepalen.

Het verlagen van de blootstelling kan op twee manieren: 1) het verlagen van de radonconcentratie, bijvoorbeeld door te ventileren, en 2) het beperken van de werktijd op locaties met een hoge radonconcentratie. De eerste optie is bij de groeven niet mogelijk, bij de drinkwaterbedrijven hangt het van (de locatie binnen) het productiestation af of dat mogelijk is. Het verkorten van de werktijd kan in bepaalde gevallen uitkomst bieden, bijvoorbeeld door bepaalde werkzaamheden te verplaatsen naar locaties met een lagere radonconcentratie.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en onderzoeksvraag

Radon is een radioactief gas dat van nature vrijkomt uit de bodem en bouwmaterialen die van bodemstoffen gemaakt zijn. Blootstelling aan radon, en aan de radioactieve vervalproducten van radon, kan leiden tot gezondheidsschade. Om de gezondheidsrisico's van blootstelling aan radon te beheersen, is het Nationaal Actieprogramma Radon (NAR) opgesteld [1]. In dit programma kunnen werkplekken worden vastgelegd waar de kans bestaat dat de radonconcentratie boven het referentieniveau ligt (in Nederland 100 Bq/m³, zie paragraaf 2.3.1 voor meer informatie). Deze werkplekken worden 'specifieke (soorten) werkplekken' genoemd. Op dit moment zijn nog geen specifieke werkplekken aangewezen in het NAR, omdat er nog te weinig informatie beschikbaar is over radonconcentraties bij verschillende soorten werkplekken.

In 2016-2017 heeft het RIVM in opdracht van het ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW) een onderzoek naar de hoeveelheid radon op werkplekken uitgevoerd [2]. Bij deze inventarisatie zijn op enkele werkplekken verhoogde radonconcentraties gevonden. Het gaat hier om bijzondere werkplekken, zoals ondergrondse ruimtes en productiestations bij drinkwaterbedrijven. Ondergrondse werkplekken zijn bijzonder, omdat ze moeilijk te ventileren zijn, waardoor radon in de ruimte lastiger weg kan. Productiestations zijn bijzonder, omdat daar stoffen uit de bodem (grondwater) worden gebruikt en bewerkt in afgesloten ruimtes.

In het onderzoek van 2016-2017 heeft het RIVM de radonconcentratie gemeten op slechts enkele werkplekken binnen de groep werkplekken waar hogere radonconcentraties zijn gevonden. Daarnaast hebben op deze werkplekken maar op één tot drie locaties radonmeters gehangen. Het is dus nog niet bekend of op andere werkplekken en locaties in ondergrondse ruimtes en productiestations ook sprake is van verhoogde radonconcentraties. Ook weten we niet wat deze verhoogde radonconcentraties betekenen voor de radonblootstelling van de werknemers.

1.2 Doel

Het doel van dit onderzoek is om kennis te leveren over de radonconcentraties bij drinkwaterbedrijven en in groeven en om te beschrijven wat deze radonconcentraties kunnen betekenen voor de radonblootstelling van de betrokken werknemers. Deze kennis helpt SZW om een beleidsbeslissing te nemen over het al dan niet opnemen van de genoemde soorten werkplekken als specifieke werkplekken in het NAR.

Dit rapport beantwoordt de volgende onderzoeksvragen:

1. Wat is de (jaargemiddelde) radonconcentratie in Bq/m³ bij de deelnemende groeven en drinkwaterbedrijven?

2. Welke informatie is, naast de concentratiemetingen, nodig om tot een schatting te komen van de blootstelling van werknemers bij groeven en drinkwaterbedrijven?

1.3 Afbakening

Zoals hierboven aangegeven, richt het onderzoek zich op werkplekken in ondergrondse ruimtes en in productiestations van drinkwaterbedrijven. In het verkennende onderzoek van 2016-2017 heeft het RIVM ook bij één glastuinbouwbedrijf, in de kas, en bij een bedrijf voor opslag van radioactief afval hogere radonconcentraties gevonden [2]. Ook bleek in de loop van 2021 uit literatuuronderzoek dat op werkplekken binnen de sectoren geothermie en viskwekerijen de kans bestaat op het optreden van relatief hoge radonconcentraties [3]. In overleg met de opdrachtgever, het ministerie van SZW, is ervoor gekozen om het onderzoek te beperken tot groeven en drinkwaterbedrijven, omdat hier in het verkennende onderzoek van 2016-2017 de hoogste radonconcentraties werden gevonden.

Deelname van bedrijven en organisaties aan dit onderzoek is op basis van vrijwilligheid. Om verschillende redenen kunnen bedrijven en organisaties besluiten om niet mee te doen aan het onderzoek.

In dit onderzoek is voor de drinkwaterbedrijven bij productiestations de jaargemiddelde radonconcentratie in de lucht in verschillende ruimtes gemeten. Het gaat hier niet om radon in het drinkwater zelf. Dit wordt gemeten tijdens een apart monitoringsprogramma. Daaruit blijkt dat het radonniveau in Nederlands grond- en drinkwater laag is (zodat aanvullend stralingsonderzoek naar gezondheidsrisico's niet nodig is) [4].

In dit rapport wordt informatie gegeven over de mogelijke blootstelling van werknemers. Het gaat hierbij om enkele algemene blootstellingsscenario's voor groeven en drinkwaterbedrijven, en om een discussie over de bijbehorende onzekerheden. Er worden geen dosisbepalingen gedaan voor individuele werknemers. Ook worden er geen metingen gedaan om de evenwichtsfactor (zie paragraaf 2.2.3) vast te stellen.

Het al dan niet aanwijzen van groeven of drinkwaterbedrijven als specifieke werkplekken in het NAR is een beleidskeuze. Dit rapport levert SZW kennis om deze werkplekken al dan niet op te nemen als specifieke werkplekken.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport bestaat uit vier delen. Het eerste deel (deel A, hoofdstukken 2 en 3), is een algemeen deel. Hoofdstuk 2 bevat achtergrondinformatie over radon en over wet- en regelgeving. Hoofdstuk 3 beschrijft methoden om radon te meten.

Het tweede deel van het rapport (deel B, hoofdstukken 4 tot en met 7), gaat over radon op werkplekken in ondergrondse groeven. In hoofdstuk 4 is achtergrondinformatie over de groeven opgenomen. Hoofdstuk 5 beschrijft de opzet van het onderzoek bij de groeven. In hoofdstuk 6

staan de resultaten van dit onderzoek en in hoofdstuk 7 staat de discussie.

Het derde deel (deel C, hoofdstukken 8 tot en met 11), gaat over radon bij drinkwaterbedrijven. In hoofdstuk 8 is achtergrondinformatie over de drinkwatersector opgenomen. Hoofdstuk 9 beschrijft de opzet van het onderzoek bij drinkwaterbedrijven. In hoofdstuk 10 staan de resultaten van het onderzoek en in hoofdstuk 11 staat de discussie.

In hoofdstuk 12, deel D, worden de algemene conclusies van dit onderzoek over radon op specifieke werkplekken gegeven. Aanvullende informatie is te vinden in de bijlagen.

1.5 Dankwoord

De auteurs bedanken de medewerkers van de groeven en drinkwaterbedrijven die hebben meegewerkt aan dit onderzoek.

Deel A – Algemene informatie

2 Achtergrondinformatie

Dit hoofdstuk bevat achtergrondinformatie over radon, blootstelling aan radon en wet- en regelgeving over radon. Specifieke informatie over radon bij groeven of drinkwaterbedrijven is te vinden in respectievelijk delen B en C van dit rapport.

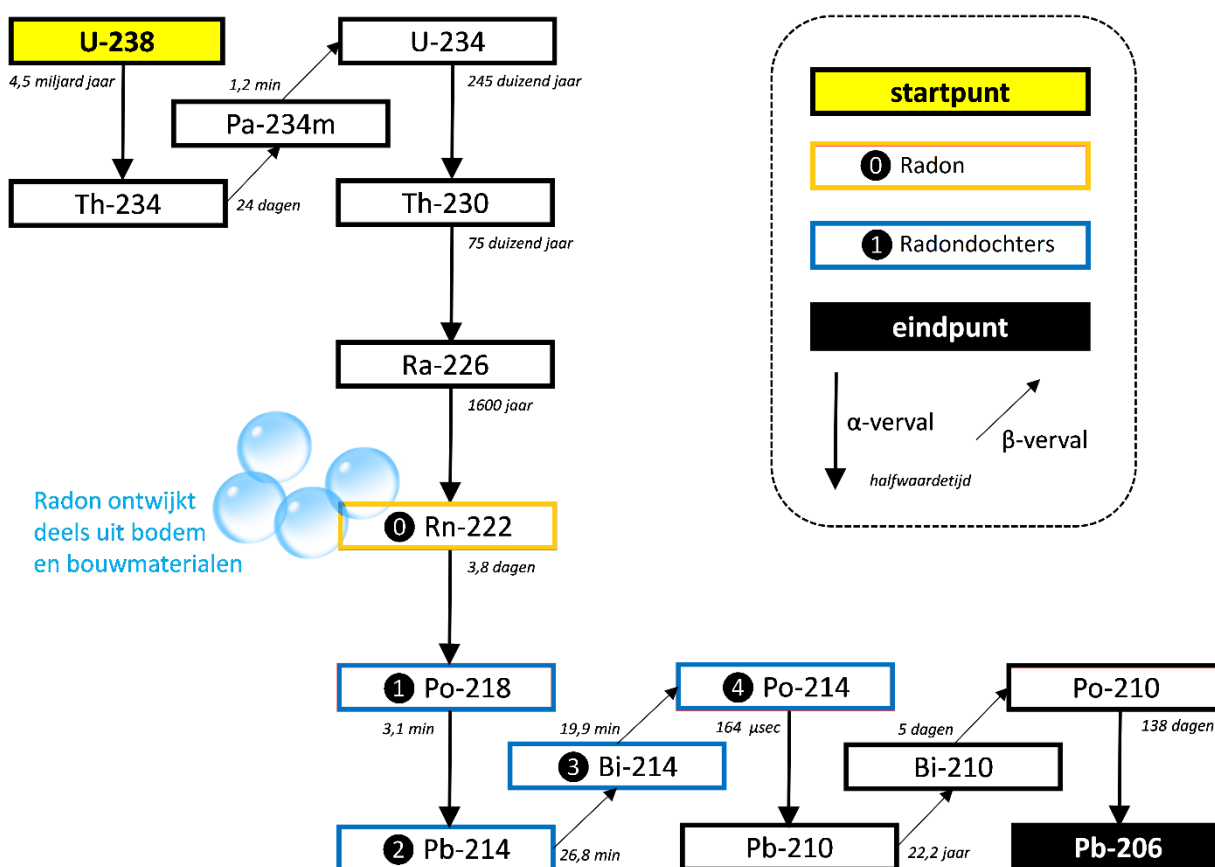
Voor meer informatie over radon en radon in Nederland verwijzen wij naar eerdere RIVM-rapporten, zoals het Basisdocument Radon (1991) [5], het onderzoek naar radon in Nederlandse woningen (2015) [6] en op werkplekken (2018) [2], alsook het rapport over blootstelling aan natuurlijke bronnen van ioniserende straling in Nederland (2021) [7].

2.1 Over radon

Radon-222 (Rn-222, meestal simpelweg radon genoemd) is een radioactief edelgas dat in onze leefomgeving aanwezig is. Doordat radon kleurloos en geurloos is, kun je het niet zien of ruiken. Radon ontstaat door het verval van radium-226 (Ra-226), dat voorkomt in de bodem en in bouwmaterialen die van bodemstoffen gemaakt zijn. Omdat radon een gas is, kan het vanuit de bodem of bouwmaterialen losraken en in de lucht terechtkomen. De mate waarin radon vrijkomt, is afhankelijk van de samenstelling van de bodem of het bouw materiaal [7]. Hoge concentraties radium-226 zijn met name te verwachten in stollingsgesteenten als graniet, terwijl sedimentaire bodems als veen en dekzand lagere concentraties bevatten. In Nederland worden (relatief) hoge radiumconcentraties gevonden in Zuid-Limburg (leem), het rivierengebied (rivierklei) en bepaalde kustgebieden (zeeklei) [8]. De radonconcentratie in lucht wordt gemeten in becquerel per kubieke meter (Bq/m³).

Als radon in de lucht terechtkomt, zal het zich vrijuit verder verspreiden. In de buitenlucht verspreidt radon zich doorgaans over een enorm volume. Maar binnenshuis, op werkplekken, in publiekstoegankelijke gebouwen en in afgesloten ruimtes kan radon zich minder verspreiden. Daardoor is de radonconcentratie op deze plekken hoger dan in de buitenlucht. Ook kan de radonconcentratie variëren in de tijd. In woningen, op werkplekken en in publiekstoegankelijke gebouwen is de radonconcentratie 's winters over het algemeen hoger en 's zomers lager (bij grotten en groeven is dit echter andersom, zie paragraaf 4.2). Dit komt doordat woningen 's winters worden verwarmd en er door het zogeheten schoorsteeneffect meer radon uit de bodem de woning binnen kan stromen [6]. 's Winters wordt er vaak ook minder geventileerd dan in de zomer. Naast de seizoensinvloeden hebben ook het ventileren van de ruimte en de aanwezigheid van mensen invloed op de radonconcentratie. Als 's nachts alle ramen en deuren dicht zijn, kan de radonconcentratie in de ruimte opbouwen. Overdag vindt er meer beweging van de lucht in de ruimte plaats door de aanwezigheid van mensen of het openzetten van ramen en deuren. Het kan dus zo zijn dat de radonconcentratie in gebouwen overdag lager is dan 's nachts [9].

Radon is, zoals eerder genoemd, radioactief en vervalt met een halveringstijd van 3,8 dagen, onder het uitzenden van alfadeeltjes. De vervalproducten van radon worden radondochters genoemd. Hierbij gaat het onder andere om de radionucliden polonium-218 (Po-218), lood-214 (Pb-214), bismuth-214 (Bi-214) en polonium-214 (Po-214). Zie Figuur 2.1 voor een schematische weergave van het ontstaan van radon en radondochters. Deze figuur geeft ook de halveringstijden van de verschillende radionucliden. In tegenstelling tot radon zijn deze radondochters niet gasvormig en kunnen ze zich hechten aan aerosolen in de lucht.



Figuur 2.1 Schematisch overzicht van de natuurlijke vervalreeks van uranium-238 (uraniumreeks). (1) t/m (4) zijn de radondochters die de grootste bijdrage leveren aan de stralingsdosis van de werknemer als gevolg van inhalatie. Figuur aangepast uit [7].

2.1.1 Gezondheidsrisico's van radonblootstelling

Radon is een gas dat zich vrij kan bewegen in de omgevingslucht en kan worden ingeademd. Radongas wordt meestal weer uitgeademd, maar radondochters kunnen achterblijven in de longen. Door het radioactieve verval van radon en de radondochters zullen zij een bijdrage leveren aan de stralingsdosis in de longen. Dat kan leiden tot het ontstaan van longkanker. Hoe hoger de radonconcentratie, en hoe langer de blootstellingstijd, des te groter de kans op longkanker [10].

Wereldwijd is radon de op één na belangrijkste risicofactor voor longkanker [11]. De belangrijkste risicofactor is roken en meerroken. Daarnaast versterkt roken het schadelijke effect van radon [12]. Meer informatie hierover is te vinden in RIVM-rapport 2015-0087 [6], waarin de resultaten van de radonmeetcampagne in Nederlandse woningen 2013-2014 zijn beschreven.

De bijdrage van de radondochters aan de stralingsdosis is verschillend als de radondochters gebonden aan aerosolen of als ongebonden radondochters worden ingeademd. De ongebonden dochters, en dochters gebonden aan kleinere ($\sim$ nanometer) aerosolen, veroorzaken meer stralingsschade dan dochters gebonden aan grote ($\sim$ micrometer) aerosolen. Dit komt doordat de kleinere deeltjes meer deponeren in de stralingsgevoelige delen van de longen [13, 14].

2.2 Blootstelling aan radon

Uit de vorige paragraaf bleek dat de kans op gezondheidsschade (longkanker) door radon toeneemt naarmate de blootstelling toeneemt. Als maat voor de blootstelling wordt de grootte effectieve jaardosis (E) gebruikt. Deze wordt uitgedrukt in millisievert (mSv). Door gebruik te maken van de effectieve dosis kunnen verschillende blootstellingen aan straling met elkaar vergeleken worden. De effectieve stralingsdosis als gevolg van inademing van radon (en dochters) wordt als volgt berekend:

$$E = C_{\text{radon,rep}} \cdot t \cdot DCC \cdot F$$

Waarbij:

- C_{radon} : de representatieve (bijvoorbeeld: gemiddelde) radonconcentratie, in Bq/m³;
- t : de blootstellingstijd, in uur;
- DCC : de dosisconversiecoëfficiënt, in mSv/h per Bq/m³;
- F : de evenwichtsfactor (zonder eenheid).

In dit onderzoek wordt de radonconcentratie bepaald met metingen en wordt andere informatie, bijvoorbeeld over de verblijfstijd van werknemers op verschillende locaties, uitgevraagd in vragenlijsten. In paragraaf 2.2.1 wordt dit verder toegelicht. Informatie over de DCC en evenwichtsfactor komen uit de wetenschappelijke literatuur, verder toegelicht in respectievelijk paragrafen 2.2.2 en 2.2.3.

Het product van de representatieve radonconcentratie $C_{\text{radon, rep}}$ en blootstellingstijd t wordt de 'over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon' genoemd. Dit wordt verder toegelicht in paragraaf 2.3.4.

2.2.1 Radonconcentratie en blootstellingstijd

Voor een goede bepaling van de blootstelling is ten eerste informatie nodig over de radonconcentratie op de werkplek. Hierbij moet rekening worden gehouden met de mogelijkheid dat de radonconcentratie sterk afhankelijk kan zijn van (1) de precieze plaats op die werkplek, (2) het seizoen en (3) het tijdstip van de dag.

Naast de radonconcentratie is de blootstelling aan radon van een werknemer op een werkplek vooral afhankelijk van het gedrag op de werkplek, dat wil zeggen: *hoe vaak* en *hoelang* iemand *waar* aanwezig is. In standaardberekeningen wordt voor de verblijfstijd op de werkplek vaak uitgegaan van 2000 uur per jaar (50 werkweken van 40 uur), maar voor een realistischere dosisberekening is een meer exacte schatting van de verblijfstijd gewenst. Met name op heel specifieke werkplekken kan de verblijfstijd aanzienlijk korter zijn, zoals in ruimtes waar men alleen voor onderhoudswerkzaamheden aanwezig is.

2.2.2 De dosisconversiecoëfficiënt

Voor het bepalen van de effectieve dosis is een dosisconversiecoëfficiënt (DCC) nodig die geschikt moet zijn voor de beschouwde werknemers en de soort werkzaamheden dat zij uitvoeren.

De DCC voor radon wordt gebruikt om de effectieve dosis te berekenen uit de gemiddelde radonconcentratie. De DCC wordt uitgedrukt in mSv/h per Bq/m³ maar wordt in de literatuur ook soms gegeven in mSv/h per mJ/m³, waarbij niet de radonconcentratie maar de potentiële alfa-energie moet worden gebruikt voor de dosisberekening¹. Op dit moment is er internationaal veel discussie over de DCC. Meer uitleg hierover is te vinden in het RIVM-rapport *Blootstelling aan natuurlijke bronnen van ioniserende straling in Nederland* [7].

UNSCEAR adviseert op basis van epidemiologisch onderzoek een DCC van $9 \cdot 10^{-6}$ mSv/h per Bq/m³ voor leden van de bevolking [15]. De ICRP adviseert op basis van modelberekeningen en epidemiologisch onderzoek de waarde $16,8 \cdot 10^{-6}$ mSv/h per Bq/m³ [10, 16]. Deze is bijna twee keer zo hoog als de DCC van UNSCEAR.

De DCC van de ICRP is volgens de ICRP 137 [16] geschikt voor de meeste situaties. Hieronder vallen bijvoorbeeld:

- Referentiewerkers op werkplekken als mijnen. Voor referentiewerkers wordt aangenomen dat zij een ademvolumetempo van 1,2 m³/uur hebben. Dit komt overeen met een derde van de tijd zittend werk verrichten en twee derde van de tijd lichte werkzaamheden uitvoeren;
- Werkers op reguliere werkplekken (in gebouwen) die met name zittend werk verrichten, en daarmee een lager ademvolumetempo hebben (0,86 m³/uur) dan referentiewerkers;

Voor bijzondere situaties raadt de ICRP een hogere DCC aan: $33,4 \cdot 10^{-6}$ mSv/h per Bq/m³ [16]. Als voorbeelden van dergelijke bijzondere situaties noemt de ICRP werknemers op reguliere werkplekken (in gebouwen) die zwaardere werkzaamheden verrichten dan standaard 'kantoorwerk', of werknemers in toeristengrotten. Voor toeristengrotten gaat de ICRP uit van een relatief grote fractie ongebonden deeltjes, die meer schade aanrichten in de longen. Voor zwaardere werkzaamheden geldt dat het ademvolumetempo toeneemt, waardoor de werknemer meer radon inademt. In beide gevallen leidt dit tot een hogere DCC.

¹ De omrekenfactor is: $1 \text{ Bq/m}^3 = 5,56 \cdot 10^{-9} \text{ J/m}^3$ [15]

De dosisschattingen in dit rapport worden gedaan met deze drie verschillende waarden voor de DCC.

2.2.3 De evenwichtsfactor

In de DCC's hierboven is de evenwichtsfactor F niet verdisconteerd. De evenwichtsfactor beschrijft de mate van evenwicht tussen radongas en kortlevende radondochters [6, 7]. Zoals genoemd in paragraaf 2.1, is radon gasvormig maar zijn radondochters dat niet. Zij kunnen neerslaan op oppervlakten (muren/vloeren) en zijn daarmee niet meer beschikbaar voor inhalatie. De radondochters kunnen zich ook hechten aan aerosolen in de lucht. Deze slaan ook neer, maar langzamer dan de ongebonden radondochters.

De totale hoeveelheid alfa-energie die beschikbaar is voor inhalatie is daarmee afhankelijk van de mate waarin de radondochters zich aan de aerosolen binden en de snelheid waarmee gebonden en ongebonden dochters neerslaan. In de praktijk wordt voor het bepalen van de stralingsdosis vaak gerekend met de gemeten radonconcentratie (C_{radon}). Deze wordt vervolgens gecorrigeerd met de evenwichtsfactor F om de zogenaamde 'evenwicht-equivalente concentratie' (EEC) te bepalen:

$$EEC = C_{\text{radon}} \cdot F$$

De EEC is de radonconcentratie die, in evenwicht met kortlevende dochters, dezelfde potentiële alfa-energie vertegenwoordigt als het daadwerkelijke luchtmengsel [15].

De evenwichtsfactor kan worden gemeten. Zo'n meting valt buiten de scope van dit onderzoek. Vaak wordt de evenwichtsfactor geschat op basis van literatuuronderzoek en aan de hand van de omstandigheden op de werkplek. Omstandigheden die een rol kunnen spelen, zijn bijvoorbeeld [17]:

- De aerosolconcentratie. Bij een hoge aerosolconcentratie zijn er meer gebonden radondochters. Dit zorgt voor een hogere evenwichtsfactor. Een hoge aerosolconcentratie kan bijvoorbeeld komen door roken, luchtvervuiling, of bepaalde werkzaamheden waarbij aerosolen ontstaan.
- Het ventilatievoud (het aantal keer per uur dat de lucht in de ruimte wordt verversd). Bij een hoog ventilatievoud is de evenwichtsfactor lager, omdat er dan minder tijd beschikbaar is voor radondochters om in te groeien [15]. Een hoog ventilatievoud kan ook leiden tot een lagere aerosolconcentratie.
- De verhouding tussen het volume van de ruimte en het totale oppervlak dat beschikbaar is voor depositie (denk aan muren, meubels en dergelijke). Buiten zijn er over het algemeen minder oppervlakken dan binnen. Daardoor is de evenwichtsfactor buiten over het algemeen hoger dan binnen.

Een typische waarde voor de evenwichtsfactor binnenshuis is 0,4 [15, 16]. Voor buiten wordt doorgaans een evenwichtsfactor van 0,6 aangehouden [15]. Er zijn echter altijd specifieke omstandigheden mogelijk waarbij de evenwichtsfactor anders kan zijn. Later in dit

rapport zal de evenwichtsfactor voor groeven en drinkwaterbedrijven worden besproken.

2.3 Wet- en regelgeving

In deze paragraaf worden de relevante delen van de Nederlandse wet- en regelgeving en internationale richtlijnen beschreven.

2.3.1 *Referentieniveaus*

In 2018 zijn Europese voorschriften uit richtlijn 2013/59/Euratom [18] (hierna: de Richtlijn) geïmplementeerd in het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming [19] (hierna: Bbs). De Richtlijn verplicht elke lidstaat tot het vaststellen van een referentieniveau voor de jaargemiddelde radonconcentratie in woningen, voor de publiekstoegankelijke gebouwen en op werkplekken. Dit referentieniveau mag maximaal 300 Bq/m³ zijn.

In Nederland zijn de referentieniveaus vastgesteld op 100 Bq/m³. Overschrijding van het referentieniveau wordt gezien als ongepaste blootstelling en moet daarom zo veel als redelijkerwijs mogelijk worden voorkomen [19]. Daarnaast geldt dat via een ministeriële regeling voor aangewezen werkplekken (Bbs 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.

2.3.2 *Nationaal Actieprogramma Radon (NAR)*

Naast het vaststellen van referentieniveaus voor de radonconcentratie verplicht de Richtlijn iedere lidstaat om een nationaal actieprogramma radon (NAR) op te stellen. Het doel van dit programma is om de langetermijnrisico's van blootstelling aan radon in woningen, publiek toegankelijke gebouwen en op werkplekken te beheersen.

In het Nederlandse NAR [1] kunnen specifieke (soorten) werkplekken worden aangewezen. Dit zijn werkplekken waar de werkgever ervoor dient te zorgen dat er metingen worden uitgevoerd om de radonconcentratie te bepalen. Het gaat dan om werkplekken waar de radonconcentratie (naar verwachting) hoog is. Bij het vaststellen van specifieke (soorten) werkplekken in het NAR moet rekening worden gehouden met de verblijfsduur van de werknemers [18]. Op dit moment zijn geen specifieke (soorten) werkplekken geïdentificeerd in het NAR. Hiervoor was het aantal specifieke werkplekken waar tijdens de meetcampagne van 2016-2017 [2] was gemeten te laag [1].

In het NAR kunnen ook geografische gebieden worden geïdentificeerd. In deze gebieden moet de radonconcentratie op werkplekken in kelders en van benedenverdiepingen worden gemeten. Op dit moment zijn geen geografische gebieden geïdentificeerd in het NAR.

2.3.3 *Wet- en regelgeving radon op de werkplek*

Wanneer een werkplek is geïdentificeerd in het NAR, dient de werkgever te zorgen 'dat metingen voor het bepalen van de radonconcentratie worden uitgevoerd' (Bbs art. 7.38, lid 2). Indien de radonconcentratie het referentieniveau overschrijdt, neemt de werkgever maatregelen om

te zorgen dat de radonconcentratie teruggebracht wordt onder het referentieniveau (Bbs art. 7.38, lid 3).

In de praktijk zal het niet altijd mogelijk zijn om de radonconcentratie te verlagen tot onder het referentieniveau. Bij een blijvende overschrijding van het referentieniveau is de werkgever verplicht tot kennisgeving aan de autoriteit (Bbs art. 7.38, lid 4). In artikel 7.1 van de Regeling stralingsbescherming beroepsmatige blootstelling [20] (hierna: Rsbs) zijn de eisen aan deze kennisgeving beschreven. Daarnaast moet de werkgever onder andere de blootstelling van de werknemers aan radon vaststellen en monitoren, en moeten er 'maatregelen worden genomen om de blootstelling van de werknemers aan radon tot een minimum te beperken' (Bbs art. 7.38, lid 6, onder a en b). In de Rsbs (art. 7.2) is vastgelegd welke gegevens de werkgever moet registreren. In de regelgeving zijn ook eisen opgenomen over waarschuwingssignalering bij hoge radonconcentraties (Bbs art. 7.38, 6^e lid, onder c en Rsbs, art. 7.3).

Via een ministeriële regeling kunnen nadere regels worden gesteld (Bbs art. 7.38, lid 8). Daarnaast kunnen via een ministeriële regeling andere artikelen van hoofdstuk 7 van het Bbs van toepassing worden verklaard (Bbs art. 7.38, lid 5). Dit hoofdstuk bevat algemene voorschriften over beroepsmatige blootstelling. Hieronder vallen bijvoorbeeld de dosislimieten voor de effectieve dosis voor niet-blootgestelde werknemers (1 mSv/jaar) en voor blootgestelde werknemers (20 mSv/jaar). Ook de indeling van blootgestelde werknemers in categorie A en B is hier beschreven (een blootgestelde werknemer is categorie A indien de effectieve dosis hoger is dan 6 mSv/jaar).

2.3.4 *Het gebruik van een over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon*

De Richtlijn [18] (art. 35, lid 2) geeft aan dat een werkplek als een geplande blootstellingssituatie moet worden beheerd indien het referentieniveau blijvend overschreden wordt en de blootstelling van de werknemers hoger is dan 6 mSv. De lidstaat moet dan bepalen welke voorschriften over beroepsmatige blootstelling van toepassing zijn.

In plaats van de effectieve dosis kan volgens de Richtlijn ook worden gekeken naar de overeenkomstige over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon (hier afgekort C_{tijd}). Deze over de tijd geïntegreerde waarde wordt uitgedrukt in $\text{Bq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ (of $\text{Bq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ per jaar wanneer het gaat om de blootstelling per jaar), en hangt af van de radonconcentratie ($C_{\text{radon}}(t)$, die varieert in de tijd) en de blootstellingstijd (t , bijvoorbeeld uitgedrukt in uur of uur per jaar):

$$C_{\text{tijd}} = \int_0^t C_{\text{radon}}(t) dt = C_{\text{radon, rep.}} \cdot t$$

De radonconcentratie waar de werknemer aan blootstaat, kan variëren in de tijd². Om C_{tijd} te kunnen berekenen, zal gerekend moeten worden

² Dit kan komen doordat de radonconcentratie in de ruimte varieert, of doordat de werknemer op verschillende tijden werkt in ruimtes met verschillende radonconcentraties.

met een representatieve radonconcentratie $C_{\text{radon, rep.}}$. Dit kan bijvoorbeeld de gemiddelde radonconcentratie op de werkplek zijn. Indien de werknemer aanwezig is op locaties met verschillende radonconcentraties, kan ook de waarde voor C_{tijd} voor elke locatie apart worden bepaald (op basis van de voor die locatie representatieve radonconcentratie) en daarna worden gesommeerd.

In verschillende Europese lidstaten wordt C_{tijd} gebruikt als referentieniveau voor de blootstelling van werknemers [21]. Een werknemer in Tsjechië mag bijvoorbeeld voltijds werken op een werkplek met een radonconcentratie op het referentieniveau (in Tsjechië 2000 uur per jaar bij 300 Bq/m^3), of slechts de helft van de tijd op een werkplek waar de radonconcentratie het dubbele is. In beide gevallen is $C_{\text{tijd}} = 600 \text{ kBq}\cdot\text{h/m}^3$ per jaar.

In dit rapport wordt de geschatte blootstelling van werknemers in groeven en bij drinkwaterbedrijven, behalve als effectieve dosis, ook uitgedrukt als over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon. Hierbij wordt de blootstelling van de werknemers geschat en vergeleken met twee afkapwaarden voor C_{tijd} : 200 en $600 \text{ kBq}\cdot\text{h/m}^3$ per jaar. Deze afkapwaarden komen overeen met voltijds (bij benadering 2000 uur per jaar) werken bij respectievelijk 100 en 300 Bq/m^3 (het Nederlandse en maximale Europese referentieniveau).

De afkapwaarden voor C_{tijd} kunnen worden omgerekend naar effectieve (jaar)dosis. Zie hiervoor Tabel 2.1. Werknemers die zijn blootgesteld aan $C_{\text{tijd}} = 600 \text{ kBq}\cdot\text{h/m}^3$ ontvangen dus een dosis van enkele mSv (1,1 tot 12 mSv bij de respectievelijk laagste en hoogste DCC en evenwichtsfactor).

Een jaarlijkse blootstelling boven de afkapwaarden betekent daarom niet dat de blootstelling wettelijk niet is toegestaan. Zoals genoemd in paragraaf 2.3.3 is de dosislimiet voor blootgestelde werknemers 20 mSv/jaar . Onder blootgestelde werknemers vallen bijvoorbeeld werknemers in de luchtvaart, de medische sector en de nucleaire sector.

Tabel 2.1 Effectieve dosis in mSv bij de twee gebruikte afkapwaarden voor de over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tijd} . De effectieve dosis is weergegeven voor drie verschillende DCC's en $F = 0,4$. De waarden tussen haakjes geven de onzekerheidsmarge, als gevolg van de onzekerheidsmarge van de evenwichtsfactor ($\pm 50\%$). De evenwichtsfactor in groeven en bij drinkwaterproductiestations wordt besproken in respectievelijk paragraaf 4.3 en paragraaf 8.4.

Afkapwaarde ($\text{kBq}\cdot\text{h/m}^3$)	UNSCEAR ($9\cdot 10^{-6} \text{ mSv/h}$ per Bq/m^3)	ICRP standaard ($16,8\cdot 10^{-6} \text{ mSv/h}$ per Bq/m^3)	ICRP toeristengrot ($33,4\cdot 10^{-6} \text{ mSv/h}$ per Bq/m^3)
200	0,7 (0,4–1,1)	1,3 (0,7–2,0)	2,7 (1,3–4,0)
600	2,2 (1,1–3,2)	4,0 (2,0–6,0)	8,0 (4,0–12,0)

3 Meetmethoden radon

Dit hoofdstuk bevat achtergrondinformatie over de methoden voor het meten van de radonconcentratie en het schatten van de dosis voor werknemers. In de beschrijving van de meetmethoden is ook opgenomen welke apparatuur gebruikt is in dit onderzoek en wat de specificaties van deze apparatuur zijn. Specifieke informatie over de gebruikte meetmethoden bij de groeven of drinkwaterbedrijven is te vinden in respectievelijk delen B en C van dit rapport.

Voor het bepalen van de radonconcentratie en eventueel het schatten van de dosis voor werknemers kan gebruikgemaakt worden van drie meetmethoden:

1. Tijd-geïntegreerde **passieve radonmetingen** op vaste punten (omgevingsmetingen);
2. Individuele **persoonsgebonden radonmetingen** met een passieve meter. Een werknemer draagt tijdens zijn werkzaamheden een radonmeter aan zijn kleding;
3. **Continue** (dynamische, actieve) **metingen**. Het meten van de radonconcentratie als functie van de tijd op een bepaalde locatie. Hierbij kan ook gekeken worden naar de invloed van handelingen op de radonconcentratie (bijvoorbeeld het openen van een deur).

In dit onderzoek is met name gebruikgemaakt van tijd-geïntegreerde passieve radonmetingen. Persoonsgebonden radonmetingen en continue metingen zijn in mindere mate toegepast. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de voor- en nadelen van de drie methoden. De methoden worden hieronder verder toegelicht.

Tabel 3.1 Voor- en nadelen van en aandachtspunten bij verschillende meetmethoden.

Soort meting	Voordelen	Nadelen	Aandachtspunten
Passieve radonmetingen	- (Jaar)gemiddelde radonconcentratie op meetlocatie(s) op de werkplek. - Kosten relatief laag. - Uitvoerbaarheid relatief eenvoudig.	- Lange meettijd. - Variatie in radonconcentratie door bijvoorbeeld ventilatie niet zichtbaar.	- Registratie verblijfstijd en -plaats nodig voor het schatten van blootstelling. - Keuze representatieve meetlocaties.
Persoonsgebonden radonmetingen	- Bepalen van de blootstelling van een werknemer. - Uitvoerbaarheid relatief eenvoudig.	- Lange meettijd. - Niet zonder meer geschikt voor zeer korte verblijfstijden. - Geen informatie over de radonconcentratie op een specifieke locatie op de werkplek.	- Instructie werknemers. - Tijdsregistratie nodig. - Opslagplaats met lage radonconcentratie.
Continue radonmetingen op vaste punten	- Korte meettijd. - Inzicht in variatie van de radonconcentratie. - Inzicht in handelingsperspectief voor het verlagen van de radonconcentratie.	- Kosten hoog. - Specialist nodig voor het uitvoeren van de meting.	- Keuze representatieve locaties en situatie. - Registratie verblijfstijd en -plaats nodig voor schatting van blootstelling.

3.1 Passieve radonmetingen

Een tijd-geïntegreerde passieve radonmeter meet de radonconcentratie op een vaste locatie op de werkplek. Als bekend is hoe vaak een werknemer hier komt en hoelang de werknemer hier is, kan de blootstelling van de werknemer op deze locatie berekend worden (zie paragraaf 2.2). Als een werknemer op locaties met verschillende radonconcentraties op de werkplek komt, moet voor meerdere locaties de blootstelling berekend worden. Door de blootstelling van elke locatie bij elkaar op te tellen kan de totale blootstelling van een werknemer aan radon geschat worden. Hiervoor is een registratie van de verblijfstijd en plaats nodig. Hoe nauwkeuriger dit geregistreerd wordt, des te nauwkeuriger is de schatting van de blootstelling van de werknemer.

Een voordeel van tijd-geïntegreerde passieve radonmetingen is dat zij relatief simpel uit te voeren zijn [9]. Door meerdere meters verdeeld over verschillende ruimtes op te hangen, kan een beeld worden gekregen van de verschillen in radonconcentratie op de werkplek. Daarbij moet wel rekening gehouden worden met het feit dat de meting een gemiddelde geeft van de radonconcentratie over de gemeten tijdsperiode. Wordt er bijvoorbeeld een jaarlang gemeten, dan is het resultaat de jaargemiddelde radonconcentratie. Indien de radonconcentratie varieert gedurende de meettijd (zie paragraaf 2.1),

kan een overschatting of onderschatting van de blootstelling van de medewerker aan radon worden gemaakt. Dat betekent dat de radonmeting niet alleen in de 'radon-arme' periode plaats moet vinden.

3.1.1 *Gebruikte apparatuur*

Bij de metingen in de groeven en bij de drinkwaterbedrijven werd gebruikgemaakt van een gesloten alfatrack radonmeter (Radtrak3, Radonova Laboratories AB, Uppsala, Zweden). Het meetbereik van dit type radonmeter ligt tussen 30 en 50.000 kBq·h/m³ (wat overeenkomt met een radonconcentratie tussen 15 en 25.000 Bq/m³, gemeten gedurende 90 dagen) [22]. De gerapporteerde totale meetonzekerheid (2 standaarddeviaties) is 12% bij 400 kBq·h/m³ en kan bij lagere radonconcentratie oplopen tot 20%. De grootste bijdrage aan de totale meetonzekerheid is de kalibratieonzekerheid. Bij zeer hoge radonconcentraties neemt de onzekerheid toe door overlappende tracks, wat het tellen van de tracks die veroorzaakt worden door één alfadeeltje niet meer mogelijk maakt. Een typische meetperiode voor de Radtrak3 is volgens de leverancier twee maanden tot een jaar.

In dit type radonmeter zit een klein plastic plaatje (zie Figuur 3.1). Als een radondeeltje de meter binnenkomt en vervalt naar een radondochter, komt er straling vrij. Deze straling maakt een beschadiging op het plaatje. Na afloop van de meetperiode wordt de radonmeter onderzocht in een gespecialiseerd laboratorium. Het laboratorium telt het aantal beschadigingen op het plaatje en rekent dit om naar een jaargemiddelde radonconcentratie. Het uitlezen van de radonmeters is voor dit onderzoek gedaan door de leverancier, waarvan het laboratorium ISO/IEC 17025 en NEN-EN-ISO 11665-4 geaccrediteerd is.



Figuur 3.1 Opengemaakte Radtrak 3 radonmeter. Figuur uit [19].

3.2 **Persoonsgebonden radonmetingen**

Individuele persoonsgebonden radonmetingen kunnen worden gebruikt als de radonconcentraties onderhevig zijn aan fluctuaties of wanneer de werknemer op verschillende plekken met verschillende radonconcentraties werkt. In dat geval worden er representatieve werknemers aangewezen en wordt vervolgens voor deze werknemers met behulp van passieve radonmeters de individuele radonblootstelling gedurende een bepaalde periode bepaald (over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, in Bq·h/m³). Deze radonblootstelling kan worden omgerekend naar een effectieve dosis in mSv (zie paragraaf 2.2). Gedurende de tijd dat de werknemer niet op de desbetreffende werkplek met een hoge radonconcentratie werkt, dient deze radonmeter bij voorkeur in een omgeving te worden opgeslagen

met een lage radonconcentratie³. Op deze opslaglocatie worden controle meters geplaatst voor het bepalen van de achtergrond-radonconcentratie ter plaatse van de opslag.

Een aandachtspunt bij het gebruik van persoonsgebonden radonmeters is dat de drager van de radonmeter een duidelijke instructie dient te krijgen, aangezien een betrouwbaar resultaat afhankelijk is van gedisciplineerde medewerking van de desbetreffende werknemer. Het is van belang dat de werknemer de radonmeter meeneemt tijdens de werkzaamheden op de plek met verhoogde radonconcentraties. Daarnaast moet geregistreerd worden hoelang de werknemer op deze werkplek is geweest. Verder betekent de detectielimiet dat er een ondergrens is aan het product radonconcentratie keer verblijfstijd: voor het bepalen van de blootstelling op werkplekken met een korte verblijfstijd moet de radonconcentratie voldoende hoog zijn. Een nadeel is verder dat er relatief lang moet worden gemeten. De meetperiode is afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid, de radonconcentratie op de werkplek en de tijd dat de werknemer werkzaamheden uitvoert op de plek met een verhoogde radonconcentratie.

3.2.1 *Gebruikte apparatuur*

Bij de groeven zijn persoonsgebonden radonmetingen uitgevoerd met een hiervoor geschikte gesloten alfatrack radonmeter (Radtrak2, Radonova Laboratories AB, Uppsala, Zweden). Het meetbereik van dit type radonmeter ligt tussen 30 en 50.000 kBq·h/m³ (wat overeenkomt met een radonconcentratie tussen 15 en 25.000 Bq/m³, gemeten gedurende 90 dagen) [23, 24]. De gerapporteerde onzekerheid (2 standaarddeviaties) is 12% bij 400 kBq·h/m³. De radonconcentratie op de opslaglocatie dient lager dan 50 Bq/m³ te zijn. De leverancier raadt een meetperiode van drie maanden aan. Het uitlezen van de radonmeters is gedaan door de leverancier, waarvan het laboratorium ISO/IEC 17025 en NEN-EN-ISO 11665-4 geaccrediteerd is.

3.3 **Continue metingen**

Bij het gebruik van een actieve radonmeter voor het uitvoeren van continue radonmetingen wordt gedurende een tijdsperiode op een vaste locatie en op meerdere momenten de radonconcentratie bepaald. Wanneer deze tijdsafhankelijke meting gekoppeld wordt aan het uitvoeren van handelingen kan de invloed hiervan op de radonconcentratie worden bepaald. Deze handelingen kunnen vervolgens vertaald worden naar maatregelen om de blootstelling van werknemers aan radon te beperken. Bijvoorbeeld als de radonconcentratie afneemt bij het ventileren van de ruimte, zou een simpele maatregel kunnen zijn om voorafgaand aan het betreden van de ruimte de enkele minuten te ventileren. Ook kan een continue meting zinvol zijn om de variatie in radonconcentratie tussen dag en nacht weer te geven.

Het is belangrijk van tevoren na te denken over representatieve locaties op een werkplek, waar moet worden gemeten. Ook moet er gemeten worden in representatieve situaties.

³ Bewaren op een andere locatie is ook een mogelijkheid, maar daarbij moet worden bedacht dat bij een hoger 'achtergrondsignaal' de correctie daarvoor leidt tot toenemende onzekerheid in het 'netto-signaal', en daarmee in de bepaling van de blootstelling.

3.3.1 *Gebruikte apparatuur*

Voor de continue metingen is gebruikgemaakt van een Tesla TSR3DNM radon-probe. Het radongas diffundeert in de detector. Terwijl het radongas vervalst, ontstaan er radondochters (zie paragraaf 2.1). De Tesla radon-probe meet deze radondochters, en kan onderscheid maken tussen Po-218 en Po-214. Tijdens het meten toont een scherm op de meter de momentane radonconcentratie. Na afloop van de meting kunnen de meetdata via een USB-kabel uitgelezen worden met een laptop. Radonconcentraties worden als uurgemiddelden weergegeven en elke twaalf uur kan een alfaspectrum getoond worden. De minimaal detecteerbare activiteit van deze meter is 100 Bq/m³ per 1 uur of 20 Bq/m³ per 24 uur [25]. De gerapporteerde onzekerheid is < 13% bij 300 Bq/m³ per 1 uur en < 3% bij 300 Bq/m³ per 24 uur.

Naast Rn-222 (radon) kan er in een ruimte ook een ander radonnuclide (Rn-220) aanwezig zijn in de lucht. Deze variant van radongas wordt ook wel thoron genoemd. Bij de aanwezigheid van thoron kan dit gas ook diffunderen in de detector. Als er naast radon ook thoron aanwezig is, laat het alfaspectrum een extra piek zien van de thorondochters (Bi-212, Po-216 en Po-212).

De selectiviteit van de detector is geverifieerd door NRG (Arnhem, Nederland) in een radonkamer met een bekende hoeveelheid radon (Rn-222) en thoron (Rn-220).

Deel B – Groeven

4 Over groeven

Wanneer radon uit de bodem vrijkomt en zich verspreidt in de lucht, kan het zich ophopen in (ondergrondse) werkplekken die slecht te ventileren zijn. Een voorbeeld van zo'n werkplek zijn de groeven. Voordat we de onderzoeksopzet en resultaten bespreken van de radonmetingen in de groeven, geven we in dit hoofdstuk een algemene beschrijving van het gebruik van de groeven. Vervolgens bespreken we de verwachte radonconcentraties en de evenwichtsfactoren in groeven.

4.1 Gebruik van de groeven

De 295 groeven⁴ in Zuid-Limburg zijn ontstaan door de winning van mergel [27]. Na stopzetting van de mergelwinning zijn de groeven voor diverse andere doelen gebruikt, bijvoorbeeld als (schuil)kapel, (aatom)schuilkelder, opslagruimte of als toeristische attractie [28]. Tegenwoordig is er met name sprake van toeristische attracties of evenement- en horecagelegenheden. In een enkele groeve vindt nog mergelwinning plaats. De groeven zijn daarnaast belangrijke leefgebieden voor vleermuizen [27].

Voor het gebruik van een groeve is een vergunning nodig. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen drie soorten gebruik [29]:

- intensief gebruik (voor bijvoorbeeld rondleidingen, horeca of evenementen);
- extensief gebruik (incidenteel beperkt gebruik door één of enkele personen, bijvoorbeeld voor cultuurhistorisch onderzoek of vleermuistellingen);
- gebruik door erkende berglopers (ervaren wandelaars met een opleiding in gesteentemechanische veiligheid).

Voor dit onderzoek zijn de intensief gebruikte groeven relevant, omdat daar werknemers zijn die regelmatig onder de grond werken.

Verreweg de meeste groeven zijn niet (officieel) toegankelijk voor publiek. Van de 295 groeven in Zuid-Limburg hebben 55 een vergunning voor intensief gebruik (zie ook paragraaf 5.1). Hierbij wordt nog onderscheid gemaakt tussen intensief en intensief-klein gebruik (respectievelijk 32 en 23 groeven). De intensief-kleine groeven zijn vaak groeven waarvan de vergunninghouder een natuurlijk persoon of een klein horecabedrijf is. Niet alle groeven met vergunningen voor intensief(-klein) gebruik zijn ook daadwerkelijk in gebruik of toegankelijk voor publiek. Er vindt meestal wel beheer en inspectie (van de geologische stabiliteit) plaats.

⁴ In de volksmond worden de groeven ook wel mergelgrotten genoemd. Deze term is onjuist [26]. Grotten zijn namelijk gevormd door natuurlijke oorzaken, terwijl de groeven zijn ontstaan door mijnbouw. Daarnaast is het gesteente geologisch gezien geen mergel maar voornamelijk kalksteen (mergel bestaat uit kalksteen en 35-65% klei, terwijl het Zuid-Limburgse gesteente tot 98,5% kalksteen bevat, en in sommige gevallen ook vuursteen). In dit rapport zal de term groeve worden gebruikt in plaats van grot. Omdat het gesteente dat in Zuid-Limburg wordt gewonnen nog altijd mergel wordt genoemd, zal deze term in dit rapport wel worden gebruikt.

Relevante werknemers voor dit onderzoek zijn met name gidsen, maar ook werknemers die onderhouds-, horeca-, kassa- of steenwinningswerkzaamheden uitvoeren. Veel van deze werkzaamheden zijn seizoensgebonden:

- Voor rondleidingen zijn de lente en zomer (mei tot en met september) de belangrijkste seizoenen [30]. Met name (school)vakanties zijn drukke perioden.
- In de winter worden sommige groeven gebruikt voor het houden van kerstmarkten [31, 32].
- De ondergrondse winning van mergel vond en vindt voornamelijk in de winter plaats (als het buiten vriest) [33].

4.2 Verwachte radonconcentraties

In groeven worden hogere radonconcentraties verwacht dan op reguliere werkplekken of in woningen. Dit komt doordat de ruimtes zich onder de grond bevinden en de ventilatie er beperkt is. Meerdere studies hebben aangetoond dat radonconcentraties in ondergrondse ruimtes, zoals grotten en groeven, hoger zijn dan op reguliere werkplekken [34]. Ook in het eerdere RIVM-onderzoek uit 2016-2017 naar radon op de werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen in Nederland zijn bij deelnemende groeven in Zuid-Limburg radonconcentraties boven het referentieniveau (100 Bq/m³) gevonden [2].

De radonconcentratie in groeven of grotten is afhankelijk van verschillende factoren, zoals het type gesteente, de luchtcirculatie en de morfologie [35]. Onder morfologie valt bijvoorbeeld het aantal ingangen en de omvang van het gangenstelsel. Ook binnen in een enkele groeve kan de radonconcentratie van plaats tot plaats variëren.

De groeven in Zuid-Limburg variëren sterk in morfologie en gebruik [28, 36]. Zo verschilt per groeve de lengte en hoogte van de gangenstelsels. Ook het aantal en de vorm van de ingangen en luchtschachten variëren. De afgelopen jaren is ten behoeve van de vleermuizen in meerdere groeven de luchtcirculatie bestudeerd en waar nodig en mogelijk verbeterd [27].

De luchtcirculatie in de groeve hangt af van de morfologie, maar ook van het klimaat in en buiten de groeve. Temperatuurverschillen tussen de groeve en de buitenlucht kunnen luchtstromingen veroorzaken. De temperatuur in de Zuid-Limburgse mergelgroeven is gedurende het jaar constant en ligt rond 12 °C [28]. Uit wetenschappelijke literatuur over grotten en groeven blijkt dat de uitwisseling van de radonrijke lucht in de grot met radonarme buitenlucht vaak het grootst is wanneer de buitentemperatuur lager is dan de binnentemperatuur. Dit is met name in de winter het geval. Daarmee is de gemeten radonconcentratie in groeven/grotten in de winter het laagst en in de zomer het hoogst [35, 37-39]⁵. In een aantal studies is ook gekeken naar de variatie in radonconcentratie gedurende een etmaal [39, 40]. De radonconcentratie was 's nachts over het algemeen lager dan overdag. Ook dit effect is toe te schrijven aan de lagere temperatuur van de buitenlucht.

⁵ De seizoensvariatie in groeven is dus anders dan die in gebouwen (zie daarvoor paragraaf 2.1).

4.3 Verwachte evenwichtsfactor

De evenwichtsfactor F geeft aan in hoeverre de kortlevende radonochters een bijdrage leveren aan de stralingsdosis. Zoals beschreven in paragraaf 2.2.3 is de waarde van de evenwichtsfactor sterk afhankelijk van de lokale omstandigheden. Deze kunnen variëren per groeve en ook binnen dezelfde groeve. In dit onderzoek zijn geen metingen gedaan om de evenwichtsfactor in de groeven te bepalen. De evenwichtsfactor wordt geschat op basis van informatie uit de literatuur over verschillende soorten ondergrondse werkplekken (actieve mijnen, toeristische mijnen, grotten, ondergrondse spa's).

Het schatten van een evenwichtsfactor voor een specifieke (locatie in een) groeve valt buiten de scope van dit onderzoek. Voor dosisschattingen van werknemers wordt daarom een algemene waarde gebruikt voor de evenwichtsfactor. Hiervoor sluiten we aan bij de aanbevolen waarde voor werkplekken en toeristengrotten van de ICRP: $F = 0,4$ [16] (tevens de aanbevolen waarde voor werkplekken van UNSCEAR [15]). Daarbij nemen we een onzekerheidsmarge van 50%. De evenwichtsfactor is dan $F = 0,4 \pm 0,2$. Dit sluit aan bij de aanbevelingen uit een overzichtsstudie van Chen en Harley [41] voor 120 grotten en toeristische mijnen.

Gedetailleerdere informatie uit de literatuur

Een overzichtsstudie van Cigna [37] geeft een gemiddelde waarde voor de evenwichtsfactor in grotten van $F = 0,57$ (880 metingen in 25 grotten). De hierboven genoemde overzichtsstudie van Chen en Harley [41] geeft een gemiddelde waarde van $F = 0,4$ voor 120 grotten en toeristische mijnen. Voor actieve mijnen, waar nog mijnbouw plaatsvindt, lag de gemiddelde waarde iets lager ($F = 0,38$, voor 173 mijnen). De studie van Chen en Harley liet ook zien dat de gemeten waarde sterk afhankelijk is van de locatie. Gemiddelde waarden voor verschillende actieve mijnen lopen bijvoorbeeld uiteen van $F = 0,08$ tot $0,72$, terwijl er binnen één mijn waarden werden gevonden tussen $F = 0,03$ en $0,86$.

Veel studies zijn uitgevoerd op ondergrondse werkplekken waar de omstandigheden anders zijn dan in de Zuid-Limburgse groeven. Een voorbeeld hiervan zijn de actieve mijnen, waar actief wordt geventileerd. De sterke ventilatie zorgt voor een lagere evenwichtsfactor [41]. Daarnaast zijn veel studies uitgevoerd in grotten, waar de morfologie anders is dan in groeven en mijnen omdat ze natuurlijk gevormd zijn.

De volgende omstandigheden kunnen de evenwichtsfactor in de groeven beïnvloeden:

- Aerosolconcentratie. In het algemeen geldt: hoe hoger de aerosolconcentratie, des te hoger de evenwichtsfactor [17, 41]. Over het algemeen is de aerosolconcentratie laag in toeristengrotten en -mijnen (waar geen mijnbouw/winning plaatsvindt) [41]. Uit een onderzoek naar aerosolen in grotten blijkt wel dat de aanwezigheid van bezoekers kan leiden tot hogere aerosolconcentraties [42]. Te denken valt hier aan het meenemen van aerosolen van buiten (stofdeeltjes op kleding) of

de resuspensie van stofdeeltjes wanneer bezoekers door de grot lopen. Deze processen zullen ook plaatsvinden in de Zuid-Limburgse groeven.

- Ventilatie. Zoals hierboven vermeld zal sterke ventilatie leiden tot een lagere evenwichtsfactor. In een grot zonder ventilatie (luchtstromingen) werd een hoge evenwichtsfactor (bijna 1) gevonden [41]. In de Zuid-Limburgse groeven in dit onderzoek is alleen natuurlijke ventilatie aanwezig (zie ook paragraaf 6.2.1). De mate van natuurlijke ventilatie varieert per groeve, afhankelijk van de morfologie, maar zal lager zijn dan de actieve ventilatie in mijnen.
- Luchtvochtigheid. Bij hoge luchtvochtigheid kan het ontstaan van waterdruppels zorgen voor depositie van deeltjes, waardoor deze niet meer beschikbaar zijn voor inhalatie. Dit wordt door Chen en Harley beschreven voor ondergrondse spa's, waar de temperatuur en luchtvochtigheid hoog zijn [41]. Een hoge luchtvochtigheid kan ook bij een laag ventilatievoud zorgen voor een lage aerosolconcentratie [14]. De luchtvochtigheid in de Zuid-Limburgse groeven is hoog – in bepaalde groeven zijn in de winter condensatiezones aanwezig [36].
- Seizoensvariaties. In een aantal studies in grotten is in de zomer een lagere evenwichtsfactor gevonden dan in de winter [43, 44]. Voor deze grotten komt de periode met een lage evenwichtsfactor overeen met de periode waarin de radonconcentratie hoog is (zie ook paragraaf 4.2). Het is mogelijk dat in de Zuid-Limburgse groeven ook vergelijkbare seizoensvariaties optreden.

Samenvattend zijn er in de groeven factoren aanwezig die kunnen leiden tot een lagere evenwichtsfactor (weinig aerosolen, hoge luchtvochtigheid), alsook factoren die kunnen leiden tot een hogere evenwichtsfactor (beperkte ventilatie, verhoogde aerosolconcentratie door bezoekers). Hierbij komen nog de seizoensinvloeden. Het samenspel van deze factoren kan complex zijn. De mate van ventilatie kan bijvoorbeeld invloed hebben op de aerosolconcentratie en de luchtvochtigheid, en zelf weer afhangen van het seizoen (als gevolg van temperatuurverschillen).

5 Onderzoeksopzet groeven

In dit hoofdstuk lichten we de onderzoeksopzet toe. We beschrijven hoe we tot de deelnemers zijn gekomen, welke informatie we verzameld hebben over de deelnemende groeven, en welke metingen daar zijn uitgevoerd.

5.1 Werving deelnemers

Aan het begin van het onderzoek hebben we contact gehad met natuurorganisaties, de provincie Limburg en enkele gemeentes in Zuid-Limburg. Zij zijn vaak de beheerder/eigenaar van de groeven. Via deze organisaties hebben we een lijst ontvangen met de 55 groeven die vergund zijn voor intensief gebruik (zie ook paragraaf 4.1, waar het gebruik van de groeven is beschreven). Groeven op deze lijst die in gebruik zijn van particulieren of waar alleen beheerwerkzaamheden plaatsvinden waren niet relevant voor het onderzoek⁶. Voor de overige groeven is onderzocht welke bedrijven⁷ werkzaamheden uitvoeren in de groeven.

Deze twintig bedrijven zijn in 2020 en 2021 gebeld om uitleg te geven over radon en het onderzoek. Ook is naar alle bedrijven een uitnodiging voor deelname aan dit onderzoek en achtergrondinformatie over het onderzoek en radon verstuurd. Deelname van bedrijven en organisaties aan dit onderzoek vindt plaats op basis van vrijwilligheid. Om verschillende redenen heeft een aantal bedrijven en organisaties besloten om niet mee te doen aan het onderzoek.

Eén gangenstelsel (groeve) kan worden gebruikt door verschillende bedrijven. Ook kan één bedrijf gebruikmaken van meerdere gangenstelsels (groeven). In de rest van dit rapport wordt de term 'deelnemende groeve' gebruikt voor een bedrijf dat heeft meegedaan aan het onderzoek door in (de delen van) de groeve die het gebruikt radonmeters op te hangen. Een bedrijf dat gebruikmaakt van meerdere gangenstelsels kan zijn beschouwd als meerdere 'deelnemende groeven' indien de gangenstelsels sterk van elkaar verschillen.

5.2 Vragenlijst

Alle deelnemende groeven hebben aan de start van het onderzoek een vragenlijst ontvangen. De vragenlijst is te vinden in bijlage 14, paragraaf 14.2. Het eerste deel van de vragen ging over de ondergrondse locatie (een omschrijving daarvan) en het gebruik van de ruimte. Het tweede deel van de vragen ging over de werknemers of vrijwilligers die in de ondergrondse ruimtes werken. Later in het onderzoek is een aantal aanvullende vragen gesteld over de werknemers en hun werktijden.

⁶ Groeven die gebruikt worden door particulieren waren niet relevant voor het onderzoek, omdat hier geen werknemers komen. Dit zijn namelijk groeven die zich bevinden op het terrein of in de buurt van een woning. De groeven waar alleen beheerswerkzaamheden plaatsvinden worden incidenteel en slechts korte tijd door werknemers bezocht.

⁷ Dit kan ook een stichting of natuurlijk persoon zijn.

Het doel van de vragenlijst was om inzicht te krijgen in de volgende aspecten:

- Of er al informatie beschikbaar is over de radonconcentratie in de groeve.
- Hoe de ondergrondse ruimtes eruitzien die door bezoekers en/of werknemers meer dan één keer per week bezocht worden.
- De intensiteit van het gebruik van de groeve, namelijk hoeveel uur per week de groeve tijdens een drukke periode gemiddeld wordt betreden (door werknemers en bezoekers).
- Het aantal werknemers, verdeeld in vaste⁸ en tijdelijke⁹ werknemers. Het gaat hier om werknemers die de groeve betreden of daar hun werkplek hebben. Onder werknemers vallen ook vrijwilligers.
- De leeftijdsverdeling van de werknemers.
- De werkzaamheden van de werknemers in de ondergrondse ruimtes of gangen, en het aantal uren dat zij deze werkzaamheden ondergronds uitvoeren.

De resultaten van de vragenlijst zijn gebruikt als startpunt voor de werkbezoeken (beschreven in paragraaf 5.3). Daarnaast hebben we de informatie over de werknemers gebruikt om een indruk te krijgen van hun blootstelling.

5.3 Werkbezoeken

In juli 2021 zijn twee onderzoekers van het RIVM op werkbezoek geweest bij de deelnemende groeven. Het doel van dit bezoek was om kennis te maken met de plaatselijke contactpersonen en de onderzoeksopzet te bespreken. Tijdens het werkbezoek hebben de RIVM-onderzoekers samen met de plaatselijke contactpersonen van de groeve:

- Gekeken welke locaties in de groeven representatief zijn voor het uitvoeren van radonmetingen op vaste plaatsen. Representatieve locaties zijn bijvoorbeeld locaties langs de route van een rondleiding en/of plekken waar hogere of juist lagere radonconcentraties worden verwacht.
- Gekeken hoe de radonmeters opgehangen kunnen worden. De radonmeter mag bijvoorbeeld niet te dicht tegen de wand geplaatst worden.
- Besproken of het mogelijk is om persoonsgebonden radonmetingen uit te voeren. Hierbij is specifiek gevraagd of er representatieve werknemers zijn die de meter kunnen meenemen tijdens hun werkzaamheden onder de grond, en of er een geschikte opbergplek aanwezig is waar de meter geplaatst kan worden als deze niet wordt gebruikt.

Uiteindelijk hebben de RIVM-onderzoekers de werkplekken van vier van de zeven deelnemende groeven kunnen bezoeken. Door wateroverlast als gevolg van extreme regenval was het niet meer mogelijk om bij de andere groeven langs te gaan. De contactpersonen van deze andere groeven hebben de RIVM-onderzoekers online gesproken. Aan de hand van een plattegrond van de groeve is samen gekeken naar

⁸ Werknemers die regelmatig en gedurende langere tijd (minimaal één jaar) op de locatie werken.

⁹ Werknemers die kortdurend werkzaamheden verrichten, bijvoorbeeld als extra hulp in drukke weken.

representatieve locaties voor het ophangen van de passieve radonmeters.

5.4 Passieve metingen

In totaal zijn op 102 locaties, verdeeld over 7 deelnemende groeven, passieve radonmeters opgehangen (zie paragraaf 3.1 voor uitleg over passieve radonmetingen). Er zijn zeven tot twintig locaties per groeve gekozen.

De vaste meetpunten in de groeven zijn gekozen aan de hand van literatuuronderzoek in combinatie met informatie uit de vragenlijsten en werkbezoeken. De vaste meetpunten vallen theoretisch gezien uiteen in de volgende categorieën:

- Langs de hoofdroute (bijvoorbeeld een rondleidingsroute); hier komen werknemers het meest langs;
- Op plaatsen die wat betreft ventilatie, of gebrek daaraan, vermoedelijk interessant zijn.

Meetpunten in de groeve waar vermoedelijk meer ventilatie is zijn bijvoorbeeld dicht bij in- en uitgangen, aardpijpen en luchtschachten. Meetpunten waar vermoedelijk minder ventilatie is, en waar daardoor mogelijk radongas ophoopt, zijn bijvoorbeeld doodlopende of afgesloten delen (diep) in de groeve. In een schriftelijke instructie is de gewenste wijze en plaats van ophangen gecommuniceerd (onder andere de afstand vanaf muren en plafond).

Per meetpunt is een tweetal radonmeters opgehangen: één voor de duur van zes maanden tijdens de periode oktober-april (gelijk aan de meting met de persoonsgebonden radonmeters, zie paragraaf 5.5) en één voor de duur van twaalf maanden (oktober-oktober). Na afloop van de meetperiode leest de leverancier de radonmeter uit en berekent de jaargemiddelde radonconcentratie voor beide meetperioden.

De gebruikte radonmeters staan beschreven in paragraaf 3.1.1. De volledige instructie voor het plaatsen van de radonmeters staat in bijlage 14, paragraaf 14.1.

5.5 Persoonsgebonden radonmetingen

In het eerste halfjaar van het radononderzoek hebben zes werknemers, werkend bij vier verschillende groeven, tijdens hun werk onder de grond een persoonsgebonden radonmeter meegedragen (zie paragraaf 3.2 voor uitleg over persoonsgebonden radonmetingen). In één geval (groeve 2021-GR-08) ging het niet werkelijk om één werknemer, maar om de groep werknemers die in de groeve aan het werk waren. De radonmeter werd daar om logistieke redenen aan een sleutelbos mee de groeve in genomen. Dat was een praktische manier om radon tijdens werktijd te kunnen meten, want hoewel de werknemers die in de groeve werkzaamheden uitvoerden konden wisselen, hadden zij daarbij ter plaatse altijd de sleutelbos nodig¹⁰.

¹⁰ De uitkomst van deze persoonsgebonden radonmeting is dus conservatief: het resultaat is de blootstelling van de groep werknemers die de sleutelbos gebruikt, en niet van een individuele werknemer. Het is niet bekend hoe conservatief de uitkomst is, omdat werknemers de groeve ook samen betreden.

De werknemers die een meter kregen, waren werknemers die regelmatig werkzaamheden onder de grond uitvoeren. Als de werknemers geen werkzaamheden uitvoerden onder de grond, werd de persoonsgebonden radonmeter op een vaste plek opgeborgen in een etui. Meestal bevond deze plek zich in een kantoor. Zowel in het etui als in de ruimte waar de radonmeter werd opgeborgen was een radonmeter aanwezig om de achtergrondconcentratie te meten.

In een schriftelijke instructie aan de werknemers is het gewenste gebruik van de persoonsgebonden radonmeters toegelicht. Hierin is onder andere het gebruik van een logboek voor de ondergrondse werktijden besproken.

Het doel van deze metingen was om te onderzoeken of persoonsgebonden radonmetingen bruikbare informatie kunnen opleveren over de blootstelling van werknemers in groeven, en welke praktische problemen er optreden. De geplande meetperiode was drie maanden. Deze meetperiode werd vervolgens verlengd tot zes maanden, omdat na drie maanden bleek dat de persoonsgebonden radonmeters maar enkele uren in de groeve waren gebruikt. Dit had mogelijk te maken met de coronamaatregelen op dat moment. De uiteindelijke meetperiode was van oktober 2021 tot april 2022.

De gebruikte radonmeters staan beschreven in paragraaf 3.2.1.

5.6 Continue metingen

In de groeven zelf zijn geen continue metingen gedaan (zie paragraaf 3.3 voor uitleg over continue radonmetingen). Wel zijn dergelijke metingen uitgevoerd in een kantoor boven een groeve. Dit kantoor werd namelijk gebruikt als opberglocatie voor een persoonsgebonden radonmeter (zie paragraaf 5.5). De radonconcentratie in het kantoor bleek onverwacht hoog ($> 400 \text{ Bq/m}^3$). Het doel van de continue metingen in het kantoor was om inzicht te geven in het effect van menselijk handelen (zoals ventileren) op de radonconcentratie.

Het kantoor heeft geen directe verbinding met de groeve maar ligt wel gedeeltelijk in de bodem. Tijdens de metingen was de radonmeter geplaatst op een bureau in het midden van de ruimte, op ongeveer 5 meter afstand van binnen- en buitenmuren. De metingen zijn uitgevoerd in de winter, gedurende een periode van zeven weken.

De gebruikte radonmeter staat beschreven in paragraaf 3.3.1.

5.7 Blootstelling van de werknemers

In dit onderzoek worden geen blootstellingsberekeningen gedaan voor individuele werknemers. Wel worden enkele algemene berekeningen gedaan, op basis van informatie over werktijden en de gemeten gemiddelde (of mediane) radonconcentraties. De blootstelling wordt uitgedrukt als de effectieve dosis (mSv) en de over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tijd} ($\text{kBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$).

De effectieve dosis wordt berekend met de DCC's zoals besproken in paragraaf 2.2.2 en met de evenwichtsfactor zoals besproken in paragraaf 4.3.

Bij het berekenen van C_{tijd} is gebruikgemaakt van:

- De gemeten radonconcentraties (gemiddelde en mediaan van de jaarmeting).
- De gerapporteerde werktijden van de werknemers in de groeven. In de meeste gevallen is de exacte werktijd niet bekend, maar slechts een bereik (bijvoorbeeld 400 tot 600 uur per jaar). In dat geval is gerekend met het midden van het bereik (in het eerdergenoemde voorbeeld dus 500 uur per jaar).

De berekeningen zijn gedaan voor alle werknemers (vast en tijdelijk). De gebruikte aannames worden samen met de resultaten van de berekening besproken in paragraaf 6.6.2.

6 Resultaten groeven

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste resultaten van de radonmetingen bij groeven besproken. In bijlage 15 zijn aanvullende resultaten weergegeven. De deelnemende groeven hebben hun eigen resultaten ontvangen. Daarnaast zijn de resultaten van de radonmetingen besproken tijdens een bijeenkomst met de deelnemende groeven. Tijdens deze bijeenkomst is ook gesproken over de blootstelling van werknemers (zie paragraaf 6.6), en het verlagen van de blootstelling (zie paragraaf 7.3). Een beleidsmedewerker van SZW was hier ook bij aanwezig.

6.1 Overzicht deelnemende groeven

Uiteindelijk hebben zeven groeven deelgenomen aan het onderzoek. Daarnaast heeft één bedrijf wel de vragenlijst voor een groeve ingevuld, maar later alsnog besloten om niet mee te doen aan de metingen. Een ander bedrijf heeft een vragenlijst ingevuld voor enkele groeven die het beheert, veelal voor extensief gebruik. Wanneer in dit hoofdstuk wordt gesproken over 'deelnemende groeven', is niet gekeken naar de antwoorden van deze twee vragenlijsten. Indien relevant wordt de informatie uit deze twee vragenlijsten apart besproken.

Twee van de deelnemende groeven (2021-GR-09 en 2021-GR-54) staan met elkaar in verbinding. Twee andere (2021-GR-08 en 2021-GR-27) zijn eigenlijk twee delen in het gangenstelsel van dezelfde groeve, die door verschillende bedrijven worden gebruikt.

6.2 Resultaten vragenlijst

6.2.1 *Over de groeven*

De deelnemende groeven verschillen sterk van elkaar in omvang en indeling. De lengte van de daar toegankelijke gangenstelsels varieert van minder dan één kilometer tot tientallen kilometers. Sommige groeven bestaan alleen uit gangenstelsels, terwijl andere ook ondergrondse ruimtes bevatten. Deze ruimtes variëren ook in vloeroppervlak, van enkele tientallen tot enkele honderden vierkante meters. Uit de werkbezoeken aan de groeven blijkt ook dat er veel variatie is in de hoogte en breedte (en daarmee het volume) van de gangenstelsels. Veel groeven zijn vanaf straatniveau horizontaal de heuvel in gebouwd maar er zijn ook groeven met meerdere verdiepingen of verticale ingangen. Het diepteverschil en de diepte (onder het maaiveld) varieert: in de vragenlijsten zijn waarden tot enkele tientallen meters genoemd.

In geen van de deelnemende groeven is een door mensen aangelegde ventilatievoorziening aanwezig. Er is daarom alleen sprake van natuurlijke ventilatie, via ingangen, aardpijpjes en luchtschachten. De meeste groeven beschikken over meerdere toegangen.

In geen van de deelnemende groeven is een risico-inventarisatie gericht op radon aanwezig. Wel zijn er in enkele groeven eerder radonmetingen

uitgevoerd. Dit is gedaan tijdens het eerdere RIVM-onderzoek uit 2016-2017 naar radon op werkplekken [2].

6.2.2 *Over de werknemers*

De werkzaamheden die worden uitgevoerd in de deelnemende groeven komen overeen met de algemene beschrijving in paragraaf 4.1. Voor dit onderzoek worden alleen de werknemers beschouwd die de groeve betreden. De eigenaar van een bedrijf kan hier ook onder vallen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen vaste werknemers en tijdelijke/flexibele werknemers (zie paragraaf 5.2). Bij twee van de deelnemende groeven zijn tijdelijke werknemers in dienst. De werkzaamheden van deze tijdelijke werknemers zijn vergelijkbaar als die van de vaste werknemers.

De leeftijdsverdeling van de werknemers is weergegeven in Tabel 6.1. Een overzicht van het gemiddelde aantal werkuren is weergegeven in Tabel 6.2. Het totaal aantal werknemers in Tabel 6.1 wijkt iets af van het totaal in Tabel 6.2, omdat de werktijden in laatstgenoemde tabel op een later moment opnieuw zijn uitgevraagd.

De werktijden zijn door de deelnemende groeven op verschillende manieren aangeleverd. Van 2021-GR-09 en 2021-GR-54 is een overzicht ontvangen van de daadwerkelijk gewerkte uren in 2023 per werknemer. Van 2021-GR-08 is de gemiddelde werktijd per persoon over een periode van tien jaar opgegeven. Voor 2021-GR-11 en 2021-GR-27 zijn de werktijden gebruikt die zijn ingevuld in de tweede vragenlijst. In deze vragenlijst is gevraagd naar het aantal werknemers dat een bepaald aantal uur per jaar werkt. Van 2021-GR-01 en 2021-GR-15 is geen tweede vragenlijst ontvangen. Voor deze groeven zijn daarom de werktijden gebruikt die zijn ingevuld in de eerste vragenlijst. In deze vragenlijst is gevraagd naar het aantal werknemers dat een bepaald aantal uur *per week* werkt. De werktijden in uur per week zijn omgerekend naar uur per jaar ($\times 52$ weken/jaar).

Tabel 6.1 Leeftijdsverdeling van vast en tijdelijk aangestelde werknemers bij de deelnemende groeven.

Leeftijd	Aantal vast	Aantal tijdelijk
< 18 jaar	5	0
18 tot 65 jaar	87	21
> 65 jaar	41	2
Totaal	133	23

Tabel 6.2 Verdeling van werktijden van vaste en tijdelijk aangestelde werknemers bij de deelnemende groeven. De kolommen 'cumulatief' laten zien welk percentage van de werknemers evenveel of minder werkt dan de aangegeven werktijd.

Werktijd (uur per jaar)	Aantal vast	Cumulatief (%)	Aantal tijdelijk	Cumulatief (%)
0 tot 200	60	43	6	27
200 tot 400	51	80	7	59
400 tot 600	2	81	3	73
600 tot 800	18	94	5	95
800 tot 1000	6	99	1	100
1000 tot 1200	0	99	0	100
1200 tot 1400	0	99	0	100
1400 tot 1600	0	99	0	100
1600 tot 1800	0	99	0	100
Meer dan 1800	2	100	0	100
Totaal	139		22	

Uit de leeftijdsverdeling blijkt dat bijna alle werknemers bij de deelnemende groeven 18 jaar of ouder zijn.

In veel van de deelnemende groeven is een duidelijk hoogseizoen aan te wijzen, waarin werknemers vaak in de groeve zijn (zie paragraaf 4.1). In het laagseizoen zijn werknemers veel minder vaak in de groeve. Als gevolg daarvan zijn er nauwelijks werknemers die *gemiddeld* veel uren in de groeve werken. Ongeveer 95% van de werknemers, zowel vast als tijdelijk, werkt maximaal 800 uur per jaar in de groeve. Ongeveer 75% van de werknemers werkt er maximaal 400 uur per jaar.

De twee bedrijven die wel de vragenlijst hebben ingevuld maar niet hebben deelgenomen aan het onderzoek hebben in totaal 23 vaste werknemers. Hiervan werken 21 personen minder dan 400 uur per jaar in de groeve. De overige 2 werknemers werken tussen 900 en 1250 uur per jaar in de groeve. Een van deze bedrijven heeft ook 13 tijdelijke werknemers, die gemiddeld ongeveer 200 uur per jaar in de groeve werken.

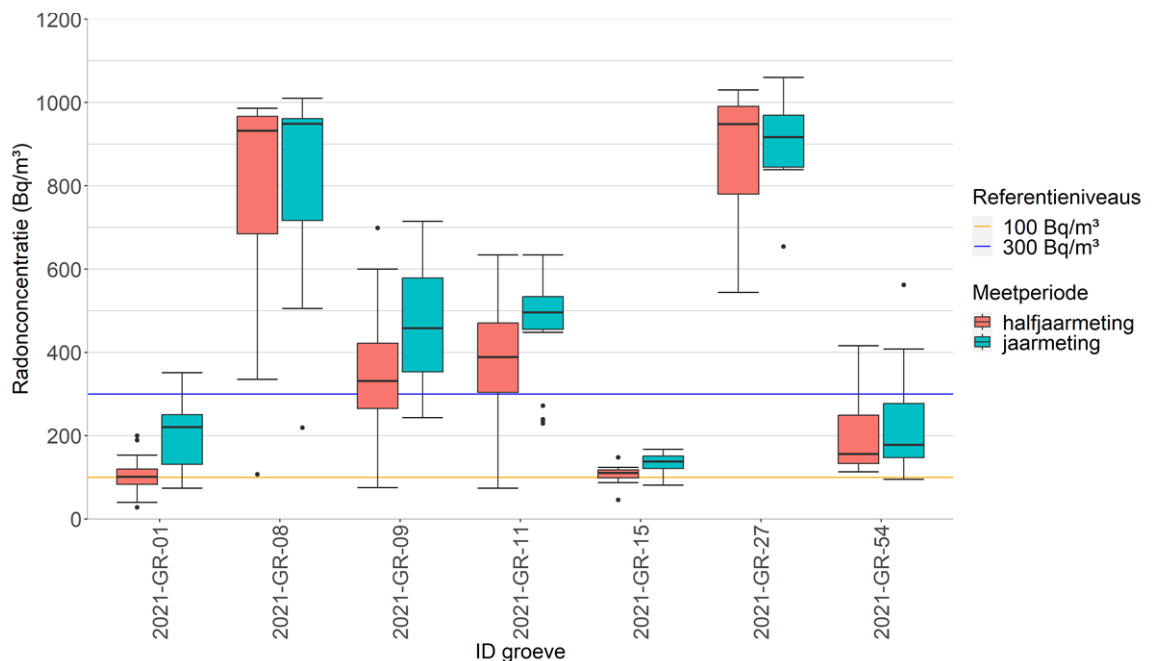
We merken op dat de cijfers over de werknemers alleen betrekking hebben op de werknemers die in dienst zijn bij de deelnemende groeve. Externe werknemers vallen hier niet onder. Dit wordt verder besproken in de discussie, paragraaf 7.1.

6.3 Resultaten passieve metingen

In totaal zijn er 102 sets van twee passieve radonmeters opgehangen in de 7 deelnemende groeven. Van elke set is na ongeveer een halfjaar (gemiddeld 189 dagen) 1 meter retour gestuurd. De andere meter is na ongeveer een jaar (gemiddeld 388 dagen) geretourneerd. De resultaten van de passieve metingen zijn samengevat in Tabel 6.3. Uitgebreide resultaten zijn weergegeven in Tabel 15.1 in bijlage 15. De resultaten zijn ook grafisch weergegeven in Figuur 6.1.

Tabel 6.3 Resultaten van de passieve radonmetingen bij de groeven. De halfjaarmetingen zijn uitgevoerd in de winterperiode. Eén van de radonmeters voor jaarmetingen was beschadigd en kon daardoor niet worden uitgelezen. Tussen haakjes is het percentage metingen boven de referentieniveaus weergegeven.

Resultaat	Jaarmeting	Halfjaarmeting
Aantal geldige metingen	101	102
Aantal metingen boven Nederlands referentieniveau (100 Bq/m ³)	95 (94%)	86 (84%)
Aantal metingen boven maximaal Europees referentieniveau (300 Bq/m ³)	46 (46%)	41 (40%)
Laagste waarde (Bq/m ³)	74	28
Hoogste waarde (Bq/m ³)	1060	1030
Mediaanwaarde (Bq/m ³)	267	182
Gemiddelde waarde (Bq/m ³)	378	313

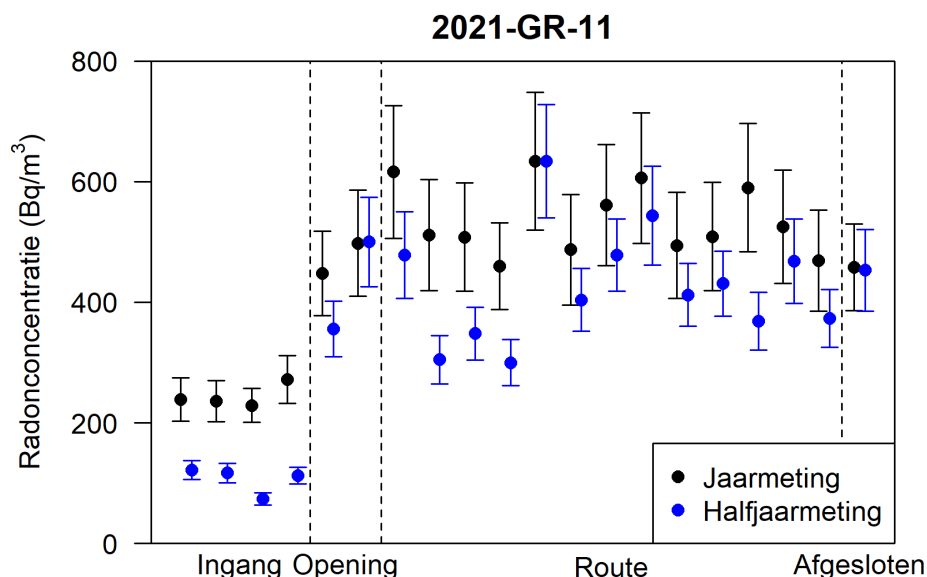


Figuur 6.1 Boxplot van de passieve radonmetingen bij de groeven. De onder- en bovenkant van de box geven het 25^e en 75^e percentiel (de interkwartielafstand), de horizontale lijn in de box is de mediaan. De verticale lijnen ('whiskers') geven aan welke waarden binnen 1,5 keer de interkwartielafstand liggen. Ook weergegeven in de figuur zijn het Nederlandse en maximale Europese referentieniveau (100 en 300 Bq/m³). De halfjaarmetingen zijn uitgevoerd in de winterperiode.

Zoals verwacht zijn de radonconcentraties in de groeven hoog vergeleken met typische concentraties in woningen en reguliere werkplekken. Bijna alle gemeten concentraties liggen boven het Nederlandse referentieniveau. Daarnaast is duidelijk te zien dat er seizoensvariatie is in de radonconcentratie: voor de meeste groeven valt de halfjaarmeting (winter) lager uit dan de jaarmeting (winter en zomer). Een vergelijking met radonconcentraties in buitenlandse grotten en mijnen is te vinden in de discussie, paragraaf 7.2.

In elke groeve zijn radonmeters opgehangen op verschillende plekken, zoals bij ingangen of ventilatieschachten, langs veelgebruikte routes, en in delen die juist meer afgesloten zijn. In sommige groeven is de radonconcentratie in de buurt van de ingang lager dan in de rest van de groeve. Dit is bijvoorbeeld het geval in groeve 2021-GR-11 (zie Figuur 6.2). Voor andere groeven is dit in mindere mate het geval (zie de figuren in bijlage 15). Dat kan te maken hebben met verschillen in morfologie tussen de groeven waardoor luchtstromingen in de buurt van de ene ingang sterker zijn dan bij de andere. Daarnaast is de omschrijving van de meetlocatie enigszins subjectief, vanwege de grote verschillen tussen de groeven.

Het is niet mogelijk om op basis van de metingen een algemene uitspraak te doen over het effect van de locatie in een groeve op de radonconcentratie. Daarvoor verschillen de groeven te veel van elkaar.



Figuur 6.2 De radonconcentratie in groeve 2021-GR-11, voor vier verschillende categorieën locaties (van links naar rechts): in de buurt van de (hoofd)ingang, bij een ander soort opening (nooduitgang, ventilatieschacht), aan de route, of in een afgesloten (afgesloten, ingestort of doodlopend) deel van de groeve. Meer informatie over de locatieomschrijvingen is te vinden in bijlage 15. Resultaten van de jaar- en halfjaarmetingen op dezelfde locatie zijn naast elkaar geplot. De foutbalken zijn 2 keer de standaarddeviatie van de meting.

6.4 Resultaten persoonsgebonden radonmetingen

In de winterperiode (oktober 2021 tot april 2022) zijn persoonsgebonden radonmetingen uitgevoerd bij zes werknemers in vier groeven: 2021-GR-01, 2021-GR-08, 2021-GR-11 en 2021-GR-09/2021-GR-54 (de gangenstelsels van deze twee groeven staan met elkaar in verbinding en worden door werknemers van hetzelfde bedrijf betreden). Uit deze verkennende metingen blijkt dat persoonsgebonden metingen in de praktijk lastig waren vanwege de vaak hoge radonconcentratie op de opslaglocatie, in combinatie met de relatief korte werktijd

ondergronds. Dit wordt hieronder in meer detail besproken. De meetresultaten zelf zijn weergegeven in Tabel 15.2 in bijlage 15.

Bij 3 van de 4 groeven was de radonconcentratie op de opslaglocatie hoger dan het aanbevolen maximum van 50 Bq/m^3 . Alleen in het geval van de radonmeter die is gedragen in groeve 2021-GR-01 had de opslaglocatie een voldoende lage radonconcentratie. De gerapporteerde blootstelling was in dit geval $< 32 \text{ kBq}\cdot\text{h/m}^3$. Deze blootstelling geldt dus voor de meetperiode (oktober–april). Om dit om te rekenen naar een blootstelling per jaar is aanvullende informatie nodig.

In drie van de vier gevallen was de persoonsgebonden radonmeter kort in gebruik, maximaal enkele procenten van de totale meetperiode. Dit maakt dat het verschil tussen de persoonsgebonden radonmeter en de achtergrondmeter klein is. De korte werktijd kan te maken hebben de meetperiode (oktober–april), die niet in het hoogseizoen voor toeristische rondleidingen valt. Alleen in het geval van 2021-GR-08 was de radonmeter lang genoeg in gebruik, maar daar was de radonconcentratie op de opslaglocatie te hoog.

Uit gesprekken met de deelnemende groeven blijkt dat de korte geregistreerde werktijd in het geval van 2021-GR-11 (twee persoonsgebonden radonmeters) te wijten is aan gebrekkige communicatie, waardoor de persoonsgebonden radonmeter alleen aan het begin van de meetperiode in de groeve werd gedragen. De resultaten van deze persoonsgebonden radonmetingen geven dus geen goed beeld van de blootstelling in de meetperiode.

Vanwege de hoge achtergrondwaarden en korte meettijd heeft de leverancier, die de radonmeters uitleest, voor vijf van de zes persoonsgebonden radonmeters alleen een bovengrens aangegeven voor de over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon. Voor de radonmeter gedragen in 2021-GR-08 is wel een meetresultaat gerapporteerd ($59 \text{ kBq}\cdot\text{h/m}^3$). In dit geval was er echter sprake van een achtergrondwaarde van 417 Bq/m^3 ; hoger dan het aanbevolen maximum van 50 Bq/m^3 . De gerapporteerde onzekerheid (2 standaarddeviaties) in deze persoonsgebonden meting is daarom zeer hoog ($426 \text{ kBq}\cdot\text{h/m}^3$).

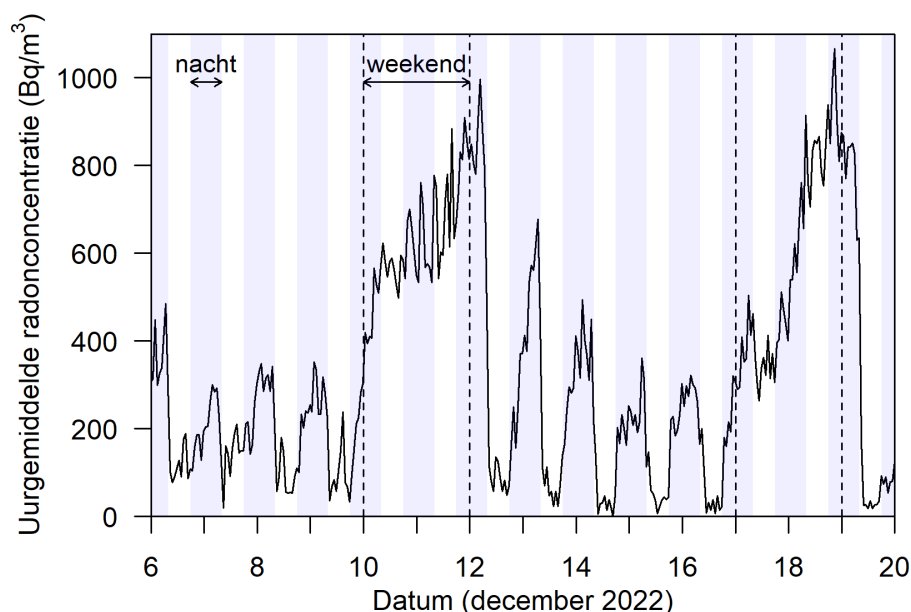
Samengevat geven de resultaten van de metingen met persoonsgebonden radonmeters weinig informatie die gebruikt kan worden om de blootstelling van werknemers te bepalen. Hiervoor zijn de onzekerheden te groot. In de discussie (paragraaf 7.4) zijn enkele mogelijkheden voor vervolgonderzoeken met persoonsgebonden radonmeters beschreven.

6.5 Resultaten continue metingen

Continue metingen zijn alleen uitgevoerd in één kantoor boven een groeve. Tijdens de meting hebben de werknemers in het kantoor op verschillende manieren geventileerd: door de deur van het kantoor open te laten, ramen korte tijd (ongeveer een halfuur) open te zetten of een raam op kiepstand (ventilatiestand) te zetten. De laatste manier bleek

het effectiefste om gedurende de werkdag de radonconcentratie te verlagen.

Figuur 6.3 geeft de uurgemiddelde radonconcentratie in het kantoor weer. Het is duidelijk te zien dat de radonconcentratie fluctueert. 's Nachts en in het weekend is de radonconcentratie hoger dan overdag op werkdagen. De hoogst gemeten radonconcentratie was 1067 Bq/m³. Deze waarde werd gemeten in het weekend.



Figuur 6.3 De uurgemiddelde radonconcentratie in een kantoor bij een groeve, gemeten met een actieve radonmeter gedurende twee weken. De radonconcentratie varieert gedurende de week, en is het hoogste 's nachts (tussen 18.00 en 08.00, gekleurde vlakken) en in het weekend (tussen stippellijnen). De werknemers zijn enkel overdag op werkdagen aanwezig. De eerste werkdagen is het kantoor geventileerd door de deur naar andere ruimtes open te laten en 's ochtends de ramen korte tijd open te zetten. Vanaf 9 december is tijdens werktijd het raam op kiepstand (ventilatiestand) gezet.

6.6 Blootstelling van de werknemers

De blootstelling van een werknemer kan worden geschat uit de gemeten radonconcentraties en de gerapporteerde werktijden. Er zijn echter veel onzekerheden bij het bepalen van de dosis. Ten eerste is niet voor individuele werknemers bekend hoe vaak zij op welke locatie in de groeve zijn. Er zal daarom moeten worden gerekend met bijvoorbeeld de gemiddelde of mediane concentratie in de groeve. Andere belangrijke onzekerheden worden besproken in paragrafen 2.2 en 4.3: er is een wetenschappelijke discussie gaande over de te gebruiken dosisconversiecoëfficiënt (DCC), en de evenwichtsfactor F is voor de deelnemende groeven niet bekend. In de dosisschatting wordt rekening gehouden met deze onzekerheden.

Hieronder worden twee manieren besproken om de blootstelling van de werknemers te schatten: door middel van de effectieve dosis, en door

middel van de over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon.

6.6.1 *Effectieve dosis*

In Figuur 6.4 is af te lezen welke effectieve dosis een werknemer ontvangt door 800 uur per jaar te werken bij een bepaalde (constante) radonconcentratie. Om aan de hand van deze figuur een dosisschatting voor een bepaalde werknemer te doen, moet een representatieve radonconcentratie worden geschat. Dit kan bijvoorbeeld de radonconcentratie zijn op een locatie waar de meeste werkzaamheden worden uitgevoerd, of de mediane/gemiddelde radonconcentratie in de groeve. In het onderste deel van Figuur 6.4 zijn de in de groeven gemeten radonconcentraties (jaarmetingen) weergegeven. Deze kunnen dienen als representatieve radonconcentratie.

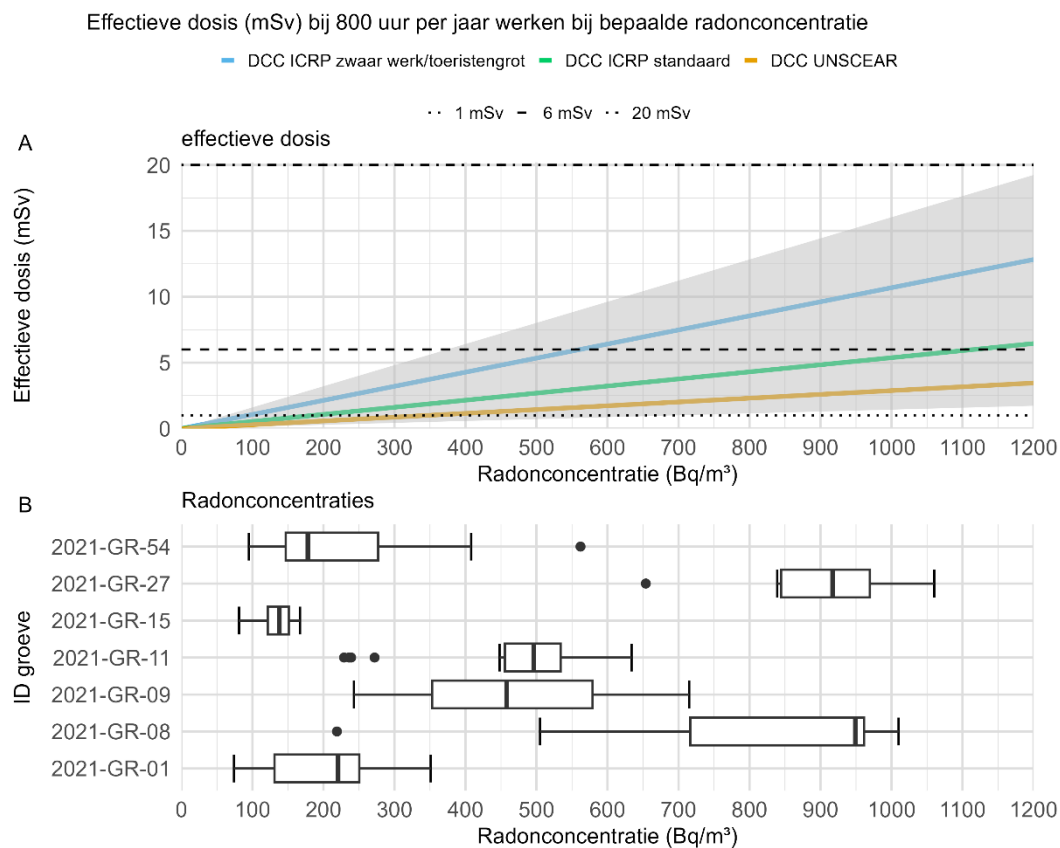
De werktijd in de figuur, 800 uur, is gekozen omdat ongeveer 95% van alle werknemers in de deelnemende groeven minder dan 800 uur per jaar ondergronds werkt. Voor de meeste beschouwde werknemers is de effectieve jaardosis daarom lager dan de dosis die uit de figuur wordt afgelezen. Omdat de effectieve dosis die wordt afgelezen uit Figuur 6.4 recht evenredig is met de werktijd ondergronds, kan de dosis worden geschaald met de gewenste werktijd.

De dosisschatting is gedaan met een aantal verschillende mogelijke waarden voor de DCC en F (zie paragraaf 2.2.2 en 4.3 voor meer informatie). In Figuur 6.4 zijn voor de volgende DCC's lijnen weergegeven:

- UNSCEAR (oranje lijn): de DCC van UNSCEAR ($9 \cdot 10^{-6}$ mSv/h per Bq/m³)
- ICRP standaard (groene lijn): de DCC van de ICRP voor de meeste situaties ($16,8 \cdot 10^{-6}$ mSv/h per Bq/m³).
- ICRP zwaar werk/toeristengrot (blauwe lijn): de DCC van de ICRP voor werkers die zwaar werk uitvoeren (en daarmee een hoger ademvolumetempo hebben) of werkers die in een toeristengrot werken ($33,4 \cdot 10^{-6}$ mSv/h per Bq/m³).

Het verschil tussen de hoogste en laagste DCC-waarde is een factor 3,7.

De effectieve dosis is berekend met een waarde voor de evenwichtsfactor F tussen 0,2 en 0,6. Dit is weergegeven met het grijze vlak in Figuur 6.4. Voor de lijnen is gerekend met de meest waarschijnlijke waarde voor F , namelijk 0,4 (zie voor uitleg paragraaf 4.3). Het verschil tussen de hoogste en de laagste F is een factor 3. In bijlage 15 is een aanvullende figuur opgenomen (Figuur 15.7), waarin voor elke DCC afzonderlijk de dosisschatting met variatie in F is weergegeven.



Figuur 6.4 Deel A toont de effectieve jaardosis als functie van de radonconcentratie bij een werktijd van 800 uur (95% van de werknemers werkt minder dan 800 uur per jaar in de groeve). Vanwege de onzekerheden in de dosisschatting, wordt een bereik getoond. Er is gerekend met verschillende waarden voor de DCC en evenwichtsfactor F (zie lopende tekst voor meer informatie). Deel B geeft de jaargemiddelde radonconcentraties in de deelnemende groeven (voor uitleg over de boxplots, zie Figuur 6.1).

Afhankelijk van de omstandigheden in de groeve en het type werkzaamheden dat wordt uitgevoerd zal de dosisschatting meer rond de onderkant of bovenkant van het aangegeven bereik liggen. Bij zware werkzaamheden dient bijvoorbeeld een hogere DCC gebruikt te worden dan bij lichte werkzaamheden. Bepaalde werkzaamheden kunnen mogelijk ook leiden tot een hogere aerosolconcentratie en daarmee tot een hogere evenwichtsfactor F . Daarnaast is de evenwichtsfactor in de winter mogelijk hoger dan in de zomer (paragraaf 4.3).

Bij een dosisschatting die op deze manier wordt gedaan is geen rekening gehouden met het feit dat de radonconcentratie overdag mogelijk hoger is dan 's nachts (paragraaf 4.2). De werkelijke blootstelling van de werknemers kan daarom wat hoger liggen dan hier geschat, aangezien zij vooral overdag aanwezig zijn in de groeve. Daarnaast is bij de dosisschatting gekeken naar de jaargemiddelde radonconcentratie van de jaarmeting; hierbij is dus geen rekening gehouden met de seizoensinvloeden (paragraaf 4.2). Voor werknemers die vooral in de zomermaanden werken kan de blootstelling hoger zijn.

Samengevat laat Figuur 6.4 zien dat voor de meeste werknemers de effectieve jaardosis maximaal enkele mSv is. Een effectieve jaardosis boven 20 mSv (de dosislimiet voor blootgestelde werknemers) is voor de werknemers in de deelnemende groeven niet te verwachten.

6.6.2

Over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon

De blootstelling van de werknemers kan ook worden uitgedrukt als de over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tijd} , zoals besproken in paragraaf 2.3.4. Dit is voor elke werknemer (in vaste of tijdelijke dienst) in de deelnemende groeven gedaan. Deze waarden zijn vergeleken met twee afkapwaarden: 200 en 600 kBq·h/m³ in een totale periode van 1 jaar (zie paragraaf 2.3.4 voor meer informatie en voor de omrekening van afkapwaarde naar effectieve dosis).

Tabel 6.4 toont het aantal werknemers met C_{tijd} boven de afkapwaarden. Bij deze berekening is een aantal aannames gedaan:

- Voor alle berekeningen is de mediaan of het gemiddelde van de radonconcentratie (jaarmeting) in de desbetreffende groeve genomen. De blootstelling wordt onder- of overschat indien de werknemer lange tijd op een locatie werkt waar de radonconcentratie sterk afwijkt van de mediaan of het gemiddelde. Daarnaast worden seizoens- of etmaalvariëaties genegeerd.
- De werktijden van de meeste werknemers zijn niet exact bekend maar vallen binnen een bereik (bijvoorbeeld 400 tot 600 uur per jaar, zie Tabel 6.2). Bij de berekeningen is gerekend met het midden van het bereik (bij het eerder genoemde voorbeeld dus 500 uur per jaar). Voor groeven 2021-GR-09 en 2021-GR-54, die betreden worden door werknemers van hetzelfde bedrijf, was (voor 2023) bekend hoeveel tijd de werknemers in elk van de groeven doorbrachten. Hiervoor is C_{tijd} voor de werknemers in elk van de groeven berekend en gesommeerd.

Uit Tabel 6.4 blijkt dat 36 tot 44 van de 161 werknemers (22 tot 27%, ruwweg 25%) per jaar een blootstelling C_{tijd} hebben die hoger is dan 200 kBq·h/m³, en dat bij 7 werknemers (bijna 5%) de blootstelling hoger is dan > 600 kBq·h/m³. Het aantal werknemers boven de afkapwaarde is kleiner wanneer er in plaats van met de mediaan radonconcentratie wordt gerekend met de gemiddelde radonconcentratie (in de meeste groeven is het gemiddelde lager dan de mediaan). De hoogste waarde voor C_{tijd} is 888 kBq·h/m³ (uitgaande van de gemiddelde radonconcentratie) of 942 kBq·h/m³ (uitgaande van de mediaan radonconcentratie). Deze blootstelling is dus ongeveer 1,5 keer zo hoog als de hoge afkapwaarde. Wanneer deze blootstelling wordt omgerekend naar effectieve dosis (paragraaf 2.3.4), blijkt dat de effectieve dosis lager is dan de dosislimiet voor blootgestelde werknemers (20 mSv/jaar), ook in het ongunstigste geval (hoogste waarde voor DCC en evenwichtsfactor F).

Met name de werknemers van groeven 2021-GR-08, 2021-GR-11 en 2021-GR-27 hebben een hogere blootstelling dan de gehanteerde afkapwaarden. 2021-GR-08 en 2021-GR-27 zijn de twee groeven waar de hoogste radonconcentraties zijn gemeten. In 2021-GR-11 zijn de

radonconcentraties lager, maar werken de werknemers langer ondergronds.

Tabel 6.4 Aantal van de in het totaal 161 werknemers van alle groeven samen die naar schatting worden blootgesteld aan een bepaalde over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tijd} , in een periode van 1 jaar. Voor elke groeve is gerekend met de opgegeven werktijden en de mediane of gemiddelde radonconcentratie (jaarmeting) in de groeve.

Gerekend met radonconcentratie	Werknemers met jaarlijkse blootstelling			
	< 200 kBq·h/m ³	200 – 600 kBq·h/m ³	> 600 kBq·h/m ³	Totaal > 200 kBq·h/m ³
Mediaan	117 (73%)	37 (23%)	7 (4%)	44 (27%)
Gemiddeld	125 (78%)	29 (18%)	7 (4%)	36 (22%)

Het is mogelijk om C_{tijd} nauwkeuriger te berekenen. Dit kunnen de deelnemende groeven doen als zij, voor elke werknemer, beschikken over de werktijd per locatie en de radonconcentratie op deze locaties. Deze manier om de blootstelling van de werknemers te berekenen benadert dus de blootstelling die wordt bepaald met het gebruik van een persoonlijke radonmeter.

7 Discussie

7.1 Representativiteit van de deelnemende groeven

In totaal zijn twintig bedrijven geïdentificeerd die werkzaamheden doen in groeven met een vergunning voor intensief gebruik. Hiervan hebben 7 bedrijven (35%) deelgenomen aan het onderzoek. De soorten werkzaamheden die worden uitgevoerd in de niet-deelnemende bedrijven zijn veelal toeristische activiteiten, en komen daarmee grotendeels overeen met de werkzaamheden in de deelnemende bedrijven. Onder de niet-deelnemende bedrijven vallen ook enkele horecalocaties, met ondergrondse ruimtes die worden gebruikt voor bijvoorbeeld evenementen. Het is onbekend of in deze ruimtes mechanische ventilatie of verwarming is aangebracht. Dit kan invloed hebben op de radonconcentratie.

Het aantal werknemers in de niet-deelnemende groeven is onbekend. Het is aannemelijk dat het aantal werknemers en de verdeling van werktijden in de niet-deelnemende groeven niet sterk afwijkt van die in de deelnemende groeven.

In dit onderzoek is alleen gekeken naar werknemers die in dienst zijn bij de deelnemende groeven. Externe werknemers zijn dus niet meegenomen. Hieronder vallen bijvoorbeeld de verkopers op kerstmarkten die in de Valkenburgse groeven worden georganiseerd (deze zijn 6 weken per jaar open, 8-9 uur per dag [31, 32]).

Aan het onderzoek hebben geen groeven voor extensief gebruik deelgenomen. Gezien het geringe aantal uren dat werknemers deze groeven betreden, zijn de extensief gebruikte groeven niet relevant voor het onderzoek.

Samengevat geven de resultaten van dit onderzoek waarschijnlijk een goed beeld van de werkzaamheden en werktijden in groeven die zijn vergund voor intensief gebruik. Gezien de grote variaties in de morfologie van de groeven is het niet mogelijk om te bepalen of de deelnemende groeven representatief zijn wat betreft radonconcentraties.

7.2 Over de meetresultaten

De gemeten radonconcentraties in de deelnemende groeven liggen bijna allemaal boven het Nederlandse referentieniveau (100 Bq/m³). Bijna de helft van de metingen ligt ook boven het maximale Europese referentieniveau (300 Bq/m³). De radonconcentratie in de groeven is hoog vergeleken met de gemiddelde radonconcentratie die is gemeten bij reguliere, bovengrondse werkplekken in Zuid-Limburg (39,6 Bq/m³ [45]). Dit ligt in de lijn der verwachtingen: op verschillende ondergrondse werkplekken in het buitenland zijn ook hoge radonconcentraties gerapporteerd [34].

De radonconcentratie varieert per groeve, maar ook binnen één groeve (gangenstelsel) zijn variaties zichtbaar. Binnen één groeve is de hoogst

gemeten radonconcentratie een factor 2 tot 10 keer zo hoog als de laagst gemeten radonconcentratie. De lagere radonconcentraties zijn in de meeste gevallen gemeten in de buurt van ingangen of andere openingen (zoals aardpijpen of ventilatieschachten). We hebben niet verder onderzocht waar het verschil in radonconcentratie vandaan komt. Variatie in de hoeveelheid (natuurlijke) ventilatie speelt waarschijnlijk een belangrijke rol, maar ook variaties in de emanatie en exhalatie¹¹ van radon uit het gesteente en de morfologie kunnen bijdragen aan de verschillen [7].

Het IAEA geeft in SRS-33 een overzicht van radonconcentraties gemeten op ondergrondse werkplekken (met uitzondering van mijnen) [34]. In verschillende toeristengrotten in Duitsland, Hongarije, Ierland, Slovenië en de Verenigde Staten zijn radonconcentraties gevonden die variëren van enkele tientallen tot ongeveer 20.000 Bq/m³. In Duitsland is ook specifiek gekeken naar toeristenmijnen. In ongeveer de helft van de toeristenmijnen (42 in totaal) werden concentraties boven 800 Bq/m³ gevonden; de hoogste concentraties waren ongeveer 20.000 Bq/m³ [46]. Uit dit onderzoek blijkt dat de radonconcentratie in toeristenmijnen en -grotten hoger is dan in actieve mijnen, mogelijk vanwege het gebrek aan actieve ventilatie. Er is ook grote spreiding in de gerapporteerde radonconcentraties, wat te verwachten is op basis van de verschillen in gesteente en morfologie (zie ook paragraaf 4.2).

De hierboven genoemde ondergrondse werkplekken zijn mogelijk niet vergelijkbaar met de Nederlandse mergelgroeven. Zo kunnen er verschillen zijn tussen natuurlijk gevormde grotten en de door de mens gevormde groeven en mijnen, en tussen toeristengroeven met verschillende soorten gesteente. We hebben echter geen specifieke informatie kunnen vinden over radonconcentraties in oude kalksteengroeven¹². Een mogelijke uitzondering hierop is het onderzoek van Gazda *et al.* naar radon in Polen (regio Lublin) [47]. De auteurs hebben onder andere metingen verricht in een kalkmijn. Het lijkt te gaan om een oude groeve die niet langer in gebruik is, mogelijk de toeristengroeve in Chelm [48]. De gemeten radonconcentratie in deze groeve was ongeveer 5.000 Bq/m³.

Over het algemeen zijn er dus hogere radonconcentraties te vinden bij buitenlandse groeven en grotten dan er tijdens dit onderzoek bij de Nederlandse mergelgroeven is gevonden.

7.3 Verlaging van blootstelling

De blootstelling van werknemers in groeven kan op twee manieren worden verlaagd: door het verlagen van de radonconcentratie of door het beperken van de werktijd.

Het IAEA geeft aan dat het verlagen van de radonconcentratie in groeven kan worden bereikt door ongebruikte delen af te sluiten en ventilatie aan te brengen in de gebruikte delen [34]. Een nadeel van

¹¹ Emanatie is het loslaten van het radondeeltje van het moedermateriaal (bodem of bouw materiaal van bodemstoffen). Als het radondeeltje vrij is gekomen vanuit het moedermateriaal bevindt het zich in de poriën. Van daaruit kan het zich door middel van diffusie of convectorie naar de oppervlakte verplaatsen en vrijkomen naar de lucht, dat heet exhalatie (zie voor een uitgebreide uitleg paragraaf 4.1.3 van [6]).

¹² Zie voetnoot 4 op pagina 39.

ventileren, naast de mogelijk hoge kosten, is dat dit het binnenklimaat van de groeve (temperatuur, luchtvochtigheid) kan veranderen. Dit kan gevolgen hebben voor het beheer van cultuurhistorisch belangrijke delen van de groeven. Daarnaast zijn sommige mergelgroeven belangrijke leefgebieden voor vleermuizen, die afhankelijk kunnen zijn van het bijzondere klimaat in de groeve om te overleven [27].

Het nemen van stralingsbeschermingsmaatregelen, zoals beperking van de blootstellingstijd, is een goede optie om de blootstelling aan radon te verlagen [34]. De blootstellingstijd kan worden beperkt door werkzaamheden waar mogelijk bovengronds of in een deel van de groeve met lage radonconcentratie uit te voeren. De meeste werknemers in dit onderzoek werken slechts een deel van hun werktijd ondergronds: 95% van de werknemers is 800 uur per jaar of minder in de groeve aanwezig. Of reductie van de werktijd mogelijk is, zal sterk afhangen van de soort werkzaamheden.

7.4 Het gebruik van persoonsgebonden radonmeters

Persoonsgebonden radonmetingen kunnen informatie geven over de (jaarlijkse) blootstelling van een individuele werknemer. Dit was echter niet mogelijk met de zes metingen die in dit onderzoek zijn uitgevoerd. Dat had te maken met het kleine verschil tussen de achtergrondmeting en de persoonsgebonden meting. In de meeste gevallen is alleen een bovengrens voor de blootstelling gerapporteerd. Deze blootstelling geldt voor de meetperiode (oktober tot april) en kan dus niet zonder meer gebruikt worden om iets te zeggen over de totale blootstelling per jaar.

Indien in vervolgonderzoek gebruik wordt gemaakt van persoonsgebonden radonmetingen, raden wij het volgende aan:

- De radonconcentratie op de opslaglocatie moet zo laag mogelijk zijn. Bij 3 van de 4 deelnemende groeven was de concentratie hoger dan het aanbevolen maximum van 50 Bq/m³.
- De metingen moeten worden uitgevoerd in het hoogseizoen, wanneer de werknemers relatief veel uren in de groeve doorbrengen.

Op deze manier wordt het verschil tussen de achtergrondmeting en de persoonsgebonden meting zo groot mogelijk. In een vervolgmeting kan eerst een korte passieve radonmeting (zie paragraaf 3.1) worden uitgevoerd voor het bepalen van de radonconcentratie op de locatie waar de persoonsgebonden radonmeter buiten de werkzaamheden om wordt opgeslagen. Daarnaast is het bij een persoonsgebonden meting van belang dat de werknemers duidelijke instructies krijgen over het gebruik van de persoonsgebonden radonmeters, zodat deze gedurende de hele werktijd ondergronds worden gedragen.

Het resultaat van de hierboven beschreven persoonsgebonden meting is de blootstelling tijdens het hoogseizoen. Om de totale blootstelling per jaar te bepalen, zal ook de blootstelling tijdens het laagseizoen moeten worden bepaald. Hiervoor zijn de persoonsgebonden radonmeters minder geschikt. In plaats daarvan kan voor het laagseizoen de blootstelling worden geschat uit gemiddelde radonconcentraties (passieve radonmetingen) en de werktijd op de meetlocaties.

Deel C – Drinkwaterbedrijven

8 Over drinkwaterbedrijven

Wanneer radon uit de bodem vrijkomt, kan het zich verspreiden in de lucht of oplossen in water. Drinkwaterbedrijven zuiveren ruw grond- of oppervlaktewater tot veilig drinkwater. Tijdens deze zuiveringsprocessen kan het radon dat in het ruwe water is opgelost vrijkomen en zich ophopen in afgesloten ruimtes. Voordat we de onderzoeksopzet en resultaten bespreken van de radonmetingen bij drinkwaterbedrijven in Nederland, geven we in dit hoofdstuk een algemene beschrijving van het drinkwaterzuiveringsproces in Nederland. Vervolgens bekijken we welke werknemers betrokken zijn bij dit proces. Tot slot bespreken we de verwachte radonconcentraties en de evenwichtsfactoren in ruimtes waar het drinkwaterzuiveringsproces plaatsvindt.

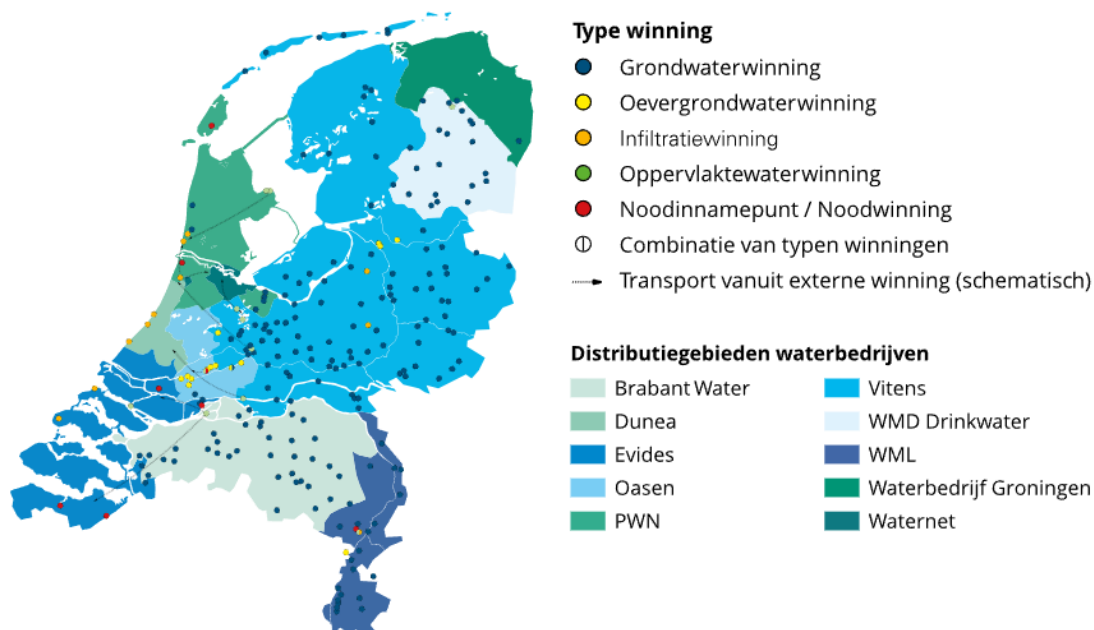
8.1 Drinkwaterzuivering in Nederland

Er zijn in Nederland tien drinkwaterbedrijven, die allemaal zijn aangesloten bij de brancheorganisatie Vewin. Ieder drinkwaterbedrijf heeft meerdere locaties waar water wordt gezuiverd. Deze worden zuiveringsstations, winningspunten, pompstations of productiestations genoemd. In dit rapport wordt de term (drinkwater)productiestation gebruikt. Informatie uit deze paragraaf is onder andere afkomstig uit vragenlijsten die drinkwaterbedrijven hebben ingevuld (zie paragraaf 9.2).

Er zijn vier varianten van waterwinning in Nederland [49] (cijfers uit 2023 [50]):

1. Grondwaterwinning (192 productiestations), waarbij water van circa 40 tot 300 m diepte wordt opgepompt.
2. Oevergrondwaterwinning (14 productiestations), waarbij de (relatief ondiepe) winputten zich in de buurt van een rivier bevinden. Het opgepompte water is rivierwater dat door de bodem gedeeltelijk is gezuiverd.
3. Infiltratiewinning (11 productiestations), waarbij oppervlaktewater in duinen wordt geïnfiltreerd en daarna weer opgepompt. In de duinen wordt het water gedeeltelijk gezuiverd.
4. Oppervlaktewaterwinning (10 productiestations), waarbij water direct uit het oppervlaktewater wordt gewonnen. Het oppervlaktewater komt met name uit de Rijn, de Maas en het IJsselmeer.

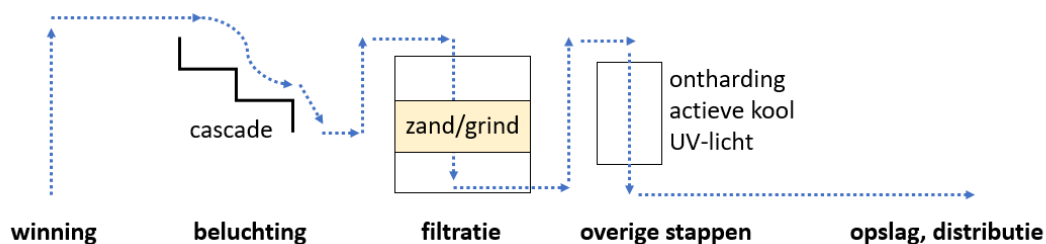
In Figuur 8.1 zijn alle productiestations in Nederland weergegeven waarbij hun ligging in Nederland en het type winning te zien is.



Figuur 8.1 Alle drinkwaterproductiestations in Nederland. Figuur uit [51].

Bij twee productiestations is er sprake van een combinatie van waterwinningstypen; deze productiestations zijn dan in de opsomming hierboven in beide categorieën meegeteld. In totaal zijn er 225 productiestations [51]. Daarnaast zijn er nog enkele punten voor noodwinningen. In Nederland is 59% van het drinkwater afkomstig uit grondwater, 34% uit oppervlaktewater, 6% uit oevergrondwater en 1% uit natuurlijk duinwater [51].

Per waterwinningstype en productiestation is het zuiveringsproces net iets anders [52-57]. Meestal is er sprake van een beluchtingsfase en van filtratie. Tijdens het beluchten worden gassen (methaan, koolmonoxide) uit het water gehaald en wordt zuurstof aan het water toegevoegd. Andere verontreinigingen, zoals ijzer en mangaan, vormen vlokken tijdens het beluchten. Beluchting vindt onder andere plaats in zogenaamde cascades (watervallen) of door middel van sproeiers. Tijdens de filtratie worden de ijzer- en mangaanvlokken, en andere vaste deeltjes, uit het water gehaald. Filtratie vindt plaats met behulp van zand- en grindfilters. Andere behandelingsstappen kunnen zijn: het ontharden van het water, zuiveren met actieve kool en zuiveren met UV-licht. Het gezuiverde water wordt vervolgens opgeslagen in reinwaterreservoirs en daarvandaan, bijvoorbeeld met een waterpomp of watertoren, gedistribueerd naar de gebruiker. In Figuur 8.2 is schematisch weergegeven hoe het drinkwaterzuiveringsproces eruit kan zien.



Figuur 8.2 Schematische weergave van het drinkwaterzuiveringsproces van grondwater, gebaseerd op de figuren op de websites van WML [58] en WMD Drinkwater [59]. Per waterwinningstype en productiestation is (de volgorde van) het zuiveringsproces net iets anders. Het is onder andere afhankelijk van de samenstelling van het ruwe water.

Bij sommige zuiveringsstappen, zoals tijdens beluchting met cascades, is de waterstroom in de ruimte open en kan radon dus makkelijk vrijkomen. De ruimtes met een open waterstroom zijn wel afgesloten. Vanwege de hygiëne moet contact met het water van buitenaf zo veel mogelijk worden voorkomen. Medewerkers komen alleen in deze ruimtes als het nodig is (bijvoorbeeld voor onderhoudswerkzaamheden). Daarnaast zijn er ook ruimtes waarbij de waterstroom in de ruimte gesloten is. Hier loopt het water door afgesloten metalen buizen of vindt de waterzuiveringsstap plaats in gesloten tanks.

8.2 Relevante werknemers

Uit een verkennend gesprek met medewerkers van een Nederlands drinkwaterbedrijf (zie ook paragraaf 9.1) blijkt dat voornamelijk twee groepen werknemers relevant zijn voor dit onderzoek [52]. Ten eerste de procesoperators, die veelal vast gestationeerd zijn op een productiestation en af en toe ook bij andere productiestations komen. Deze werknemers bedienen en controleren de machines in het productiestation en nemen monsters van het water voor onderzoek in een laboratorium. Ze werken veelal vanuit een kantoor of bedieningsruimte en maken daarnaast regelmatig (bijvoorbeeld dagelijks) een controleronde door het productiestation. De tweede groep werknemers zijn de onderhoudsmedewerkers. Deze werknemers werken in teams aan onder andere het onderhoud en schoonmaken van de cascades en de filterbakken. De onderhoudsmedewerkers kunnen werkzaamheden uitvoeren bij meerdere productiestations.

Ook tijdens de gesprekken met de andere Nederlandse drinkwaterbedrijven zijn deze twee relevante groepen werknemers voorgelegd. De meeste drinkwaterbedrijven bevestigden dat de procesoperator en onderhoudsmedewerker de relevante werknemers zijn [60]. Het kan voorkomen dat in sommige gevallen de werkzaamheden van een werknemer bestaan uit een combinatie van de hierboven beschreven taken van procesoperator en onderhoudsmedewerker, of dat het bedrijf bijvoorbeeld werknemers in dienst heeft die alleen specifieke taken uitvoeren (zoals monsternamen).

Productiestations zijn vijf dagen per week tijdens kantooruren bemenst. Buiten kantooruren is er een bereikbaarheidsdienst voor de

werknemers. Er zijn ook onbemande productiestations [52]. Veel processen zijn namelijk geautomatiseerd.

8.3 Verwachte radonconcentraties

In productiestations voor drinkwater worden hogere radonconcentraties verwacht dan op reguliere werkplekken of in woningen. Dit komt doordat het ruwe water radon bevat als gevolg van het langdurige ondergrondse verblijf [34, 61]. Het radon kan in het productiestation tijdens het zuiveringsproces vrijkomen. Bovendien vinden de zuiveringsstappen meestal plaats in afgesloten ruimtes, waardoor het radon zich in deze ruimtes kan ophopen. De verwachting is dat grondwater (inclusief oevergrondwater en infiltratiewater) meer radon zal bevatten dan oppervlaktewater¹³.

Verschillende studies hebben aangetoond dat radonconcentraties in drinkwaterproductiestations hoger kunnen zijn dan op reguliere werkplekken [61-64]. Ook in het eerdere RIVM-onderzoek uit 2016-2017 naar radon op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen in Nederland zijn bij deelnemende drinkwaterproductiestations radonconcentraties boven het referentieniveau (100 Bq/m³) gevonden [2].

Uit onderzoek naar radon bij Beierse drinkwaterproductiestations blijkt dat de radonconcentratie in het ruwe water afhankelijk is van de grondsoort [61]. In dat onderzoek is ook gekeken naar de verhouding tussen de radonconcentratie in de lucht en in het ruwe water. Deze verhouding varieert sterk per productiestation, vanwege verschillen in onder andere ventilatievoud en de mate waarin radon vrijkomt tijdens de verschillende zuiveringsprocessen (en uit andere bronnen zoals bouwmaterialen en de bodem). Het is daarom niet mogelijk om op basis van de grondsoort of radonconcentratie in ruw water nauwkeurig te voorspellen aan welke radonconcentratie werknemers worden blootgesteld.

Daarnaast blijkt uit Fins onderzoek dat de radonconcentratie bij productiestations van plaats tot plaats en van tijd tot tijd kan verschillen [65]. De radonconcentratie is bijvoorbeeld afhankelijk van de productie (volume water gezuiverd per tijdseenheid), de mate van ventilatie, de afstand tot verschillende procesinstallaties en het type procesinstallaties dat wordt gebruikt. Seizoens- en etmaalvariaties zijn daarmee ook te verwachten, vanwege variaties in waterproductie en eventueel ook ventilatiegedrag [63, 64].

Bij de meeste Nederlandse productiestations ligt de productie in de zomer hoger dan in de winter [51, 52]. Dit komt doordat mensen in de zomer meer water verbruiken voor bijvoorbeeld het sproeien van de tuin en het vullen van een zwembad. Grootschalige onderhoudswerkzaamheden, waarbij de waterstroom uit staat, worden meestal in de winter uitgevoerd [52, 66]. De blootstelling van de onderhoudsmedewerkers is daarmee ook seizoensafhankelijk.

¹³ Oppervlaktewater komt, vergeleken met grondwater, minder in contact met de bodem (waardoor het minder radon bevat) en meer in contact met de buitenlucht (waardoor radon makkelijk kan ontsnappen). Uitzoeken hoezeer de radonconcentratie afhangt van het type winning is in dit onderzoek echter geen onderzoeksvraag.

8.4 Verwachte evenwichtsfactor

De evenwichtsfactor F geeft aan in hoeverre de kortlevende radonochters een bijdrage leveren aan de stralingsdosis. Zoals beschreven in paragraaf 2.2.3 is de waarde van de evenwichtsfactor sterk afhankelijk van de lokale omstandigheden. Deze kunnen in de productiestations per ruimte variëren. In dit onderzoek zijn geen metingen gedaan om de evenwichtsfactor voor verschillende ruimtes van drinkwaterproductiestations te bepalen. In plaats daarvan wordt de evenwichtsfactor geschat op basis van literatuuronderzoek.

In de wetenschappelijke literatuur is informatie beschikbaar over de evenwichtsfactor bij Duitse, Oostenrijkse en Finse drinkwaterproductiestations. Deze studies worden hieronder in meer detail beschreven. Omdat niet bekend is in welke mate de situatie in Oostenrijk, Finland en Duitsland toepasbaar is op Nederland, wordt een waarde van $F = 0,4$ genomen. Deze sluit aan bij de hogere waarden uit het Finse onderzoek en de lagere waarden uit de Oostenrijkse en Duitse onderzoeken en kan daarmee dienen als een representatieve waarde. Daarbij nemen we een onzekerheidsmarge van 50%. De evenwichtsfactor is dan $F = 0,4 \pm 0,2$.

De waarde van $F = 0,4$ komt overeen met de standaardwaarde voor de evenwichtsfactor binnenshuis, zoals gebruikt door de ICRP en UNSCEAR [15, 16].

Gedetailleerdere informatie uit de literatuur

Uit een reviewartikel van Stietka *et al.* [64] uit 2017 blijkt dat er weinig onderzoek is gedaan naar de evenwichtsfactor bij drinkwaterproductiestations. De meeste onderzoekers gaan voor dosisbepalingen uit van de standaardwaarde $F = 0,4$ zoals aanbevolen door de ICRP en UNSCEAR [15, 16].

De enige metingen genoemd in het artikel van Stietka *et al.* zijn afkomstig uit Duitse en Oostenrijkse onderzoeken, en varieerden van gemiddeld $F = 0,37$ tot $F = 0,55$. De gemiddelde waarde uit het Oostenrijkse onderzoek is $F = 0,52$. Dit is het gemiddelde van vijf metingen waarbij de evenwichtsfactor varieerde tussen 0,26 en 0,59. Het is onbekend in welke ruimtes van het productiestation de metingen zijn uitgevoerd [67, 68]. De Duitse onderzoeken zijn uitgevoerd in de deelstaten Beieren ($F = 0,5$), Hessen ($F = 0,37$) en Baden-Württemberg ($F = 0,55$) [67]. Over het onderzoek in Hessen is geen verdere informatie gevonden. De Beierse studie is waarschijnlijk het onderzoek van Trautmannsheimer [69]. Hier worden waarden tussen $F = 0,3$ en 0,8 gerapporteerd. De auteur merkt op dat er in de meeste gevallen geen correlatie te vinden was tussen de waarde van de evenwichtsfactor en de condities in de ruimte. Rekening houdend met de verblijftijd in verschillende ruimtes, wijkt de evenwichtsfactor van het radon waar een werknemer gemiddeld aan blootstaat niet sterk af van de standaardwaarde van $F = 0,4$. In Baden-Württemberg zijn in totaal 341 metingen gedaan van de evenwichtsfactor [70]. De resultaten laten een grote spreiding zien rond de gemiddelde waarde van $F = 0,55$. Het is niet bekend in welke ruimtes van de productiestations de metingen zijn

gedaan, behalve dat het gaat om locaties met hoge radonconcentraties ($> 400 \text{ Bq/m}^3$).

Uit een recent onderzoek van Tyrväinen *et al.* bij drie Finse productiestations blijkt dat de evenwichtsfactor sterk kan variëren, ook binnen één ruimte [71]. Dit had te maken met variatie in de productie, de afstand tot de procesinstallatie en de mate van ventilatie. Enkele observaties uit dit onderzoek zijn:

- Bij alle metingen werd een grote fractie ongebonden dochters gevonden. Dit is toe te schrijven aan de lage aerosolconcentratie in de beschouwde productiestations. De evenwichtsfactor is laag wanneer de fractie ongebonden dochters hoog is (zie ook paragraaf 2.2.3).
- De laagste waarde (gemiddeld $F = 0,09$) werd gemeten bij een productiestation met grond- en oppervlaktewaterwinning, in een ruimte waar flotatie¹⁴ en filtratie werden uitgevoerd. Op andere plaatsen binnen dezelfde ruimte was de evenwichtsfactor echter hoger (tot gemiddeld $F = 0,25$). Deze variatie wordt door Tyrväinen *et al.* als volgt verklaard: de evenwichtsfactor is laag in de buurt van de installatie waaruit radon vrijkomt, omdat de radondochters nauwelijks tijd hebben gehad om in te groeien.
- De hoogste evenwichtsfactor (gemiddeld $F = 0,42$) werd gemeten in een filtratieruimte van een productiestation met infiltratiewinning.
- Bij een beluchtingsinstallatie van een productiestation met grondwaterwinning werd een gemiddelde evenwichtsfactor van $F = 0,28$ gemeten. Bij dit productiestation werd de productie bijna dagelijks enkele uren stilgelegd en daarna weer gestart (vanwege de aanwezigheid van een watertoren). De gemeten radonconcentratie, fractie ongebonden dochters en evenwichtsfactor fluctueerden ook. De evenwichtsfactor was het hoogst (tot ongeveer $F = 0,6$) wanneer de productie stillag, en het laagst (ongeveer $F = 0,1$) wanneer de productie net was gestart.

Samenvattend laat het onderzoek van Tyrväinen *et al.* zien dat er geen 'typische' waarde is voor de evenwichtsfactor bij drinkwaterproductiestations. De waarden zijn echter wel lager dan de evenwichtsfactoren gemeten in Oostenrijk en Duitsland.

Het is op basis van de beschikbare informatie over de Nederlandse productiestations niet mogelijk om te zeggen of deze het meest overeenkomen met die uit de Finse studie of uit de Oostenrijkse en Duitse onderzoeken.

¹⁴ Een zuiveringsproces waarbij verontreinigingen hechten aan luchtbelletjes en naar het oppervlak drijven.

9 Onderzoeksopzet drinkwaterbedrijven

9.1 Werving deelnemers

Voor dit onderzoek zijn alle tien drinkwaterbedrijven in Nederland benaderd, zowel telefonisch als via email. Daarnaast hebben we contact gehad met brancheorganisatie Vewin om informatie over het onderzoek te geven. Van twee drinkwaterbedrijven hebben we geen respons gekregen.

Acht drinkwaterbedrijven gaven aan aanvullende informatie over het onderzoek te willen ontvangen. Onderzoekers van het RIVM hebben met medewerkers van deze bedrijven (online) kennismakingsgesprekken gevoerd. Deze medewerkers hadden voornamelijk een leidinggevende of veiligheidskundige functie binnen het drinkwaterbedrijf. Tijdens deze gesprekken is uitgelegd wat radon is en zijn de achtergrond en de opzet van het onderzoek besproken. De werknemers van de drinkwaterbedrijven hebben uitleg gegeven over de drinkwaterproductie bij hun productiestations. De acht drinkwaterbedrijven hebben na het kennismakingsgesprek besloten om mee te doen aan het onderzoek.

9.1.1 *Selectie productiestations*

Voor dit onderzoek zijn metingen gedaan bij verschillende productiestations van elk drinkwaterbedrijf. Het doel was om bij zo veel mogelijk productiestations te meten.

Aan het begin van het onderzoek is onderscheid gemaakt tussen productiestations in drie verschillende regio's: Zuid-Limburg, het Gelders Rivierengebied en de rest van Nederland¹⁵. Uit eerder onderzoek is namelijk bekend dat in het Gelders Rivierengebied en Zuid-Limburg de radonconcentraties in woningen, op werkplekken en in publiekstoegankelijke gebouwen hoger zijn dan in andere delen van Nederland [2, 6]. Het is niet bekend of dit zich vertaalt naar hogere radonconcentraties bij de productiestations in deze regio's.

Na de indeling van de productiestations in subpopulaties zijn steekproefgroottes berekend (foutmarge $e = 0,05$, betrouwbaarheidsinterval = 95% (Z-score = 1,96) en spreiding = 0,5). Voor de regio's Gelders Rivierengebied en Zuid-Limburg zouden bijna alle productiestations moeten meedoen aan het onderzoek. Dit bleek niet haalbaar. In het verdere onderzoek is daarom niet gekeken naar subpopulaties, en is dus niet onderzocht of de verschillen tussen radonconcentraties in de drie regio's statistisch significant zijn.

Voor het uiteindelijke aantal geselecteerde productiestations was de haalbaarheid voor de drinkwaterbedrijven leidend. In overleg met de contactpersonen van de drinkwaterbedrijven is gekozen bij hoeveel, en in sommige gevallen ook bij welke, productiestations radonmetingen

¹⁵ Zuid-Limburg is hier gedefinieerd als het deel van Nederland waar postcodes beginnen met de cijfers 61, 62, 63 of 64, en het Gelders Rivierengebied als het deel van Nederland waar postcodes beginnen met 40, 41, 53, 65 en 66. Deze definitie is ook gebruikt in de recente meetcampagne naar radon in Nederlandse woningen, op reguliere werkplekken en voor het publiek toegankelijke gebouwen [45].

worden uitgevoerd. Dit was afhankelijk van de capaciteit van het drinkwaterbedrijf en de interesse in het onderzoek. Eén drinkwaterbedrijf heeft doorgegeven hoeveel productiestations mee konden doen (ruwweg de helft), en heeft de keuze van de stations overgelaten aan het RIVM. Bij het maken van deze keuze is eerst gekeken of er productiestations in het Gelders Rivierengebied of Zuid-Limburg liggen (zie hierboven). Deze zijn alle geselecteerd. De selectie van de overige productiestations is gedaan door op een kaart alternerende productiestations te selecteren. Op deze manier werd een goede geografische spreiding van de deelnemende productiestations behaald.

9.2 Bedrijfsvragenlijst

Alle deelnemende drinkwaterbedrijven hebben aan het begin van het onderzoek een vragenlijst ontvangen (de bedrijfsvragenlijst). Het eerste deel van de vragen ging over de productiestations (een omschrijving daarvan, inclusief welke metingen er worden gedaan), de verschillende ruimtes en de processen die in deze ruimtes plaatsvinden. Het tweede deel van de vragen ging over de werknemers die in de productiestations werkzaamheden uitvoeren. Later in het onderzoek is een aantal aanvullende vragen gesteld over de werknemers en hun werktijden.

Het doel van de bedrijfsvragenlijst was algemene informatie krijgen over:

- Welke informatie bij drinkwaterbedrijven al beschikbaar is over radon.
- In welke ruimtes, naast de beluchtings- en filtratieruimte, de werknemers langere tijd (> 5 uur per week) werkzaamheden uitvoeren.
- De werknemers binnen een bedrijf die werkzaamheden uitvoeren in de productiestations (het aantal en soort werknemers).
- Een schatting van het aantal uur per jaar dat een werknemer werkzaamheden uitvoert in verschillende ruimtes van het productiestation.
- Uit de kennismakingsgesprekken bleek dat werknemers vaak werkzaamheden uitvoeren bij verschillende productiestations. Daarom is ook gevraagd naar het aantal productiestations waar een werknemer gemiddeld werkt.

De informatie verkregen met behulp van deze vragenlijst is gebruikt bij het maken van een meetplan voor de passieve metingen, zie paragraaf 9.4. De bedrijfsvragenlijst is te vinden in bijlage 16, paragraaf 16.3.

9.3 Werkbezoeken

In april 2022 zijn twee onderzoekers van het RIVM op werkbezoek geweest bij één productiestation. In oktober 2022 is er nog een onderzoeker van het RIVM op werkbezoek geweest bij een productiestation van een ander drinkwaterbedrijf. Beide productiestations maakten gebruik van grondwaterwinning. Het doel van deze bezoeken was om een beeld te vormen van het drinkwaterzuiveringsproces en van de verschillende ruimtes in de productiestations. Tijdens de werkbezoeken hebben de RIVM-onderzoekers samen met de plaatselijke contactpersonen:

- Gekeken naar de ruimtes voor het uitvoeren van de radonmetingen op vaste plaatsen. Dit zijn bijvoorbeeld de filtratieruimte, beluchtingsruimte en bedieningsruimte.
- Gekeken hoe de radonmeters opgehangen kunnen worden. De radonmeter mag bijvoorbeeld niet te dicht tegen de wand of in de directe waterstroom geplaatst worden.

9.4 Passieve metingen

De passieve radonmetingen zijn uitgevoerd gedurende twee meetperioden (zie paragraaf 3.1 voor uitleg over passieve radonmetingen). Voor elk deelnemend productiestation zijn per meetperiode drie passieve radonmeters, inclusief ophanginstructie, opgestuurd per post¹⁶. De radonmeters zijn verpakt per productiestation en in een doos verstuurd van het RIVM naar de contactpersoon van het drinkwaterbedrijf. De contactpersoon distribueerde de radonmeters verder naar de productiestations. In totaal zijn 583 passieve radonmeters verstuurd naar 105 verschillende productiestations bij 8 drinkwaterbedrijven.

De contactpersonen van de deelnemende productiestations hebben dus per meetperiode een aantal radonmeters en een ophanginstructie ontvangen. In de instructie is beschreven hoe de radonmeters opgehangen dienen te worden (ze mogen bijvoorbeeld niet te dicht tegen een muur of plafond worden geplaatst). Daarnaast is beschreven dat de radonmeters bij voorkeur worden opgehangen in de volgende ruimtes:

- Ruimte 1: de eerste stap in het zuiveringsproces waar (onderhouds)medewerkers komen (bijvoorbeeld beluchtingsruimte).
- Ruimte 2: een andere stap in het zuiveringsproces waar (onderhouds)medewerkers komen (bijvoorbeeld een filtratieruimte).
- Ruimte 3: een ruimte waar medewerkers een langere tijd verblijven (bijvoorbeeld een kantoor, bedieningsruimte).

Op basis van deze informatie hebben de contactpersonen zelf de meetlocaties gekozen. Met 'meetlocatie' wordt in dit geval bedoeld: de ruimte van het productiestation waar de radonmeter heeft gehangen. Een productiestation kan dus meerdere (meestal drie) meetlocaties hebben. De meters mochten ontsmet worden voor het plaatsen; dit heeft geen invloed op de meting [72].

De contactpersonen bij de productiestations is verzocht om de meters voor de tweede meetperiode op te hangen op dezelfde locaties als de meters voor de eerste meetperiode.

De radonmeters zijn bij de verschillende productiestations op verschillende dagen opgehangen en verwijderd. De meettijd (aantal dagen) varieerde ook. De gemiddelde ophang- en verwijderdata zijn

¹⁶ Naar één productiestation zijn vier radonmeters per meetperiode verstuurd. Dit productiestation produceert drinkwater uit zowel grondwater als oppervlaktewater. Daarnaast zijn er twee productiestations die twee radonmeters per meetperiode hebben ontvangen, omdat de beschikbare tijdsinvestering van werknemers voor het plaatsen van de meters beperkt was.

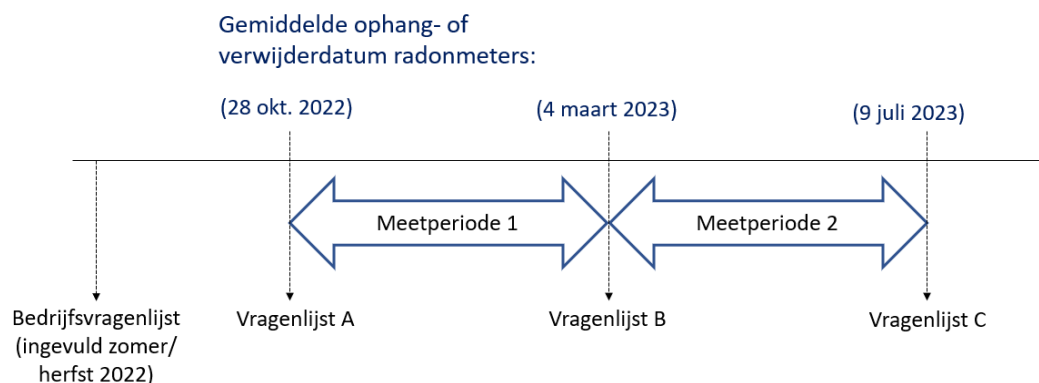
weergegeven in Figuur 9.1. Een aanvullend overzicht is gegeven in bijlage 17, Tabel 17.1.

Meetperiode 1 correspondeert ruwweg met herfst/winter, en meetperiode 2 met lente/zomer. De gemiddelde meettijd was 127 dagen in meetperiode 1 en 128 dagen in meetperiode 2.

De gebruikte radonmeters zijn beschreven in paragraaf 3.1.1. De volledige instructie voor het plaatsen van de radonmeters staat in bijlage 16, paragraaf 16.1.

9.5 Vragenlijsten bij de metingen

Alle deelnemende productiestations hebben drie vragenlijsten ontvangen (vragenlijsten A, B en C), zie Figuur 9.1. Vragenlijst A is verstuurd samen met de passieve radonmeters voor de eerste meetperiode. Vragenlijst B is verstuurd aan het einde van de eerste en het begin van de tweede meetperiode. Vragenlijst C is verstuurd aan het einde van de tweede meetperiode. De vragenlijsten zijn te vinden in bijlage 16, paragraaf 16.4 t/m 16.6.



Figuur 9.1 Schematische weergave van de meetperioden en verstuurde vragenlijsten. De radonmeters zijn bij de verschillende productiestations op verschillende dagen opgehangen en verwijderd. In de figuur zijn de gemiddelde ophang- en verwijderdata van de radonmeters in de twee meetperioden weergegeven.

Het doel van vragenlijst A was informatie verkrijgen over de productiestations waar de passieve radonmetingen zijn uitgevoerd en over de werknemers die daar werken. Er is gevraagd naar het type waterzuivering, de hoeveelheid water die gezuiverd wordt, en een omschrijving van de ruimtes waar radonmeters zijn opgehangen (onder andere de functie van de ruimte, of er installaties aanwezig zijn voor het zuiveren van water en hoe er wordt geventileerd). Daarnaast is gevraagd welke werknemers in de ruimte komen (procesoperators, onderhoudsmedewerkers, overige werknemers) en hoeveel uur per jaar zij gemiddeld in elke ruimte aanwezig zijn. Tot slot is voor iedere radonmeter gevraagd naar de ophangdatum.

In vragenlijst B is gevraagd naar de verwijderdatum van de eerste passieve radonmeter in de ruimte, en de ophangdatum van de tweede

meter. Verder is gevraagd naar de functie van de ruimte, om te controleren of dit overeenkomt met vragenlijst A.

In de laatste vragenlijst voor de productiestations, vragenlijst C, is gevraagd naar de verwijderdatum van de tweede passieve radonmeter. Ook hier is weer gevraagd naar de functie van de ruimte. Daarnaast zijn er vragen opgenomen over het materiaal waaruit de ruimte is opgebouwd en de diepte waarop ruw water wordt gewonnen (indien van toepassing).

Uit vragenlijsten A en B (respectievelijk B en C) kan de meettijd worden bepaald voor elke passieve radonmeter in meetperiode 1 (respectievelijk meetperiode 2).

Wanneer het productiestation vragenlijst A, B en/of C niet heeft ingevuld, ontbreekt informatie over de ophang- en/of verwijderdatum van de radonmeters. Deze gegevens zijn nodig om de radonmeters te laten uitlezen. In sommige gevallen is de datum telefonisch of via email doorgegeven. In andere gevallen is de ontbrekende datum geschat door de gemiddelde ophang- of verwijderdatum te nemen van de andere productiestations van hetzelfde bedrijf. Indien dit ook niet mogelijk was, of de geschatte (verwijder)datum onrealistisch¹⁷ was, is gerekend met de datum waarop de geretourneerde meters zijn ontvangen bij het RIVM minus negen dagen (de mediaantijd tussen verwijdering en ontvangst bij het RIVM van radonmeters met een bekende verwijderdatum).

9.6 Continue metingen

Continue radonmetingen zijn uitgevoerd tijdens twee soorten onderhoudswerkzaamheden (zie paragraaf 3.3 voor uitleg over continue radonmetingen). In overleg met de contactpersonen van de drinkwaterbedrijven is gekeken tijdens welke werkzaamheden de metingen konden worden uitgevoerd. De eerste metingen zijn gedaan tijdens klein onderhoud (een dagdeel, waterstroom blijft aan), en de tweede tijdens groot onderhoud (meerdere weken, waterstroom staat uit). De werkzaamheden en metingen zijn hieronder in meer detail beschreven. De gebruikte radonmeters zijn beschreven in paragraaf 3.3.1.

Het doel van deze metingen was om te verkennen hoe de radonconcentratie varieert tijdens de werkzaamheden in een filtratie- en/of beluchtingsruimte. De concentratie tijdens werkzaamheden in deze ruimtes kan anders zijn dan de gemeten gemiddelde radonconcentratie met de passieve radonmeter. Als er bijvoorbeeld tijdens de werkzaamheden in de beluchtings- of filtratieruimte deuren opengaan, kan de lucht met hogere radonconcentratie in de ruimte zich vermengen met de lucht met lagere radonconcentratie buiten de ruimte. Een ander voorbeeld is dat de radonconcentratie in de ruimte afneemt tijdens het uitzetten van de waterstroom. Hoeveel en hoe snel de radonconcentratie afneemt, is afhankelijk van de mate van ventilatie in een ruimte [65].

¹⁷ Bijvoorbeeld omdat de op deze manier geschatte verwijderdatum *later* was dan de datum waarop de meters retour ontvangen zijn bij het RIVM, of juist een onrealistisch lange tijd (enkele maanden) daarvoor.

Daarnaast kunnen de werkzaamheden zelf invloed hebben op hoeveel radon er (gemiddeld) vrijkomt uit het ruwe water. Een voorbeeld hiervan is het vervangen van actieve kool in filters. Het filter kan meer radon afvangen als de actieve kool net is ververst, waardoor er na onderhoudswerkzaamheden aan het filter minder radon vrijkomt in de ruimte [65]. De radonconcentratie kan ook toenemen tijdens werkzaamheden, zoals bij het terugspoelen van filters ('backwash', waarbij water in omgekeerde richting door het filter wordt gepompt om vuil los te maken) [61].

Ruimtes waar water wordt gezuiverd zijn tijdens regulier bedrijf veelal afgesloten. Werknemers komen hier dus voornamelijk tijdens onderhoudswerkzaamheden. De continue metingen kunnen daarom bijdragen aan een betere schatting van de blootstelling van de werknemers.

9.6.1 *Continue metingen 1: onderhoud sproeikoppen (klein onderhoud)*
Deze metingen zijn uitgevoerd in een productiestation voor het zuiveren van oevergrondwater. Per dag wordt hier ongeveer 40.000 m³ water gezuiverd.

De actieve metingen zijn uitgevoerd tijdens onderhoud in de gecombineerde beluchtings- en filtratieruimtes van dit productiestation. Dit is de eerste stap in het zuiveringsproces. Een schets van de ruimte is te vinden in Figuur 9.2a. Het opgepompte ruwe water komt de ruimte aan de bovenzijde binnen, waardoor het belucht wordt. Op een tussenvloer in de ruimte bevinden zich sproeikoppen waarmee het water op een ondergelegen zandfilter wordt gespreid. Na het zandfilter volgen de overige zuiveringsstappen. In het productiestation bevinden zich tien gecombineerde beluchtings- en filtratieruimtes naast elkaar op een gang.

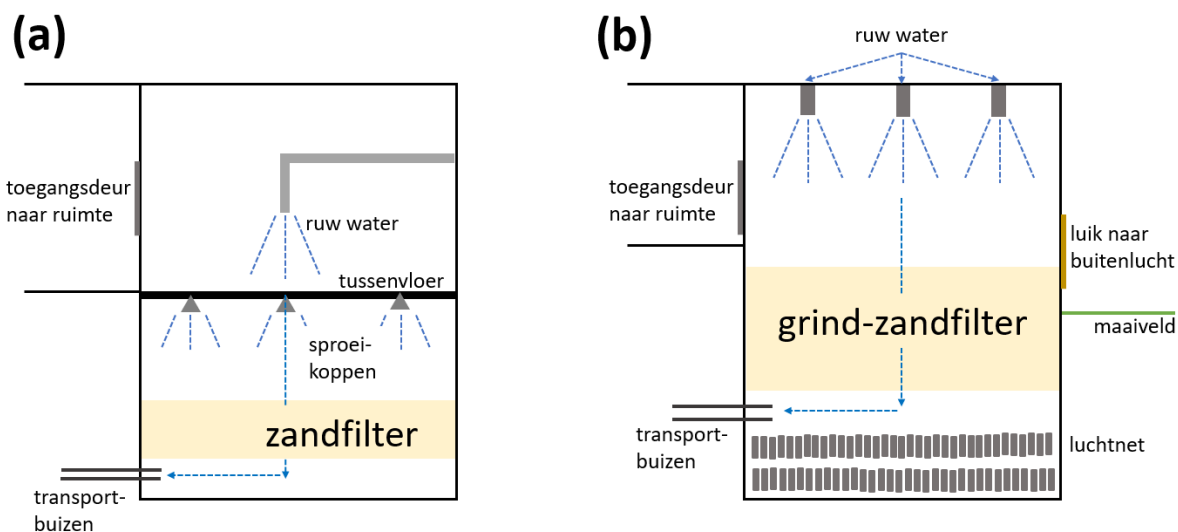
Het onderhoud bestond uit het met hoge druk doorspuiten van de sproeikoppen. Dit duurde ongeveer 15 minuten per ruimte en enkele uren in totaal voor alle ruimtes. De onderhoudsmedewerker stond hierbij op de tussenvloer van de ruimte. Tijdens het reinigen van de sproeikoppen stond de deur van de ruimte die gereinigd werd open. De overige ruimtes waren afgesloten. De waterstroom stond aan tijdens de onderhoudswerkzaamheden. De onderhoudsmedewerker droeg tijdens de werkzaamheden geen adembescherming. Wel werden beschermingsmiddelen, zoals een overall, gedragen om besmetting van het water zo veel mogelijk te voorkomen.

Voor deze continue metingen zijn drie radonmeters gebruikt. Deze zijn op de volgende plaatsen opgehangen:

- In een van de gecombineerde beluchtings- en filtratieruimtes, deze lag aan het einde van de gang.
- Op de gang, tegenover de ingang van de ruimte waar de eerste meter hing (ongeveer 1 m afstand van de toegangsdeur).
- Verderop in de gang tussen twee ingangen van een ruimte in, (op ongeveer 15 m afstand van de tweede meter, en op ongeveer 2 m afstand van de toegangsdeuren van de andere ruimtes).

De meters zijn de dag voor de werkzaamheden geplaatst.

Bij dit productiestation zijn in beide meetperioden ook passieve metingen uitgevoerd van de gang en een gecombineerde beluchtungs- en filtratieruimte (dit is niet dezelfde ruimte als waar de actieve metingen hebben plaatsgevonden, maar de ruimtes zijn identiek ingericht).



Figuur 9.2 Schets van de ruimtes waar onderhoud is uitgevoerd tijdens (a) de eerste set continue radonmetingen en (b) de tweede set continue radonmetingen. De blauwe pijlen geven de richting aan van de waterstroom. De schetsen zijn bedoeld om een algemeen beeld te geven van de indeling van de ruimtes. Karakteristieken zoals de relatieve afmetingen of het aantal sproeikoppen zijn niet nauwkeurig weergegeven.

9.6.2

Continue metingen 2: onderhoud nafilterruijnte (groot onderhoud)

Deze metingen zijn uitgevoerd in een productiestation voor grondwater. Het ruwe water wordt hier twee keer belucht en gefilterd, eerst in de voorfiltrerruimte en daarna in de nafilterruijnte. De continue metingen zijn uitgevoerd tijdens onderhoud in de nafilterruijnte.

Een schets van de nafilterruijnte is te vinden in Figuur 9.2b. Het water wordt via sproeikoppen in het plafond de ruimte in gesproeid, waarna het door een grind-zandfilter stroomt. Onder in de ruimte bevinden zich stenen met daaronder een luchtnet. Dit luchtnet kan gebruikt worden om het filter te reinigen: het luchtnet zorgt ervoor dat lucht of water van onder naar boven door het filter kan stromen, waardoor filtergrond en eventueel vuil loskomen. Het productiestation heeft zes voorfiltrerruimtes en zes nafilterruijntes, gelegen aan een centrale gang.

Het onderhoud bestond uit het vervangen van het filtergrind en het schoonmaken van de ruimte, inclusief de stenen van het luchtnet. Hierbij stond de waterstroom uit. Tijdens de werkzaamheden werd een slang van buitenaf via een luik in de nafilterruijnte gebracht, waarbij het luik werd afgedicht met een plastic zak. Via de slang werd het oude filtergrind/-zand verwijderd. In totaal duurden de werkzaamheden 27 dagen, van het uitzetten tot het weer aanzetten van de waterstroom.

Werknemers waren tijdens deze werkzaamheden niet continu in de ruimte (zie paragraaf 10.5, waar de resultaten van de continue metingen worden besproken, voor meer informatie).

De waterstroom in de andere voor- en nafilterruides in het productiegebouw stonden tijdens de werkzaamheden wel aan.

Voor deze continue metingen zijn twee radonmeters gebruikt. Deze zijn op de volgende locaties geplaatst:

- Direct buiten de toegangsdeur tot de nafilterruidte. Na het schoonmaken van de nafilterruidte is de meter in de ruimte zelf geplaatst (dit was eerder niet mogelijk vanwege de aard van de werkzaamheden).
- Op de gang van de nafilterruidtes, op enkele meters afstand van de toegangsdeur van de nafilterruidte.

De meters zijn geplaatst één dag nadat de waterstroom was afgesloten. Vier dagen na het plaatsen van de meters is begonnen met de werkzaamheden (voorbereidingen voor het verwijderen van het oude filtergrind).

Bij dit productiestation zijn ook passieve metingen uitgevoerd (alleen in de tweede meetperiode). Deze metingen zijn onder andere gedaan in een filtergebouw. Dit is niet hetzelfde filtergebouw als waar de actieve metingen zijn uitgevoerd, maar de gebouwen zijn identiek ingericht.

9.7 Blootstelling van de werknemers

In dit onderzoek worden geen blootstellingsberekeningen gedaan voor individuele werknemers. Wel worden enkele algemene schattingen gedaan. De blootstelling, uitgedrukt als de over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tijd} , wordt geschat op basis van opgegeven informatie over werktijden en de gemeten radonconcentraties op verschillende plaatsen. Deze blootstelling (C_{tijd}) wordt vervolgens omgerekend naar effectieve dosis, waarbij gebruik wordt gemaakt van de DCC's zoals besproken in paragraaf 2.2.2 en de evenwichtsfactor zoals besproken in paragraaf 8.4.

De blootstelling van de werknemers bij drinkwaterbedrijven (C_{tijd} , voor een totale periode van één jaar) wordt als volgt geschat:

1. De blootstelling van een werknemer in een bepaalde ruimte wordt berekend. Dit is het product van de gemeten radonconcentratie en de werktijd in de ruimte (uur per jaar), zoals opgegeven in vragenlijst A. Indien in beide meetperiodes metingen zijn gedaan, wordt gerekend met de gemiddelde radonconcentratie.
2. De blootstelling van een werknemer bij een bepaald productiestation wordt berekend. Dit is de som van de blootstellingen in de verschillende ruimtes van het productiestation (meestal 3 ruimtes), berekend in stap 1. De blootstelling omvat dus de blootstelling in ruimtes waar water wordt gezuiverd en in kantoor-/bedieningsruimtes (zie paragraaf 9.4 voor een beschrijving van de ruimtes.).

3. De totale blootstelling van een werknemer is de som van de blootstelling bij de bezochte productiestations (berekend in stap 2). Uit de bedrijfsvragenlijst is bekend dat een werknemer van drinkwaterbedrijf X gemiddeld n_x productiestations per jaar bezoekt, maar niet welke dit zijn. Daarom wordt een berekening gedaan met de Monte-Carlomethode:
 - a. Uit de productiestations van drinkwaterbedrijf X worden willekeurig n_x productiestations getrokken. Dit is een 'trekking met terugleggen' – dat wil zeggen dat een productiestation meerdere keren kan voorkomen in de selectie van n_x productiestations. Een trekking zonder terugleggen is niet mogelijk, omdat bij sommige drinkwaterbedrijven minder productiestations hebben meegedaan aan het onderzoek dan een werknemer gemiddeld bezoekt.
 - b. De trekking wordt $100 \times W_x$ gedaan, waarbij W_x het aantal werknemers van drinkwaterbedrijf X is. Voor elke werknemer worden dus 100 berekeningen gedaan.
 - c. In elke berekening wordt ook de totale werktijd (uur per jaar) bepaald: de som van werktijden in de verschillende ruimtes van de n_x getrokken productiestations.
 - d. De resultaten worden vervolgens gecorrigeerd: indien de totale werktijd hoger is dan 2000 uur per jaar, wordt de blootstelling geschaald met een factor 2000/werktijd. In vragenlijst A is namelijk opgegeven hoelang een werknemer gemiddeld *aanwezig* is in een ruimte (dat wil zeggen: de bezettingstijd). Dit kan meer zijn dan voltijds werken (2000 uur per jaar). De totale werktijd in stap 3c) kan ook > 2000 uur per jaar worden als in de trekking toevallig productiestations met een hoge bezettingstijd worden gekozen. De correctie zorgt ervoor dat de blootstelling van de werknemer overeenkomt met een werktijd van maximaal 2000 uur. Effectief wordt de werktijd 'verdeeld' over de verschillende ruimtes en productiestations volgens de verhouding die is opgegeven in de vragenlijsten.

Stap 3 wordt voor elk drinkwaterbedrijf gedaan, waarna de resultaten gezamenlijk worden geanalyseerd. Hierbij is aangenomen dat de distributie van berekende blootstellingen hetzelfde is als de distributie van de werkelijke blootstellingen van de werknemers.

Uit de resultaten kan bijvoorbeeld worden bepaald welk percentage van de werknemers (dat wil zeggen: trekkingen) een jaarlijkse blootstelling heeft die hoger is dan de afkapwaarden van 200 en 600 kBq·h/m³ (die overeenkomen met 2000 uur werken bij respectievelijk het Nederlandse en het maximale Europese referentieniveau, zie paragraaf 2.3.4 voor meer informatie).

Bovenstaande berekeningen worden apart gedaan voor procesoperators en onderhoudsmedewerkers, de twee groepen werknemers die voor dit onderzoek relevant zijn. In vragenlijst A is ook gevraagd naar overige werknemers (inclusief externen) die de ruimte betreden. De blootstelling is niet bepaald voor deze overige werknemers, omdat er geen informatie beschikbaar is over het aantal werknemers en het aantal productiestations dat zij bezoeken. Daarnaast variëren de

werkzaamheden van deze overige werknemers per productiestation, waardoor het niet realistisch is om de blootstellingen van overige werknemers bij verschillende productiestations bij elkaar op te tellen.

De op bovenstaande manier berekende blootstelling is uitdrukkelijk een schatting. De gebruikte aannames worden besproken samen met de resultaten van de berekening, in paragraaf 10.6.1.

10 Resultaten drinkwaterbedrijven

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste resultaten van de radonmetingen bij drinkwaterbedrijven besproken. In bijlage 17 zijn aanvullende resultaten weergegeven.

De deelnemende drinkwaterbedrijven hebben hun eigen resultaten ontvangen. Daarnaast hebben alle drinkwaterbedrijven een uitnodiging ontvangen om (online) met de onderzoekers van het RIVM de eigen resultaten te bespreken. Hier hebben drie drinkwaterbedrijven gebruik van gemaakt. De onderzoekers van het RIVM hebben ook meer toelichting gegeven over radon en de resultaten van dit onderzoek bij een overleg van de veiligheidskundigen van de Nederlandse drinkwaterbedrijven. Tot slot zijn de resultaten van de radonmetingen besproken tijdens een bijeenkomst met de deelnemende drinkwaterbedrijven. Een beleidsmedewerker van SZW was hier ook bij aanwezig. Tijdens deze bijeenkomsten is ook gesproken over de blootstelling van werknemers (paragraaf 10.6) en het verlagen van de blootstelling (zie paragraaf 11.3).

10.1 Overzicht deelnemende drinkwaterbedrijven

Uiteindelijk hebben 8 van de 10 drinkwaterbedrijven, en 105 van de 225 productiestations, deelgenomen aan het onderzoek (dat wil zeggen: er zijn radonmeters naar deze productiestations verstuurd). Voor informatie over het aantal bedrijven en productiestations dat radonmeters heeft teruggestuurd, zie paragraaf 10.3.1.

10.2 Resultaten vragenlijsten

10.2.1 *Over de drinkwaterbedrijven en productiestations*

Bij de deelnemende drinkwaterbedrijven komen alle typen drinkwaterzuivering voor die in paragraaf 8.1 zijn beschreven. Bij de meeste deelnemende productiestations wordt grondwater gezuiverd, zie Tabel 10.1.

Tabel 10.1 Overzicht van de soorten waterzuivering bij de deelnemende productiestations (die vragenlijst A hebben ingevuld).

Soort zuivering	Aantal
Grondwater	54
Oevergrondwater	6
Infiltratiewater	1
Oppervlaktewater	1
Grondwater, oevergrondwater, oppervlaktewater	1
Totaal	63

De deelnemende productiestations verschillen van elkaar wat betreft omvang en uitvoering. Zo varieert de diepte van de grondwaterwinning van 20 tot 120 m. Ook lijkt de frequentie van onderhoud en de type installaties voor het zuiveren van het ruwe water te variëren per productiestation. Dit is terug te zien in de opgegeven werktijden per

ruimte (zie verder paragraaf 10.4) en de omschrijvingen van de installaties per ruimte.

De mediaan van de gerapporteerde productie in de zomer van drinkwater is circa 8 miljoen liter/dag. Voor de helft van de productiestations ligt de productie in de zomer tussen circa 4 en 18 miljoen liter/dag (25^e en 75^e percentiel van de gerapporteerde drinkwaterproductie). Bij ongeveer driekwart van de deelnemende productiestations die vragenlijst A hebben ingevuld ligt de productie in de zomer hoger dan in de winter. De mediane zomerproductie ligt een factor 1,2 hoger dan de mediane winterproductie.

In de bedrijfsvragenlijst is gevraagd of de waterstroom aan of uit staat wanneer verschillende typen werknemers een ruimte betreden. De meeste bedrijven gaven aan dat dit per station en ruimte verschilt, en dat dit ook afhankelijk is van de reden waarom de werknemer de ruimte betreedt. De waterstroom in gesloten installatieonderdelen blijft bijvoorbeeld aan als een werknemer elders in de ruimte onderhoud verricht of een monster neemt. Bij grote werkzaamheden aan het installatieonderdeel zelf staat de waterstroom meestal uit. Het kan dan wel zo zijn dat de waterstroom van andere installaties in dezelfde ruimte of elders in het gebouw aan staat.

10.2.2 *Over de werknemers*

In de bedrijfsvragenlijst is gevraagd naar het aantal werknemers (procesoperators, onderhoudsmedewerkers) die werkzaamheden uitvoeren bij productiestations, en naar de leeftijdsverdeling van deze werknemers. In totaal hebben zes van de deelnemende acht bedrijven de bedrijfsvragenlijst ingevuld. Geen van de werknemers bij productiestations van deze bedrijven was jonger dan 18 jaar. Van de overige twee bedrijven is informatie ontvangen via de mail.

Het totale aantal werknemers bij productiestations van de deelnemende bedrijven is ongeveer¹⁸ 1000. Een exact getal kan niet worden gegeven, omdat sommige bedrijven het aantal fte (fulltime-equivalenten) hebben doorgegeven, en niet het aantal personen. Twee bedrijven hebben daarnaast opgemerkt dat de procesoperators ook onderhoudswerkzaamheden uitvoeren.

In vragenlijst A, ingevuld door de productiestations, is gevraagd naar de werktijden van procesoperators en onderhoudsmedewerkers in elke ruimte waar radonmeters hebben gehangen. Daarnaast is ook gevraagd hoelang overige werknemers hier komen, en welke werknemers dit zijn. Deze resultaten worden gepresenteerd in paragraaf 10.4.

10.3 **Resultaten passieve metingen**

10.3.1 *Distributie van radonmeters*

Een overzicht van de verstuurde en retour ontvangen radonmeters is weergegeven in Tabel 10.2. In de eerste meetperiode is 60% van de radonmeters geretourneerd. In de tweede meetperiode lag het

¹⁸ Hierbij moet worden opgemerkt dat de meeste drinkwaterbedrijven rapporteren dat ze enkele tientallen procesoperators en onderhoudsmedewerkers in dienst hebben. Bij één bedrijf ligt dit aantal veel hoger (honderden). Het aantal is gecontroleerd door de contactpersoon van het bedrijf in kwestie.

percentage geretourneerde meters iets hoger (66%). Van de in totaal 367 geretourneerde meters konden er 348 worden geanalyseerd door de leverancier. De resterende 19 meters heeft de leverancier – om onbekende reden – niet ontvangen.

Van één bedrijf (15 deelnemende productiestations, 45 radonmeters) zijn na de eerste meetperiode geen radonmeters retour ontvangen. Geen van de productiestations van dit bedrijf heeft vragenlijst A ingevuld. Later bleek dat door capaciteitsproblemen de radonmeters bij dit bedrijf niet zijn opgehangen. In de tweede meetperiode zijn geen radonmeters naar dit bedrijf verstuurd.

Tabel 10.2 Overzicht van de distributie van de passieve radonmeters. Tussen haakjes staat het percentage meters vermeld dat is geretourneerd/geanalyseerd, ten opzichte van het aantal verstuurde meters.

	Meetperiode 1	Meetperiode 2	Totaal
Meters (verstuurd)	314	269	583
Meters (retour)	189 (60%)	178 (66%)	367 (63%)
Meters (geanalyseerd)	182 (58%)	166 (62%)	348 (60%)

Een overzicht van de productiestations die radonmeters hebben ontvangen en geretourneerd is weergegeven in Tabel 10.3: 65 productiestations hebben in ten minste één meetperiode radonmeters opgehangen en geretourneerd; 60 productiestations hebben in beide meetperioden meters opgehangen. De overige 5 productiestations (4 in meetperiode 1 en 1 in meetperiode 2) hebben dus slechts in één meetperiode deelgenomen.

Tabel 10.3 Overzicht van de drinkwaterbedrijven en productiestations die passieve radonmeters hebben ontvangen en geretourneerd. Tussen haakjes staat het percentage productiestations vermeld dat radonmeters heeft geretourneerd ten opzichte van het aantal productiestations waar radonmeters naar zijn verstuurd.

	Meetperiode 1	Meetperiode 2
Drinkwaterbedrijven (verstuurd)	8	7
Drinkwaterbedrijven (retour)	7	7
Productiestations (verstuurd)	105	90
Productiestations (retour)	64 (61%)	61 (68%)

10.3.2 Gemeten radonconcentraties

In totaal zijn 348 van de 583 verstuurde radonmeters geretourneerd en geanalyseerd. Tabel 10.4 geeft een samenvatting van de gemeten waarden. Van de in totaal 348 metingen lagen er 122 (35%) boven het Nederlandse referentieniveau (100 Bq/m³). Daarnaast lagen 51 van de in totaal 348 metingen (15%) boven het maximale Europese referentieniveau (300 Bq/m³).

Radonconcentraties boven het Nederlandse referentieniveau zijn gevonden bij alle 7 bedrijven en bij 64% van de productiestations (met ten minste 1 geldige meting). Bij 6 van de 7 bedrijven en 34% van de productiestations is ook ten minste 1 meetlocatie met radonconcentratie > 300 Bq/m³. Meer informatie hierover is te vinden in Tabel 17.2 en Tabel 17.3 in bijlage 17.

Tabel 10.4 Resultaten van de passieve radonmetingen bij de drinkwaterproductiestations. Tussen haakjes is het percentage metingen boven de referentieniveaus gegeven.

	Meetperiode 1 (herfst/winter)	Meetperiode 2 (lente/zomer)
Aantal geldige metingen	182	166
Aantal metingen boven Nederlands referentieniveau (100 Bq/m ³)	64 (35%)	58 (35%)
Aantal metingen boven maximaal Europees referentieniveau (300 Bq/m ³)	27 (15%)	24 (14%)
Laagste waarde (Bq/m ³)	< 10 (opm. 1)	< 10 (opm. 1)
Hoogste waarde (Bq/m ³)	> 17.700 (opm. 2)	> 23.100 (opm. 2)
Mediaanwaarde (Bq/m ³)	61	68
Gemiddelde waarde (Bq/m ³)	375	398

Opmerkingen bij Tabel 10.4:

1. De meetwaarde was lager dan de detectielimiet. Dit was het geval voor 2 metingen in meetperiode 1 en 6 metingen in meetperiode 2.
2. De radonconcentratie was hoger (bij de gebruikte meettijd) dan het meetbereik van de radonmeter, waardoor deze verzadigd is geraakt. Dit was het geval voor 1 meting in meetperiode 1 en 1 meting in meetperiode 2.

De hoogste radonconcentratie in beide meetperioden is gemeten in dezelfde ruimte. Het betreft een cascaderuimte. Alle andere gemeten radonconcentraties liggen onder 10.000 Bq/m³.

In totaal zijn er metingen gedaan op totaal 192 unieke meetlocaties (waarvan bij 182 is gemeten in de eerste meetperiode en bij 166 in de tweede meetperiode). Hiervan is op 150 meetlocaties zowel in meetperiode 1 als in meetperiode 2 de radonconcentratie gemeten (met een geldig meetresultaat). Bij de overige meetlocaties is dus alleen in één van de twee meetperioden gemeten. Daarnaast was het voor 6 meetlocaties (bij 2 productiestations) niet mogelijk om de resultaten van meetperiode 1 met meetperiode 2 te vergelijken, omdat de desbetreffende productiestations vragenlijsten B en C niet hadden ingevuld.

Bij ongeveer de helft van de meetlocaties is de hoogste radonconcentratie gevonden in meetperiode 1 (herfst/winter), bij de overige meetlocaties juist in meetperiode 2 (lente/zomer). Voor 126 van de 150 meetlocaties is het verschil in radonconcentratie tussen de twee meetperioden een factor 2 of lager. In bijlage 17 zijn de resultaten van meetperioden 1 en 2 tegen elkaar uitgezet in Figuur 17.1 en Figuur 17.2.

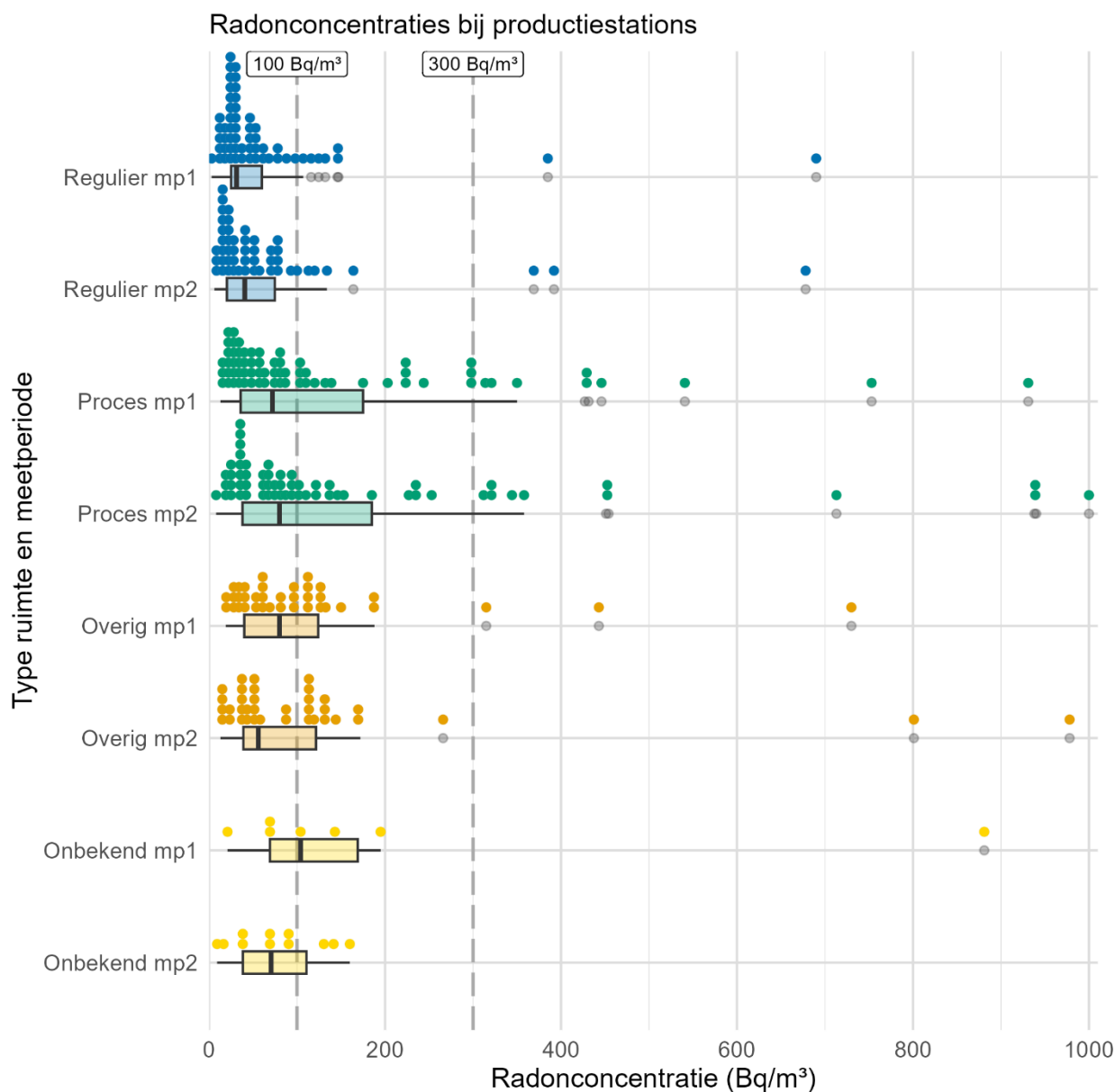
In beide meetperioden ligt de mediaan van de radonconcentraties ver onder het gemiddelde. Er zijn dus veel locaties waar de radonconcentratie relatief laag is, en er is een klein aantal locaties met een (zeer) hoge radonconcentratie. Dit blijkt ook uit Figuur 10.1. In

deze figuur is de gemeten radonconcentratie weergegeven per meetperiode en per soort ruimte (voor informatie over hoe de radonconcentratie afhangt van andere karakteristieken van de meetlocatie, zie paragraaf 10.3.3). De indeling van de soorten ruimtes is als volgt:

- Regulier: een ruimte die in de vragenlijst is omschreven als kantoor, bedieningsruimte, operatorruimte, controleruimte, werkplek, kantine of keuken.
- Proces: een ruimte waar in vragenlijst A is aangegeven dat er installaties aanwezig zijn voor het zuiveren van water. Hieronder vallen bijvoorbeeld cascades, plaatbeluchters en filters.
- Overig: overige ruimtes in het productiestation. Hieronder vallen bijvoorbeeld trappenhuisen, gangen en pompenruimtes.
- Onbekend: het productiestation heeft vragenlijst A niet ingevuld. In sommige gevallen was er wel een beschrijving van de ruimte beschikbaar (uit vragenlijst B of C) maar kon niet worden opgemaakt of het gaat om een ruimte met procesinstallaties. In totaal zijn er 18 metingen uitgevoerd in een onbekende ruimte, waarvan 7 in meetperiode 1 en de overige in meetperiode 2.

Figuur 10.1 laat ook zien dat de radonconcentratie in de reguliere ruimtes over het algemeen lager is dan in de procesruimtes. Dit geldt voor zowel de mediane concentratie als de hoogst gemeten radonconcentratie.

In totaal zijn er geldige metingen gedaan bij 60 verschillende reguliere ruimtes. Bij 15% van deze ruimtes (9 ruimtes) is in tenminste 1 meetperiode een radonconcentratie van boven de 100 Bq/m³ gevonden. Dit is lager dan het percentage metingen boven de 100 Bq/m³ bij alle ruimtes, namelijk 35%. De hoogste radonconcentratie gemeten in een reguliere ruimte was 690 Bq/m³.



Figuur 10.1 Boxplots en cloudplots van de passieve radonmetingen in verschillende ruimtes bij de productiestations per meetperiode. Bij de cloudplots geeft iedere punt een meetwaarde weer. Bij de boxplots geven de linker- en rechterkant van de box het 25^e en 75^e percentiel weer (de interkwartielafstand), de verticale lijn in de box is de mediaan. De horizontale lijnen ('whiskers') geven aan welke waarden binnen 1,5 keer de interkwartielafstand liggen. Ook weergegeven in de figuur zijn het Nederlandse en maximale Europese referentieniveau (100 en 300 Bq/m^3). Meetperiode 1 (mp1) correspondeert ruwweg met de herfst/winter en meetperiode 2 (mp2) met de lente/zomer. Een omschrijving van de indeling van de type ruimtes staat beschreven in paragraaf 10.3.2. De -as is afgekapt op 1000 Bq/m^3 , 20 meetpunten zijn niet weergegeven. Het gaat om 9 metingen in procesruimtes in meetperiode 1, 6 metingen in procesruimtes in meetperiode 2, 3 metingen in overige ruimtes in meetperiode 1 en 2 metingen in overige ruimtes in meetperiode 2.

- 10.3.3 *Karakteristieken van meetlocaties met hoge en lage radonconcentraties*
- In deze paragraaf wordt nader gekeken naar enkele meetlocaties met hoge en lage radonconcentraties, waarbij vragenlijst A is ingevuld door het productiestation. Het doel is om te zien of bepaalde karakteristieken met name voorkomen bij locaties met een hoge, of juist een lage radonconcentratie. De volgende karakteristieken worden daarbij bekeken:
- Een omschrijving van de ruimte.
 - Het type ventilatie. Bij de meeste meetlocaties is het ventilatievoud¹⁹ onbekend.
 - Het type winning en de diepte van de winning (merk op dat in dit onderzoek met name is gekeken naar grondwaterwinning).
 - De regio waarin het productiestation ligt. Twee regio's worden beschouwd:
 - **Regio 1:** Zuid-Limburg en het Gelders Rivierengebied, waar de radonconcentratie in woningen en op reguliere werkplekken hoger ligt dan in de rest van Nederland [2, 6].
 - **Regio 2:** de rest van Nederland niet zijnde regio 1.

Er zijn geen statistische tests gedaan, en de resultaten van de analyse kunnen ook niet gebruikt worden om met zekerheid te zeggen dat één of meerdere karakteristieken correleren met hoge of lage radonconcentraties. Het onderzoek is namelijk opgezet om radonconcentraties bij drinkwaterbedrijven te bepalen, en niet om deze concentraties te verklaren op basis van de karakteristieken van de ruimte. Wel kan de analyse suggesties voor nader onderzoek opleveren.

In totaal zijn voor vier groepen (dertig meetlocaties) de karakteristieken nader bekeken. Dit zijn (de tabellen zijn te vinden in bijlage 17, paragraaf 17.2):

- Groep 1.** De tien meetlocaties met de hoogste radonconcentraties. De meetlocaties bevinden zich bij negen verschillende productiestations. In totaal zijn hier achttien metingen gedaan. Zie Tabel 17.4.
- Groep 2.** 10 willekeurig getrokken meetlocaties met radonconcentratie $< 100 \text{ Bq/m}^3$ in ten minste 1 meetperiode. De meetlocaties bevinden zich bij negen verschillende productiestations. In totaal zijn hier negentien metingen gedaan. Zie Tabel 17.5.
- Groep 3.** De vijf reguliere ruimtes (onder andere kantoren, bedieningsruimtes) met de hoogste radonconcentraties. In totaal zijn hier negen metingen gedaan. Zie Tabel 17.6.
- Groep 4.** Vijf willekeurig getrokken reguliere ruimtes met radonconcentratie $< 100 \text{ Bq/m}^3$ in ten minste 1 meetperiode. In totaal zijn hier negen metingen gedaan. Zie Tabel 17.7.

Uit de analyse blijkt dat hoge radonconcentraties voorkomen in zowel regio 1 als regio 2, bij verschillende soorten winningen (en verschillende winningsdieptes), en in ruimtes met verschillende soorten ventilatie.

Of een bepaalde soort ventilatie samenhangt met een hoge radonconcentratie kan op basis van deze gegevens niet worden gezegd.

¹⁹ Het aantal keren per uur dat de lucht in de ruimte wordt ververst.

Hetzelfde geldt voor de soort winning: er zijn voornamelijk metingen gedaan bij productiestations voor (oever)grondwaterwinning, en slechts bij één productiestation voor infiltratiewinning en één voor oppervlaktewinning (zie Tabel 10.1). Bij dat productiestation voor oppervlaktewinning vindt voorfiltratie van rivierwater plaats; de radonconcentratie op de meetlocaties (kantoor en filterhal) was $< 100 \text{ Bq/m}^3$. Op basis van de metingen bij dit ene productiestation is niet te zeggen of dit representatief is voor alle productiestations voor oppervlaktewater. Hier is vervolgonderzoek voor nodig.

Meetlocaties in Zuid-Limburg en het Gelders Rivierengebied (regio 1) komen vaker voor in de groepen met hoge radonconcentratie (groepen 1 en 3) dan in de groepen met lage radonconcentratie (groepen 2 en 4). De radonconcentratie bij drinkwaterbedrijven hangt dus mogelijk samen met de geografische locatie, met hogere radonconcentraties in Zuid-Limburg en het Gelders Rivierengebied. Op basis van de beschikbare data kan dit echter niet met zekerheid worden gezegd.

Verder is uit de analyse op te maken dat radonconcentraties in procesruimtes (met installaties voor het zuiveren van water) hoger zijn dan in reguliere ruimtes (vergelijk groepen 1 en 2). Dit is besproken in paragraaf 10.3.2.

Een hoge radonconcentratie in één ruimte betekent niet altijd dat de radonconcentratie in andere ruimtes ook hoog is. Bij 5 van de 9 productiestations waar meetlocaties met de hoogste radonconcentraties zijn gevonden (groep 1), is ook ten minste 1 ruimte aanwezig met een radonconcentratie $< 100 \text{ Bq/m}^3$.

10.4 Werknemers op de meetlocaties

Voor 176 van de 192 unieke meetlocaties met ten minste één geldig meetresultaat is informatie beschikbaar over de werknemers die de ruimte betreden. Tabel 10.5 laat zien hoe vaak elk type werknemer is genoemd in de vragenlijsten. De ruimtes worden bijna allemaal betreden door procesoperators en onderhoudsmedewerkers. De categorie 'overig' omvat technici, procestechnici, monsternemers, schoonmakers, kantoorpersoneel, controllers en andere werknemers van het bedrijf. De categorie 'extern' omvat aannemers, gasten, bouwpersoneel en vendors. De hoogst gemeten radonconcentratie in ruimtes waarvoor vragenlijst A is ingevuld²⁰ en waar externen komen, is 132 Bq/m^3 .

In vragenlijst A is gevraagd hoelang elke soort werknemer (procesoperator, onderhoudsmedewerker, overige werknemer) gemiddeld in elke ruimte werkt. Tabel 10.6 geeft een samenvatting van deze resultaten, waarbij de resultaten voor de verschillende soorten werknemers zijn opgeteld. Uit Tabel 10.6 blijkt dat werktijden in procesruimtes typisch kort zijn (tot 200 uur per jaar). Hetzelfde geldt voor de overige ruimtes. In de reguliere ruimtes, zoals bedieningsruimtes, komen langere werktijden voor.

²⁰ Mogelijk zijn niet alle externe werknemers opgegeven in vragenlijst A (het is ook mogelijk dat externen in sommige gevallen zijn ingedeeld als procesoperators/onderhoudsmedewerkers). Uit een bijeenkomst met de veiligheidskundigen van de Nederlandse drinkwaterbedrijven (september 2024, dus aan het einde van het onderzoek) is gebleken dat drinkwaterbedrijven voor onderhoudswerkzaamheden soms externen inhuren (dit kunnen ook werknemers van andere drinkwaterbedrijven zijn).

Tabel 10.5 Aantal keren dat werknemers zijn genoemd, in alle ruimtes met ten minste 1 geldig meetresultaat (176 unieke meetlocaties) en in de ruimtes met ten minste 1 meetresultaat boven 100 Bq/m³ (69 unieke meetlocaties).

Soort werknemer	In alle ruimtes (176)	In ruimtes met > 100 Bq/m ³ (69)
Procesoperator	166	64
Onderhoudsmedewerker	163	63
Overig (excl. externen)	37	12
Extern	12	2

Tabel 10.6 Aantal keren dat een bepaalde werktijd is ingevuld als antwoord op de vraag: 'Hoeveel uur per jaar is een werknemer gemiddeld aanwezig in de ruimte?' in vragenlijst A. Alleen de antwoorden van de meetlocaties met tenminste 1 geldig meetresultaat (176 unieke meetlocaties) zijn in de tabel weergegeven. Let op: de tabel geeft dus geen informatie over het aantal werknemers met een bepaalde werktijd in een ruimte.

Werktijd (uur per jaar)	Reguliere ruimte	Procesruimte	Overige ruimte
0 tot 200	73	152	65
200 tot 400	9	7	5
400 tot 600	3	4	6
600 tot 800	5	2	0
800 tot 1000	4	0	0
1000 tot 1200	3	1	0
1200 tot 1400	0	0	0
1400 tot 1600	1	0	0
1600 tot 1800	0	0	0
Meer dan 1800	13	0	0

10.5 Resultaten continue metingen

Continue metingen zijn gedaan tijdens twee verschillende soorten onderhoudswerkzaamheden. De metingen zijn, voor zover mogelijk, vergeleken met de resultaten van de passieve radonmetingen. Hieruit blijkt dat de passieve metingen in deze gevallen een redelijk beeld geven van de radonconcentraties waar werknemers aan blootstaan tijdens de onderhoudswerkzaamheden.

Er zijn echter geen continue metingen gedaan tijdens groot onderhoud (zonder waterstroom) in een ruimte met hoge (> 300 Bq/m³) passief gemeten radonconcentratie. Redenen hiervoor zijn dat de radonconcentratie bij veel productiestations voorafgaand aan de continue metingen nog onbekend was en dat wij afhankelijk waren van de planning van groot onderhoud bij de drinkwaterbedrijven. Groot onderhoud vindt maar eens in een langere tijdperiode (soms meerdere jaren) plaats.

De meetonzekerheid van de continue radonmeter is niet weergegeven in onderstaande figuren (Figuur 10.2 en Figuur 10.3). Deze is < 13% bij 300 Bq/m³ per 1 uur (1-uursgemiddelde) en < 3% bij 300 Bq/m³ per 24 uur (24-uursgemiddelde) (zie paragraaf 3.3.1).

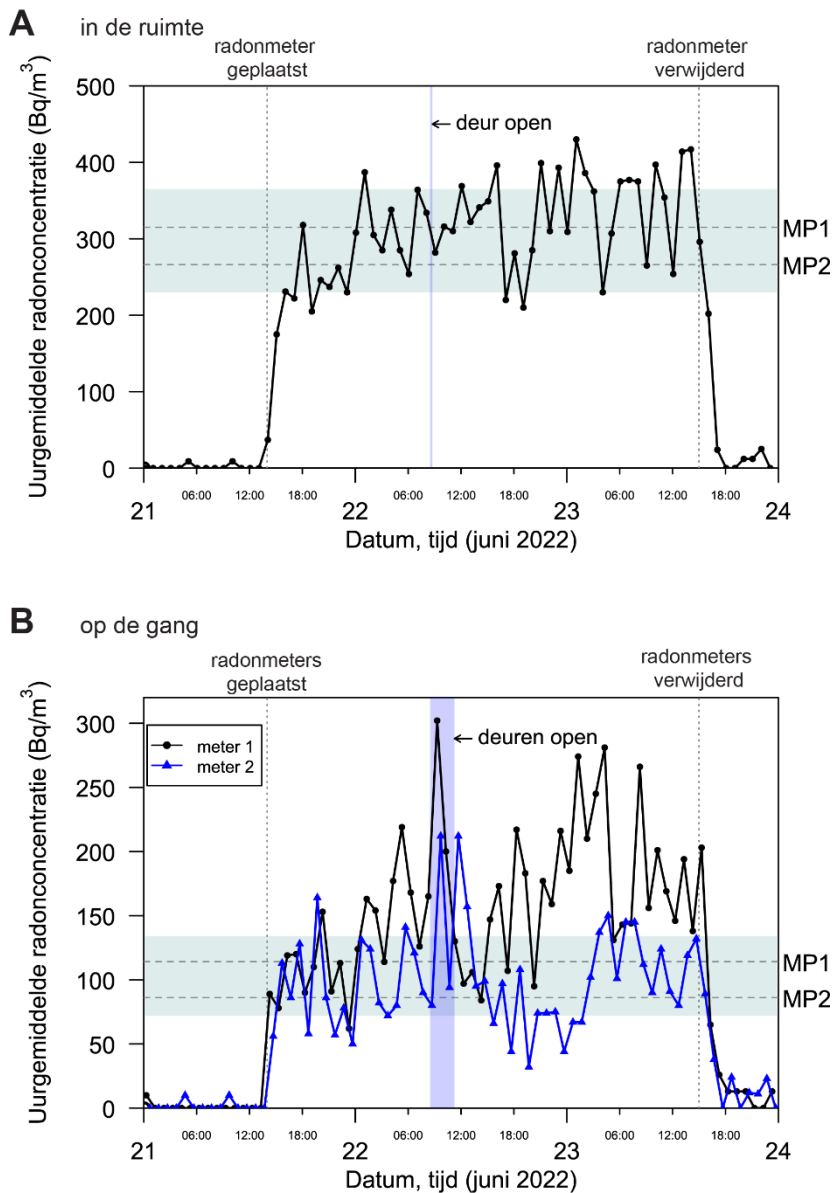
10.5.1 *Continue metingen 1: onderhoud sproeikoppen (klein onderhoud)*

De eerste set continue metingen werd gedaan tijdens het reinigen van de sproeikoppen in gecombineerde beluchtings- en filtratieruimtes. Dit is kortdurend onderhoud (een dagdeel), waarbij de waterstroom aan staat. Er zijn drie meters opgehangen: één in een beluchtings- en filtratieruimte, en twee op de gang buiten de ruimtes. De gemeten radonconcentraties zijn weergegeven in Figuur 10.2.

In Figuur 10.2 is te zien dat de gemeten radonconcentratie fluctueert gedurende de periode dat de meters op de gang of in de ruimte zijn geplaatst. De variaties in radonconcentraties zijn niet toe te schrijven aan bijvoorbeeld het openen of sluiten van deuren. Hiervoor is de periode dat een ruimte open is (15 minuten) te kort vergeleken met de meettijd waarover een gemiddelde radonconcentratie wordt bepaald (1 uur).

De gemiddelde radonconcentratie in de ruimte tijdens de continue metingen is 323 Bq/m^3 (het gemiddelde van de gemeten uurgemiddelde waarden, van 6 uur na het plaatsen van de meters tot het verwijderen van de meters). Dit komt redelijk overeen met de resultaten van de passieve metingen die zijn uitgevoerd in een vergelijkbare ruimte²¹, zie ook Figuur 10.2a. Voor deze werkzaamheden zal dus het resultaat van de passieve metingen kunnen worden gebruikt om de blootstelling van de werknemers te schatten. In de hal worden met de continue metingen gemiddeld radonconcentraties van 100 en 165 Bq/m^3 gevonden (meter 2, respectievelijk meter 1). Ook dit is in redelijke overeenstemming met de passieve metingen.

²¹ De passieve metingen zijn niet tegelijk uitgevoerd met de continue metingen. De passieve metingen zijn uitgevoerd tussen september 2022 en januari 2023 (meetperiode 1) en tussen januari 2023 en juni 2023 (meetperiode 2), terwijl de actieve metingen zijn uitgevoerd in juni 2022.



Figuur 10.2 De radonconcentratie gemeten tijdens het reinigen van de sproeikoppen in tien gecombineerde beluchtings- en filtratieruimtes (eerste set continue metingen). **Figuur A** geeft de radonconcentratie in één van de ruimtes weer, en **figuur B** de radonconcentratie gemeten op twee verschillende locaties op de gang voor de ruimtes. Meter 1 was geplaatst aan het einde van de gang, tegenover de ruimte uit **figuur A**. Meter 2 was verderop in de gang geplaatst. In de periode van 08.30 tot 11.15 vond in ten minste één van de ruimtes ongeveer een kwartier lang werkzaamheden plaats, waarbij de deur van de ruimte open was. Deze tijd is gemarkeerd met een gekleurd verticaal vlak in de figuren. In de **figuur** is aangegeven wanneer de radonmeters zijn geplaatst en verwijderd. Daarnaast zijn twee radonconcentraties gemarkeerd: MP1 en MP2, het resultaat van passieve radonmetingen (in een vergelijkbare ruimte en op dezelfde gang) tijdens respectievelijk de eerste en tweede meetperiode. Het gekleurde horizontale vlak geeft de onzekerheid weer (2 standaarddeviaties) van de passieve metingen.

10.5.2 *Continue metingen 2: reinigen van nafilterruimte (groot onderhoud)*

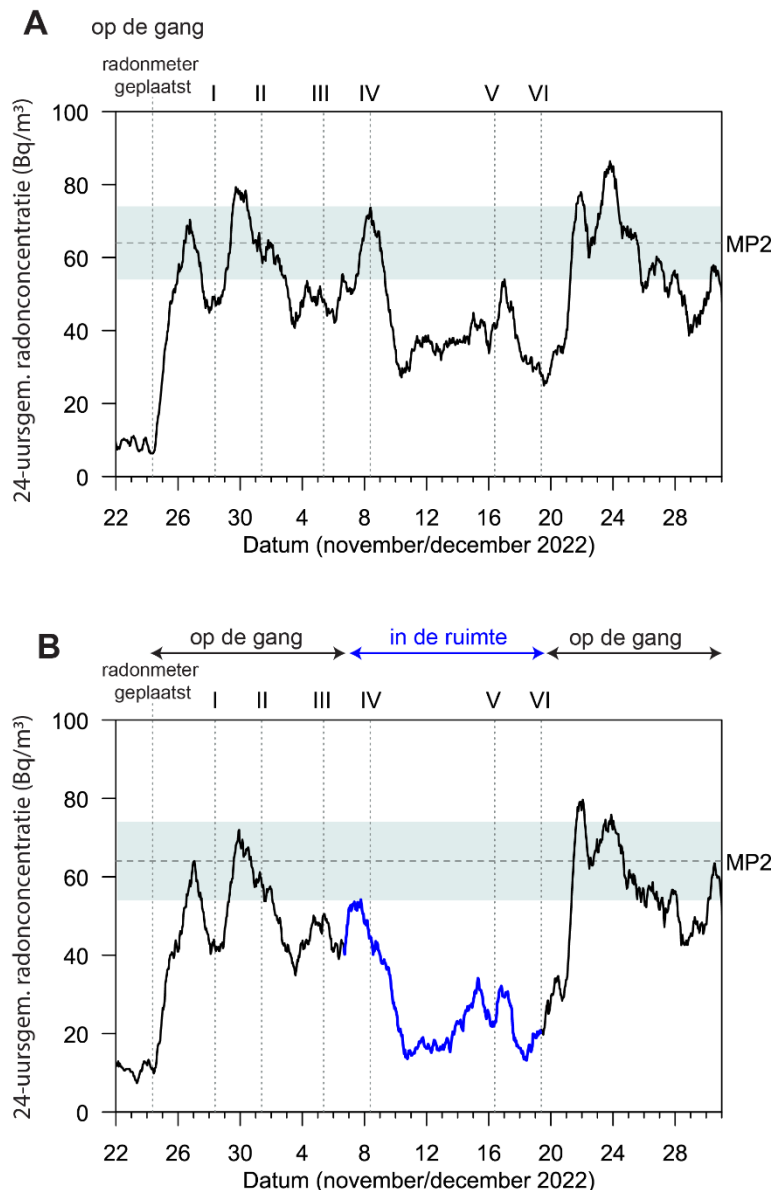
De tweede set continue metingen werd gedaan tijdens het vervangen van filtergrind in een nafilterruimte. Als onderdeel van de werkzaamheden werd ook de ruimte schoongemaakt. Er zijn twee radonmeters geplaatst: één vlak buiten de nafilterruimte die werd gereinigd, en één iets verderop in de gang waar de filterruimtes aan liggen. De waterstroom in de nafilterruimte is uitgezet op de dag voordat de radonmeters werden geplaatst. Er is dus niet gemeten wat de radonconcentratie is vóór de start van de werkzaamheden. Ook was het niet mogelijk om een radonmeter te plaatsen in de nafilterruimte, terwijl de waterstroom aan stond of tijdens de eerste werkzaamheden (die onder andere bestonden uit het reinigen van de ruimte met een hogedrukspuit).

Figuur 10.3 toont de gemeten (24-uursgemiddelde) radonconcentratie tijdens deze onderhoudswerkzaamheden. De radonconcentratie fluctueert maar blijft onder 100 Bq/m^3 (de maximale uurgemiddelde radonconcentratie ligt iets hoger, rond 162 Bq/m^3). Vanaf 6 december is één van de radonmeters 14 dagen verplaatst naar de nafilterruimte zelf (aangegeven met de blauwe lijn in Figuur 10.3b). Gedurende deze periode werden in de nafilterruimte lagere radonconcentraties gemeten dan op de gang, waarschijnlijk doordat er een directe verbinding was tussen de ruimte en de buitenlucht via een luik waardoor het filtergrind werd verwijderd.

De gemeten radonconcentraties in de hal tijdens de continue metingen zijn gemiddeld ongeveer $40\text{--}50 \text{ Bq/m}^3$. Dit komt redelijk overeen met de resultaten van de passieve meting die zijn uitgevoerd in een vergelijkbaar filtergebouw²². In dit geval zal het gebruik van het passieve meetresultaat voor het schatten van de blootstelling tijdens werkzaamheden dus een redelijk beeld geven van de werkelijke situatie.

Werknemers zijn tijdens de werkzaamheden niet continu in de ruimte. Sommige werkzaamheden, zoals de eerste reinigingsstap (uitgevoerd op 23 november, één dag voor het plaatsen van de radonmeters), zijn geautomatiseerd. De procesoperator heeft tijdens het onderhoud kort bijgehouden welke werkzaamheden per dag worden uitgevoerd. Hieruit blijkt dat werknemers met name in de ruimte zijn tijdens het verwijderen van het oude filtergrind en schoonmaken van de ruimte (3 werkdagen, 5-6 uur per dag, gemarkeerd met II in Figuur 10.3) en tijdens het schoonmaken van de stenen van het luchtnet (2 werkdagen, 5-6 uur per dag, gemarkeerd met III in Figuur 10.3). Ook heeft de procesoperator aangegeven dat er gedurende een aantal dagen geen werkzaamheden zijn uitgevoerd (7 december en 9 t/m 15 december).

²² De passieve metingen zijn dus niet uitgevoerd in hetzelfde filtergebouw als de actieve metingen. Bij het productiestation zijn twee (identiek uitgevoerde) filtergebouwen aanwezig. Ook waren de passieve en actieve meter niet op precies dezelfde locatie in het gebouw geplaatst. De passieve metingen zijn daarnaast niet tegelijk met de continue metingen uitgevoerd. De passieve metingen zijn uitgevoerd tussen februari en juni 2023 (meetperiode 2), terwijl de actieve metingen zijn uitgevoerd in november en december 2022.



Figuur 10.3 De radonconcentratie gemeten tijdens het reinigen van de nafilterruidtes (tweede set continue metingen). **Figuur A** geeft de radonconcentratie weer op de gang vlak buiten één van de ruimtes, en **figuur B** de radonconcentratie die verderop in de gang is gemeten. Een deel van de tijd was de radonmeter in de ruimte zelf geplaatst; dit is weergegeven in blauw. Zes tijden zijn gemarkeerd met verticale stippellijnen: **(I)** voorbereidingen voor het verwijderen van het oude filtergrind; **(II)** start verwijderen van het oude filtergrind en schoonmaken van de ruimte (dit duurt drie werkdagen); **(III)** start schoonmaken van de stenen van het luchtnet en testen van het luchtnet (dit duurt twee werkdagen); **(IV)** inbrengen van vier lagen nieuw filtergrind gevolg door een week zonder werkzaamheden; **(V)** inbrengen van nog twee lagen nieuw filtergrind; en **(VI)** filter op inloop. Daarnaast is een radonconcentratie gemarkeerd: MP2, het resultaat van passieve radonmetingen in een vergelijkbaar filtergebouw tijdens de tweede meetperiode. Het gekleurde horizontale vlak geeft de onzekerheid weer (2 standaarddeviaties) van de passieve meting.

10.6 Blootstelling van werknemers

De blootstelling van werknemers bij drinkwaterbedrijven kan worden geschat aan de hand van de gemeten radonconcentraties, de gerapporteerde werktijden in de verschillende ruimtes, en de gerapporteerde informatie over het aantal productiestations die werknemers gemiddeld bezoeken. Bij deze schatting worden ook de belangrijkste onzekerheden en aannames besproken. Hieronder wordt in paragraaf 10.6.1 de blootstelling uitgedrukt als de over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon. Daarna, in paragraaf 10.6.2, wordt de effectieve dosis besproken.

- 10.6.1** *Over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon*
 Als maat voor de jaarlijkse blootstelling kijken we in eerste instantie naar de over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tijd} ($\text{kBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, per jaar). Deze blootstelling is berekend voor de werknemer in elke ruimte (uit de gemeten radonconcentratie en de gerapporteerde werktijd) en voor elk productiestation (waarbij wordt gesommeerd over de verschillende ruimtes). De totale geschatte blootstelling van een werknemer is vervolgens bepaald door de blootstelling te sommeren van n_x willekeurig getrokken productiestations van het drinkwaterbedrijf in kwestie. Hier is n_x het aantal productiestations dat een werknemer van het bedrijf gemiddeld in een jaar tijd bezoekt. Meer informatie over deze Monte-Carlomethode is te vinden in paragraaf 9.7.

De berekening van de geschatte blootstelling wordt voor de procesoperators en onderhoudsmedewerkers van elk drinkwaterbedrijf afzonderlijk gemaakt. Vervolgens worden de resultaten van de drinkwaterbedrijven gezamenlijk geanalyseerd.

Slechts in enkele ruimtes en bij enkele productiestations worden blootstellingen gevonden die hoger zijn dan de gehanteerde afkapwaarden (200 en $600 \text{ kBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, per jaar). Dit komt doordat de werktijden in ruimtes met een hoge radonconcentratie over het algemeen kort zijn (enkele tientallen of enkele honderden uren per jaar). Procesruimtes, waar over het algemeen veel radon is, worden alleen betreden door werknemers wanneer dat noodzakelijk is voor onderhoud.

Werknemers verrichten echter bij meerdere productiestations werkzaamheden, en staan dus langer bloot aan radon dan verwacht op basis van de werktijden in één enkele ruimte bij één enkel productiestation. Het geschatte percentage van de werknemers, voor de gehele sector, met een *totale* blootstelling boven de afkapwaarden is weergegeven in Tabel 10.7.

Histogrammen van de blootstelling van een werknemer (in één ruimte, bij één productiestation en in totaal) zijn te vinden in Figuur 17.3 en Figuur 17.4 in bijlage 17. Histogrammen van de totale blootstelling van procesoperators en onderhoudsmedewerkers zijn ook te vinden in Figuur 10.4 in paragraaf 10.6.2.

Tabel 10.7 Percentage werknemers (procesoperators en onderhoudsmedewerkers) dat naar schatting wordt blootgesteld aan een over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tijd} , boven de afkapwaarden. Percentages zijn afgerond op één significant cijfer (voor percentages lager dan 10) of twee significante cijfers.

	Werknemers met jaarlijkse blootstelling:			
	< 200 kBq·h/m³	200 - 600 kBq·h/m³	> 600 kBq·h/m³	Totaal > 200 kBq·h/m³
Procesoperator	71%	19%	10%	29%
Onderhoudsmedewerker	74%	22%	4%	26%

Uit Tabel 10.7 blijkt dat ongeveer 25–30% van de werknemers een geschatte blootstelling heeft boven 200 kBq·h/m³. Bij ongeveer 5–10% van de werknemers ligt de geschatte blootstelling boven 600 kBq·h/m³.

Paragraaf 2.3.4 beschrijft hoe de blootstelling in kBq·h/m³ kan worden omgerekend naar effectieve dosis in mSv. Hieruit blijkt dat een jaarlijkse blootstelling gelijk aan de hoge afkapwaarde (600 kBq·h/m³) overeenkomt met een effectieve jaardosis van enkele mSv (1,1 tot 12 mSv, afhankelijk van de gebruikte waarde voor de DCC en de evenwichtsfactor). Dit ligt onder de dosislimiet voor blootgestelde werknemers (20 mSv). Meer informatie over de effectieve dosis van de werknemers bij drinkwaterbedrijven is te vinden in paragraaf 10.6.2.

De percentages in Tabel 10.7 zijn uitdrukkelijk schattingen. Een nauwkeurigere schatting van de blootstelling (eventueel uitgevoerd door de drinkwaterbedrijven zelf) kan worden gedaan door voor individuele werknemers te rekenen met de daadwerkelijke, individuele werktijd per ruimte. De blootstelling kan ook worden bepaald met persoonsgebonden radonmeters. Dit bespreken we in paragraaf 11.4.

Hieronder worden de aannames die bij het berekenen zijn gedaan nader bespreken. Daarna volgt informatie over de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse.

Gedane aannames, en beperkingen van de rekenwijze:

1. De gerapporteerde werktijden in vragenlijst A zijn een (ruwe) schatting. In veel gevallen heeft de contactpersoon van het productiestation of drinkwaterbedrijf aangegeven dat de werktijd lastig in te schatten is. Exacte gegevens zijn meestal niet beschikbaar. Eén bedrijf heeft een geschatte werktijd per soort ruimte (bedieningsruimte, beluchtingsruimte) doorgegeven in de bedrijfsvragenlijst omdat werktijden per meetlocatie lastig in te schatten waren. De werktijd (of bezettingstijd) in een ruimte kan per jaar ook sterk variëren, afhankelijk van het benodigde onderhoud.
2. Er is gerekend met de gemiddelde radonconcentratie (passief gemeten). Eventuele seizoensgebonden blootstelling wordt hiermee genegeerd. Het is ook niet ondenkbaar dat tijdens bepaalde werkzaamheden de radonconcentratie anders is dan het gemiddelde dat wordt gemeten met de passieve radonmeters [61, 64, 65]. De continue radonmetingen die in paragraaf 10.5 zijn besproken laten zien dat passieve radonmetingen een

redelijk beeld geven van de radonconcentratie in de twee beschouwde situaties. Deze situaties zijn klein onderhoud (enkele uren, waterstroom aan), en groot onderhoud in ruimtes waar de radonconcentratie laag is ($< 100 \text{ Bq/m}^3$). De metingen geven echter geen informatie over de mate waarin de radonconcentratie kan variëren tijdens groot onderhoud (dagen/weken, waterstroom uit) in een ruimte waar de gemiddelde radonconcentratie hoog is ($> 300 \text{ Bq/m}^3$).

3. In de Monte-Carlomethode worden steeds n_x willekeurige productiestations getrokken van het drinkwaterbedrijf in kwestie. Elke combinatie van productiestations is mogelijk. Er wordt dus geen rekening gehouden met de geografische ligging van de stations en met het gegeven dat er sprake kan zijn van regionale onderhoudsploegen binnen één bedrijf. Informatie hierover is niet beschikbaar.
4. Informatie over radonconcentraties én werktijden is beschikbaar voor zestig productiestations. Dat is ongeveer een kwart van het totale aantal productiestations in Nederland. De fractie ligt voor sommige drinkwaterbedrijven hoger en voor andere lager. Impliciet wordt in de berekening aangenomen dat deze productiestations wat betreft blootstelling representatief zijn voor de overige productiestations van het bedrijf.
5. Naast de blootstelling wordt ook de totale werktijd van de werknemer berekend. De mediaan berekende werktijd is 1972 uur per jaar voor de procesoperator en 1005 uur per jaar voor de onderhoudsmedewerker (na correctie: werktijden langer dan 2000 uur per jaar worden gecorrigeerd naar 2000 uur en de bijbehorende blootstelling wordt geschaald met dezelfde factor). 10% van de procesoperators en 42% van de onderhoudsmedewerkers heeft een berekende werktijd lager dan 800 uur. We nemen aan dat de berekende totale werktijden (na eventuele correctie) een goede schatting zijn van de werkelijke totale werktijden. De gevolgen van deze aanname zijn:
 - a) De blootstelling van de werknemers met korte berekende werktijden wordt mogelijk onderschat. Het is niet bekend hoe groot de onderschatting is. Werknemers kunnen immers een deeltijdsaanstelling hebben (waardoor de blootstelling niet wordt onderschat of juist wordt overschat) of de resterende werktijd doorbrengen op een locatie met lage radonconcentratie (waardoor de blootstelling weinig wordt onderschat).
 - b) Een hoge berekende werktijd (tegen 2000 uur per jaar) kan wijzen op een overschatting van de blootstelling, omdat de reistijd van de werknemer tussen de verschillende productiestations hierin niet is meegenomen. Het is niet bekend hoe groot de overschatting is.
6. Er is alleen gekeken naar de blootstelling van procesoperators en onderhoudsmedewerkers. Blootstelling van overige werknemers, of extern ingehuurd werknemers, zijn niet meegenomen in deze analyse.

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt het volgende:

- I. Blootstelling boven $600 \text{ kBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ (per jaar) komt met name voor bij werknemers die bij bepaalde productiestations werken. Indien 1 specifiek productiestation buiten beschouwing wordt gelaten, blijkt uit analyse van de resultaten namelijk dat ongeveer 1% (in plaats van 10%) van de procesoperators een hogere blootstelling heeft dan $600 \text{ kBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$. Voor de onderhoudsmedewerkers geldt hetzelfde, al gaat het om een ander productiestation en ligt het percentage werknemers met blootstelling boven $600 \text{ kBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ op minder dan 1% (in plaats van op 4%).
- II. Bij twee drinkwaterbedrijven heeft meer dan de helft van de werknemers een blootstelling die hoger is dan $200 \text{ kBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ (per jaar). Voor de onderhoudsmedewerkers ligt dit percentage bij deze twee bedrijven op 60–80%, voor de procesoperators op 80-90%. Bij één van deze bedrijven is er ook een hoge fractie procesoperators met een blootstelling van $> 600 \text{ kBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ (bijna 50%). De hoge blootstelling van de werknemers bij deze bedrijven komt door:
 - a. Enkele relatief lange werktijden in ruimtes met radonconcentraties boven het Nederlandse referentieniveau.
 - b. Werken bij veel verschillende productiestations. Dit geeft om twee redenen een hoge berekende blootstelling. Ten eerste komen hierdoor de ruimtes die in punt IIa zijn genoemd in veel trekkingen voor. Ten tweede komt de totale (gecorrigeerde) werktijd in veel gevallen uit op 2000 uur per jaar, waardoor de blootstelling mogelijk wordt overschat (zie aanname 5b hierboven).
 Beide bedrijven hebben echter relatief weinig werknemers, waardoor de invloed hiervan op de data in Tabel 10.7 beperkt is.
- III. Zoals genoemd in voetnoot 18 op pagina 82 heeft één bedrijf opgegeven honderden procesoperators in dienst te hebben, terwijl de andere bedrijven er enkele tientallen hebben. Indien het aantal procesoperators van dat ene bedrijf wordt verlaagd met een factor 6, wordt het aantal procesoperators met blootstelling boven de afkapwaarden verlaagd met enkele procentpunten.

10.6.2 Effectieve dosis

In Figuur 10.4 is af te lezen welke effectieve dosis een werknemer ontvangt bij een bepaalde over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tijd} . Om aan de hand van deze figuur een dosisschatting te doen voor een bepaalde werknemer, moet dus eerst C_{tijd} worden geschat. De drinkwaterbedrijven kunnen dit voor individuele werknemers eventueel zelf doen, op basis van de gemeten radonconcentraties bij de deelnemende productiestations en de werktijden van de werknemers in kwestie. In het onderste deel van Figuur 10.4 zijn de in paragraaf 10.6.1 geschatte verdelingen weergegeven van C_{tijd} , voor onderhoudsmedewerkers en procesoperators.

De dosisschatting is gedaan met een aantal verschillende mogelijke waarden voor de DCC en F (zie paragraaf 2.2.2 en 4.3 voor meer informatie). In Figuur 10.4 zijn er voor de volgende DCC's lijnen weergegeven:

- UNSCEAR (oranje lijn): de DCC van UNSCEAR ($9 \cdot 10^{-6}$ mSv/h per Bq/m³)
- ICRP standaard (groene lijn): de DCC van de ICRP voor de meeste situaties ($16,8 \cdot 10^{-6}$ mSv/h per Bq/m³).
- ICRP zwaar werk/toeristengrot (blauwe lijn): de DCC van de ICRP voor werkers die zwaar werk uitvoeren (en daarmee een hoger ademvolumetempo hebben) of werkers die in een toeristengrot werken ($33,4 \cdot 10^{-6}$ mSv/h per Bq/m³).

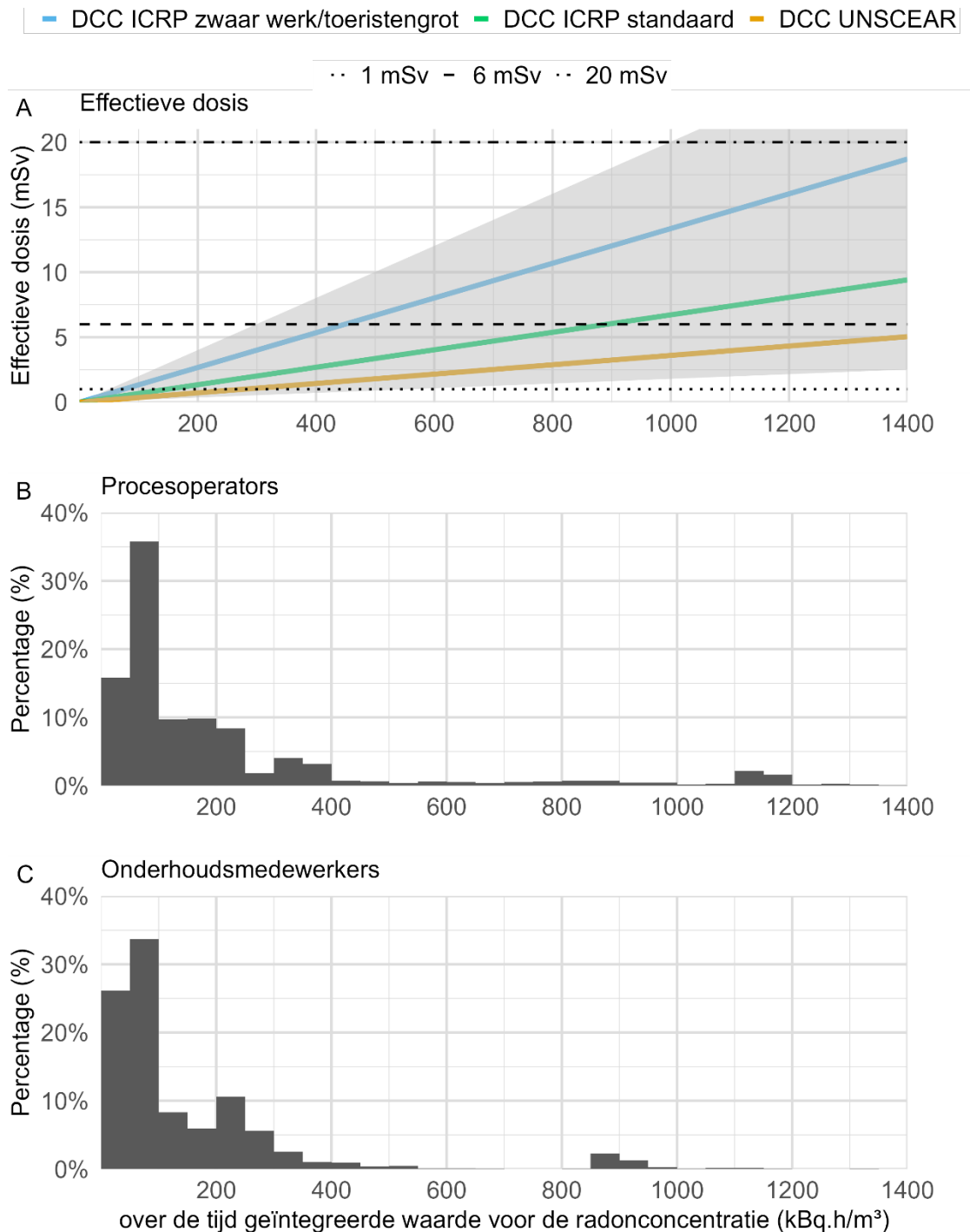
Het verschil tussen de hoogste en laagste DCC waarde is een factor 3,7.

De effectieve dosis is berekend met een waarde voor de evenwichtsfactor F tussen 0,2 en 0,6. Dit is weergegeven met het grijze vlak in Figuur 10.4. Voor de lijnen is gerekend met de meest waarschijnlijke waarde voor F , namelijk 0,4 (zie voor uitleg paragraaf 8.4). Het verschil tussen de hoogste en de laagste F waarmee gerekend is, is een factor 3. In bijlage 17 is een aanvullende figuur opgenomen (Figuur 17.5), waarin voor elke DCC afzonderlijk de dosisschatting met variatie in F is weergegeven.

Afhankelijk van het type werkzaamheden dat wordt uitgevoerd en de omstandigheden in het productiestation zal de dosisschatting meer rond de onderkant of bovenkant van het aangegeven bereik liggen. Bij zware werkzaamheden dient bijvoorbeeld een hogere DCC gebruikt te worden dan bij lichte werkzaamheden (kantoorwerk). Een hogere DCC kan ook gebruikt worden voor situaties waarbij veel ongebonden radonochters worden verwacht. Tyrväinen *et al.* gaan bij blootstellingsberekeningen voor werknemers bij drinkwaterbedrijven uit van de DCC van de ICRP voor zwaar werk ($33,4 \cdot 10^{-6}$ mSv/h per Bq/m³), omdat de werknemers een verhoogd ademvolumetempo hebben [71]. De evenwichtsfactor zal waarschijnlijk per ruimte en per productiestation variëren (zie paragraaf 8.4). Daarnaast kunnen er voor de evenwichtsfactor etmaalvariaties zijn, die samenhangen met de waterproductie. Lage evenwichtsfactoren zullen te vinden zijn in ruimtes met weinig aerosolen (bijvoorbeeld door het filteren van lucht).

Uitgaande van de geschatte blootstelling C_{tijd} in paragraaf 10.6.1, laat Figuur 10.4 zien dat de effectieve dosis voor de meeste werknemers ruim onder 6 mSv zal liggen, ook bij het gebruik van een hoge DCC en waarde voor de evenwichtsfactor. Dit ligt onder de dosislimiet voor blootgestelde werknemers (20 mSv/jaar). Overschrijding van deze dosislimiet zal naar verwachting niet (of nauwelijks) voorkomen.

De aannames die in paragraaf 10.6.1 worden gebruikt, zijn eveneens van toepassing op deze berekening van de effectieve dosis.



Figuur 10.4 (A) toont de effectieve jaardosis als functie van de over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tijd} . Vanwege de onzekerheden in de dosisschatting wordt een bereik getoond. Er is gerekend met verschillende waarden voor de DCC en evenwichtsfactor F (zie lopende tekst paragraaf 10.6.2). Het onderste deel van de figuur geeft de geschatte verdeling van C_{tijd} voor de radonconcentratie voor procesoperators (B) en onderhoudsmedewerkers (C), zoals bepaald in paragraaf 10.6.1. De x-as is afgekapt bij $1400 \text{ kBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$; 99% van de geschatte verdeling van C_{tijd} is weergegeven.

11 Discussie

11.1 Representativiteit van de deelnemende productiestations

In totaal zijn bij 65 van de 225 Nederlandse productiestations radonmetingen uitgevoerd, verdeeld over 7 verschillende drinkwaterbedrijven. Daarmee hebben 29% van de productiestations en 70% van de drinkwaterbedrijven deelgenomen aan het onderzoek.

Alle typen drinkwaterwinning die in Nederland worden toegepast, komen bij de deelnemende productiestations voor. De deelnemende productiestations zuiveren met name grondwater en oevergrondwater. Er hebben slechts twee productiestations deelgenomen die oppervlaktewater zuiveren. De deelnemende productiestations liggen verspreid door Nederland. Er zijn metingen gedaan in de gebieden waar bij woningen en reguliere werkplekken hogere radonconcentraties worden gevonden dan in de rest van Nederland – namelijk Zuid-Limburg en het Gelders Rivierengebied.

Van de meeste deelnemende productiestations is ook informatie beschikbaar over de werktijden van de werknemers. In totaal gaat het hierbij om ongeveer 1000 werknemers die werkzaamheden uitvoeren bij de zeven drinkwaterbedrijven waar radonmetingen zijn gedaan. Volgens de drinkwaterstatistieken van VEWIN heeft de Nederlandse drinkwatersector in totaal 5097 fte in dienst (per 31 december 2020) [51]. Hieronder vallen bijvoorbeeld ook medewerkers op hoofdkantoren.

Samengevat geven de resultaten van dit onderzoek waarschijnlijk een goed beeld van de werktijden en radonconcentraties bij productiestations in Nederland (met name van locaties voor grondwaterwinning). Het is uiteraard niet uit te sluiten dat er ruimtes zijn waar de radonconcentratie hoger is, of dat er productiestations zijn waar de radonconcentratie gemiddeld juist lager is dan in dit onderzoek is gevonden.

11.2 Over de meetresultaten

In totaal zijn bij de 7 drinkwaterbedrijven 348 geldige radonmetingen gedaan. De verdeling van de radonconcentraties is scheef; de mediaan ($61\text{--}68\text{ Bq/m}^3$) ligt ver onder het gemiddelde ($375\text{--}398\text{ Bq/m}^3$). Bij 35% van de metingen lag de radonconcentratie boven het Nederlandse referentieniveau (100 Bq/m^3). Al met al is de radonconcentratie bij drinkwaterbedrijven significant hoger dan die gevonden bij reguliere werkplekken (28 Bq/m^3 in Gelders Rivierengebied, 40 Bq/m^3 in Zuid-Limburg en 20 Bq/m^3 in overig Nederland [45]).

Radonconcentraties boven het Nederlandse referentieniveau werden gevonden bij alle deelnemende drinkwaterbedrijven en 64% van de productiestations (waar ten minste 1 geldige meting is gedaan). Ongeveer 15% van de metingen lag boven het maximale Europese referentieniveau (300 Bq/m^3). Deze radonconcentraties werden bij 34% van de productiestations gevonden. Hoge radonconcentraties zijn met name gevonden in procesruimtes, waar installaties staan voor het

zuiveren van ruw water, maar ook in enkele kantoor- en bedieningsruimtes zijn hoge ($> 300 \text{ Bq/m}^3$) radonconcentraties gevonden.

Ook in het buitenland zijn hoge radonconcentraties gevonden bij drinkwaterbedrijven. Een overzicht van metingen bij drinkwaterbedrijven is gegeven door Stietka *et al.* in een reviewartikel uit 2017 [64]. In Duitsland (deelstaten Beieren en Baden-Württemberg) en Oostenrijk (deelstaat Opper-Oostenrijk) is de radonconcentratie op ongeveer de helft van de meetlocaties $> 1000 \text{ Bq/m}^3$ (metingen bij 45 productiestations). In Zweden ligt deze fractie hoger (49 van de 60 productiestations), en in de Verenigde Staten (staat Iowa) juist lager (1 van de 31 productiestations). Maximaal gerapporteerde radonconcentraties die in dit reviewartikel zijn opgenomen zijn onder andere 2600 Bq/m^3 in Slovenië, 38.000 Bq/m^3 in Oostenrijk en 20.000 Bq/m^3 in Duitsland (deelstaat Hessen). Uit recent onderzoek blijkt ook dat de radonconcentratie bij Finse drinkwaterbedrijven hoog is: bij 39% van de productiestations zijn radonconcentraties van $> 300 \text{ Bq/m}^3$ aangetroffen [65].

Al met al lijken de radonconcentraties bij buitenlandse drinkwaterbedrijven hoger dan de Nederlandse (een grotere fractie metingen $> 1000 \text{ Bq/m}^3$). Dit kan liggen aan verschillen in grondsoort en dus verschillen in de radonconcentratie in het ruwe water. Maar ook de grootte en uitvoering van het productiestation, en de mate van ventilatie kunnen invloed op de radonconcentratie hebben [61].

Daarnaast kunnen verschillen in onderzoeksopzet een belangrijke rol spelen. Uit bovengenoemde buitenlandse studies is niet altijd op te maken in welke ruimtes de metingen zijn uitgevoerd. In het huidige onderzoek is naast procesruimtes ook gekeken naar kantoor- en bedieningsruimtes, waar de radonconcentratie over het algemeen lager is.

11.3 Verlaging van blootstelling

De blootstelling van werknemers bij drinkwaterbedrijven kan op twee manieren worden verlaagd: door het verlagen van de radonconcentratie of door het beperken van de werktijd op locaties met hoge radonconcentratie.

Het IAEA raadt aan om de blootstelling bij drinkwaterbedrijven te verlagen door middel van ventilatie in combinatie met het beperken van werktijden [34]. Het IAEA merkt daarbij op dat werknemers over het algemeen kort aanwezig zijn in ruimtes met de hoogste radonconcentraties. Voor elke ruimte kan worden gekeken of er maatregelen nodig zijn en zo ja, welke van de twee maatregelen haalbaar zijn.

In een grote studie naar radon bij Beierse drinkwaterproductiestations doet Trautmannsheimer [69] de volgende aanbevelingen over het reduceren van de blootstelling:

- Voorlichting van de werknemers is belangrijk om de blootstellingstijd te verlagen. Bij bepaalde werkzaamheden is het

mogelijk niet noodzakelijk dat de werknemer de hele tijd ter plaatse is.

- Mechanische ventilatie heeft de voorkeur boven het openen van ramen en deuren, omdat dit een grotere reductie in radonconcentratie geeft. Op locaties waar werknemers slechts korte tijd zijn voor onderhoud kan gebruik worden gemaakt van mobiele ventilatiesystemen.
- De afvoerlucht uit gesloten installaties (bijvoorbeeld onthardingstanks) moet direct naar buiten worden geleid.
- Procesruimtes moeten goed worden afgesloten.
- Kantoor- en bedieningsruimtes kunnen het beste worden geplaatst in een apart gebouw, los van procesruimtes.
- Er moeten regelmatig metingen worden gedaan om het effect van de toegepaste maatregelen te onderzoeken.

De bouwkundige maatregelen zijn mogelijk alleen haalbaar bij nieuwbouw.

Ook in Oostenrijk is onderzoek gedaan naar het verlagen van de blootstelling bij drinkwaterbedrijven [73]. Het onderzoek betrof drie productiestations waar de blootstelling van de werknemers boven 2.000 kBq·h/m³ lag. Eerst werden de ruimtes met hoge radonconcentraties geïdentificeerd en werd er bepaald langs welke weg radon in de ruimte binnendrong. Vervolgens werden onder andere schachten gedicht, extra ventilatie-installaties aangebracht en ruimtes met hoge radonconcentratie beter afgesloten van ruimtes waar werknemers langdurig werkzaamheden uitvoerden. De radonconcentratie nam in de meeste ruimtes af van enkele duizenden naar honderden Bq/m³, voor een investering ter waarde van ongeveer €1000 per productiestation (in 2008).

Het is echter de vraag of deze relatief eenvoudige en goedkope maatregelen ook in Nederland van toepassing zijn. Uit het artikel blijkt namelijk dat het proces van drinkwaterzuivering in Oostenrijk (deelstaat Opper-Oostenrijk) anders is dan in Nederland. Specifiek wordt genoemd dat zuiveringsstappen als beluchting door middel van cascades en sproeiers nauwelijks worden toegepast in Opper-Oostenrijk, terwijl dit een belangrijke bron van radon kan zijn [73].

Uit een gesprek met een werknemer van een Nederlands drinkwaterbedrijf blijkt dat het verlagen van de radonconcentratie door extra te ventileren niet overal mogelijk is [74]. De drinkwaterkwaliteit (hygiëne) staat voorop. Ook in reguliere ruimtes (kantoren, bedieningsruimtes) zal extra ventileren niet altijd haalbaar zijn. Zo kunnen er bijvoorbeeld geen ramen worden opengezet indien dit het productiestation toegankelijk maakt voor onbevoegden.

Samenvattend zal het per productiestation variëren of het verlagen van de radonconcentratie haalbaar is. In dit onderzoek is niet gekeken naar het verlagen van de blootstellingstijd. De haalbaarheid hiervan zal ook per productiestation, en per werknemer, variëren. Mogelijk kunnen sommige werkzaamheden met hoge blootstelling worden verdeeld over verschillende werknemers, of kunnen bepaalde werkzaamheden worden uitgevoerd in ruimtes met een lagere radonconcentratie.

11.4 Het gebruik van persoonsgebonden radonmeters

Persoonsgebonden radonmetingen kunnen informatie geven over de blootstelling van individuele werknemers. In dit onderzoek zijn geen metingen gedaan met persoonsgebonden radonmeters bij de drinkwaterbedrijven. Aan het begin van het onderzoek is besloten om de nadruk te leggen op passieve radonmetingen (en enkele verkennende continue metingen) in plaats van persoonsgebonden metingen. Dit had te maken met de variatie in werklocaties van de werknemers, wat registratie van werktijden complex kan maken.

In Duitsland zijn er persoonsgebonden metingen gedaan bij drinkwaterbedrijven in Beieren [61]. In deze studie kregen werknemers gedurende een periode van twee maanden een persoonsgebonden meter. Ongeveer 2% van de werknemers ontving een effectieve dosis boven 20 mSv/jaar. In de Duitse studie zijn de persoonsgebonden radonmetingen vergeleken met de passieve radonmetingen. De passieve radonmetingen geven over het algemeen wat lagere radonconcentraties dan het gemiddelde dat met de persoonlijke radonmeters is bepaald (blootstelling gedeeld door werktijd). De auteurs van de studie raden het gebruik van persoonsgebonden meters aan, omdat de blootstelling hiermee realistischer te bepalen is dan met passieve radonmetingen en het bijhouden van werktijden. Zij gaven hiervoor de volgende redenen:

- Passieve radonmetingen werden in de studie uitgevoerd in twee ruimtes per productiestation, terwijl de beschouwde productiestations tot dertig verschillende ruimtes hadden.
- Het was voor de werknemers in de studie niet haalbaar om de werktijd per ruimte bij te houden.
- De radonconcentratie kan variëren in de tijd, vanwege seizoens- of etmaalvariaties en vanwege het uitvoeren van bepaalde onderhoudswerkzaamheden.

Hierbij moet worden opgemerkt dat onze schattingen van de blootstelling, die zijn gebaseerd op passieve radonmetingen, waarschijnlijk nauwkeuriger zijn dan die in bovengenoemde studie: wij beschikken over data voor drie ruimtes per productiestation (in plaats van twee), en over schattingen van de werktijden per ruimte (in plaats van alleen totale werktijd).

Indien in vervolgonderzoek (bijvoorbeeld door de drinkwaterbedrijven zelf) gebruik wordt gemaakt van persoonsgebonden radonmetingen, raden wij aan om dit te doen in combinatie met passieve radonmetingen en het bijhouden van werktijden per (soort) ruimte van de werknemers in kwestie (voor zover haalbaar). Op deze manier kan namelijk de blootstelling die is bepaald met de persoonsgebonden radonmeter worden vergeleken met de blootstelling die is geschat op basis van de werktijden en passieve radonmetingen. Deze vergelijking kan informatie opleveren over de locaties met de hoogste blootstelling. Die informatie kan worden gebruikt om de blootstelling gericht te verlagen (zie ook paragraaf 11.3).

Voordat een dergelijk vervolgonderzoek wordt uitgevoerd, is het raadzaam om eerst enkele pilotexperimenten uit te voeren, onder andere om te bepalen hoelang de persoonsgebonden metingen moeten

duren. Drinkwaterbedrijven kunnen op basis van de werktijden en passieve meetresultaten de werknemers met een potentieel hoge blootstelling identificeren.

Daarnaast gelden de algemene aanbevelingen voor het gebruik van persoonlijke radonmeters: werknemers moeten een duidelijke instructie ontvangen, en wanneer de radonmeter niet in gebruik is, moet deze worden bewaard op een plaats met een lage (en bekende) radonconcentratie (zie verder paragraaf 3.2).

Deel D – Algemene conclusies

12 Conclusies

Het doel van dit onderzoek is om kennis te leveren over de radonconcentraties bij drinkwaterbedrijven en Zuid-Limburgse mergelgroeven, en om te onderzoeken welke aanvullende informatie er nodig is om tot een schatting te komen van de blootstelling van de werknemers. Hiervoor zijn passieve radonmetingen uitgevoerd bij 7 groeven en bij 65 productiestations van 7 drinkwaterbedrijven.

Op basis van de resultaten in dit rapport kan het ministerie van SZW een beleidsbeslissing nemen over het al dan niet opnemen van groeven en drinkwaterbedrijven als specifieke werkplekken in het Nationaal Actieprogramma Radon.

Tijdens het onderzoek is informatie verzameld over de werktijden van de werknemers. Op basis hiervan zijn schattingen gedaan van de blootstelling van de werknemers. De blootstelling wordt uitgedrukt als een over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tjd} , waarbij afkapwaarden van 200 en 600 kBq·h/m³ per jaar overeenkomen met voltijds (2000 uur per jaar) werken bij respectievelijk het Nederlandse (100 Bq/m³) en het maximale Europese referentieniveau (300 Bq/m³).

De effectieve dosis kan berekend worden door C_{tjd} te vermenigvuldigen met een evenwichtsfactor en dosisconversiecoëfficiënt (DCC). De evenwichtsfactor en DCC hangen samen met de type werkzaamheden en omstandigheden op een werkplek. In dit onderzoek zijn geen metingen van de evenwichtsfactor uitgevoerd en is niet onderzocht welke DCC van toepassing is op welke werkzaamheden. Een schatting van de effectieve dosis is gedaan met informatie uit de literatuur. Hierbij is gebruikgemaakt van drie waarden voor de DCC ($9 \cdot 10^{-6}$, $16,8 \cdot 10^{-6}$ en $33,4 \cdot 10^{-6}$ mSv/h per Bq/m³) en een range van 0,2 tot 0,6 voor de evenwichtsfactor.

Hiermee komt een over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon van 200 kBq·h/m³ overeen met een effectieve dosis van 0,4 tot 4,0 mSv en een waarde van 600 kBq·h/m³ met 1,1 tot 12 mSv. Een (beperkte) overschrijding van de afkapwaarden (in een jaar) betekent daarom dat de effectieve jaardosis van de werknemers lager is dan de dosislimiet voor blootgestelde werknemers (20 mSv/jaar).

De aan het onderzoek deelnemende organisaties hebben hun eigen resultaten ontvangen en de gelegenheid gekregen om hierover vragen te stellen aan de onderzoekers van het RIVM. Voor zowel de groeven als de drinkwaterbedrijven is een bijeenkomst georganiseerd, waarbij de onderzoekers van het RIVM informatie hebben gegeven over radon, de resultaten van het onderzoek, de blootstelling van de werknemers, en hoe de blootstelling verder in kaart kan worden gebracht en verlaagd. Deze informatie is ook beschreven in dit rapport.

Hieronder worden de onderzoeksvragen beantwoord voor de groeven en drinkwaterbedrijven. Tot slot is beschreven (voor beide sectoren samen) wat het handelingsperspectief is.

Groeven

Wat is de (jaargemiddelde) radonconcentratie in Bq/m³ bij de deelnemende groeven?

Bij alle deelnemende groeven zijn radonconcentraties boven het Nederlandse referentieniveau (100 Bq/m³) gemeten. De jaargemiddelde radonconcentraties varieerden tussen 74 en 1060 Bq/m³, met een mediaanwaarde van 267 Bq/m³ en een gemiddelde van 378 Bq/m³. Tijdens de winterperiode (oktober tot april) zijn er separate metingen uitgevoerd. Deze halfjaargemiddelde radonconcentraties lagen bij de meeste groeven lager dan de jaargemiddelde waarde. De resultaten laten daarnaast zien dat de radonconcentratie sterk varieert, zowel tussen de verschillende groeven als tussen verschillende meetlocaties binnen één groeve. Bij sommige groeven is de radonconcentratie in de buurt van de ingang bijvoorbeeld veel lager dan dieper in het gangenstelsel.

Welke informatie is, naast de concentratiemetingen, nodig om tot een schatting te komen van de blootstelling van werknemers bij groeven?

Om tot een schatting van de blootstelling van de werknemers bij de groeven te komen, is informatie nodig over de (jaar)gemiddelde radonconcentratie op verschillende plekken in de groeve en over de tijd dat een werknemer op deze plekken aanwezig is. Door deze twee waarden voor elke plek te vermenigvuldigen, kan een over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tijd} , worden verkregen. De totale C_{tijd} kan worden vergeleken met 200 kBq·h/m³, respectievelijk 600 kBq·h/m³.

De meeste werknemers van de groeven werken slechts een deel van hun werktijd ondergronds: 95% van de werknemers werkt maximaal 800 uur per jaar ondergronds. Ongeveer 25% van de werknemers heeft naar verwachting een blootstelling (per jaar) die hoger is dan 200 kBq·h/m³. Een blootstelling boven 600 kBq·h/m³ wordt bij bijna 5% van de werknemers verwacht.

Drinkwaterbedrijven

Wat is de (jaargemiddelde) radonconcentratie in Bq/m³ bij de deelnemende drinkwaterbedrijven?

Bij alle deelnemende drinkwaterbedrijven zijn radonconcentraties boven het Nederlandse referentieniveau (100 Bq/m³) gemeten. In beide meetperioden lag de mediaan (61 en 68 Bq/m³) ver onder het gemiddelde (375 en 398 Bq/m³). Er zijn dus veel locaties met een relatief lage radonconcentratie, en minder locaties met een (zeer) hoge radonconcentratie. De hoogste radonconcentraties zijn gevonden in ruimtes met installaties voor het zuiveren van ruw water. Ruimtes als kantoren en bedieningsruimtes hadden een lagere radonconcentratie, maar ook hier zijn radonconcentraties boven het referentieniveau gevonden.

Welke informatie is, naast de concentratiemetingen, nodig om tot een schatting te komen van de blootstelling van werknemers bij drinkwaterbedrijven?

Voor een schatting van de blootstelling van de werknemers is, naast de radonconcentratie in verschillende ruimtes binnen een productiestation, informatie nodig over de tijd dat een representatieve werknemer in deze verschillende ruimtes aanwezig is. Omdat werknemers werkzaamheden uitvoeren in meerdere productiestations is ook informatie nodig over hoeveel en welke productiestations deze werknemer gemiddeld bezoekt.

Werknemers werken over het algemeen slechts kort in de procesruimtes, waar ruw water wordt gezuiverd. Deze korte werktijd per ruimte geeft echter geen goed beeld van de blootstelling, omdat werknemers in meerdere ruimtes van meerdere productiestations werken. De blootstelling is daarom geschat met behulp van een Monte-Carloberekening, waarbij de blootstelling van een werknemer bij een aantal willekeurig getrokken productiestations van het bedrijf wordt gesommeerd.

Ongeveer 25-30% van de werknemers heeft naar verwachting een blootstelling (per jaar) die hoger is dan $200 \text{ kBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$. Blootstelling boven $600 \text{ kBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ wordt bij ongeveer 5-10% van de werknemers verwacht. De op deze manier berekende blootstelling is uitdrukkelijk een schatting.

Handelingsperspectief

De blootstelling van de werknemers, en niet de radonconcentratie in een ruimte, is bepalend voor de kans op gezondheidseffecten van werknemers. Wel kan het meten van de radonconcentratie in groeven en productiestations waar nog geen metingen hebben plaatsgevonden extra inzicht geven.

Aanvullend onderzoek kan zich richten op het beter in kaart brengen van de blootstelling van werknemers bij groeven en drinkwaterproductiestations. Dat kan worden bereikt door werktijden van individuele werknemers (beter) te registreren, in combinatie met passieve radonmetingen op verschillende locaties. Een alternatief is om persoonsgebonden radonmetingen te doen, bijvoorbeeld bij werknemers met potentieel hoge radonblootstelling. Persoonsgebonden radonmetingen zijn met name nuttig wanneer werknemers op veel verschillende locaties werken en/of de radonconcentratie op de werklocatie(s) sterk varieert in de tijd. Het is ook mogelijk om de variatie in radonconcentratie op een locatie in kaart te brengen door continue radonmetingen te doen.

Als de blootstelling van individuele werknemers is bepaald, kan worden gekeken naar het verlagen van de blootstelling. Dit kan worden bereikt door het verlagen van de radonconcentratie, bijvoorbeeld door te ventileren, of door de werktijd op locaties met hoge radonconcentratie te beperken, bijvoorbeeld door werkzaamheden te verplaatsen naar een andere locatie of te verdelen over meerdere werknemers. Of het verlagen van de blootstelling haalbaar is, en op welke manier, zal van bedrijf tot bedrijf verschillen.

13 Literatuur

1. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *Nationaal Actieprogramma Radon*, 2021.
2. P. Goemans, et al., *Radon, thoron en gammastraling op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen in Nederland – Resultaten RIVM-meetcampagne 2016-2017*, RIVM-Rapport 2018-0027, 2018.
3. L. Boudewijns en M. van der Schaaf, *Inventarisatie radonblootstelling specifieke beroepsgroepen*, RIVM-rapport 2021-0179, 2021.
4. RIVM. *Monitoring van radioactiviteit in drinkwater*. Beschikbaar via <https://www.rivm.nl/straling-en-radioactiviteit/wat-doet-rivm/milieumonitoring/drinkwater>, geraadpleegd 10 december 2024.
5. L.H. Vaas, et al., *Basisdocument radon*, RIVM-rapport nr. 710401014, 1991.
6. R. Smetsers, et al., *Radon en thoron in Nederlandse woningen vanaf 1930. Resultaten RIVM-meetcampagne 2013-2014*, RIVM Rapport 2015-0087, 2015.
7. R.C.G.M. Smetsers en P.D.B.M. Bekhuis, *Blootstelling aan natuurlijke bronnen van ioniserende straling in Nederland*, RIVM-rapport 2021-0032, 2021.
8. R.C.G.M. Smetsers, *Woningen in Nederland met mogelijk hogere radonconcentraties. Onderzoek voor de implementatie van richtlijn 2013/59/Euratom*, RIVM Rapport 2017-0032, 2017.
9. M. Velsma en C. Rosenbaum, *Radonmeters voor particulier gebruik*, RIVM-briefrapport 2020-0210, 2021.
10. International Commission on Radiological Protection (ICRP), *Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon*, ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1), 2010.
11. World Health Organization (WHO), *WHO handbook on indoor radon. A public health perspective*. 2009.
12. S. Darby, et al., *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies*. *BMJ*, 2005. **330**(7485): p. 223.
13. National Research Council (US) Committee on Health Risks of Exposure to Radon (BEIR VI), *Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI*. Washington (DC): National Academies Press (US), 1999.
14. J.W. Marsh, et al., *EFFECTIVE DOSE COEFFICIENTS FOR RADON AND PROGENY: A REVIEW OF ICRP AND UNSCEAR VALUES*. *Radiat Prot Dosimetry*, 2021. **195**(1): p. 1-20.
15. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), *UNSCEAR 2019 Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation – Annex B, Lung cancer from exposure to radon*, United Nations, Official Records Seventy-fourth Session Supplement No. 46, New York, 2020.
16. International Commission on Radiological Protection (ICRP), *Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3*, ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4). 2017.

17. J. Chen en N.H. Harley, *A Review of Indoor and Outdoor Radon Equilibrium Factors—part I: 222Rn*. Health Physics, 2018. **115**(4): p. 490-499.
18. EURATOM, *RICHTLIJN 2013/59/EURATOM van de Raad van 5 december 2013 tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming tegen de gevaren verbonden aan de blootstelling aan ioniserende straling*, 2014.
19. Minister van Infrastructuur en Milieu, *Besluit van 23 oktober 2017, houdende vaststelling van regels ter bescherming van personen tegen de gevaren van blootstelling aan ioniserende straling (Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming)*, 2017.
20. Staatssecretaris van Sociale Zaken en Werkgelegenheid, *Regeling van de Staatssecretaris van Sociale Zaken en Werkgelegenheid van 23 januari 2018, nr. 2018-0000004839, tot vaststelling van uitvoeringsvoorschriften voor de bescherming van werknemers die beroepsmatig blootgesteld kunnen worden aan ioniserende straling (Regeling stralingsbescherming beroepsmatige blootstelling 2018)*, 2018.
21. European Commission. Directorate-General for Energy, *Radon in workplaces – Implementing the requirements in Council Directive 2013/59/Euratom*. Publications Office, 2020.
22. Radonova, *Radtrak3 product sheet*, beschikbaar via de leverancier.
23. Radonova, *Radtrak2 product sheet*, beschikbaar via de leverancier.
24. Radonova. *Radon dosimetry*. Beschikbaar via <https://radonovalaboratories.com/product/radon-dosimetry/>, geraadpleegd 7 november 2023.
25. Tesla, *TSR3DNM USB Radon Probe with Display and Big Memory. Technical Specifications & Operation Manual*, v.1, 2017.
26. A. van Wijngaarden, *Ons krijtland Zuid-Limburg III: De ondergrondse kalksteengroeven in Zuid-Limburg*, Wetenschappelijke Mededelingen van de Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging. No. 71. RIVON-mededeling No. 257, 1967.
27. A.-J. Haarsma, *Vleermuizen in mergelgroeven, verschillende aspecten met betrekking tot de in het kader van Natura2000 aangewezen mergelgroeven als belangrijk leefgebied voor meer-, vale en ingekorven vleermuis*, Rapport Batweter, 2011.03, 2011.
28. E. Stevenhagen, *De ondergrondse kalksteenwinning in Zuid-Limburg*. Historisch-Geografisch Tijdschrift, 1999. **17**(2): p. 37-48.
29. Provincie Limburg, *Handreiking gesteentemechanische veiligheid van onderaardse kalksteengroeven*, Beschikbaar via <https://www.limburg.nl/algemeen/zoeken/@1832/mijnbouwvergunning/>, Maart 2018.
30. Anoniem (persoonlijke communicatie aan M. Velsma en C. Rosenbaum), *Gesprekken over groeven*. 2021.
31. Visit Zuid-Limburg. *Kerststad Valkenburg: kerstmarkt Gemeentegrot*. Beschikbaar via <https://www.kerststadvalkenburg.nl/te-doen/kerstmarkt-gemeentegrot/>, geraadpleegd 19 december 2023.
32. Visit Zuid-Limburg. *Kerststad Valkenburg: kerstmarkt Fluweelengrot*. Beschikbaar via <https://www.kerststadvalkenburg.nl/te-doen/kerstmarkt-fluweelengrot/>, geraadpleegd 19 december 2023.

33. Mergelbouwsteen Kleijnen. *Mergelwinning*. Beschikbaar via <https://mergel.nl/winning/>, geraadpleegd 20 december 2023.
34. International Atomic Energy Agency, *Radiation Protection against Radon in Workplaces other than Mines*. IAEA SRS-33, Wenen: IAEA, 2004.
35. D. Langridge, R.P. Stokes, en C.P. Jackson, *Monitoring of radon gas in caves of the Yorkshire Dales, United Kingdom*. Journal of Radiological Protection, 2010. **30**(3): p. 545.
36. A. van Wijngaarden, *De natuurlijke luchtcirculatie in ondergrondse kalksteengroeven in Zuid-Limburg*, Publicatie van Nationaal Historisch Genootschap in Limburg, reeks XVII 00-1-1968. RIVON-mededeling no. 258, 1968.
37. A.A. Cigna, *Radon in caves*. International Journal of Speleology, 2005. **34**: p. 1-18.
38. O.A. Dumitru, et al., *Radon survey in caves from Mallorca Island, Spain*. Science of The Total Environment, 2015. **526**: p. 196-203.
39. D.E. Tchorz-Trzeciakiewicz en T. Parkitny, *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.
40. L. Fijałkowska-Lichwa, *Short-term radon activity concentration changes along the Underground Educational Tourist Route in the Old Uranium Mine in Kletno (Sudety Mts., SW Poland)*. Journal of Environmental Radioactivity, 2014. **135**: p. 25-35.
41. J. Chen en N.H. Harley, *A Review of Radon Equilibrium Factors in Underground Mines, Caves, and Thermal Spas*. Health Physics, 2020. **119**(3): p. 342-350.
42. J. Dredge, et al., *Cave aerosols: distribution and contribution to speleothem geochemistry*. Quaternary Science Reviews, 2013. **63**: p. 23-41.
43. J. Vaupotič, *Nanosize radon short-lived decay products in the air of the Postojna Cave*. Science of The Total Environment, 2008. **393**(1): p. 27-38.
44. R. Yamada, et al., *A Preliminary Study of Radon Equilibrium Factor at a Tourist Cave in Okinawa, Japan*. Atmosphere, 2021. **12**(12): p. 1648.
45. M. Velsma, et al., *Radon in Nederlandse woningen, op reguliere werkplekken en voor het publiek toegankelijke gebouwen – Resultaten meetcampagne 2022-2023, 2024*.
46. J. Schmitz en R. Fritsche, *Radon Impact at Underground Workplaces in Western Germany*. Radiation Protection Dosimetry, 1992. **45**(1-4): p. 193-195.
47. L. Gazda, et al., *Radon Hazards in Relation to Elemental and Isotope Composition of the Geological Structures in the Lubelskie Voivodeship*. Journal of Ecological Engineering, 2018. **19**(2): p. 45-49.
48. Polish Tourism Organisation. *The Chelm Chalk Tunnels*. Beschikbaar via <https://www.polen.travel/nl/inne-atrakcje-turystyczne/the-chelm-chalk-tunnels>, geraadpleegd 29 juli 2024.
49. Drinkwaterplatform. *Waar komt ons kraanwater vandaan?* Beschikbaar via <https://www.drinkwaterplatform.nl/themas/watertransitie/winning-en/>, geraadpleegd 25 april 2024.

50. Vewin, *Kerngegevens drinkwater 2023*, Beschikbaar via www.vewin.nl/publicaties, 2023.
51. P.J.J.G. Geudens en O.A.A. Kramer, *Drinkwaterstatistieken 2022. Van bron tot kraan*, Uitgave van Vewin. Beschikbaar via www.vewin.nl/publicaties, 2022.
52. Anoniem (persoonlijke communicatie aan M. Velsma en C. Rosenbaum), *Gesprek over drinkwaterbedrijf*. 2022.
53. Werkbezoek drinkwaterproductiestation, 2022.
54. Vewin, *Hoe wordt drinkwater gemaakt?* Waterspiegel, 2021. **nr. 2 – 2021**.
55. Oasen. *Traditionele zuivering*. Beschikbaar via <https://www.oasen.nl/alles-over-drinkwater/drinkwater-maken/traditionele-zuivering>, geraadpleegd 26 april 2024.
56. Dunea. *Hoe wordt uw drinkwater gemaakt?* Beschikbaar via <https://www.dunea.nl/drinkwater/hoe-wordt-uw-drinkwater-gemaakt>, geraadpleegd 26 april 2024.
57. Vitens. *Zo maakt Vitens drinkwater*. Beschikbaar via <https://www.vitens.nl/Over-water/Water-maken>, geraadpleegd 26 april 2024.
58. WML (NV Waterleiding Maatschappij Limburg). *Hoe maken we water?* Beschikbaar via <https://www.wml.nl/alles-over-water/drinkwater-maken>, geraadpleegd 21 mei 2024.
59. WMD Drinkwater. *Drinkwater maken*. Beschikbaar via <https://wmd.nl/drinkwater/drinkwater-maken/>, geraadpleegd 8 augustus 2024.
60. Anoniem (persoonlijke communicatie aan M. Velsma en D. Siegersma), *Gesprek met drinkwaterbedrijf*. 2022.
61. M. Trautmannsheimer, W. Schindlmeier, en K. Börner, *Radon concentration measurements and personnel exposure levels in Bavarian water supply facilities*. Health Physics, 2003. **84**(1): p. 100-110.
62. J. Vaupotic, *Radon exposure at drinking water supply plants in Slovenia*. Health Physics, 2002. **83**(6): p. 901-906.
63. M. Stietka, et al., *Development of standard methods for activity measurement of natural radionuclides in waterworks as basis for dose and risk assessment – First results of an Austrian study*. Applied Radiation and Isotopes, 2013. **81**: p. 294-297.
64. M. Stietka, et al., *Measurement strategies for radon in indoor air of waterworks – a review*. Radioprotection, 2017. **52**(2): p. 101-107.
65. J.T. Tyrväinen, T. Turtiainen, en J. Naarala, *Radon transport to indoor air in groundwater plants as a by-effect of different water treatments*. Journal of Water Process Engineering, 2023. **56**: p. 104408.
66. Anoniem (persoonlijke communicatie aan M. Velsma en M. van der Linden), *Gesprek met drinkwaterbedrijf*. 2022.
67. W. Aspek, et al., *Strahlenexposition durch Trinkwasser in Oberösterreich – 2004 bis 2006: Teilprojekt Strahlenexposition von Beschäftigten in oberösterreichischen Wasserwerken. Zusammenfassender Endbericht*, Zusammenfassender Endbericht, 2007.

68. W. Ringer, M. Simader, en M. Bernreiter, *Radioaktivität und Strahlung in Österreich 2005 und 2006: Anhang A1. Strahlenexposition von Beschäftigten in oberösterreichischen Wasserwerken (Teil 2: Ergebnisse)*, Bundesministerium für Soziales, Gesundheit, Pflege und Konsumentenschutz (BMSGPK), Mei 2009.
69. M. Trautmannsheimer, *Radonexponierte Arbeitsplätze in Wasserwerken in Bayern*, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen), 1 mei 2002.
70. J. Schmitz, R.M. Nickels, en R. Fritsche. *Exposure to radon/radon decay products in waterworks*, IRPA-10 Proceedings of the 10th international congress of the International Radiation Protection Association on harmonization of radiation, human life and the ecosystem. Japan, pp. 1v. 2000.
71. J.T. Tyrväinen, J. Naarala, en T. Turtiainen, *Relevance of radon progeny measurements for the assessment of inhalation doses in groundwater utilities*. J Radiol Prot, 2024. **44**(2).
72. Medewerker van Radonova (persoonlijke communicatie aan M. Velsma en C. Rosenbaum), *Informatie over ontsmetting van radonmeters*. 28 februari 2022.
73. W. Ringer, et al., *Mitigation of three water supplies with high radon exposure to the employees*. Radiation Protection Dosimetry, 2008. **130**(1): p. 26-29.
74. Anoniem (persoonlijke communicatie van een coördinator technisch beheer en onderhoud van een drinkwaterbedrijf aan M. van der Linden), *Gesprek over radonblootstelling bij drinkwaterbedrijven*. 11 juli 2024.

14 Bijlage onderzoeksmethode, groeven

14.1 Instructie plaatsen passieve radonmeters

Instructie ophangen radonmeters

Hoe zien de radonmeters eruit?

- Uw pakket bevat XX sets van vierkante radonmeters.
- Een set bestaat uit twee radonmeters verbonden met een touwtje.
- Een aantal sets is ook nog voorzien van een kaartje met contactgegevens van het RIVM. Hier kunt u uw naam en contactgegevens op noteren, zodat uw collega's weten wie intern het aanspreekpunt is m.b.t. de detectoren. (zie foto).
- Op iedere radonmeter staat een uniek registratienummer van 9 cijfers.



Radonmeter



Een opgehangen radonmeter

Waar worden de radonmeters opgehangen?

- We vragen u de detectoren op te hangen in de volgende ondergrondse locaties, buiten handbereik van het publiek:
 - Opsomming van de locaties waar de radonmeters komen te hangen. Samen met de deelnemende grotten is gekeken op welke locaties radonmeters kwamen te hangen. Het ging o.a. om:
 - Meetpunten langs de hoofdroute (bijvoorbeeld een rondleidingsroute); hier komen werknemers het meeste langs;
 - meetpunten waar vermoedelijk meer ventilatie is in de groeve, zijn bijvoorbeeld nabij in- en uitgangen, aardpijpen en luchtschachten;
 - Meetpunten waar vermoedelijk minder ventilatie is en daardoor mogelijk radongas ophoopt, zijn bijvoorbeeld doodlopende of afgesloten delen (diep) in de groeve.
- De detectoren dienen op minstens 1 meter van de grond te worden geplaatst, voor zover mogelijk op minstens 25 cm afstand van muren, plafond en hoeken.

- Belangrijk is dat de detectoren niet in de weg hangen zodat er niet tegen aan wordt gestoten, en zodat ze niet makkelijk weg te nemen zijn.
- De detectoren werken niet goed als u ze vlakbij een warmtebron plaatst. Graag niet ophangen boven een verwarming, of vlak onder of boven een warme lamp (aan een armatuur van TL-verlichting is geen probleem).
- Markeer tijdens het ophangen iedere ophangplaats van een set radonmeters op de plattegrond van de groeve en schrijf hierbij de nummers van beide radonmeters aan het touwtje.
- Gelieve de detectoren zo spoedig mogelijk na ontvangst (binnen enkele dagen) op te hangen en deze niet te lang te laten liggen omdat dit de metingen minder nauwkeurig maakt.

Meetlocaties doorgeven aan RIVM

We vragen u om een foto of kopie van de plattegrond met de gemarkeerde ophangplaatsen en bijbehorende nummers van de radonmeters te sturen aan radon@rivm.nl. Vermeld u daarbij alstublieft de datum waarop de radonmeters zijn opgehangen.

Vervolg

De radonmeters die in de groeve zijn opgehangen, meten het radongas gedurende drie maanden (onderste meter) en gedurende twaalf maanden (bovenste meter). Drie maanden na de start van de metingen ontvangt u van ons een retourenvelop. Daarin stuurt u ons alle onderste meters terug nadat u op alle ophangplaatsen het touwtje tussen de twee radonmeters heeft doorgeknipt. Twaalf maanden na de start van de metingen ontvangt u opnieuw een retourenvelop voor de bovenste radonmeters.

Wij sturen na ontvangst de radonmeters naar het laboratorium. Na analyse krijgt u van ons uw eigen resultaten. Wij verwerken de resultaten van alle deelnemende groeven geanonimiseerd in een rapport.

Vragen?

Als u vragen heeft, aarzel dan niet om te mailen naar radon@rivm.nl, of te bellen met de onderzoekers.

Bedankt voor uw medewerking!

14.2

Bedrijfsvragenlijst

Fijn dat u aan dit onderzoek wilt deelnemen.

Radon: wat is dat?

Radon is een natuurlijk gevormd, radioactief gas dat u niet kunt zien of ruiken. Omdat radon van nature vrijkomt uit de bodem, gesteentes en stenen bouwmaterialen is het lastig om contact te vermijden. Met name in moeilijk of slecht te ventileren ruimtes kan radon een gezondheidsrisico vormen: wie radon veel en vaak inademt, kan longkanker krijgen.

Waarom dit onderzoek?

De kans dat radon longkanker veroorzaakt, hangt van een aantal factoren af. Bijvoorbeeld van de hoeveelheid radon die aanwezig is in de ruimte waarin iemand zich bevindt en hoe lang en hoe vaak iemand zich hier bevindt.

De hoeveelheid radon die vrij komt uit de bodem kan per regio erg verschillen. In Nederland komt met name in gebieden met gesteente, rivierklei en leemgrond veel radon voor. Daarom heeft het RIVM in 2016 een verkennend onderzoek gedaan naar de aanwezigheid en hoeveelheid radon in Nederlandse bedrijven. Maar over radon in de werkomgeving is nog veel onduidelijk. Komt een grote hoeveelheid radon voor in de werkomgeving? Komen mensen op het werk veel en langdurig met radon in contact? En lopen werknemers een gezondheidsrisico door in contact te komen met radon? Het RIVM wil met dit onderzoek antwoord op deze vragen krijgen.

Waarom bij uw bedrijf?

In 2016 is onderzoek gedaan in vier Zuid-Limburgse grotten en groeves. Hier zijn hoge radonwaarden gemeten. We verwachten dat ook in andere grotten en groeves veel radon aanwezig is, maar we weten niet hoeveel en hoe vaak mensen hiermee in contact komen.

Het RIVM is geïnteresseerd in groeves en grotten die gebruikt worden voor bedrijfsactiviteiten, zoals evenementen, restaurants, rondleidingen, enzovoorts. Omdat uw bedrijf zich in een groeve of grot bevindt, is uw deelname aan dit onderzoek belangrijk.

Waarom deelnemen aan het onderzoek en wat levert het u op? Het onderzoek geeft u inzicht hoeveel radon in de grot of groeve aanwezig is waar uw bedrijf is gevestigd. Ook krijgt u meer inzicht of u of uw personeel een gezondheidsrisico loopt door de aanwezigheid van radon.

Wat doen wij met de onderzoeksgegevens?

Op de volgende pagina wordt u gevraagd om enkele contactgegevens in te vullen. Uw bedrijfsgegevens worden alleen gebruikt om informatie aan u terug te koppelen. De gegevens uit vragenlijst worden geanonimiseerd, zodat deze niet herleid kunnen worden naar uw bedrijf. Op basis van de anonieme gegevens wordt een wetenschappelijk onderzoeksrapport opgesteld, waarin de mogelijke gezondheidsrisico's van radon in grotten en groeves van Zuid-Limburg worden beschreven.

De vragenlijst

Het eerste deel van de vragen gaat over uw ondergrondse locatie (een omschrijving daarvan) en het gebruik van de ruimte. Het tweede deel van de vragen gaat over de medewerkers of vrijwilligers die in de ondergrondse ruimten werken. Helemaal aan het einde kunt u opmerkingen kwijt die u niet ergens anders kon plaatsen.

De tijd die het invullen van de vragen kost, is afhankelijk van de grootte van uw bedrijf; het zal ongeveer tussen de 15 en 30 minuten zijn. U kunt de ingevulde gegevens tussentijds opslaan.

Voor meer informatie over radon, ga naar de website van het RIVM.

Mocht u nog vragen of opmerkingen hebben over het onderzoek, neem dan contact op met het projectteam van het RIVM via radon@rivm.nl.

Contactgegevens

Vul hieronder de contactgegevens in. Deze gegevens worden alleen gebruikt om u bij vragen te kunnen contacteren. De resultaten van de enquête worden geanonimiseerd verwerkt in het onderzoeksrapport.		
1.	Bedrijfsnaam:	
2.	Bedrijfsadres:	
3.	Postcode:	
4.	Plaats:	
5.	Naam van de groeve:	
6.	Naam contactpersoon:	
7.	Telefoonnummer:	
8.	Emailadres:	

Locatie - Algemene vragen

Op deze pagina staan algemene vragen over uw locatie. De vragen zijn erop gericht om inzicht te krijgen in de hoeveelheid informatie die er al beschikbaar is over radon. Ook wordt bestaande ventilatie of luchtverversing uitgevraagd, omdat de radonconcentratie daarvan afhankelijk is.		
9.	Is op uw locatie een risico-inventarisatie (RI&E) aanwezig gericht op radongas?	Ja Nee
10.	Worden of werden op uw locatie radonmetingen uitgevoerd?	Ja Nee
11.	Hoe vaak worden (of werden) radonmetingen uitgevoerd?	Minder dan 1 keer per jaar 1 keer per jaar Vaker dan 1 keer per jaar
12.	Door wie worden de radonmetingen uitgevoerd?	Overheidsinstantie Commercieel bedrijf Particulier
13.	Worden op uw locatie andere metingen aan de omgeving gedaan? Denk aan bijvoorbeeld temperatuur, fijnstof of luchtvochtigheid. *	Ja Nee
14.	Wat wordt er gemeten? U kunt meerdere antwoorden kiezen.	Temperatuur Luchtvochtigheid Koolstofdioxide (CO2) Fijnstof Anders, namelijk
15.	Is in het gedeelte van de groeve dat minimaal 1 keer per week wordt betreden ventilatie (luchtverversing) aanwezig die door mensen is aangelegd? Als	Nee, alleen natuurlijke ventilatie Ja, mechanische ventilatie Ja, door een of meerdere luchtschachten Anders, namelijk

	er alleen luchtverversing is door tocht, vul dan "Nee, alleen natuurlijke ventilatie" in. U kunt meerdere antwoorden kiezen.	
16.	Hoe vaak en/of wanneer wordt er geventileerd? U kunt hier details van de ventilatie aangeven. Bijvoorbeeld "Tijdens openingsuren" of "Alleen in de zomer". *	

Locatie - Omschrijving ondergrondse ruimte

De volgende vragen geven inzicht in hoe de ondergrondse ruimte eruit zien. Het gaat hierbij om het deel van de ondergrondse ruimte dat door bezoekers en/of medewerkers minimaal één keer per week wordt gebruikt. Aan de hand van de antwoorden, kan worden ingeschat op welke plaatsen het mogelijk en/of zinvol zou zijn om de radonconcentratie te meten.		
17.	Bestaat er een plattegrond van de ondergrondse ruimten?	Ja Nee
18.	Wilt u deze plattegrond ter inzage beschikbaar stellen?	Ja Nee
19.	Hoeveel ondergrondse zalen / ruimten die betreden worden, zijn er op uw locatie? *	Geen (alleen gangen) 1 2 3 4 - 10 Meer dan 10
20. 21. 22.	Kunt u voor de meest gebruikte ruimten (maximaal 3) aangeven wat ongeveer het oppervlakte is?	< 40 m ² 40 - 100 m ² 100 - 400 m ² > 400 m ² Niet van toepassing
23.	Wat is de lengte van het deel van het gangenstelsel dat minimaal één keer per week door medewerkers of bezoekers wordt betreden?	< 1 kilometer 1 - 10 kilometer 10 - 100 kilometer > 100 kilometer
24.	Wat is de (maximale) diepte onder het ingangsniveau?	
25.	Hoeveel in- en uitgangen heeft de groeve, die door medewerkers en/of bezoekers minimaal één keer per week gebruikt worden? *	1 2 3 4 of meer
26.	Hoe worden deze in- en uitgangen afgesloten buiten openingstijden? U kunt meerdere antwoorden kiezen.	Niet Hek Deur Anders, namelijk

27.	Hoeveel in- en uitgangen heeft de groeve, die door medewerkers en/of bezoekers minder dan één keer per week gebruikt worden? Het kan hierbij bijvoorbeeld ook gaan om nooduitgangen.	1 2 3 4 of meer
28.	Hoe worden deze minder vaak gebruikte in- en uitgangen afgesloten? U kunt meerdere antwoorden kiezen.	Niet Hek Deur Anders, namelijk

Locatie - Gebruik van de ondergrondse ruimte

De volgende vragen gaan over het gebruik van de ondergrondse ruimte. Met deze gegevens kan een inschatting worden gemaakt van de intensiteit van het gebruik en daarmee van de blootstelling van medewerkers en/of vrijwilligers.		
29.	Waarvoor wordt uw locatie gebruikt? Uw kunt meerdere antwoordmogelijkheden aankruisen.	Rondleidingen Expositie Evenementen Horecagelegenheid Sportieve activiteit Mergel / steenwinning Anders, namelijk
30.	Hoeveel uur per week tijdens een drukke week wordt de groeve gemiddeld betreden door bezoekers? Neem hierbij bijvoorbeeld een week in een schoolvakantie (vóór de coronacrisis) in gedachte.	
31.	Hoeveel uur per week tijdens een drukke week wordt de groeve gemiddeld betreden door medewerkers of vrijwilligers? Neem hierbij bijvoorbeeld een week in een schoolvakantie (vóór de coronacrisis) in gedachte. *	

Medewerkers

De volgende vragen gaan over medewerkers. Het gaat hierbij om personen die de groeven betreden of daar hun werkplek hebben. Hieronder kan dus bijvoorbeeld ook een kassamedewerker vallen, wanneer de kassa zich in de groeve bevindt. Waar staat "Medewerker" kunt u ook "Vrijwilliger" lezen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen vaste medewerkers en tijdelijke of flexibele medewerkers. Dit is omdat vaste medewerkers meestal langer en meer aanwezig zijn, en dus een grotere blootstelling aan radon hebben. Met vaste medewerkers wordt bedoeld: medewerkers die regelmatig en gedurende langere tijd (minimaal één jaar) op de locatie werken. Ze hoeven dus
--

niet per se een vast contract te hebben. Het kunnen bijvoorbeeld ook langdurig inzetbare uitzendkrachten zijn. Met tijdelijke of flexibele medewerkers wordt bedoeld: medewerkers die kortdurend werkzaamheden verrichten, bijvoorbeeld als extra hulp in drukke weken. De vragen hebben betrekking op de situatie zoals die was vóór de coronacrisis.		
32.	Hoeveel vaste medewerkers of vaste vrijwilligers zijn er, die de groeven betreden of daar hun werkplek hebben? *	Rondleidingen Expositie Evenementen Horecagelegenheid Sportieve activiteit Mergel / steenwinning Anders, namelijk
33.	Hoeveel jaar zijn deze vaste medewerkers of vaste vrijwilligers gemiddeld in dienst? *	
Hoe zijn deze vaste medewerkers of vaste vrijwilligers (die in de groeven werken) verdeeld over de hieronder genoemde leeftijdscategorieën? Vul indien niet van toepassing "0" in.		
34.	Jonger dan 18	
35.	Tussen 18 en 65 jaar	
36.	Ouder dan 65 jaar	
Hoeveel van de vaste medewerkers of vrijwilligers doen de volgende werkzaamheden in de groeve? Als bepaalde werkzaamheden niet van toepassing zijn op uw locatie, vul dan 0 in.		
37.	Kassa	
38.	Gids	
39.	Horeca	
40.	Onderhoud	
41.	Mergel/steenwinning	
42./43.	Anders, namelijk	
Hoeveel van uw vaste medewerkers of vrijwilligers werken de volgende werkuren per week in de ondergrondse ruimten of gangen? (Vul bij niet van toepassing "0" in).		
44.	< 8 uur per week	
45.	9 - 16 uur per week	
46.	17 - 24 uur per week	
47.	25 - 32 uur per week	
48.	33 - 40 uur per week	
49.	> 40 uur per week	
50.	Hoeveel tijdelijke / flexibele medewerkers of tijdelijke vrijwilligers zijn er? *	
51.	Hoeveel uur per week werkt een tijdelijke / flexibele medewerker of vrijwilliger gemiddeld in de ondergrondse ruimten of gangen? *	

Hoe zijn uw tijdelijke of flexibele medewerkers of tijdelijke vrijwilligers (die in de groeven werken) verdeeld over de hieronder genoemde leeftijdscategorieën? Vul indien niet van toepassing "0" in.		
52.	Jonger dan 18	
53.	Tussen 18 en 65 jaar	
54.	Ouder dan 65 jaar	
Hoeveel van de tijdelijke / flexibele medewerkers of tijdelijke vrijwilligers doen de volgende werkzaamheden in de groeven? Als bepaalde werkzaamheden niet van toepassing zijn op uw locatie, vul dan 0 in.		
55.	Kassa	
56.	Gids	
57.	Horeca	
58.	Onderhoud	
59.	Mergel/steenwinning	
60./61.	Anders, namelijk:	
Hieronder kunt u nog opmerkingen plaatsen die u eerder niet kwijt kon. U kunt hier ook extra toelichting geven bij eerder gestelde vragen.		
62.	Overige opmerking:	

15 Bijlage resultaten, groeven

15.1 Passieve radonmetingen

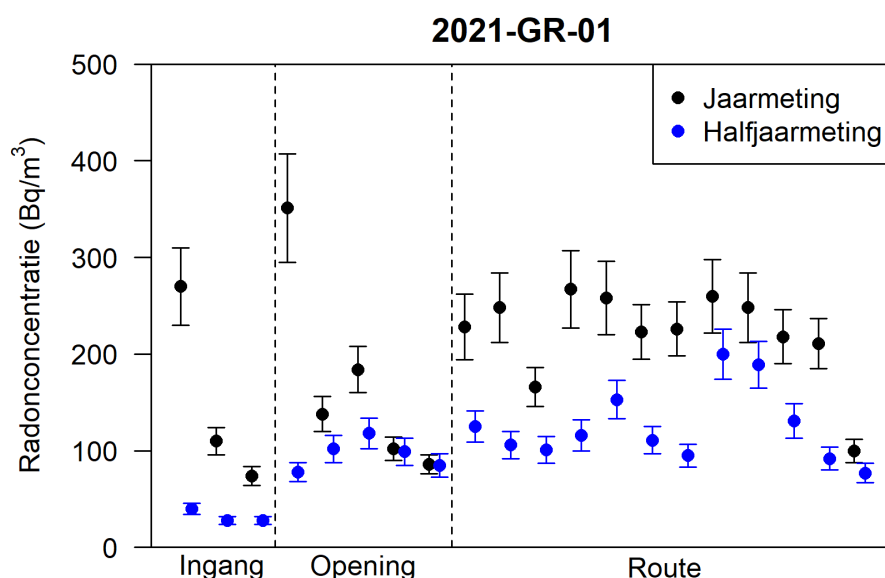
Deze paragraaf geeft aanvullende resultaten van de passieve radonmetingen, per groeve.

In Figuur 15.1 t/m Figuur 15.6 (en Figuur 6.2 van het rapport) zijn de radonconcentraties in de groeven weergegeven. De locaties zijn verdeeld in vijf categorieën:

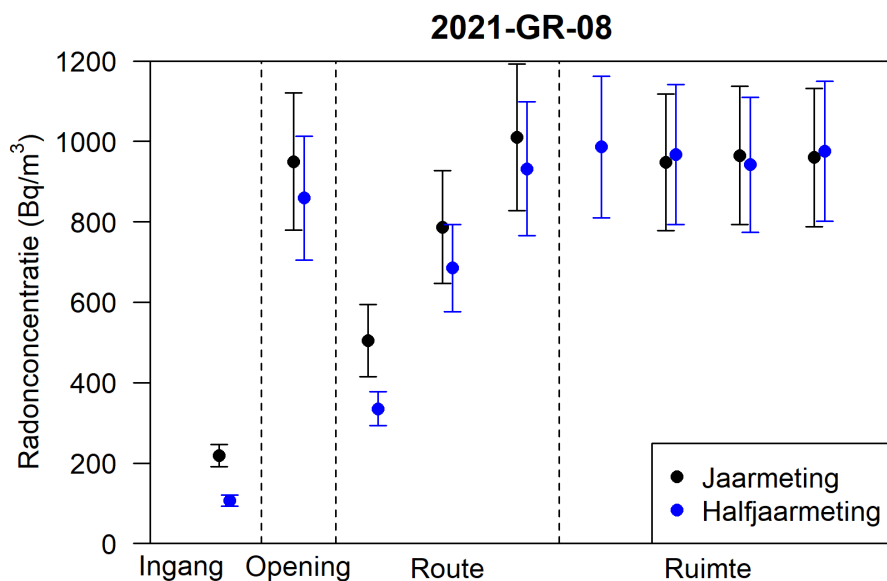
- Ingang: in de buurt van de (hoofd)ingang.
- Opening: in de buurt van een andere opening, zoals een aardpijp, ventilatieschacht, alternatieve opening, nooduitgang of opening voor vleermuizen.
- Route: langs de (hoofd)route, in het gangenstelsel van de groeve.
- Ruimte: in een ruimte (een groter of meer open deel van de groeve).
- Afgesloten: in een afgesloten, ingestort of doodlopend deel van de groeve.

De beschrijving van een locatie is gebaseerd op informatie die is verkregen van de deelnemende groeven, bijvoorbeeld plattegronden of uitleg tijdens een werkbezoek.

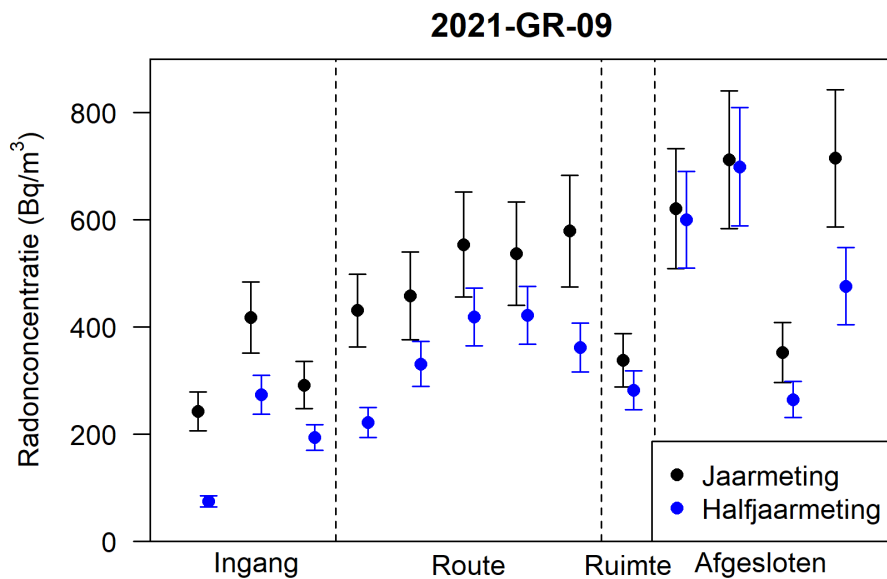
De resultaten van de jaar- en halfjaarmetingen op dezelfde locatie zijn bij elkaar geplot. De foutbalken zijn 2 keer de standaarddeviatie van de meting.



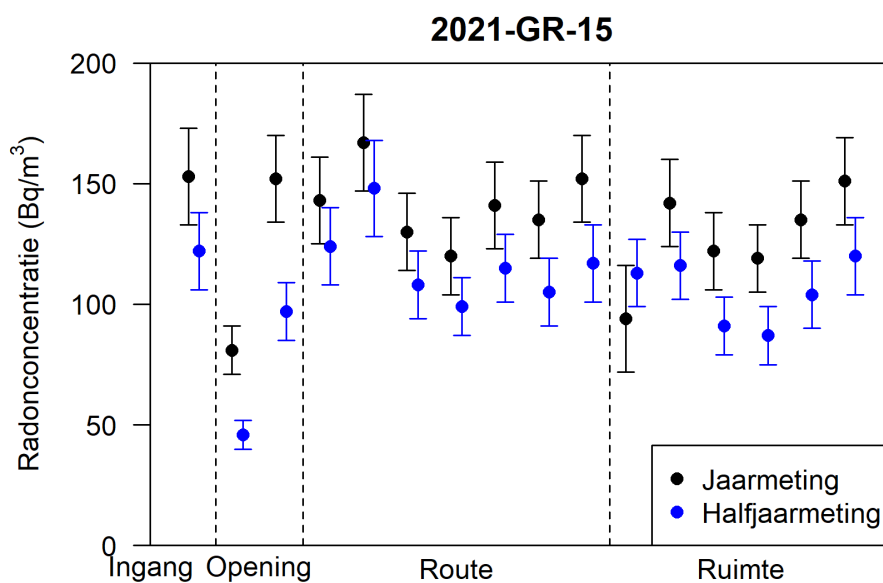
Figuur 15.1 De radonconcentratie op verschillende categorieën locaties in groeve 2021-GR-01 (zie tekst aan het begin van paragraaf 15.1 voor beschrijving).



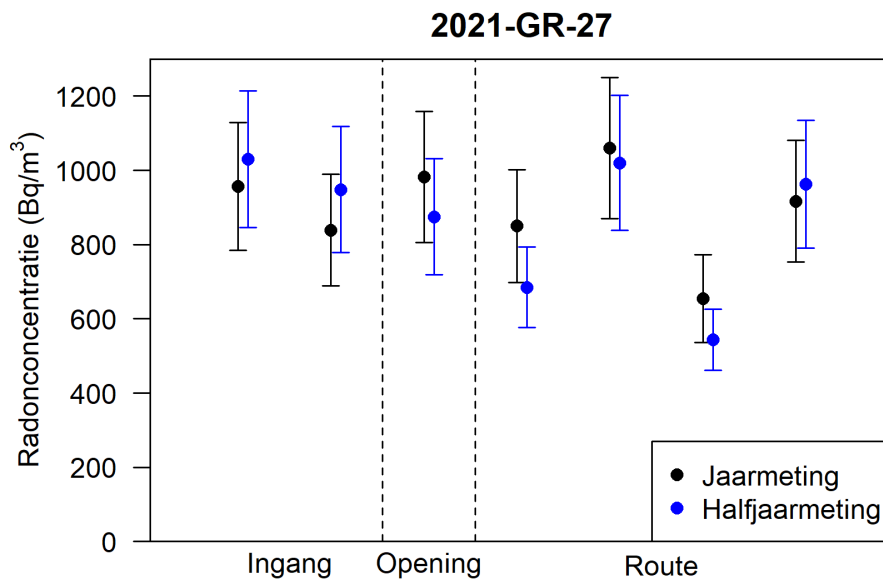
Figuur 15.2 De radonconcentratie op verschillende categorieën locaties in groeve 2021-GR-08 (zie tekst aan het begin van paragraaf 15.1 voor beschrijving).



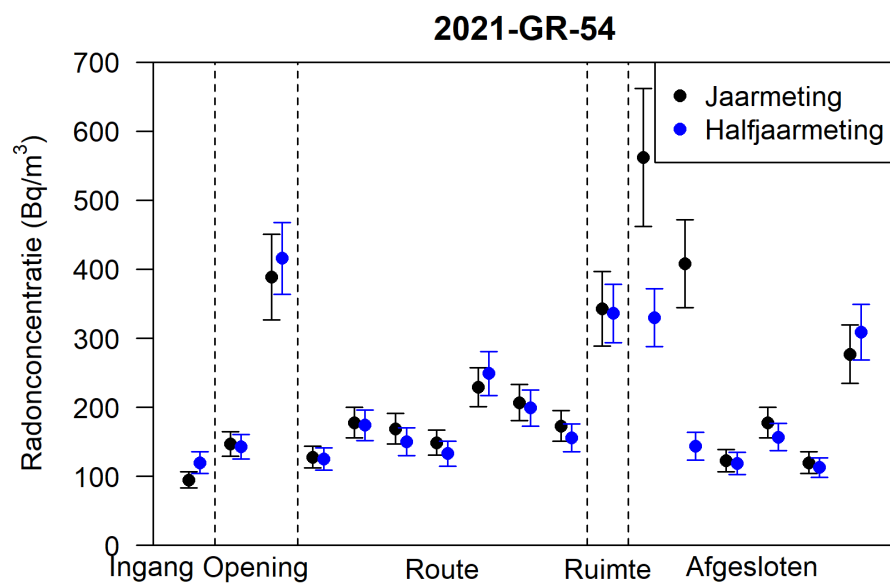
Figuur 15.3 De radonconcentratie op verschillende categorieën locaties in groeve 2021-GR-09 (zie tekst aan het begin van paragraaf 15.1 voor beschrijving).



Figuur 15.4 De radonconcentratie op verschillende categorieën locaties in groeve 2021-GR-15 (zie tekst aan het begin van paragraaf 15.1 voor beschrijving).



Figuur 15.5 De radonconcentratie op verschillende categorieën locaties in groeve 2021-GR-27 (zie tekst aan het begin van paragraaf 15.1 voor beschrijving).



Figuur 15.6 De radonconcentratie op verschillende categorieën locaties in groeve 2021-GR-54 (zie tekst aan het begin van paragraaf 15.1 voor beschrijving).

Tabel 15.1 Resultaten van de passieve radonmetingen bij de groeven. 'J' = jaarmeting, 'HJ' = halfjaarmeting. De halfjaarmetingen zijn uitgevoerd in de winterperiode.

	2021-GR-01		2021-GR-08		2021-GR-09		2021-GR-11		2021-GR-15		2021-GR-27		2021-GR-54	
	J	HJ	J	HJ	J	HJ	J	HJ	J	HJ	J	HJ	J	HJ
Meettijd (dagen)	394	190	393	192	386	187	381	185	393	195	377	182	385	187
Aantal geldige metingen	20	20	8	9	13	13	20	20	16	16	7	7	17	17
Aantal metingen boven Nederlands referentieniveau (100 Bq/m ³)	17	11	8	9	13	12	20	19	14	11	7	7	16	17
Aantal metingen boven maximaal Europees referentieniveau (300 Bq/m ³)	1	0	7	8	11	7	16	15	0	0	7	7	4	4
Laagste waarde (Bq/m ³)	74	28	219	107	243	75	229	74	81	46	654	544	95	113
Hoogste waarde (Bq/m ³)	351	200	1010	986	715	699	634	634	167	148	1060	1030	562	416
Mediaanwaarde (Bq/m ³)	220	102	949	932	458	331	496	388	138	110	917	948	178	156
Gemiddelde waarde (Bq/m ³)	198	104	793	754	481	355	468	364	134	107	894	866	228	198

15.2 **Persoonsgebonden radonmetingen**

Deze paragraaf geeft de meetresultaten van de persoonsgebonden radonmetingen.

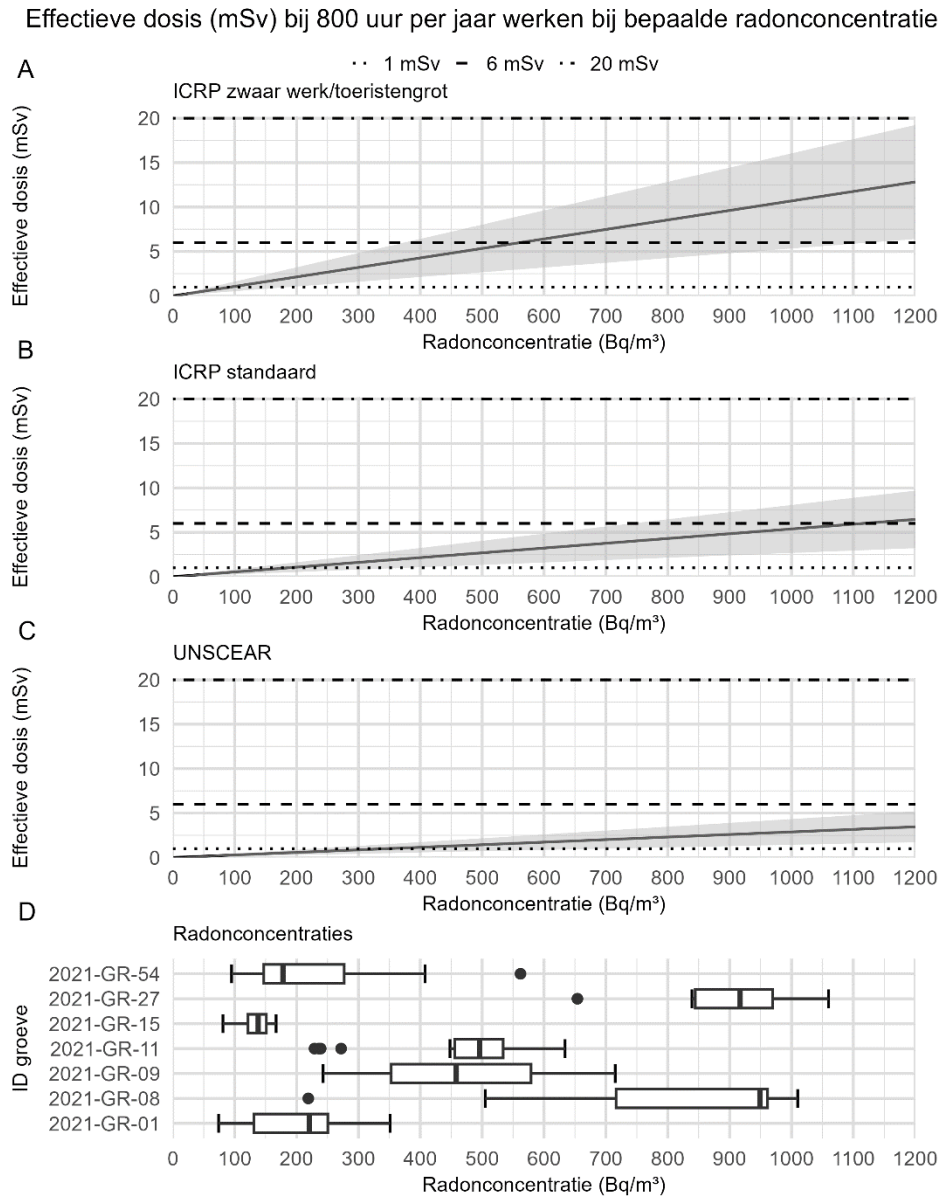
Tabel 15.2 Resultaten van persoonsgebonden radonmetingen in de groeven. De onzekerheid is 2 standaarddeviaties. De weergegeven waarden voor de achtergrond zijn het gemiddelde van 2 metingen (zie paragraaf 5.5 voor meer informatie).

Werknemer	Werktijd (uur)	Meetperiode (dagen)	Over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tijd} (kBq·h/m ³)			Achtergrond (Bq/m ³)	
			Resultaat	Onzekerheid	Gerapporteerd	Resultaat	Onzekerheid
GR-01	132	199	21	32	< 32	21	4
GR-08	122	192	59	426	59	417	50
GR-09 of 54 (werknemer 1)	5	204	39	86	< 86	71,5	10
GR-09 of 54 (werknemer 2)	74	204	45	86	< 86	71,5	10
GR-11 (werknemer 1)	7 (*)	185	0	104	< 104	117	14
GR-11 (werknemer 2)	7 (*)	185	6	104	< 104	117	14

(*) De persoonsgebonden radonmeter is alleen aan het begin van de meetperiode (de eerste week) gedragen, de gerapporteerde werktijd komt daarmee niet overeen met de werkelijke werktijd ondergronds. Zie paragraaf 5.5 voor meer informatie.

15.3 Effectieve dosis

Figuur 15.7 geeft de dosisschatting met verschillende mogelijke waarden voor de DCC en F . Zie paragraaf 6.6 voor meer informatie.



Figuur 15.7 Figuren A-C tonen de effectieve dosis als functie van de radonconcentratie bij een werktijd van 800 uur (95% van de werknemers werken minder dan 800 uur per jaar in de groeve). Er is gerekend met de DCC van de ICRP voor zware werkzaamheden/werkzaamheden in een toeristengrot (A), de DCC van de ICRP voor standaard werkzaamheden (B) en de DCC van UNSCEAR (C). Het grijze vlak geeft de variatie in evenwichtsfactor aan. Voor de variatie van de evenwichtsfactor is gerekend met een F van 0,2 tot 0,6. Voor de lijnen is gerekend met een meest waarschijnlijke waarde voor F , namelijk 0,4. Het onderste deel van de figuur (D) geeft de jaargemiddelde radonconcentraties in de deelnemende groeven (voor uitleg over de boxplots, zie Figuur 6.1).

16 Bijlage onderzoeksmethode, drinkwaterbedrijven

16.1 Instructie plaatsen passieve radonmeters

Bedankt voor uw medewerking aan het RIVM-onderzoek naar radon bij drinkwaterwinningsbedrijven. U heeft nu één, twee of drie radonmeters ontvangen.

Lees de voor- en achterkant van deze instructie eerst goed door, voor u de meter uit de verpakking haalt.

De meter werkt vanzelf. U hoeft de meters alleen maar in de juiste ruimten te plaatsen.

Stap 1:

Kies één, twee of drie verschillende ruimtes in het zuiveringsstation waar u de radonmeters gaat plaatsen. Dit zijn bij voorkeur de volgende ruimtes:

- Ruimte 1: eerste stap in het zuiveringsproces waar (onderhouds)medewerkers komen (bijvoorbeeld beluchtingsruimte).
- Ruimte 2: andere stap in het zuiveringsproces waar (onderhouds)medewerkers komen (bijvoorbeeld een filtratieruimte).
- Ruimte 3: Een ruimte waar medewerkers een langere tijd verblijven (bijvoorbeeld een kantoor, bedieningsruimte).



Figuur 8 Radonmeter opgehangen in een ruimte

Stap 2:

Haal de radonmeter uit de verpakking²³. De radonmeter meet vanaf nu vanzelf de hoeveelheid radon in de ruimte.

Stap 3 (optioneel):

Noteer op het informatiekaartje de gegevens van de contactpersoon namens uw organisatie. Verbind dit kaartje met bijvoorbeeld een

²³ De meter mag ontsmet worden. Het ontsmetten van de meter met desinfectiemiddel op basis van waterstofperoxide en perazijnzuur (bijvoorbeeld Panox 300) voor het plaatsen in een ruimte heeft geen invloed op de meting.

touwtje aan de radonmeter, zodat uw collega's weten wie intern de contactpersoon is. U kunt de radonmeter ook ophangen met dit touwtje in de ruimte (zie figuur 1).

Stap 4:

Hang de radonmeter op, of leg deze neer in de ruimten. Noteer van iedere meter:

- het nummer van de radonmeter. Dit bestaat uit 9 cijfers en staat op de meter (zie figuur 2).
- de datum waarop u de radonmeter heeft geplaatst.
- de ruimte waar u de radonmeter heeft geplaatst.

Deze informatie heeft u nodig bij stap 5.

Verplaats de radonmeter daarna niet meer. Het is belangrijk dat de radonmeter de hele meetperiode op dezelfde plek blijft.

Houd bij het plaatsen rekening met het volgende:

Plaats of hang de radonmeter wel:

- Minimaal 25 cm van de binnenmuur of het plafond af.
- Minimaal 50 cm van een ventilatievoorziening.
- Minimaal 50 cm van de buitenmuur af.
- Minimaal 25 cm van een warmtebron (radiator, kachel, elektronische apparaten).

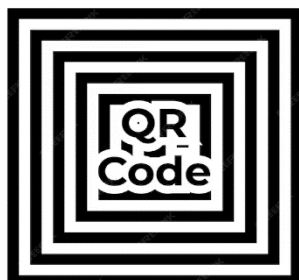
Plaats of hang de radonmeter niet:

- Op de vloer.
- In de verpakking.
- In een afgesloten (lade)kast of ander voorwerp dat afgesloten wordt.
- In het water.
- In direct zonlicht.

Stap 5:

Ga naar de vragenlijst voor het registreren van de radonmeter of scan de QR-code, en vul in (circa 15 tot 30 minuten):

- De datum waarop u de meter plaatst.
- Het nummer van de radonmeter. Dit bestaat uit 9 cijfers en staat op de meter (zie figuur 2).
- De naam van het productiestation en de ruimte waar de radonmeter hangt.
- Een aantal gegevens over het zuiveringsstation en de ruimten waar de radonmeters hangen.
- Een aantal gegevens over de werkzaamheden in deze ruimte.
- Een foto van de ruimte waar de radonmeter hangt (optioneel).



Over drie maanden laten we u weten hoe u de meters terugstuurt. Enkele productiestations ontvangen daarna een nieuwe meter. Zo weten we voor twee verschillende periodes in het jaar de gemiddelde radonconcentratie. De hoeveelheid radon in de ruimte varieert namelijk gedurende het jaar.



Figuur 9 Het nummer op de radonmeter

Wij sturen na ontvangst de radonmeters naar het laboratorium. Na analyse krijgt u van ons uw eigen resultaten. Wij verwerken de resultaten van alle deelnemende zuiveringsstations geanonimiseerd in een rapport.

Meer informatie of vragen?

Kijk voor meer informatie over radon, het onderzoek en deze radonmeter op www.rivm.nl/radon. Nog vragen? Neem contact met de onderzoekers van het RIVM

16.2 Algemene informatie voorafgaand aan de bedrijfsvragenlijsten en vragenlijst A

Fijn dat u aan dit onderzoek wilt deelnemen.

In deze vragenlijst geeft u antwoord op vragen over uw bedrijf. Deze informatie gebruiken we voor het schatten van de blootstelling aan radon van de werknemer. Het eerste deel van de vragen gaat over de locaties voor de productie van het drinkwater (een korte omschrijving daarvan) en het gebruik van de ruimten. Het tweede deel van de vragen gaat over de medewerkers die in deze ruimten werken. Helemaal aan het einde kunt u opmerkingen kwijt die u niet ergens anders kon plaatsen.

De tijd die het invullen van de vragen kost, is afhankelijk van de grootte van uw bedrijf; het zal ongeveer tussen de 15 en 30 minuten zijn. U kunt de ingevulde gegevens tussentijds opslaan.

Radon: wat is dat?

Radon is een natuurlijk gevormd, radioactief gas dat u niet kunt zien of ruiken. Omdat radon van nature in de bodem voorkomt, komt het terecht in grondwater. Radon lost op in (grond)water, en zal ontsnappen wanneer het opgepompte water in een ruimte bewerkt wordt. In deze ruimte kan radon dan een gezondheidsrisico vormen bij inademing. Hoe meer radon er aanwezig is en hoe langer u hier bent, hoe hoger de kans op longkanker.

Waarom dit onderzoek?

De kans dat radon longkanker veroorzaakt, hangt van een aantal factoren af. Bijvoorbeeld van de hoeveelheid radon die aanwezig is in een ruimte en hoe lang iemand zich hier bevindt. De hoeveelheid radon die vrijkomt in een ruimte verschilt per regio en per werkplek. Daarom heeft het RIVM in 2016 een verkennend onderzoek gedaan naar de hoeveelheid radon in Nederlandse bedrijven. Bij dit onderzoek zijn hogere radonwaarden gevonden bij grondwater-zuiveringsstations van drinkwaterbedrijven en in ondergrondse ruimtes zoals grotten. Maar over radon in de werkomgeving is nog steeds veel onduidelijk. Komt radon veel voor in de werkomgeving? Komen mensen op het werk veel en langdurig met radon in contact? En lopen werknemers een gezondheidsrisico door in contact te komen met radon? Het RIVM wil met dit onderzoek antwoord op deze vragen krijgen.

Waarom bij uw bedrijf?

In 2016 heeft het RIVM bij vier drinkwaterbedrijven onderzoek gedaan naar radon. Bij drie bedrijven is in drie ruimtes de radonconcentratie gemeten en bij één bedrijf in vijf ruimtes. Dit waren filtratieruimtes, beluchtingsruimtes en/of bedieningsruimtes. Bij deze metingen zijn hoge radonwaarden gevonden. We verwachten dat ook op andere productiestations veel radon aanwezig is. Maar we weten niet hoe veel mensen hiermee in contact komen. Omdat uw bedrijf meerdere locaties heeft waar drinkwater geproduceerd wordt, is uw deelname aan dit onderzoek belangrijk.

Wat doen wij met de onderzoeksgegevens?

Om uw privacy te beschermen, krijgen alleen de onderzoekers die betrokken zijn bij het onderzoek toegang tot uw gegevens. Uw gegevens delen wij niet met andere personen of instanties, en zullen niet worden gebruikt voor andere doeleinden dan de radonstudie. Op basis van de geanonimiseerde gegevens wordt een wetenschappelijk onderzoeksrapport opgesteld, waarin we de blootstelling aan radon van werknemers bij (drink)waterbedrijven. U krijgt uw eigen meetresultaten uiteraard wel toegestuurd. We leggen dan ook uit wat de meetresultaten betekenen en wat u kunt doen als de meting hoog is.

Informatie en contact

Voor meer informatie over radon, ga naar [de website van het RIVM](#).

Mocht u nog vragen of opmerkingen hebben over het onderzoek, neem dan contact op met het projectteam van het RIVM via radon@rivm.nl.

16.3 Bedrijfsvragenlijst

Contactgegevens

Vul hieronder de contactgegevens in. Deze gegevens worden alleen gebruikt om u bij vragen te kunnen contacteren. De resultaten van de vragenlijst worden geanonimiseerd verwerkt in het onderzoeksrapport.		
1.	Bedrijfsnaam:	
2.	Bedrijfsadres:	
3.	Postcode:	
4.	Plaats:	
5.	Naam contactpersoon:	
6.	Telefoonnummer contactpersoon:	
7.	E-mailadres contactpersoon:	

Locatie - Algemene vragen

Op deze pagina staan algemene vragen over de winning/zuiveringsstations voor de productie van drinkwater bij uw bedrijf. De vragen zijn erop gericht om inzicht te krijgen in de hoeveelheid informatie die er al beschikbaar is over radon.		
8.	Hoeveel productiestations zijn er bij uw bedrijf waar grondwater gezuiverd wordt?	
9.	Hoeveel productiestations zijn er bij uw bedrijf waar oppervlaktewater gezuiverd wordt?	
10.	Hoeveel productiestations zijn er bij uw bedrijf waar infiltratiewater gezuiverd wordt?	
11.	Hoeveel productiestations zijn er bij uw bedrijf waar oevergrondwater gezuiverd wordt?	
12.	Is bij uw bedrijf een risico-inventarisatie (RI&E) aanwezig gericht op radongas?	
13.	Worden of werden binnen uw bedrijf radonmetingen uitgevoerd? Indien ja:	Ja Nee
13a	Hoe vaak worden (of werden) radonmetingen uitgevoerd?	Minder dan 1 keer per jaar 1 keer per jaar Vaker dan 1 keer per jaar
13b	Door wie worden (of werden) de radonmetingen uitgevoerd?	Overheidsinstantie Commercieel bedrijf Particulier
16	Worden in productiestations andere metingen gedaan? Denk aan bijvoorbeeld temperatuur, fijnstof of luchtvochtigheid.	Ja Nee
16a.	Wat wordt er gemeten? U kunt meerdere antwoorden kiezen.	Temperatuur Luchtvochtigheid Koolstofdioxide (CO2) Fijnstof Waterstofsulfide (H2S) Lower Explosive Limit (LEL) Zuurstof (O) Anders, namelijk:

Locatie – algemene omschrijving productiestations

De volgende vragen geven inzicht in de verschillende ruimten die aanwezig zijn bij productiestations en de processen die in deze ruimten plaatsvinden. De situatie kan per productiestation anders zijn, daarom vindt u aan het einde van de vragenlijst ruimte om opmerkingen te plaatsen.		
De volgende vragen gaan over de beluchtingsruimte		
18.	Op hoeveel productiestations vindt beluchting van water plaats?	
19.	Hoeveel beluchtingsruimtes zijn er gemiddeld per productiestation?	
20.	Hoeveel beluchtingsinstallaties staan er gemiddeld per ruimte?	
De volgende vragen gaan over de filtratieruimte		
21.	Op hoeveel productiestations vindt filtratie van water plaats?	
22.	Hoeveel filtratieruimtes zijn er gemiddeld per productiestation?	
23.	Hoeveel filterinstallaties staan er gemiddeld per ruimte?	
De volgende vragen gaan over andere ruimtes bij het productiestation waar medewerkers komen.		
24.	Zijn er andere ruimtes in het waterzuiveringsstation waar medewerkers langere tijd (gemiddeld >5 uur per week) werkzaamheden uitvoeren? Meerdere antwoorden mogelijk.	Kantoorruimte Drinkwateropslagruimte Bedieningsruimte Anders, nl.
25.	Welke van de volgende medewerkers verblijven langere tijd (gemiddeld >5 uur per week) in deze ruimte?	Procesoperator Onderhoud- /schoonmaakmedewerkers Anders, nl.
26.	Het zuiveringsproces kan per productiestation anders zijn. Wilt u hier nog extra toelichting over geven of heeft u hier nog opmerkingen over?	

Medewerkers

De volgende vragen gaan over medewerkers. Het gaat hierbij om personen die de waterzuiveringsstations betreden of daar hun werkplek hebben. Hieronder kan dus bijvoorbeeld ook een kantoormedewerker vallen, wanneer het kantoor zich in het waterzuiveringsstation bevindt.		
27.	Welke van de volgende medewerkers heeft u in dienst die werkzaamheden uitvoeren in het productiestation? U kunt meerdere antwoorden kiezen.	Procesoperator Onderhouds- en schoonmaakmedewerkers Anders, namelijk
Hoe zijn deze medewerkers bij uw bedrijf (die werkzaamheden in het zuiveringsstation uitvoeren) verdeeld over de hieronder genoemde leeftijdscategorieën? Het gaat hier om alle medewerkers bij elkaar, dus procesoperators, schoonmaak- en onderhoudsmedewerkers en anderen. Vul indien niet van toepassing "0" in.		
28.	Jonger dan 18 jaar	
29.	Tussen 18 en 65 jaar	
30.	Ouder dan 65 jaar	
31.	Hoeveel jaar zijn deze medewerkers gemiddeld in dienst?	
De volgende vragen gaan over de procesoperators <i>Als bij vraag 17 procesoperator is aangevinkt verschijnen de volgende vervolgvragen</i>		

De volgende vragen gaan over medewerkers. Het gaat hierbij om personen die de waterzuiveringsstations betreden of daar hun werkplek hebben. Hieronder kan dus bijvoorbeeld ook een kantoormedewerker vallen, wanneer het kantoor zich in het waterzuiveringsstation bevindt.		
32.	Hoeveel procesoperators heeft u bij uw bedrijf in dienst?	
33.	Wat is het gemiddeld aantal procesoperators per station?	
34.	Op hoeveel productiestations werkt de procesoperator gemiddeld?	
35.	Hoeveel uur gemiddeld per jaar is de procesoperator in de beluchtingsruimtes?	
36.	Wat is de stand van de waterstroom tijdens de werkzaamheden van de procesoperator in de beluchtingsruimte?	· volledig aan, in de beluchtingsruimte stroomt water door de beluchtingsinstallatie · volledig uit, er is geen waterstroom aanwezig in de beluchtingsruimte. · Alleen de waterstroom in de beluchtingsinstallatie waar werkzaamheden worden uitgevoerd staat uit. In andere installaties in de ruimte stroomt nog steeds water. · Anders, nl:
37.	Hoeveel uur gemiddeld per jaar is de procesoperator in de filtratieruimtes?	
38.	Wat is de stand van de waterstroom tijdens de werkzaamheden van de procesoperator in de filtratieruimte?	· volledig aan, in de filtratieruimte stroomt in alle filterinstallatie water · volledig uit, er is geen waterstroom aanwezig in de filtratieruimte. · Alleen de waterstroom in de filterinstallatie waar werkzaamheden worden uitgevoerd staat uit. In andere filterinstallaties in de ruimte stroomt nog steeds water. · Anders, nl:
39.	Hoeveel uur gemiddeld per jaar is de procesoperator op kantoor of in de bedieningsruimtes in het productiestation?	
40.	Heeft u nog opmerkingen of wilt u extra uitleg geven over de procesoperators? Dan kunt u deze hier kwijt:	
De volgende vragen gaan over de onderhouds- /schoonmaakmedewerkers <i>Als bij vraag 17 onderhouds- en schoonmaakmedewerkers is aangevinkt verschijnen de volgende vervolgvragen</i>		
41.	Hoeveel onderhouds-/schoonmaakmedewerkers heeft u bij uw bedrijf in dienst?	
42.	Wat is het gemiddeld aantal onderhouds-	

De volgende vragen gaan over medewerkers. Het gaat hierbij om personen die de waterzuiveringsstations betreden of daar hun werkplek hebben. Hieronder kan dus bijvoorbeeld ook een kantoormedewerker vallen, wanneer het kantoor zich in het waterzuiveringsstation bevindt.		
	/schoonmaakmedewerkers per station?	
43.	Op hoeveel productiestations werkt de onderhouds- /schoonmaakmedewerker gemiddeld?	
44.	Hoeveel uur gemiddeld per jaar is de onderhouds- /schoonmaakmedewerker in de beluchtingsruimtes?	
45.	Wat is de stand van de waterstroom tijdens de werkzaamheden van de onderhouds- /schoonmaakmedewerkers in de beluchtingsruimte?	· volledig aan, in de beluchtingsruimte stroomt water door de beluchtingsinstallatie · volledig uit, er is geen waterstroom aanwezig in de beluchtingsruimte. · Alleen de waterstroom in de beluchtingsinstallatie waar werkzaamheden worden uitgevoerd staat uit. In andere installaties in de ruimte stroomt nog steeds water. · Anders, nl:
46.	Hoeveel uur gemiddeld per jaar is de onderhouds- /schoonmaakmedewerker in de filtratieruimtes?	
47.	Wat is de stand van de waterstroom tijdens de werkzaamheden van de onderhouds- /schoonmaakmedewerkers in de filtratieruimte?	· volledig aan, in de filtratieruimte stroomt in alle filterinstallatie water · volledig uit, er is geen waterstroom aanwezig in de filtratieruimte. · Alleen de waterstroom in de filterinstallatie waar werkzaamheden worden uitgevoerd staat uit. In andere filterinstallaties in de ruimte stroomt nog steeds water. · Anders, nl:
48.	Hoeveel uur gemiddeld per jaar is de onderhouds- /schoonmaakmedewerker op kantoor of in de bedieningsruimtes in het productiestation?	
49.	Heeft u nog opmerkingen of wilt u extra uitleg geven over de onderhouds- /schoonmaakmedewerkers? Dan kunt u deze hier kwijt:	
De volgende vragen gaan over de medewerkers die u bij vraag 24 heeft ingevuld bij anders, namelijk.		
<i>Als bij vraag 17 anders, namelijk: is aangevinkt verschijnen de volgende vervolgvragen</i>		
50.	Hoeveel andere medewerkers heeft u bij uw bedrijf in dienst?	
51.	Wat is het gemiddeld aantal andere medewerkers per station?	

De volgende vragen gaan over medewerkers. Het gaat hierbij om personen die de waterzuiveringsstations betreden of daar hun werkplek hebben. Hieronder kan dus bijvoorbeeld ook een kantoormedewerker vallen, wanneer het kantoor zich in het waterzuiveringsstation bevindt.		
52.	Op hoeveel productiestations werkt de andere medewerker gemiddeld?	
53.	Hoeveel uur gemiddeld per jaar is de andere medewerker in de beluchtingsruimtes?	
54.	Wat is de stand van de waterstroom tijdens de werkzaamheden van de andere medewerkers in de beluchtingsruimte?	· volledig aan, in de beluchtingsruimte stroomt water door de beluchtingsinstallatie · volledig uit, er is geen waterstroom aanwezig in de beluchtingsruimte. · Alleen de waterstroom in de beluchtingsinstallatie waar werkzaamheden worden uitgevoerd staat uit. In andere installaties in de ruimte stroomt nog steeds water. · Anders, nl:
55.	Hoeveel uur gemiddeld per jaar is de onderhouds- /schoonmaakmedewerker in de filtratieruimtes?	
56.	Wat is de stand van de waterstroom tijdens de werkzaamheden van de andere medewerkers in de filtratieruimte?	· volledig aan, in de filtratieruimte stroomt in alle filterinstallatie water · volledig uit, er is geen waterstroom aanwezig in de filtratieruimte. · Alleen de waterstroom in de filterinstallatie waar werkzaamheden worden uitgevoerd staat uit. In andere filterinstallaties in de ruimte stroomt nog steeds water. · Anders, nl:
57.	Hoeveel uur gemiddeld per jaar is de andere medewerker op kantoor of in de bedieningsruimtes in het productiestation?	
58.	Heeft u nog opmerkingen of wilt u extra uitleg geven over de medewerkers die u bij vraag 24 heeft ingevuld bij anders, namelijk? Dan kunt u deze hier kwijt:	
Hieronder kunt u nog opmerkingen plaatsen die u eerder niet kwijt kon. U kunt hier ook extra toelichting geven bij eerder gestelde vragen.		
59.	Overige opmerkingen	

16.4 Vragenlijst A: Vragenlijst bij eerste radonmetingen in productiestations

Contactgegevens

Vul hieronder de contactgegevens in. Deze gegevens worden alleen gebruikt om u bij vragen te kunnen contacteren. De resultaten van de enquête worden geanonimiseerd verwerkt in het onderzoeksrapport.		
1.	Bedrijfsnaam:	
2.	Naam productiestation:	
3.	Adres productiestation:	
4.	Postcode productiestation:	
5.	Plaats productiestation:	
6.	Naam contactpersoon productiestation:	
7.	Telefoonnummer contactpersoon productiestation:	
8.	E-mailadres contactpersoon productiestation:	

Deel 1 - Algemene vragen productiestation

Op deze pagina staan algemene vragen over het station voor de productie van (drink)water. De vragen zijn erop gericht om inzicht te krijgen in de hoeveelheid informatie die er al beschikbaar is over radon.		
9	Worden of werden op uw locatie radonmetingen uitgevoerd?	Ja Nee
10	Hoe vaak worden (of werden) radonmetingen uitgevoerd? [Indien vraag 9 ja]	Minder dan 1 keer per jaar 1 keer per jaar Vaker dan 1 keer per jaar
11	Door wie worden (of werden) de radonmetingen uitgevoerd? [Indien vraag 9 ja]	Overheidsinstantie Commercieel bedrijf Particulier Onbekend
12	Worden er op uw locatie andere metingen aan de omgeving gedaan? Denk aan bijvoorbeeld temperatuur, fijnstof of luchtvochtigheid.	Ja Nee
13	Wat wordt er gemeten? U kunt meerdere antwoorden kiezen. [Indien vraag 12 Ja]	Temperatuur Luchtvochtigheid Koolstofdioxide (CO ₂) Fijnstof Waterstofsulfide (H ₂ S) Lower Explosive Limit (LEL) Zuurstof (O) Anders, namelijk:
14	Welk type water wordt in het productiestation gezuiverd?	Grondwater Oevergrondwater Infiltratiewater

Op deze pagina staan algemene vragen over het station voor de productie van (drink)water. De vragen zijn erop gericht om inzicht te krijgen in de hoeveelheid informatie die er al beschikbaar is over radon.		
		Oppervlaktewater Anders, namelijk
15	Hoeveel liter water wordt gemiddeld per dag gezuiverd gedurende zomer (april t/m september)?	
16	Hoeveel liter water wordt per dag gemiddeld gezuiverd gedurende winter (oktober t/m maart)?	

Deel 2 - omschrijving van de ruimten waar radonmeters hangen.

De volgende vragen geven inzicht in hoe de ruimten van het productiestation eruit zien waar de radonmeters hangen. Ook wordt gevraagd naar informatie over de ruimten die invloed hebben op de radonconcentratie.		
17	Hoeveel radonmeters hangen in het productiestation?	Eén radonmeter Twee radonmeters Drie radonmeters
De volgende vragen gaan over de ruimte waar de eerst/tweede/derde radonmeter hangt (ruimte 1/2/3). <i>Deze vragen worden gesteld voor iedere ruimte waar een radonmeter</i> De voorkeurslocatie radonmeter 1 was de eerste stap in het zuiveringsproces waar (onderhouds)medewerkers komen (bijvoorbeeld beluchtingsruimte). De voorkeurslocatie radonmeter 2 was een andere stap in het zuiveringsproces waar (onderhouds)medewerkers komen (bijvoorbeeld filtratieruimte). De voorkeurslocatie radonmeter 3 was een ruimte waar medewerkers langere tijd verblijven (bijvoorbeeld een kantoor of bedieningsruimte).		
xx	Wanneer heeft u de radonmeter in de ruimte 1/2/3 opgehangen?	Datum [dd-mm-jjjj]
xx	Welk nummer staat er op de radonmeter in ruimte 1/2/3?	9 cijfers
xx	Wat is de functie van ruimte 1/2/3?	
xx	Staan er één of meerdere installaties in ruimte 1/2/3 voor het zuiveren van het ruwe water? Bijvoorbeeld cascades, beluchtingssproeiers, filters.	Ja Nee
xx	Geef een korte omschrijving van de installaties in ruimte 1/2/3?	
xx	Hoeveel van deze installatieonderdelen zijn er in ruimte 1/2/3?	
xx	Hoeveel van deze ruimtes zijn er in het productiestation?	
xx	Hoe groot is ruimte 1/2/3?	< 1 m 1 m - 2 m 2 m - 3 m 3 m - 4 m

De volgende vragen geven inzicht in hoe de ruimten van het productiestation eruit zien waar de radonmeters hangen. Ook wordt gevraagd naar informatie over de ruimten die invloed hebben op de radonconcentratie.		
		5 m - 6 m 6 m >
xx	Hoe hoog is ruimte 1/2/3?	< 1 m 1 m - 2 m 2 m - 3 m 3 m - 4 m 5 m - 6 m 6 m >
xx	Is in ruimte 1/2/3 ventilatie (luchtverversing) aanwezig?	Nee, afgesloten ruimte met een deur Ja, mechanische ventilatie Ja, natuurlijke ventilatie door één of meerdere ramen Niet bekend Anders, namelijk:
xx	Wanneer wordt er geventileerd? U kunt meerdere antwoorden kiezen.	Tijdens onderhoud Tijdens schoonmaken Tijdens waterzuivering, als de waterstroom aanstaat Altijd, de ventilatie gaat nooit uit. Niet bekend Anders namelijk:
xx	Is het ventilatievoud van ruimte 1/2/3 bekend? Ventilatievoud is het aantal keer dat per uur de ruimte van verse lucht wordt voorzien	Ja Nee
xx	Wat is het ventilatievoud in ruimte 1/2/3 als de ventilatie aanstaat? *	
xx	Is er een overdruk of onderdruk aanwezig in ruimte 1/2/3?	Overdruk Onderdruk Nee, er is geen drukverschil Onbekend
xx	U kunt hier een foto toevoegen van ruimte 1/2/3 (optioneel)	

Deel 3 - Medewerkers

De volgende vragen gaan over medewerkers. Het gaat hierbij om personen die in de ruimten komen waar een radonmeter hangt of daar hun werkplek hebben. <i>Deze vragen worden gesteld voor iedere ruimte waar een radonmeter hangt en voor iedere medewerker (procesoperator/onderhoudsmedewerkers/Anders) die in deze ruimte komt.</i>		
69	Welke van de volgende medewerkers komen in de ruimte 1/2/3?	Procesoperator Onderhoudsmedewerkers Anders, nl:
70	Hoeveel uur gemiddeld per jaar is een procesoperator/onderhoudsmedewerker/andere medewerkers aanwezig in ruimte 1/2/3?	

Overige ruimten bij het productiestation en mogelijkheid voor het plaatsen van algemene opmerking(en)

De volgende vragen geven inzicht in de overige ruimten die aanwezig zijn in het productiestation.		
71	Zijn er nog andere ruimten in het productiestation waar medewerkers langere tijd (gemiddeld > 5 uur per week) verblijven?	Ja Nee
72	Hieronder kunt u nog opmerkingen plaatsen die u eerder niet kwijt kon. U kunt hier ook extra toelichting geven bij eerder gestelde vragen.	

16.5

Vragenlijst B: Vragenlijst bij de tweede radonmetingen in (drink)waterproductiestations

Nogmaals dank voor u deelname aan dit onderzoek.

U heeft net een radonmeter uit verschillende ruimtes bij het productiestation verwijderd en een nieuwe radonmeter geplaatst. Om beide radonmeters goed te registreren in onze database stellen wij u een aantal vragen. De tijd voor het invullen van deze vragenlijst is ongeveer 5 á 10 minuten.

Contactgegevens

Vul hieronder de contactgegevens in. Deze gegevens worden alleen gebruikt om u bij vragen te kunnen contacteren. De resultaten van de enquête worden geanonimiseerd verwerkt in het onderzoeksrapport.		
1.	Bedrijfsnaam:	
2.	Naam productiestation:	
3.	Postcode productiestation:	
4.	Plaats productiestation:	

Gegevens van de verwijderde en nieuw geplaatste radonmeters

Met de volgende vragen willen we weten hoeveel radonmeters er hangen in het productiestation. Wanneer de radonmeters zijn verwijderd en de nieuwe zijn opgehangen.		
17	Hoeveel radonmeters hangen in het productiestation?	Eén radonmeter Twee radonmeters Drie radonmeters
De volgende vragen gaan over de ruimte waar de eerst/tweede/derde radonmeter hangt (ruimte 1/2/3). <i>Deze vragen worden gesteld voor iedere ruimte waar een radonmeter</i> De voorkeurslocatie radonmeter 1 was de eerste stap in het zuiveringsproces waar (onderhouds)medewerkers komen (bijvoorbeeld beluchtingsruimte). De voorkeurslocatie radonmeter 2 was een andere stap in het zuiveringsproces waar (onderhouds)medewerkers komen (bijvoorbeeld filtratieruimte). De voorkeurslocatie radonmeter 3 was een ruimte waar medewerkers langere tijd verblijven (bijvoorbeeld een kantoor of bedieningsruimte).		

Met de volgende vragen willen we weten hoeveel radonmeters er hangen in het productiestation. Wanneer de radonmeters zijn verwijderd en de nieuwe zijn opgehangen.		
xx	Wat is de functie van ruimte 1/2/3?	
xx	Wanneer heeft u de radonmeter in ruimte 1/2/3 verwijderd?	Datum [dd-mm-jjjj]
xx	Welk nummer staat er op de verwijderde radonmeter in ruimte 1/2/3?	9 cijfers
xx	Wanneer heeft u de nieuwe radonmeter in de ruimte 1/2/3 geplaatst?	Datum [dd-mm-jjjj]
xx	Welk nummer staat er op de nieuwe radonmeter in ruimte 1/2/3?	9 cijfers
xx	Hieronder kunt u nog opmerkingen plaatsen over ruimte 1/2/3. U kunt hier ook extra toelichting geven bij eerder gestelde vragen.	

16.6 Vragenlijst C: Vragenlijst terugsturen radonmeters tweede meetperiode productiestations

Nogmaals dank voor u deelname aan dit onderzoek.

U heeft net een radonmeter uit verschillende ruimtes bij het productiestation verwijderd. Om de radonmeters goed te registreren in onze database stellen wij u een aantal vragen. De tijd voor het invullen van deze vragenlijst is ongeveer 5 minuten.

Contactgegevens

Vul hieronder de contactgegevens in. Deze gegevens worden alleen gebruikt om u bij vragen te kunnen contacteren. De resultaten van de enquête worden geanonimiseerd verwerkt in het onderzoeksrapport.		
1.	Bedrijfsnaam:	
2.	Naam productiestation:	
3.	Postcode productiestation:	
4.	Plaats productiestation:	
5.	E-mailadres contactpersoon productiestation:	

Gegevens van de verwijderde radonmeters

Met de volgende vragen willen we weten hoeveel radonmeters er hingen in het productiestation en wanneer de radonmeters zijn verwijderd.		
6.	Hoeveel radonmeters hingen in het productiestation?	☐ Eén radonmeter ☐ Twee radonmeters ☐ Drie radonmeters

Met de volgende vragen willen we weten hoeveel radonmeters er hingen in het productiestation en wanneer de radonmeters zijn verwijderd.		
De volgende vragen gaan over de ruimte waar de eerst/tweede/derde radonmeter hangt (ruimte 1/2/3). <i>Deze vragen worden gesteld voor iedere ruimte waar een radonmeter</i> De voorkeurslocatie radonmeter 1 was de eerste stap in het zuiveringsproces waar (onderhouds)medewerkers komen (bijvoorbeeld beluchtingsruimte). De voorkeurslocatie radonmeter 2 was een andere stap in het zuiveringsproces waar (onderhouds)medewerkers komen (bijvoorbeeld filtratieruimte). De voorkeurslocatie radonmeter 3 was een ruimte waar medewerkers langere tijd verblijven (bijvoorbeeld een kantoor of bedieningsruimte).		
xx	Welk nummer staat er op de verwijderde radonmeter in ruimte 1/2/3?	Cijfers
xx	Wanneer heeft u de radonmeter in ruimte 1/2/3 verwijderd?	Datum [dd-mm-jjjj]
xx	Wat is de functie van ruimte 1/2/3?	
xx	Uit welk materiaal bestaan de wanden/muren van ruimte 1/2/3?	Beton Baksteen Metaal Niet bekend Anders, namelijk:
Hieronder stellen we een algemene vraag over het pompstation. De informatie helpt ons om de meetresultaten beter te duiden.		
19.	Op welke diepte vindt de drinkwaterwinning plaats? Indien dit niet van toepassing is vul hier "0" in.	
20.	Hieronder kunt u nog opmerkingen plaatsen. U kunt hier ook extra toelichting geven bij eerder gestelde vragen.	

17 Bijlage resultaten, drinkwaterbedrijven

17.1 Passieve radonmetingen

In deze paragraaf zijn aanvullende resultaten opgenomen over de passieve radonmetingen bij drinkwaterbedrijven.

Tabel 17.1 geeft een overzicht van de ophang- en verwijderdata, en de meettijd, van de passieve radonmeters bij de drinkwaterbedrijven.

Tabel 17.1 Overzicht van ophang- en verwijderdata van passieve radonmeters bij drinkwaterbedrijven.

	Meetperiode 1	Meetperiode 2
Ophangdatum		
Gemiddeld	28 oktober 2022	4 maart 2023
Vroegste	22 september 2022	24 januari 2023
Laatste	12 januari 2023	26 april 2023
Verwijderdatum		
Gemiddeld	4 maart 2023	9 juli 2023
Vroegste	24 januari 2023	1 april 2023
Laatste	26 april 2023	31 augustus 2023
Meettijd (dagen)		
Gemiddeld	127	128
Kortste	51	44
Langste	212	199

In Tabel 17.2 en Tabel 17.3 is informatie gegeven over het aantal bedrijven, respectievelijk productiestations, waar bepaalde radonconcentraties zijn gemeten.

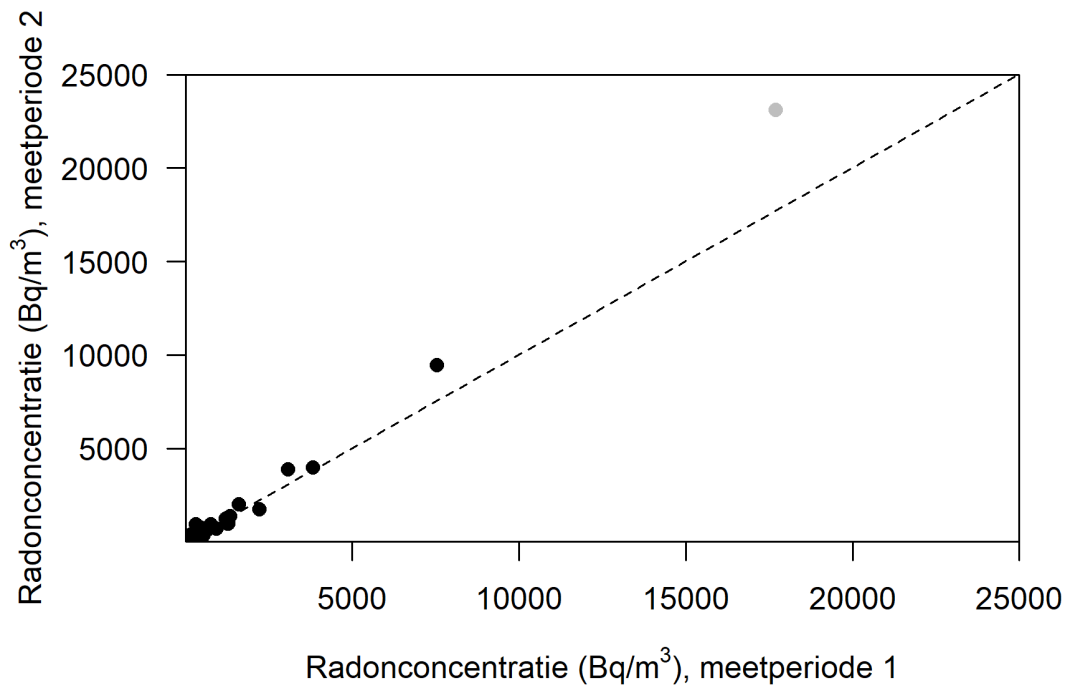
In Figuur 17.1 en Figuur 17.2 zijn de gemeten radonconcentraties in meetperiode 1 en 2 tegen elkaar uitgezet.

Tabel 17.2 Bedrijven met ten minste één meting boven een bepaalde radonconcentratie. 'Bedrijven totaal' zijn de bedrijven die radonmeters hebben opgehangen en geretourneerd. In de kolom 'beide' zijn alle metingen gezamenlijk geanalyseerd.

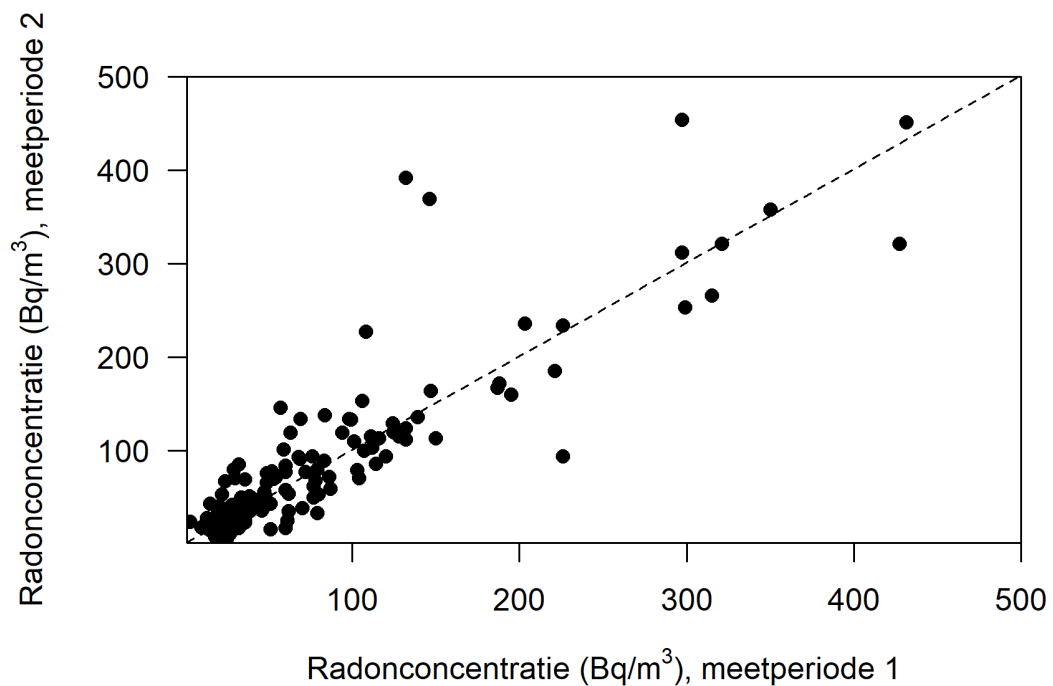
	Meetperiode 1	Meetperiode 2	Beide
Bedrijven totaal	7	7	7
Met metingen > 100 Bq/m ³	7	7	7
Met metingen > 300 Bq/m ³	6	6	6
Met metingen > 1000 Bq/m ³	4	2	4

Tabel 17.3 Productiestations met ten minste één meting boven een bepaalde radonconcentratie. 'Productiestations totaal' zijn de productiestations die radonmeters hebben opgehangen en geretourneerd. Tussen haakjes is het percentage productiestations gegeven waar radonconcentraties boven een bepaalde waarde zijn gemeten. In de kolom 'beide' zijn alle metingen gezamenlijk geanalyseerd. Bij sommige productiestations is een overschrijding van een bepaalde radonconcentratie alleen gemeten in 1 van de 2 meetperioden.

	Meetperiode 1	Meetperiode 2	Beide
Productiestations totaal	64	61	65
Met metingen > 100 Bq/m ³	35 (55%)	34 (56%)	41 (64%)
Met metingen > 300 Bq/m ³	20 (31%)	17 (28%)	22 (34%)
Met metingen > 1000 Bq/m ³	10 (16%)	6 (10%)	10 (15%)



Figuur 17.1 Radonconcentratie in meetperiode 1 en meetperiode 2, van alle meetlocaties waar in beide meetperioden is gemeten. De stippellijn geeft aan waar de radonconcentraties gelijk zijn. Zie Figuur 17.2 voor een beeld tot 500 Bq/m³. Eén datapunt is in grijs weergegeven – in beide meetperioden was de radonmeter verzadigd en is alleen een ondergrens voor de radonconcentratie bekend. Deze is geplot.



Figuur 17.2 Radonconcentratie in meetperiode 1 en meetperiode 2, van alle meetlocaties waar in beide meetperioden is gemeten. De stippellijn geeft aan waar de radonconcentraties gelijk zijn. Zie Figuur 17.1 voor het volledige bereik, tot 25.000 Bq/m³.

17.2 Locaties met hoge en lage radonconcentratie

In deze paragraaf zijn tabellen gegeven met enkele karakteristieken van meetlocaties met hoge en lage radonconcentraties. Zie paragraaf 10.3.3 voor meer informatie over deze locaties.

Tabel 17.4 Karakteristieken van verschillende meetlocaties: de 10 ruimtes met de hoogste radonconcentratie (groep 1). Zie Tabel 17.5 voor meetlocaties met lage radonconcentratie. Gegeven zijn de radonconcentraties in meetperioden (MP) 1 en 2, en enkele karakteristieken van de ruimte en het productiestation, namelijk de soort ruimte, aanwezige ventilatie, de soort winning (inclusief diepte), en de regio waar het productiestation ligt (waarbij regio 1 = Zuid-Limburg of het Gelders Rivierengebied, en regio 2 = de rest van Nederland). (): Gegevens niet beschikbaar. Opmerking: locatie nr. 1 en 4 zijn twee verschillende ruimtes van hetzelfde productiestation.*

Nr.	Radonconc. MP1&MP2 (Bq/m³)	Ruimte	Ventilatie	Winning	Regio
1	> 17.000 & > 23.100	Cascaderuimte	Luchtfilters	Grondwater, diepte (*)	1
2	7.537 & 9.478	Filtratieruimte (nat, meter hangt in filter)	Ramen	Grondwater, diepte (*)	1
3	6748 & (*)	Gang voor cascade	(*)	35 m diep	1
4	3820 & 3974	Cascadegang	Ramen	Grondwater, diepte (*)	1
5	3068 & 3906	Beluchtingsruimte, compressorruimte	Luchtdroging	Grondwater, 40 m diep	2
6	2207 & 1751	Voorfiltratiegebouw	Nee	Grondwater, 30 m diep	2
7	1601 & 2031	Buizenkelder reinwaterkelder	Rooster in deur	Grondwater, 80 m diep	2
8	1699 & (*)	Filtercascade	(*)	30 m diep	1
9	1342 & 1377	Reactorruimte t.b.v. ontharding	Mechanisch	Grondwater, diepte (*)	1
10	1280 & 978	Voorfilter	Mechanisch	Oevergrond- water, 40 m diep	1

Tabel 17.5 Karakteristieken van verschillende meetlocaties: 10 willekeurig getrokken ruimtes met radonconcentratie < 100 Bq/m³ in ten minste 1 meetperiode (groep 2). Zie Tabel 17.4 voor meetlocaties met hoge radonconcentratie. Gegeven zijn de radonconcentraties in meetperioden (MP) 1 en 2, en enkele karakteristieken van de ruimte en het productiestation, namelijk de soort ruimte, aanwezige ventilatie, de soort winning (inclusief diepte), en de regio waar het productiestation ligt (waarbij regio 1 = Zuid-Limburg of het Gelders Rivierengebied, en regio 2 = de rest van Nederland). (): Gegevens niet beschikbaar. Opmerking: locaties nr. 12 en 13 zijn twee verschillende ruimtes in hetzelfde productiestation.*

Nr.	Radonconc. MP1&MP2 (Bq/m³)	Ruimte	Ventilatie	Winning	Regio
11	34 & 24	Filtergebouw	Onbekend	Oevergrond- water, 40 m diep	2
12	87 & 59	Filterhal	Mechanisch	Infiltratiewater, 2 – 5 m diep	2
13	39 & 25	Pompenhal (voorzuiivering)	Mechanisch	Infiltratiewater, 2 – 5 m diep	2
14	60 & 77	Bedieningsruimte, kantine	Nee	Grondwater, 80 m diep	1
15	68 & 91	Filterketel	(*)	Grondwater, 25 m diep	2
16	48 & 53	Operatorruimte	Nee	Grondwater, 50 m diep	1
17	28 & 26	Kantine	(*)	(*)	2
18	26 & 33	Kantoor, kantine	Onbekend	Grondwater, diepte (*)	2
19	20 & (*)	Kantoor, werkplaats	Mechanisch	Grondwater, diepte (*)	2
20	62 & 54	Nafilter	Onbekend	Grondwater, diepte (*)	2

Tabel 17.6 Karakteristieken van verschillende meetlocaties: de 5 reguliere ruimtes met hoogste radonconcentratie (groep 3). Zie Tabel 17.7 voor reguliere ruimtes met lage radonconcentratie. Gegeven zijn de radonconcentraties in meetperioden (MP) 1 en 2, en enkele karakteristieken van de ruimte en het productiestation, namelijk de soort ruimte, aanwezige ventilatie, de soort winning (inclusief diepte), en de regio waar het productiestation ligt (waarbij regio 1 = Zuid-Limburg of het Gelders Rivierengebied, en regio 2 = de rest van Nederland). (): Gegevens niet beschikbaar.*

Nr.	Radonconc. MP1&MP2 (Bq/m ³)	Ruimte	Ventilatie	Winning	Regio
21	690 & 678	Kantoor, bedieningsruimte	Roosters in ramen	Grondwater, diepte (*)	1
22	132 & 392	Kantine, bedieningsruimte	Nee	Grondwater, 70 m diep	1
23	385 & (*)	Kantoor	(*)	35 m diep	1
24	146 & 369	Kantoor, bedieningsruimte	Mechanisch	Grondwater, 40 m diep	2
25	147 & 164	Kantine, werkplek	Onbekend	Grondwater, diepte (*)	2

Tabel 17.7 Karakteristieken van verschillende meetlocaties: 5 willekeurig getrokken reguliere ruimtes met radonconcentratie < 100 Bq/m³ in ten minste 1 meetperiode (groep 4). Zie Tabel 17.6 voor reguliere ruimtes met hoge radonconcentratie. Gegeven zijn de radonconcentraties in meetperioden (MP) 1 en 2, en enkele karakteristieken van de ruimte en het productiestation, namelijk de soort ruimte, aanwezige ventilatie, de soort winning (inclusief diepte), en de regio waar het productiestation ligt (waarbij regio 1 = Zuid-Limburg of het Gelders Rivierengebied, en regio 2 = de rest van Nederland). (): Gegevens niet beschikbaar.*

Nr.	Radonconc. MP1&MP2 (Bq/m ³)	Ruimte	Ventilatie	Winning	Regio
26	53 & (*)	Kantoor	Mechanisch	Grondwater, diepte (*)	2
27	25 & 27	Bedieningsruimte	Nee	Grondwater, diepte (*)	1
28	68 & 93	Kantine	Onbekend	Grondwater, diepte (*)	2
29	32 & 25	Kantine	Onbekend	Grondwater, diepte (*)	2
30	(*) & 17	Kantoor	Mechanisch	Grondwater, 40 m diep	2

17.3 Over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon

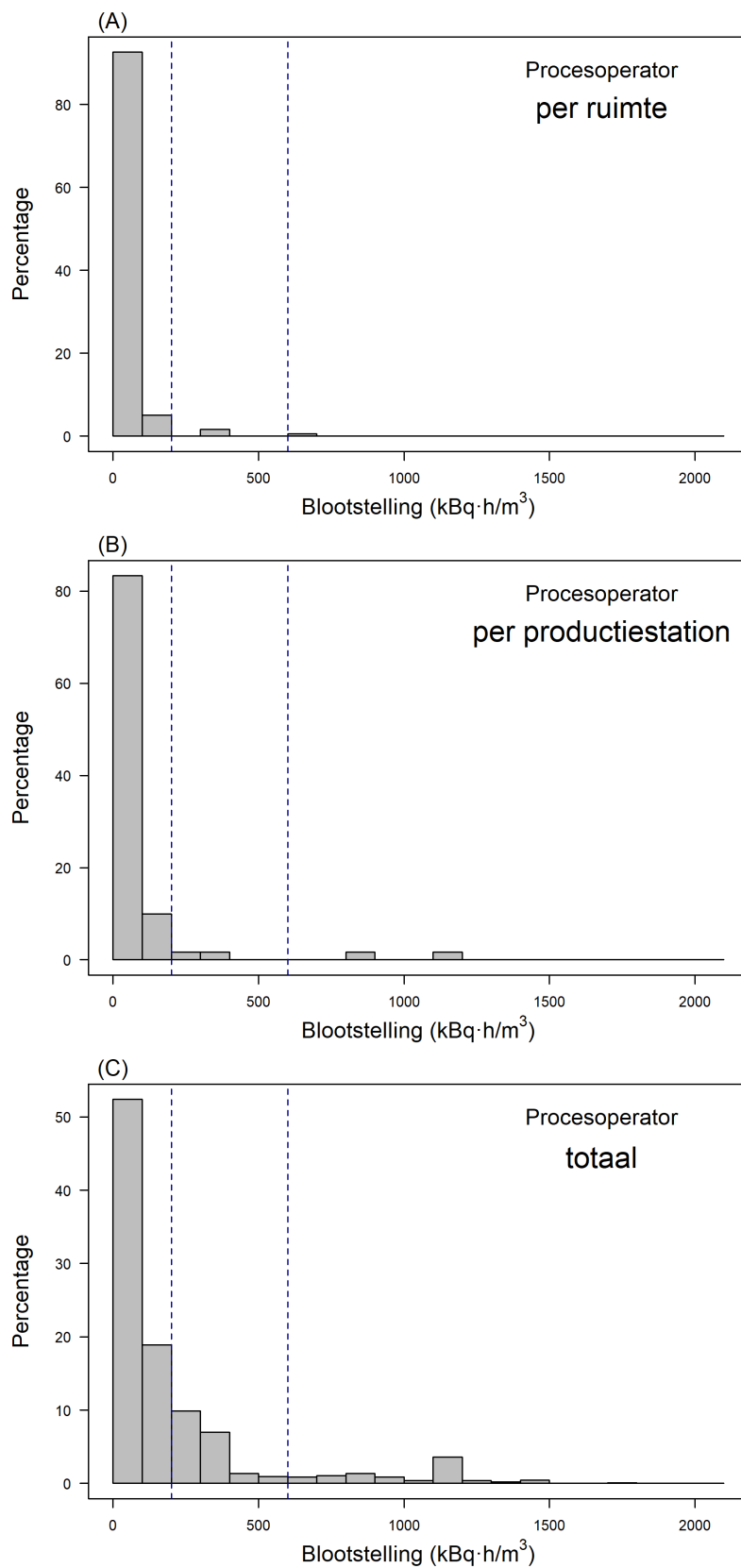
In deze paragraaf is aanvullende informatie opgenomen over de blootstelling van werknemers bij drinkwaterbedrijven, uitgedrukt als over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tijd} , voor een totale periode van één jaar.

Histogrammen van de blootstelling zijn gegeven in Figuur 17.3 (voor procesoperators) en Figuur 17.4 (voor onderhoudsmedewerkers). In elk van de figuren is het volgende weergegeven:

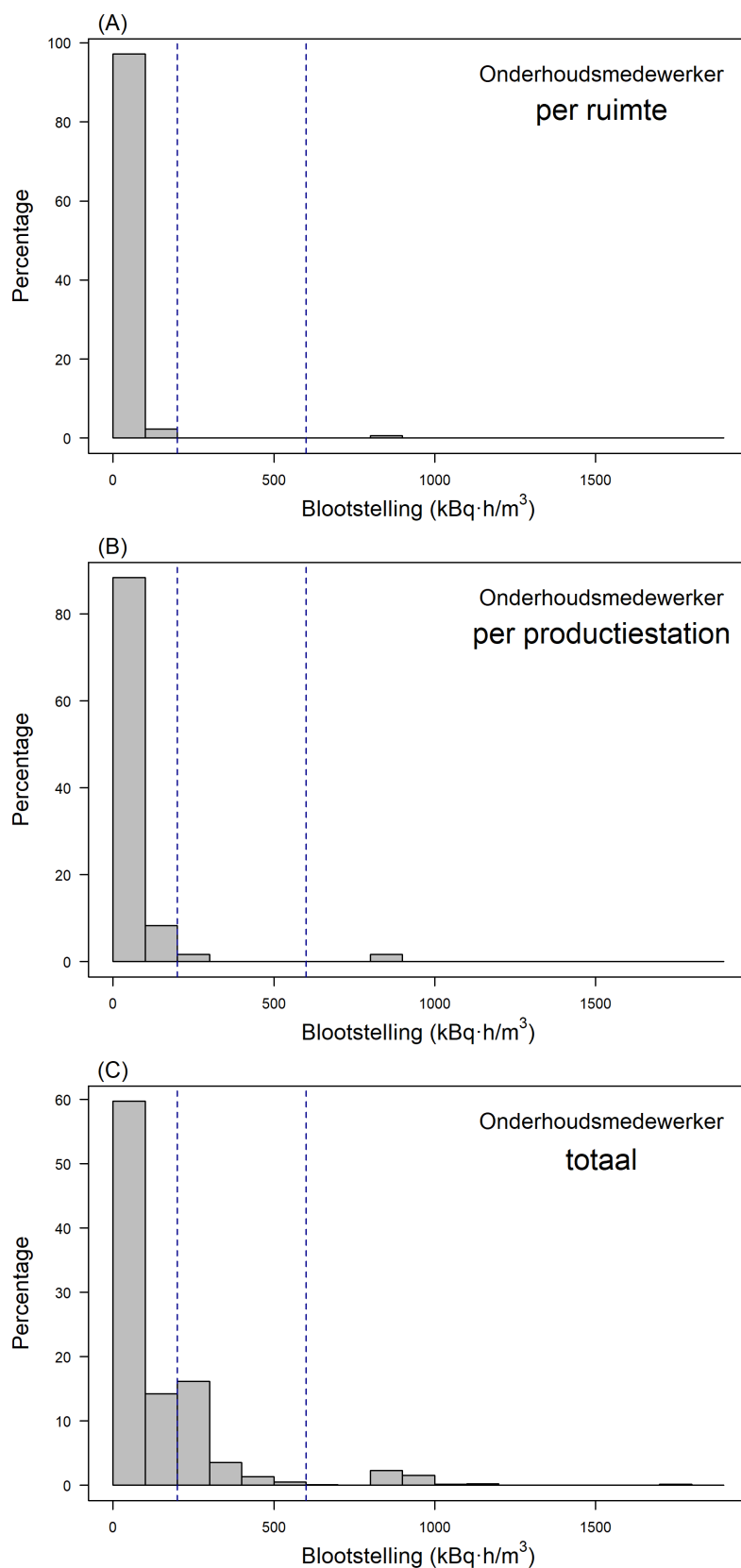
- Subfiguur A): Histogram van de blootstelling van de werknemer in kwestie in één ruimte.
- Subfiguur B): Histogram van de blootstelling van de werknemer in kwestie bij één productiestation (som van de blootstellingen in de ruimtes van dit productiestation).
- Subfiguur C): Histogram van de totale blootstelling van de werknemer in kwestie bij n_x productiestations (waarbij n_x het gemiddeld aantal productiestations is dat een werknemer van drinkwaterbedrijf X bezoekt). Voor het berekenen van de data in subfiguur C is gebruikgemaakt van de Monte-Carlomethode. Deze is beschreven in paragraaf 9.7. De gedane aannames en de onzekerheden van de schatting zijn beschreven in paragraaf 10.6.1.

In alle figuren zijn verticale lijnen getekend bij de twee afkapwaarden (200 en 600 kBq·h/m³).

Voor beide soorten werknemers is de jaarlijkse blootstelling C_{tjd} in de meeste ruimtes (subfiguur A) en bij de meeste productiestations (subfiguur B) lager dan de afkapwaarde van 200 kBq·h/m³. Wanneer rekening wordt gehouden met het feit dat werknemers bij meerdere productiestations werken, zijn hogere blootstellingen te zien (subfiguur C).



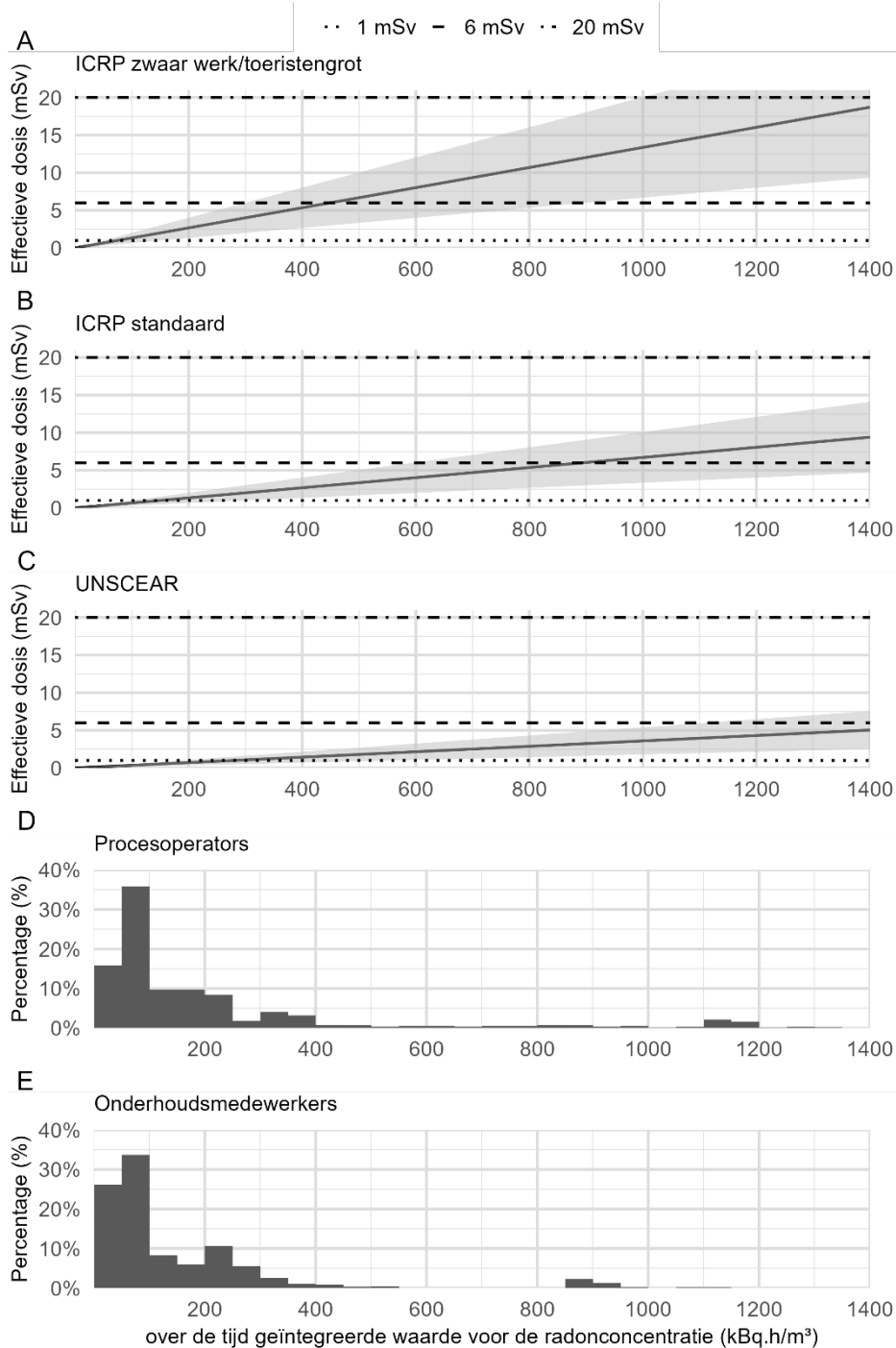
Figuur 17.3 Blootstelling (C_{tijd}) van procesoperators. Voor meer informatie, zie tekst aan het begin van deze paragraaf.



Figuur 17.4 Blootstelling (C_{tijd}) van onderhoudsmedewerkers. Voor meer informatie, zie tekst aan het begin van deze paragraaf.

17.4 Effectieve dosis

Figuur 17.5 geeft de dosisschatting met verschillende mogelijke waarden voor de DCC en F . Zie paragraaf 10.6.2 voor meer informatie.



Figuur 17.5 De bovenste drie figuren tonen de effectieve dosis als functie van de over de tijd geïntegreerde waarde van de blootstelling aan radon, C_{tijd} . Er is gerekend met de DCC van de ICRP voor zware werkzaamheden/werkzaamheden in een toeristengrot (A), de DCC van de ICRP voor standaard werkzaamheden (B) en de DCC van UNSCEAR (C). Het grijze vlak geeft de variatie in evenwichtsfactor aan, waarbij is gerekend met een F van 0,2 tot 0,6. Voor de lijnen is gerekend

met een meest waarschijnlijke waarde voor F , namelijk 0,4. Het onderste deel van de figuur geeft de geschatte verdeling van C_{tijd} voor procesoperators (D) en onderhoudsmedewerkers (D), zoals bepaald in paragraaf 10.6.1. De x-as is afgekapt op $1400 \text{ kBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$. 99% van de geschatte verdeling van C_{tijd} is weergegeven.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

februari 2025

De zorg voor morgen
begint vandaag