



*rivm*

Rapport 610790006/2009

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

Ventilatie en de samenhang met radon  
in nieuwbouwwoningen in  
Nederland Resultaten en analyses van  
tracermetingen in het project VERA

RIVM-rapport 610790006/2009

**Ventilatie en de samenhang met radon in  
nieuwbouwwoningen in Nederland**  
Resultaten en analyses van tracermetingen in het project VERA

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

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

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke  
Ordening en Milieubeheer, in het kader van het BEST-programma 'Beleidsondersteuning Straling'

© RIVM 2009

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

## Rapport in het kort

### **Ventilatie en de samenhang met radon in nieuwbouwwoningen in Nederland**

Resultaten en analyses van tracermetingen in het project VERA

Het radioactieve edelgas radon is in Nederlandse nieuwbouwwoningen overwegend afkomstig uit bouwmaterialen. In mindere mate is het afkomstig uit de bodem – via de kruipruimte of de buitenlucht. Dit blijkt uit onderzoek dat het RIVM heeft uitgevoerd in opdracht van het ministerie van VROM. In het onderzoek zijn de resultaten gecombineerd van ventilatie- en radonmetingen in meer dan driehonderd nieuwbouwwoningen in Nederland. Het gaat om woningen die tussen 1994 en 2003 zijn gebouwd.

In eerdere studies is aangetoond dat blootstelling aan straling in de woning voor ruwweg de helft bijdraagt aan de stralingsbelasting die Nederlandse burgers gemiddeld door het jaar heen oplopen. Een groot deel van de stralingsbelasting binnenshuis is het gevolg van het inademen van radioactieve vervalproducten van radon.

Luchtstromen transporteren radon door de woning. Een nauwkeurige inschatting van de luchtstromen tussen verschillende ruimten in afzonderlijke woningen blijkt moeilijk te verwezenlijken. Voor een gemiddelde woning is dit wel gerealiseerd. Zo is afgeleid dat de uitwisseling van lucht tussen de hal en andere ruimten sterker is dan de luchtstromen tussen de andere ruimten onderling. Bovendien is gebleken dat ventilatie de hoeveelheid radon vermindert die zich verzamelt in leefruimten, zoals de slaap- en de woonkamer.

Trefwoorden: ventilatie, radon, binnenklimaat, PFT, tracermetingen



## Abstract

### **Ventilation and its effect on radon buildup in newly built dwellings in the Netherlands**

Results and analyses of tracer measurements in the VERA-project

Building materials are the primary source of the radioactive gas radon detected in newly built Dutch houses. To a lesser degree indoor radon originates from the soil, entering the house via crawl spaces and from outside air. These are the conclusions drawn by the National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) upon completion of research commissioned by the Ministry of Spatial Planning, Housing and the Environment of the Netherlands. The data are a compilation of ventilation and radon measurements performed in more than 300 newly constructed houses in the Netherlands that were built between 1994 and 2003.

In previous studies it has been shown that indoor radiation exposure accounts for roughly half of the average yearly radiation dose received by Dutch citizens. A large portion of the indoor radiation dose results from the inhalation of radon decay products.

Air flows circulate radon throughout the different living spaces of a house. Although it has proven difficult to make a precise estimation of all air flows in individual houses, the use of mean air flow values has yielded valuable information. Based on mean values, air exchange between the central hallway and surrounding rooms is much larger than that between the individual rooms. Moreover, ventilation appears to reduce the amount of radon that accumulates in living spaces, such as bedrooms and living rooms.

Key words: ventilation, radon, indoor air, PFT, tracer measurements



# Inhoud

<b>Samenvatting</b>		<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
1.1	Achtergrond	11
1.2	Doelstelling	11
1.3	Vraagstelling VERA-onderzoek	11
1.4	Vraagstelling ventilatie	12
1.5	Leeswijzer	12
<b>2</b>	<b>Opzet onderzoek</b>	<b>13</b>
2.1	Inbedding in VERA	13
2.2	Onderzoek aan ventilatie van de nieuwbouwwoning	13
2.3	Twee soorten ventilatiemetingen	14
<b>3</b>	<b>Theorie</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>Resultaten</b>	<b>19</b>
4.1	Zonereductie	19
4.2	Resultaten	21
4.2.1	Luchtstromen - eengezinswoningen	21
4.2.2	Ventilatievoud	22
4.2.3	Meergezinswoningen	23
4.3	Resultaten PFT-metingen - onzekerheden data	23
4.3.1	Temperatuur	23
4.3.2	Restrictie adsorbers	24
4.3.3	Uitlezen hoeveelheid gas	24
4.3.4	Effect openen en sluiten deuren en ramen	24
4.3.5	Seizoenseffecten	24
4.3.6	Bepalen volumes woningen	24
4.3.7	Modelonzekerheden	25
4.4	Stroming in individuele woningen – statistische analyse	25
4.4.1	Lineaire regressie voor alle woningen tegelijk	25
4.4.2	Regressie met beperkende voorwaarden	25
4.4.3	Mixed-effectsregressie	26
4.4.4	Clusteranalyse	26
4.4.5	Factoranalyse	26
4.4.6	Tweezonemodellen	27
4.4.7	Tweezonemodellen - meergezinswoningen	28
4.4.8	Conclusie	28
<b>5</b>	<b>Synthese radonmetingen en PFT-metingen</b>	<b>29</b>
5.1	Radonconcentratie en ventilatie	29
5.1.1	Correlatie tussen radonconcentratie en totale luchtstroom	29
5.1.2	Driezoneanalyse	32
5.2	Bepaling radonbrontermen	33
5.2.1	Herkomst radon in woonkamer	34
5.3	Overige bevindingen	34
5.3.1	Verband PFT-ventilatie en mechanische ventilatie	34



5.3.2	Trendanalyse	35
5.3.3	Type ventilatie en radonconcentratie	35
<b>6</b>	<b>Conclusies</b>	<b>37</b>
6.1	Evaluatie PFT-methode	37
6.2	Resultaten van de ventilatiemetingen	39
6.2.1	Algemene resultaten	39
6.2.2	Resultaten voor individuele woningen	39
6.3	Combinatie van ventilatie- en radonmetingen	40
	<b>Literatuur</b>	<b>41</b>
	Bijlage A	43
	Bijlage B	45

## Samenvatting

Van de gemiddelde stralingsbelasting per inwoner in Nederland is, volgens [2], naar schatting bijna de helft afkomstig van natuurlijke radioactiviteit - vooral radon - in de woning. De belangrijkste bronnen van radon zijn de bodem, de buitenlucht (feitelijk het aardoppervlak via de buitenlucht) en steenachtige bouwmaterialen. In het VERA(VEntilatie en RADon)-project wordt onderzoek gedaan naar de radonconcentratie en de samenhang met ventilatie in Nederlandse nieuwbouwwoningen. Om de genoemde bijdragen aan de radonconcentratie in een woning beter te kunnen kwantificeren is de ventilatie in recent gebouwde woningen (1994-2003) gemeten. Hiervoor is de zogeheten PFT(PerFluorocarbon Tracer)-methode toegepast, een methode waarbij met het volgen van een tracergas de ventilatie wordt bepaald.

Dit rapport doet verslag van deze metingen en de bijbehorende analyse. Bovendien wordt stilgestaan bij de beperkingen van de PFT-methode die het gevolg zijn van technische, modelmatige en administratieve problemen.

### Ventilatiemetingen

Uit de metingen is gebleken dat van alle luchtstromen in en uit de woning, de luchtstroom van de hal naar buiten de grootste is. Veel gemeten luchtstromen zijn zeer klein, zoals de uitwisseling van lucht tussen de slaapkamer en de kruipruimte. De luchtstromen tussen enerzijds de hal en anderzijds de slaap- of woonkamer zijn aanzienlijk. De kruipruimte, ten slotte, lijkt relatief geïsoleerd te zijn van de rest van de woning.

Het gemiddelde ventilatievoud van de woonkamer van een eengezinswoning met alleen buitenlucht bedraagt in de survey  $0,5 \text{ h}^{-1}$ . De mechanische ventilatie is hier waarschijnlijk voor een belangrijk deel verantwoordelijk voor. Voor de slaapkamer ligt het ventilatievoud (met buitenlucht) rond de  $0,7 \text{ h}^{-1}$ . Overigens is de totale luchtdoorstroming van de verschillende ruimten groter, maar vindt deze deels tussen ruimten onderling plaats.

Voor meergezinswoningen bestaat een grote uitwisseling van lucht tussen slaapkamer, woonkamer en hal. Deze ruimten zijn veelal goed gemengd. Dit maakt de uitkomsten van de ventilatiestroommetingen zeer onzeker.

Er is voor de surveyperiode (1994-2003) geen ontwikkeling in de tijd vastgesteld voor de grootte van de totale ventilatie van een woning, noch voor alleen de mechanische ventilatie.

### PFT-methode

Vaak bleek het toepassen van de PFT-methode voor individuele woningen problematisch. Of hier het 'goed gemengd zijn' van lucht uit verschillende ruimten of andere woningspecifieke factoren voor verantwoordelijk waren, is nader uitgezocht met statistische technieken zoals lineaire regressie en mixed effectsregressie. Dit leverde echter geen bevredigende resultaten op. Hierbij leken de grote variatie tussen de woningen en correlaties tussen sommige luchtstromen een belangrijke rol te spelen. Het bleek niet mogelijk deze problemen door middel van zogeheten clusteranalyse of factoranalyse op te lossen.

### Ventilatie en radon

De uitkomsten van de ventilatiemetingen bieden de mogelijkheid om te bepalen waar het radon in woonruimten vandaan komt. Op basis van een massabalans van het tracergas en van het aanwezige radon kan een schatting worden gemaakt van de radonbrontermen in de verschillende ruimten. Deze lijken in overeenstemming te zijn met het exhalatietempo van de bouwmaterialen en onderliggende bodem. De radonconcentratie is daarbij gecorreleerd met het ventilatievoud: een

hoger ventilatievoud levert een lagere concentratie op. De radonconcentratie in de woonkamer wordt voor circa 67 % bepaald door de bouwmaterialen in die woonkamer, voor 22 % door de buitenlucht en voor 11 % door de kruipruimte.

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Van de gemiddelde stralingsbelasting in Nederland is, volgens [2], naar schatting bijna de helft afkomstig van natuurlijke radionucliden die zorgen voor een blootstelling aan straling in het binnenmilieu. Volgens de huidige inzichten is de stralingsbelasting in nieuwbouwwoningen in de periode van begin jaren zeventig van de vorige eeuw tot begin jaren negentig toegenomen, met name als gevolg van een toename van de radonconcentratie [1],[2],[3].

De radonconcentratie in woningen hangt samen met de gebruikte bouwmaterialen en de ventilatie. Ook andere gezondheidsproblemen in relatie tot het binnenmilieu hangen veelal samen met de ventilatie van de woning, waarbij zowel aanwezigheid als gebruik van ventilatievoorzieningen van belang is.

## 1.2 Doelstelling

De overheid heeft als beleidsuitgangspunt geformuleerd te komen tot een stand still van de stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen. De stralingsbelasting in de woning is voor ongeveer twee derde terug te voeren tot de radonconcentratie en wordt voor een derde door externe straling vanuit bouwmaterialen veroorzaakt. Voor een goede evaluatie van oorzaken van mogelijke veranderingen of verschillen in de stralingsbelasting in woningen is het wenselijk inzicht te verkrijgen in de gerealiseerde ventilatie van de woning. Kennis van de ventilatie van de woning is tevens van belang bij de analyse van de kwaliteit van het binnenmilieu in relatie tot andere agentia.

## 1.3 Vraagstelling VERA-onderzoek

Om na te gaan of het uitgangspunt van een stand still voor de stralingsbelasting wordt gerealiseerd, en om na te gaan in welke mate de ventilatievoorzieningen en het ventilatiegedrag hierbij van belang zijn, is een survey ingericht voor nieuwbouwwoningen, met de hoofdvragen, zoals deze zijn verschenen in het opzetrapport VERA [4]:

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

## 1.4 Vraagstelling ventilatie

In dit rapport worden de vragen uit bovenstaande lijst beantwoord die te maken hebben met ventilatie. Dat zijn vragen 2, 3 en 5. Een meer specifieke formulering van deze vragen is:

- a. Wat is de herkomst van het radon in de woonkamer? De verwachting is dat de ventilatiemetingen in combinatie met de radonmetingen een beter beeld verschaffen van de bronnen die bijdragen aan de radonconcentratie in de woonkamer.
- b. Er is een duidelijke relatie te verwachten tussen gemiddelde radonconcentratie in woningen en de mate van ventilatie: als er meer geventileerd wordt, is de gemiddelde radonconcentratie lager. Kan dit verband worden aangetoond met behulp van de resultaten van de ventilatie- en radonmetingen?
- c. Kunnen kwantitatieve uitspraken worden gedaan over het verband tussen ventilatie en andere gemeten variabelen, zoals: bouwjaar, type woning, ventilatiegedrag, type ventilatie et cetera?

## 1.5 Leeswijzer

Het rapport laat zich als volgt lezen: de experimentele opzet van het onderzoek wordt in hoofdstuk 2 beschreven. De theoretische achtergrond van het gebruikte stromingsmodel passeert in hoofdstuk 3 en hoofdstuk 4 bevat de resultaten van de experimenten en de hierop volgende analyse. In hoofdstuk 5 worden de resultaten van de in het kader van het VERA-project uitgevoerde radonmetingen met die van de ventilatiemetingen geïntegreerd. Een en ander wordt afgesloten met het concluderende hoofdstuk 6, waarin de resultaten worden samengevat.

## 2 Opzet onderzoek

### 2.1 Inbedding in VERA

Het onderzoek heeft plaatsgehad onder de vlag van het project VERA: VEntilatie en RADon. Dit project is in 2004 gestart met het doel de ventilatie en radonconcentraties in woningen gebouwd in de periode 1994 tot 2003 te meten, alsmede de ontwikkeling hiervan ten opzichte van resultaten uit eerdere radonsurveys te onderzoeken. Voor de achtergronden van dit project wordt verwezen naar [4]. Hier staat de informatie over radon- en externestralingmetingen, de voorgaande radonsurveys, de steekproef van nieuwbouwwoningen en de gedetailleerde opzet van het project. In het onderhavige rapport worden de resultaten van de ventilatiemetingen besproken, de analyse op deze resultaten en het verband met de gemeten radonconcentraties.

### 2.2 Onderzoek aan ventilatie van de nieuwbouwwoning

In de vorige survey [2] is met behulp van ventilatiemetingen onderzoek verricht naar de uitwisseling van lucht tussen de verschillende ruimten. Daaruit is afgeleid hoe de relatieve bijdragen van radon in de woning vanuit bouwmaterialen, buitenlucht en kruipruimte (bodem) zich verhielden. Daarbij is toen een gemiddelde verhouding 70:15:15 vastgesteld voor de bijdragen van respectievelijk bouwmaterialen, buitenlucht en bodem. Om de absolute bijdrage van bijvoorbeeld bouwmaterialen uit verschillende ruimten beter te kunnen kwantificeren is bij de opzet van de huidige studie besloten dat er ventilatiemetingen in meer ruimten nodig waren.

De ventilatie van een woning is een ingewikkeld proces, waarbij alle luchtstromen in de woning, inclusief die van en naar buiten, een rol spelen. Deze luchtstromen kunnen in tijd en plaats sterk variëren. Vooral het onderscheid tussen interne luchtuitwisseling (tussen verschillende ruimten binnen de woning) en externe luchtuitwisseling (tussen de woning en buitenlucht) is van belang bij het analyseren van de afvoer van stoffen die in het binnenmilieu aanwezig zijn. De externe luchtuitwisseling kan plaatsvinden door bedoelde mechanische ventilatie, door bedoelde ventilatie middels het openen van ramen en ventilatieroosters, door onbedoelde ventilatie door het openen van deuren, en via naden en kieren in de gebouwschil.

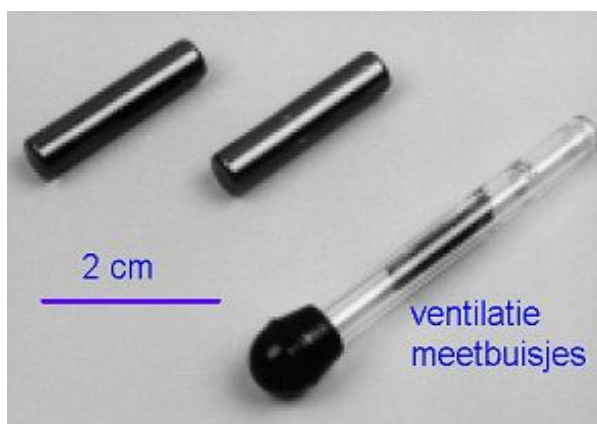
In dit onderzoek is gekozen voor het in kaart brengen van de effectieve uitwisseling tussen verschillende ruimten in de woning en met de buitenlucht gedurende een vol meetjaar. In een viertal ruimten, te weten de woonkamer, hal, hoofdslaapkamer en kruipruimte of centrale toegangshal zijn tracers en adsorbers geplaatst, met het doel inzicht te verkrijgen in de gerealiseerde ventilatie van de woonkamer en de hoofdslaapkamer. Het ventilatietempo is, net als de radonconcentratie, aan wisselingen onderhevig, waarbij zeker ook de seizoenen een rol spelen. Om in combinatie met de radonmetingen iets te kunnen zeggen over de bronnen van radon (buitenlucht, kruipruimte en bouwmaterialen) hebben zowel de radonmetingen als de tracermetingen gedurende een heel jaar plaatsgevonden.

In aanvulling hierop is nagegaan welke bijdrage de mechanische ventilatiesystemen in de woning kunnen hebben aan de ventilatie van de woning. Daartoe is een meetprogramma uitgevoerd waarmee de capaciteit van het mechanische ventilatiesysteem is bepaald in de verschillende gebruiksstanden.

Voor het onderzoeken van de mechanische ventilatiesystemen was meten gedurende een vol jaar niet haalbaar en is slechts de te behalen ventilatiecapaciteit gemeten, om een indruk te krijgen van de basisventilatie van de woning. Daarnaast is aan deelnemers van het onderzoek in een enquête gevraagd naar het gebruik van het systeem. Aan de uitvoering van dit deel van het onderzoek heeft het bureau Lichtveld Buis & Partners (LBP) een bijdrage geleverd [5].

## 2.3 Twee soorten ventilatiemetingen

Er zijn twee methoden gehanteerd om ventilatie in de woning te onderzoeken. De luchtstromen in de woning zijn in kaart gebracht en de aangebrachte mechanische ventilatiesystemen zijn op hun werking onderzocht.



Figuur 1. Twee PFT-bronnen en een adsorber (CATS) voor het ventilatieonderzoek.

### Ventilatiestromen

Voor het vaststellen van de luchtstromen tussen de verschillende vertrekken van een woning is gebruikgemaakt van de zogeheten PFT-methode. In vier ruimten in de woning is daartoe gedurende de meetperiode van één jaar een tracergas - een zogeheten PerFluorocarbon Tracer - losgelaten vanuit een klein aluminium buisje. Dit experiment is in twee verschillende typen woningen uitgevoerd: in eengezinswoningen en meergezinswoningen. In eengezinswoningen - rijtjeshuizen - is gemeten in de woonkamer, hoofdslaapkamer, hal en kruipruimte. In meergezinswoningen - appartementen - in de woonkamer, hoofdslaapkamer, hal en centrale toegangshal.

Hierbij zijn vier verschillende tracers gebruikt: één per meetruimte. Met behulp van adsorbers - Capillary Adsorbent Tracer Samplers (CATS) - die zich in diezelfde ruimten bevonden, zijn de tracergassen gedurende de meetperiode geadsorbeerd. Een foto van twee PFT-bronnen en een CATS is weergegeven in Figuur 1.

Uit de geadsorbeerde hoeveelheden van de vier tracers in de verschillende ruimten kunnen de (netto, geïntegreerde) luchtstromen tussen de verschillende ruimten worden bepaald. Deze specialistische methode met vier verschillende tracers wordt alleen door Brookhaven National Laboratory (BNL)<sup>1</sup> aangeboden. Voor een nadere beschrijving van de methode wordt verwezen naar [6],[7].

<sup>1</sup> Department of Energy and Environment, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, contact: RN Dietz

Over de gebruikte tracers kan het volgende worden opgemerkt:

- Er is vrijwel geen achtergrondconcentratie van PFT aanwezig.
- PFT's zijn niet giftig, niet reactief, onbrandbaar en onschadelijk voor het milieu.
- De PFT's kunnen extreem gevoelig worden gedetecteerd, tot minder dan een femtoliter ( $10^{-15}$ ) per liter lucht, zodat met zeer geringe hoeveelheden kan worden volstaan.

Ook tijdens de vorige radonsurvey [2] werd de PFT-methode van BNL gebruikt voor ventilatiemetingen.

Ter ondersteuning van de ventilatiemetingen is in 75 woningen in alle meetruimten ook uurlijks de temperatuur gemeten. De PFT-bronnen zijn enigszins temperatuursafhankelijk en bij de berekening van de emissie kan hier rekening mee worden gehouden. Voor deze temperatuurmeting is gebruikgemaakt van een ATAL- ATV-11 (zie Figuur 2).



**Figuur 2. ATAL-ATV-datarecorder voor het loggen van temperatuur en luchtvochtigheid op een harde schijf.**

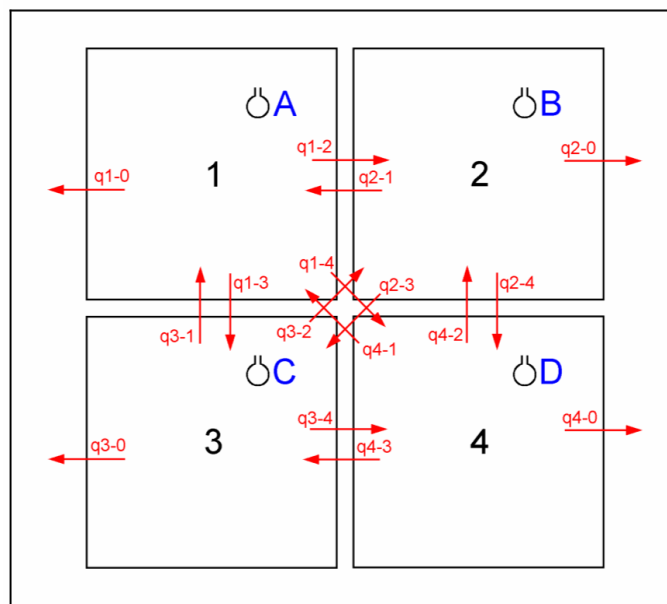




### 3 Theorie

In hoofdstuk 2 is de opzet van de PFT-metingen besproken. Deze zijn uitgevoerd om de luchtstromen binnen de woning te kunnen bepalen. De luchtstromen in een woning verplaatsen ook radon: kennis over de luchtstromen geeft ons daarom beter inzicht in de herkomst en verspreiding van radon in een woning.

De theorie achter de PFT-berekeningen wordt in dit hoofdstuk besproken. Ze berust op een eenvoudig stromingsmodel dat wordt toegepast op zowel de tracergassen als het radon. Dit model is in Figuur 3 geïllustreerd.



**Figuur 3. Schema van luchtstromen (pijlen) en bronnen (symbolen bij de hoofdletters).**

In het model zijn we uitgegaan van een woning die is opgedeeld in (maximaal) vier zones - woonkamer (1), hoofdslaapkamer (2), hal (3) en kruipruimte of centrale toegangshal voor respectievelijk een- en meergezinswoningen (4). De luchtstroom van zone  $i$  naar zone  $j$  is aangeduid door het symbool  $q_{i-j}$ . Er is bovendien een uitwisseling met de buitenruimte, aangegeven door het subscript 0. Onder de buitenruimte vallen ook de ruimten binnen de woning waarin niet gemeten is, zoals een tweede slaapkamer. In dit schema ontbreken de stromen van buiten naar binnen. Deze kunnen berekend worden met de aanname dat de som van de stromen nul is. In het onderzoek zijn consequent de codes aan de meetruimten toegekend zoals ze staan in Tabel 1.

Een belangrijke aanname in het toegepaste stromingsmodel is dat we uitgaan van een stationaire situatie. Er is een jaar lang gemeten, en dit heeft voor elke adsorber één jaargemiddelde concentratie per tracer opgeleverd. We nemen daarom een situatie aan waar de concentraties en de luchtstromen constant in de tijd zijn. De werkelijke luchtstromen veranderen elk moment, van grootte of van richting. Daarom kunnen we in het model beter van effectieve, of jaargemiddelde luchtstromen spreken.

De hoeveelheid PFT of radon die er in een ruimte bijkomt ten gevolge van productie in de ruimte zelf of door toevoer vanuit een andere ruimte is gelijk aan wat de ruimte verlaat. Deze massabalans kan worden opgeschreven in 16 vergelijkingen, waarvoor wordt verwezen naar Bijlage A van dit rapport.

**Tabel 1. Codes van luchtstromen.**

<b>ruimte</b>	<b>code</b>
buiten, inclusief niet bemeten ruimten	0
woonkamer	1
slaapkamer	2
hal	3
kruipruimte (ew)/centrale toegangshal (mw)*	4

\*ew staat voor eengezinswoning, mw voor meergezinswoningen

De parameters in het stromingsmodel zijn, voor de PFT's:

- de sterktes van de vier gebruikte bronnen,
- de PFT-concentraties per ruimte - deze zijn vastgelegd in de adsorbers en
- de effectieve luchtstromen - deze worden berekend met behulp van het model.

Analoog daaraan geldt voor radon dat de variabelen in het model gegeven worden door:

- de effectieve luchtstromen - deze zijn berekend met bovenstaand model,
- de radonconcentraties per ruimte - deze zijn gemeten [3] en
- de brontermen van radon in elke ruimte - deze worden berekend met behulp van het model.

Samenvattend: de resultaten van de PFT-metingen verschaffen inzicht in de luchtstromen in de woning en de vertaling van deze resultaten naar radon levert, in combinatie met de gemeten radonconcentratie, inzicht op in de verdeling en productie van radon in de woning.

## 4 Resultaten

De PFT-experimenten zijn uitgevoerd in 304 woningen. Dit heeft een grote hoeveelheid gegevens opgeleverd. Hierop zijn analyses verricht waarvan we in dit hoofdstuk de resultaten bespreken. Het model dat is beschreven in hoofdstuk 3 is gebruikt om de (effectieve) luchtstromen in en uit het huis te berekenen. Deze kennis heeft ons inzicht verschaft over de herkomst en productie van radon in de beschouwde woningen.

Het is gebleken dat het voor de meeste woningen niet mogelijk was uitspraken te doen over (alle) effectieve luchtstromen in individuele woningen. Daarom worden naast resultaten voor individuele woningen in dit rapport ook resultaten voor mediane en gemiddelde woningen gerapporteerd. Voor de mediane woning zijn de mediane waarden van de PFT-concentraties gebruikt om de luchtstromen te berekenen, voor de gemiddelde woning de gemiddelde waarde van de PFT-concentraties.

### 4.1 Zonereductie

De 304 woningen waarin PFT-metingen zijn uitgevoerd zijn niet over één kam te scheren: ten eerste bestaat het geselecteerde woningbestand voor een deel uit eengezinswoningen (lees: rijtjeshuizen, geschakelde en vrijstaande woningen) en voor een deel uit meergezinswoningen (lees: appartementen).

Ten tweede is het voor een deel van de woningen niet mogelijk gebleken het stromingsmodel in vier zones toe te passen. Zo is het in veel huizen niet mogelijk gebleken in vier ruimten te meten. Ook zijn er in verschillende fasen van de metingen en analyses woningen uitgevallen. De oorzaken hiervan worden hier kort toegelicht:

#### **Geen vierde ruimte**

Zoals gesteld was het in sommige woningen niet mogelijk in de vier van tevoren vastgestelde ruimten te meten. Zo ontbrak in sommige eengezinswoningen de kruipruimte, of stond deze onder water.

#### **Administratie en defect of verloren gegaan materiaal**

Sommige gegevens zijn onbruikbaar geworden omdat bij de analyse van de PFT-adsorbers door BNL er enkele administratieve vergissingen zijn gemaakt. Daarnaast is een klein deel van de adsorbers defect geweest of heeft in een zeker stadium in één verpakking bij de bronnen gezeten. Dit laatste heeft zich geuit in zeer hoge waarden voor de PFT-concentraties. Ten slotte is een deel van de meetapparatuur gedurende de meetperiode kwijtgeraakt of onbedoeld verplaatst, waardoor geen resultaten bepaald konden worden.

#### **Doorgemengde ruimten**

Een belangrijke tekortkoming van het model lijkt te zijn dat het niet goed omspringt met ruimten die onderling doorgemengd zijn, zoals bijvoorbeeld een hal en een woonkamer die soms in open verbinding staan. Om a priori te testen of de bovenstaande situatie zich voordoet, kan het zogeheten Zonal Condition Number berekend worden [8]. Dit getal geeft aan in welke mate de ruimten in een woning zijn doorgemengd. BNL heeft van enkele woningen aangegeven dat een

reductie van het aantal zones wenselijk was, op basis van berekeningen van het Zonal Condition Number.

### **Onrealistische meetresultaten**

Het lijkt aannemelijk dat de concentratie van een bepaalde tracer het hoogst zou moeten zijn in de ruimte waar zich de bron van die tracer bevindt. Dit bleek echter in veel woningen niet het geval: in veel woningen is de hoogste concentratie van ten minste één tracergas gemeten buiten de ruimte waar zich de bron van het gas bevond. Dit kan verschillende oorzaken hebben. Voor de hand liggende verklaringen zijn: de bron bevond zich zo dicht bij een deur dat een groot deel van het vrij gekomen gas buiten de bedoelde ruimte terechtgekomen is, of de CATS in de ruimte waar zich de bron bevond heeft niet goed gefunctioneerd. Het is (in de meeste gevallen) niet mogelijk te achterhalen wat er gebeurd is. Toepassing van het model in deze situatie leidt tot fysisch onmogelijke uitkomsten.

In al deze gevallen heeft een probleem geleid tot een reductie van het aantal zones waarvoor de luchtstromen zijn geanalyseerd. In Tabel 2 staat beschreven in welke categorieën de woningen zijn ingedeeld naar aanleiding van de bovenstaande zonereducties.

**Tabel 2. Indeling in zones en aantal corresponderende woningen.**

<b>aantal zones</b>	<b>aantal woningen</b>
4	164
3	120
2	12
1	3
0	5
<b>totaal</b>	<b>304</b>

Overigens staan in Blaauboer et al. (2008) [3] resultaten met 178 vierzonewoningen vermeld. BNL heeft na verschijning van dit briefrapport nog enkele resultaten gerectificeerd, waardoor de groep van vierzonewoningen op 164 is uitgekomen.

De luchtstromen zijn voor verschillende groepen woningen uitgerekend: er is enerzijds onderscheid gemaakt tussen de woningen met drie en vier zones. Anderzijds zijn de vierzonewoningen onder te verdelen in 125 eengezinswoningen en 39 meergezinswoningen. De woningen uit de eerste categorie hebben een kruipruimte, bij de woningen uit de tweede categorie is in de centrale toegang gemeten.

### **Extra selectie**

De berekende luchtstromen hebben een theoretische ondergrens: de luchtstromen worden berekend van ruimte 1 naar 2 en vice versa en moeten positief zijn. Het blijkt dat veel berekende luchtstromen negatief zijn, hoewel dit vaak nog binnen de foutmarge van de berekeningen valt. In sommige gevallen is dit echter zeker niet geval: als extra selectie van de data hebben we daarom de woningen weggelaten waar luchtstromen voorkomen die kleiner zijn dan  $-100 \text{ m}^3/\text{h}$ . Bij één woning zijn er vier luchtstromen die kleiner zijn dan  $-30 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ook deze woning is weggelaten.

Er is op theoretische gronden een lans te breken voor een strenger criterium. Dit reduceert de totale groep van woningen echter tot een aantal dat te klein is om nog betrouwbare uitspraken over te kunnen doen. In de berekeningen in paragraaf 4.4 is wel een strenger criterium gehanteerd.

Deze additionele selectie reduceert het aantal bruikbare eengezinswoningen met vier zones tot een verzameling van 107 woningen. Dit is de groep woningen waarmee de hierna volgende analyses zijn uitgevoerd.

## 4.2 Resultaten

### 4.2.1 Luchtstromen - eengezinswoningen

Voor de groep van 107 eengezinswoningen zijn de mediane en gemiddelde concentraties gebruikt om met het model van hoofdstuk 3 de (effectieve) luchtstromen te bepalen. In Tabel 3 staan van deze berekening de resultaten. De luchtstromen zijn hier gegeven voor de groep van eengezinswoningen waar het vierzonemodel kon worden toegepast. Meergezinswoningen worden besproken in paragraaf 4.2.3 en de driezonewoningen in paragraaf 5.1.2.

Tabel 3 geeft de luchtstromen van het gemiddelde of mediane huis, niet het gemiddelde of de mediaan van berekende luchtstromen.

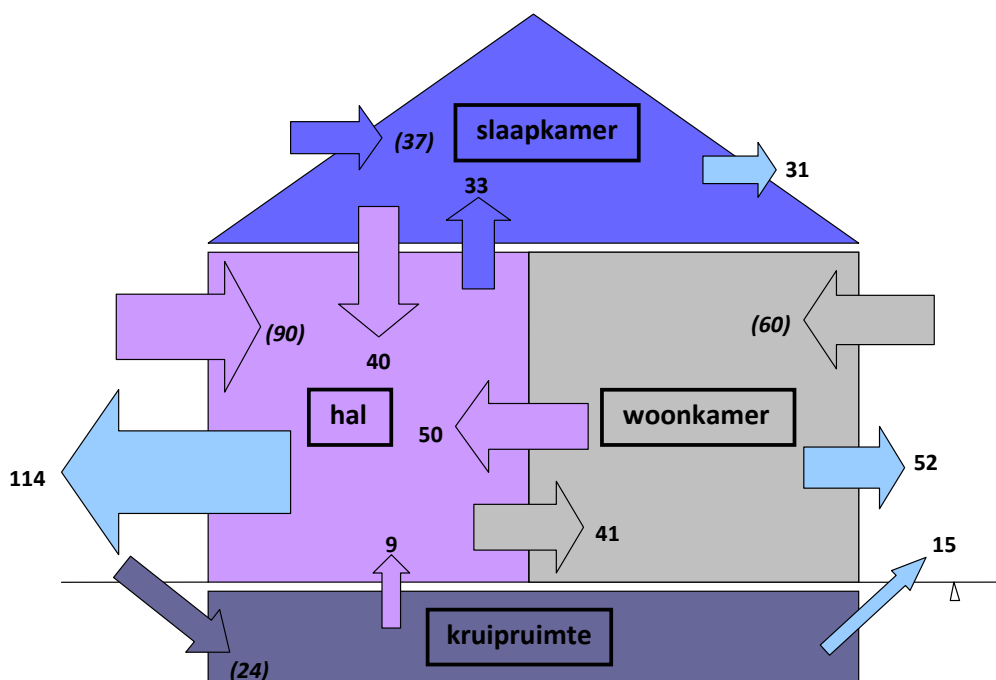
**Tabel 3. Overzicht luchtstromen voor eengezinswoningen - vierzonemodel (m<sup>3</sup>/h).**

		van:				buiten	
		kruipruimte	woonkamer	slaapkamer	hal		
<b>naar:</b>	kruipruimte	-	8	1	0*	16	
		-	0	0	1	24	
	woonkamer	2	-	4	26	56	steeds:
		2	-	2	41	60	gemiddelde (107w)
	slaapkamer	1	6	-	15	27	mediaan (107w)
		0*	3	-	33	37	
	hal	7	24	18	-	57	
		9	50	40	-	90	
	buiten	14	50	26	66	-	
		15	52	31	114	-	

\* waar het model kleine, negatieve waarden geeft, is afgerond op nul

In de kolommen van deze tabel zijn de stromen van de ene naar de andere ruimte weergegeven. Bij elke categorie staan twee getallen vermeld: de stroom behorende bij de gemiddelde PFT-concentratie voor de groep van 107 woningen en de stroom bij de mediane PFT-concentratie.

In deze tabel vallen enkele zaken op: de luchtstroom van de hal naar buiten is de grootste, en veel luchtstromen zijn zeer klein, zoals de uitwisseling tussen de slaapkamer en de kruipruimte. De uitwisseling tussen de hal en de slaap- en woonkamer is aanzienlijk en de kruipruimte lijkt redelijk geïsoleerd te zijn van de rest van de woning. Twee stromen in deze tabel namen kleine negatieve waarden aan: omdat we er in het model van uitgaan dat de stromen positief zijn, hebben we ze in de tabel afgerond op nul. In Figuur 4 zijn de waarden uit Tabel 3 voor de mediane eengezinswoning visueel weergegeven.



Figuur 4. Overzicht luchtstromen (m<sup>3</sup>/h) in een mediane eengezinswoning. Getallen tussen haakjes zijn de stromen van buiten naar binnen berekend door de som van de stromen per ruimte nul te veronderstellen. Stromen kleiner dan 5 m<sup>3</sup>/h zijn weggelaten.

#### 4.2.2 Ventilatievoud

Omdat in het onderzoek ook de volumes van de woonruimten zijn bepaald, is met behulp van de resultaten van de luchtstromen ook het ventilatievoud te berekenen: het aantal keer dat per uur de lucht in een ruimte wordt ververst. In Tabel 4 zijn de ventilatievouden weergegeven voor de groep van 107 vierzonewoningen. Hier is onderscheid gemaakt tussen het totale ventilatievoud (de totale luchtstroom door een ruimte gedeeld door het volume van de ruimte) en het ventilatievoud ten opzichte van de buitenlucht (de luchtstroom van buiten naar binnen, gedeeld door het volume van de ruimte). Voor de totale woning zijn deze waarden identiek. De ventilatievouden zijn berekend voor de gemiddelde en mediane woning.

**Tabel 4. Resultaten ventilatievoud (1/h) gemiddelde en mediane woning.**

	<b>woonkamer</b>	<b>slaapkamer</b>	<b>hal</b>	<b>kruipruimte</b>	<b>totaal</b>
ventilatievoud totaal gem.	0,9 (0,9*)	1,3	3,1	0,6 (1,1*)	0,7
mediaan	1,0	2,0	5,6	0,7	1,1
ventilatievoud buiten gem.	0,5	0,7	1,6	0,4	0,7
mediaan	0,6	1,1	2,7	0,7	1,1

\* de waarden tussen haakjes komen, ter vergelijking, uit [2].

Uit Tabel 4 kunnen we het volgende opmaken: de verschillen tussen mediane en gemiddelde waarden zijn (ook hier) soms zeer groot. Zoals verwacht is het ventilatievoud ten opzichte van de buitenlucht steeds kleiner dan het totale ventilatievoud, hoewel dit verschil bij de kruipruimte klein is.

De waarden tussen haakjes zijn afkomstig uit het rapport over de twee radonsurvey [2]. Uit Tabel 4 is op te maken dat het ventilatievoud voor de woonkamer in de gemiddelde woning berekend in deze studie hetzelfde is als die in [2]. De waarde van het ventilatievoud in de kruipruimte is veel minder dan in [2]. Dit zou kunnen impliceren dat de isolatie van de kruipruimte sterk is toegenomen, of dat het volume (van de kruipruimte) in werkelijkheid kleiner is dan meegenomen in de berekening - de hoogte is bijvoorbeeld geringer dan geschat.

#### **4.2.3 Meergezinswoningen**

Zoals in paragraaf 4.1 is aangegeven, bevinden zich in de groep van 164 bruikbare vierzonewoningen, 39 meergezinswoningen. Als we de (niet eens zo strikte) selectiecriteria hanteren van paragraaf 4.1, houden we ongeveer 19 woningen over. Dit aantal is te laag om betrouwbare uitspraken te kunnen doen over de (effectieve) luchtstromen in meergezinswoningen.

### **4.3 Resultaten PFT-metingen - onzekerheden data**

Bij de analyse van de resultaten van de PFT-metingen moet rekening worden gehouden met verschillende bronnen van onzekerheid; deze worden elk hier kort besproken.

#### **4.3.1 Temperatuur**

Het tempo waarin PFT-gas uit de bronnetjes vrijkomt, is afhankelijk van de omgevingstemperatuur. Bij temperaturen rond kamertemperatuur leidt een temperatuursverandering van 5 °C tot een verandering van circa 20 % in het productietempo van PFT. In 75 woningen zijn temperatuurmetingen gedaan. Bij het berekenen van de emissiesnelheid van de bronnetjes is per ruimte de tijdgemiddelde temperatuur over deze 75 woningen gebruikt. In de kruipruimte varieert de temperatuur vrij sterk, in de andere ruimten minder. De onzekerheid in de totale productie van tracergassen bedraagt enkele procenten. Tabel 5 geeft een indicatie van de variatie in het temperatuurverloop in de woningen waar gemeten is. De kolommen ‘minimum’ en ‘maximum’ geven de minimale, respectievelijk maximale, waarde aan van het in een woning gemeten jaargemiddelde in de betreffende ruimte.



Tabel 5. Overzicht temperatuurmetingen.

ruimte	Temperatuur (°C)				
	gemiddeld	maximum	minimum	mediaan	standaarddeviatie
woonkamer	21,3	24,5	17,2	21,3	1,1
slaapkamer	20,1	22,8	15,7	20,2	1,2
hal	20,6	25,0	16,9	20,6	1,5
kruipruimte	14,9	20,5	10,6	14,7	1,8
centrale toegang	17,6	17,7	17,5	17,6	0,1

#### 4.3.2 Restrictie adsorbers

Om verzadiging van de adsorbers gedurende de lange meetperiode te voorkomen hadden deze een verkleinde opening, waardoor de adsorptiesnelheid met een factor  $98 \pm 7$  werd verkleind. Deze factor is empirisch bepaald door de leverancier. Als één set metingen die minder goed is uitgevallen, wordt genegeerd, is de reductiefactor  $95 \pm 4$ .

#### 4.3.3 Uitlezen hoeveelheid gas

Over de onzekerheid in de bepaling van de hoeveelheid geadsorbeerd gas bij het ‘uitlezen’ van de adsorbers meldde de leverancier van de apparatuur (Brookhaven National Laboratories) voorafgaand aan het experiment dat *‘the analyses to determine PFT concentrations on the 1200 CATS samplers will be [] within ~10 %’*.

#### 4.3.4 Effect openen en sluiten deuren en ramen

Een belangrijke veronderstelling in het model en bij de analyses van de metingen is dat er evenwicht heerst in de woningen. In de praktijk leidt openen en sluiten van ramen en deuren zeker tot forse afwijkingen van het gemiddelde in de grootte van de ventilatiestromen en de concentraties van de tracergassen in de ruimten. Het is moeilijk in te schatten hoe groot het effect hiervan op de metingen is.

#### 4.3.5 Seizoenseffecten

In de VERA-survey is gedurende ongeveer twaalf maanden gemeten. Het is waarschijnlijk dat het ventilatiegedrag van de bewoners van de woningen in de survey niet over de hele periode hetzelfde geweest is: het lijkt bijvoorbeeld aannemelijk dat er in de zomer meer geventileerd wordt dan in de winter, wanneer de verwarming aanstaat, en dat daardoor luchtstromen groter en ook anders zijn, zowel naar buiten als binnen een woning.

Bij het uitlezen van de PFT-adsorbers kan alleen worden bepaald hoeveel PFT er in totaal geadsorbeerd is, niet in welk tempo dat gebeurd is. Seizoenseffecten kunnen dus niet worden vastgesteld. In het model wordt aangenomen dat er gedurende de volledige meetperiode evenwicht heerste in de woningen, en dat alle luchtstromen constant waren. Kwantitatieve informatie over seizoen-effecten is niet beschikbaar.

Gezien de geringe bijdrage vanuit de kruipruimte is de zo geïntroduceerde fout door temperatuursvariatie aldaar (zie Tabel 5) absoluut gezien niet zo groot.

#### 4.3.6 Bepalen volumes woningen

In een deel van de analyses is gebruikgemaakt van ventilatievouden. Uit bouwtekeningen van de woningen zijn de volumes van de meetruimten bepaald. De onzekerheid in de schattingen is ongeveer 10 % voor de woonkamer, 7 % voor de slaapkamer, 25 % voor de hal en 10 % voor de kruipruimte. Slaapkamers zijn over het algemeen rechthoekige ruimten, waar het volume vrij goed van te bepalen is. Woonkamers zijn vaak onregelmatiger van vorm, en zijn vaak uitgebouwd,

waarbij niet alle afmetingen te achterhalen zijn. Bij de hal is vaak onduidelijk of deze met de complete zolder in verbinding staat.

#### 4.3.7 Modelonzekerheden

Naast de onzekerheden in de data zijn er modelonzekerheden, bijvoorbeeld veroorzaakt doordat de lucht in verschillende ruimten in één woning erg goed gemengd kan zijn, of doordat niet voldaan is aan de aanname dat de meetruimten zich voortdurend in evenwicht bevonden, hetgeen een aanzienlijke versimpeling van de werkelijkheid is. Met name de lucht in de hal lijkt in veel gevallen goed gemengd met lucht uit één of meer andere ruimten. Dit maakt het model in deze gevallen niet of slecht oplosbaar.

### 4.4 Stroming in individuele woningen – statistische analyse<sup>2</sup>

De gepresenteerde waarden van de PFT-stromen in Tabel 3 hebben betrekking op groepen woningen. De oorspronkelijke opzet was het stromingsmodel van hoofdstuk 3 toe te passen op individuele woningen om voor elke woning de gemeten stromen te kunnen rapporteren. Dit bleek echter in zeer veel woningen onmogelijk: een eerste toepassing van het model leidde in slechts een derde van de woningen tot fysisch mogelijke resultaten. Met soepelere criteria zijn uiteindelijk analyses uitgevoerd met een groep van 107 vierzonewoningen, maar ook voor deze selectie geldt dat we niet zomaar de resultaten van individuele woningen kunnen gebruiken.

Omdat hiervoor verschillende verklaringen mogelijk leken, is op verschillende manieren geprobeerd toch tot uitspraken over de individuele woningen te komen.

#### 4.4.1 Lineaire regressie voor alle woningen tegelijk

Als in een woning de lucht in twee of meer ruimten goed gemengd is, zijn de in Bijlage A beschreven vergelijkingen waaruit de luchtstromen kunnen worden berekend niet of slecht oplosbaar. Wiskundig gesteld: het stelsel vergelijkingen ontgaat. Dit verschijnsel lijkt zich bij veel woningen in de VERA-survey voor te doen.

De modelvergelijkingen kunnen voor alle woningen tegelijk samengevoegd worden in een veel groter stelsel, dat kan worden opgelost door middel van lineaire regressie. De verwachting was dat het complete model minder gevoelig zou zijn voor ontgaanden in individuele huizen. Echter, ook deze aanpak leverde negatieve stromen op en was daarmee onsuccesvol.

#### 4.4.2 Regressie met beperkende voorwaarden

Vervolgens is lineaire regressie uitgevoerd met de voorwaarde dat alle berekende stromen groter dan een kleine negatieve waarde moeten zijn. Er is gekozen voor een kleine negatieve waarde omdat door meeton nauwkeurigheden deze eventueel zouden kunnen optreden. Dit levert, wanneer het model voor alle woningen tegelijk wordt opgelost, voor de meeste stromingen zeer kleine waarden op. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt doordat de variatie tussen woningen zo groot is, dat gemiddelde waarden, over alle woningen, weinigzeggende waarden opleveren.

Een regressie met constraints voor elke woning apart levert voor 25 % van de woningen met vier meetpunten geen convergentie in de methode en daarmee ook geen oplossing op. Dit aantal is dusdanig groot dat we ook deze aanpak als niet succesvol beschouwen.

---

<sup>2</sup> De analyses in paragraaf 4.4.1 tot en met 4.4.5 zijn uitgevoerd door A. Wong en H. Boshuizen (EMI, RIVM).

Over de woningen waarvoor wél schattingen konden worden gemaakt, is er gekeken naar de correlatie tussen de verschillende stromingen. Daaruit kwam naar voren dat de stromingen tussen woon- en slaapkamer en terug, en tussen hal en slaapkamer en terug, sterk gecorreleerd waren. Dit impliceert dat deze stromen als variabelen tot een enkele stroming kunnen worden teruggebracht. Daarnaast bleek dat alle stromen vanuit de kruipruimte (naar buiten, woonkamer, slaapkamer en hal) sterk gecorreleerd waren.

#### **4.4.3 Mixed-effectsregressie**

Bij een mixed-effectsregressie is het uitgangspunt dat de luchtstromen in een woning beschreven worden door een algemeen, voor alle woningen geldig model, met daarbovenop effecten die specifiek zijn voor die woning. Deze woningspecifieke effecten kunnen gezien worden als ruis. Een dergelijk model is toepasbaar wanneer de in de klassieke lineaire regressiemodellen gemaakte veronderstelling dat alle waarnemingen ongecorrleerd zijn, niet opgaat. Dit is het geval in de VERA-survey, waar de meetresultaten per woning gecorreleerd bleken. Met standaard lineaire regressie zijn vanwege de aanwezigheid van de individuele effecten de coëfficiënten en standaardfouten biased (niet zuiver).

Mixed-effectsmodellen zijn rekenintensief. Bij de oplossing wordt gebruikgemaakt van numerieke schattingen, in tegenstelling tot klassieke regressie, waarbij exacte oplossingen beschikbaar zijn. De oplossing wordt berekend met behulp van een iteratief algoritme.

In de VERA-survey bleek het aantal variabelen per woning te groot om een oplossing van het model te vinden. Reductie van het aantal variabelen op basis van de sterke correlaties vermeld bij de beschrijving van regressie met beperkende voorwaarden, leverde evenmin een convergentie op in de regressie. De vermoedelijke reden hiervoor is dat de variatie in luchtstromen tussen woningen te groot is.

#### **4.4.4 Clusteranalyse**

Clusteranalyse is een klasse van methoden waarin getracht wordt data op te delen in clusters, op basis van criteria in variabelen. Omdat bij de hierboven beschreven regressie met constraints en het mixed-effectsmodel de indruk groeide dat problemen ontstonden doordat de variatie binnen de steekproef te groot was, is geprobeerd de woningen op te delen in clusters met gemeenschappelijke eigenschappen, en elk van deze clusters apart te modelleren. Dit kan bijvoorbeeld op basis van volume of radonconcentratie.

Voor het samenstellen van clusters is een beproefde methode uit de literatuur gebruikt [9]. Een clusteranalyse op basis van radonconcentratie of volume is mogelijk; dit leverde een drietal clusters van woningen op. Binnen elk cluster was er echter opnieuw sprake van oplossingen met fysisch onmogelijke negatieve stromingen. De negatieve stromingen zijn niet voor elk cluster dezelfde. Wel was bij elk cluster de stroming van de hal naar kruipruimte negatief.

#### **4.4.5 Factoranalyse**

Bij factoranalyse wordt geprobeerd voor een groot aantal geobserveerde variabelen een kleiner aantal factoren - de variabelen die de observaties (grotendeels) beschrijven, te vinden.

Omdat bij eerdere analysepogingen van de data bleek dat er sterke correlaties tussen luchtstromen bestonden, is geprobeerd door middel van factoranalyse het aantal variabelen in het model te reduceren. Ook deze methode bleek geen bevredigende resultaten op te leveren.

#### 4.4.6 Tweezonemodellen

Menging van lucht in twee of meer meetruimten lijkt in vrij veel woningen voor onoplosbaarheid van het model te zorgen. Het lijkt aannemelijk dat de hal, die in de VERA-aanpak gezien werd als verbindingsruimte tussen de leefruimten en de kruipruimte, relatief vaak met één of meer andere ruimten goed gemengd is, terwijl bijvoorbeeld de kruipruimte volgens verwachting in veel gevallen niet goed gemengd is met andere ruimten.

Om te zien of er nog uitspraken over stromen in individuele woningen gedaan kunnen worden, zijn voor alle woningen modellen getest waarin steeds twee meetruimten bekeken zijn, terwijl alle overige ruimten buiten beschouwing zijn gelaten. Deze modellen zijn analoog aan het in hoofdstuk 3 beschreven model, maar beschrijven steeds maar twee meetruimten en twee tracergassen, en één overige ruimte, die alle andere ruimten in de woning (met of zonder meetapparatuur) en buiten omvat.

**Tabel 6. Luchtstromen (m<sup>3</sup>/h) in eengezinswoningen: tweezonemodel.**

		van:				
		kruipruimte	woonkamer	slaapkamer	hal	
<b>naar:</b>	kruipruimte	-	3	1	5	
		-	1	0	1	
		-	(3) 123	(5) 118	(13) 87	
woonkamer	1	-	15	61	steeds:	
	0	-	10	40	gemiddelde	
	(3) 123	-	(9) 183	(27) 148	mediaan	
slaapkamer	3	21	-	54	aantal*	
	2	12	-	36		
	(5) 118	(9) 183	-	(39) 138		
hal	14	73	57	-		
	10	57	44	-		
	(13) 87	(27) 148	(39) 138	-		

\* tussen haakjes het aantal woningen met niet-fysische resultaten

Zoals verwacht leidt deze aanpak voor stromingen tussen woonkamer, slaapkamer en kruipruimte (of centrale hal) relatief vaak tot fysisch mogelijke resultaten, terwijl de berekende stromen van en naar de hal relatief vaak sterk negatief of extreem groot zijn.

Voor eengezinswoningen zijn deze resultaten samengevat in Tabel 6. Zowel de gemiddelde als de mediane stromen zijn hierin weergegeven. Bij aantal is aangegeven in hoeveel woningen het betreffende model tot een fysisch reële oplossing leidde, dat wil zeggen een oplossing zonder stromen kleiner dan -10 m<sup>3</sup>/h en zonder extreem grote stromen (> 2000 m<sup>3</sup>/h), zowel tussen de twee meetruimten onderling als naar alle ruimten buiten het model. Tussen haakjes is aangegeven in hoeveel woningen wel meetresultaten beschikbaar waren, maar het model niet leidde tot aanvaardbare resultaten. Dit is, zoals verwacht, opvallend vaak het geval tussen hal en woonkamer en tussen hal en slaapkamer, ruimten die in veel gevallen direct met elkaar verbonden zijn door een deur. In paragraaf 4.2 worden stromen kleiner dan -100 m<sup>3</sup>/h buiten beschouwing gelaten. Het hier aangelegde criterium is iets strenger. Als ook stromen tot -100 m<sup>3</sup>/h toegelaten worden veranderen de resultaten in Tabel 6 niet sterk: de gemiddelde en mediane waarden nemen iets toe. Dit wordt veroorzaakt doordat veel negatieve stromen vanuit een meetruimte naar buiten gericht zijn, en samenhangen met relatief grote stromen tussen de twee meetruimten in het model.

In 110 van de 222 eengezinswoningen leveren de tweezonemodellen die twee van de ruimten woonkamer, slaapkamer en kruipruimte bevatten allemaal valide stromen op - dat wil zeggen: niet alleen de stromen tussen de meetruimten zijn valide, maar ook die van de meetruimten naar 'overig'.

De resultaten met tweezonemodellen zijn goed vergelijkbaar met die van de vierzonemodellen in Tabel 3. Dit blijkt nog niet uit een directe vergelijking van Tabel 3 en Tabel 6 omdat in Tabel 3 stromen zijn berekend op grond van gemiddelde en mediane concentraties, terwijl Tabel 6 gemiddelde en mediane waarden van de met tweezonemodellen uit individuele concentraties berekende stromen laat zien. Deze verschillen vallen grotendeels weg als we de berekening met tweezonemodellen op dezelfde manier uitvoeren als die met vierzonemodellen: op basis van gemiddelde en mediane PFT-concentraties.

#### **4.4.7 Tweezonemodellen - meergezinswoningen**

Het aantal meergezinswoningen waarin succesvol in vier zones gemeten is, was te klein om op grond van het vierzonemodel uitspraken te doen over de stromingen in meergezinswoningen.

Toepassing van het tweezonemodel levert voor een aantal ruimten wel voldoende grote groepen woningen op, zie Bijlage B. De resultaten voor de hal zijn vergelijkbaar met die voor eengezinswoningen, de stromen tussen woonkamer en slaapkamer zijn wat groter. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt doordat in meergezinswoningen deze ruimten zich vaker op dezelfde verdieping bevinden dan in eengezinswoningen.

#### **4.4.8 Conclusie**

Directe toepassing van het in hoofdstuk 3 beschreven model voor individuele woningen leidt tot fysisch onmogelijke resultaten. Dit zou kunnen worden verklaard doordat in veel woningen de lucht in twee of meer ruimten onderling goed gemengd is, waardoor oplossing van het model niet direct mogelijk is, of doordat woningspecifieke effecten een belangrijke rol spelen. Gezien de opzet van het model zijn beide verklaringen plausibel. Om deze hypothesen te testen zijn lineaire regressies (met en zonder beperkende voorwaarden) en mixed-effectsregressies uitgevoerd. Dit leverde echter geen bevredigende resultaten op. Hierbij leken de grote variatie tussen de woningen en correlaties tussen sommige luchtstromingen een belangrijke rol te spelen. Het bleek echter niet mogelijk deze problemen door middel van clusteranalyse of factoranalyse op te lossen.

Op grond van de beschikbare data is het dus niet mogelijk gebleken uitspraken te doen over alle individuele stromen tegelijk in afzonderlijke woningen in de steekproef. We beperken ons in dit rapport dan ook tot gemiddelde en mediane resultaten, met uitzondering van de eerste paragraaf van het volgende hoofdstuk waar we de correlatie bepalen tussen de individuele totale ventilatiestromen en de radonconcentraties.

Tweezonemodellen geven voor de stromen (in individuele woningen) tussen woonkamer, slaapkamer en kruipruimte in meer gevallen dan bij vierzonemodellen plausibele resultaten. Dat de resultaten vergelijkbaar zijn met die van vierzonemodellen, ondersteunt de uitkomst van de analyses met vier zones.

## 5 Synthese radonmetingen en PFT-metingen

Het samenvoegen van de resultaten van ventilatie- en radonmetingen is een belangrijke doelstelling van het project VERA - VEntilatie en RAdon. Kennis over de ventilatie in woningen stelt ons in staat uitspraken te doen over het verband tussen ventilatie en radon, en over de herkomst van radon in de leefruimten van een woning.

In het RIVM-briefrapport Stralingsbelasting in nieuwbouwwoningen - voorlopige resultaten [3] zijn de resultaten van de radonmetingen in het VERA-project gepresenteerd. Deze zijn samengevat in Tabel 7. Voor de gemiddelde radonconcentratie in de buitenlucht wordt de waarde van  $3 \text{ Bq/m}^3$  uit [10] aangenomen.

We gaan hier voorbij aan de discussie over thoron. Onderstaande radonconcentraties zijn lager dan in voorgaande studies. Dit wordt in [3] verklaard door de constatering dat in vorige surveys vermoedelijk naast radon, ook thoron is gemeten, dat is geïnterpreteerd als radon. In [3] en in een toekomstige rapportage over thoron wordt deze problematiek behandeld.

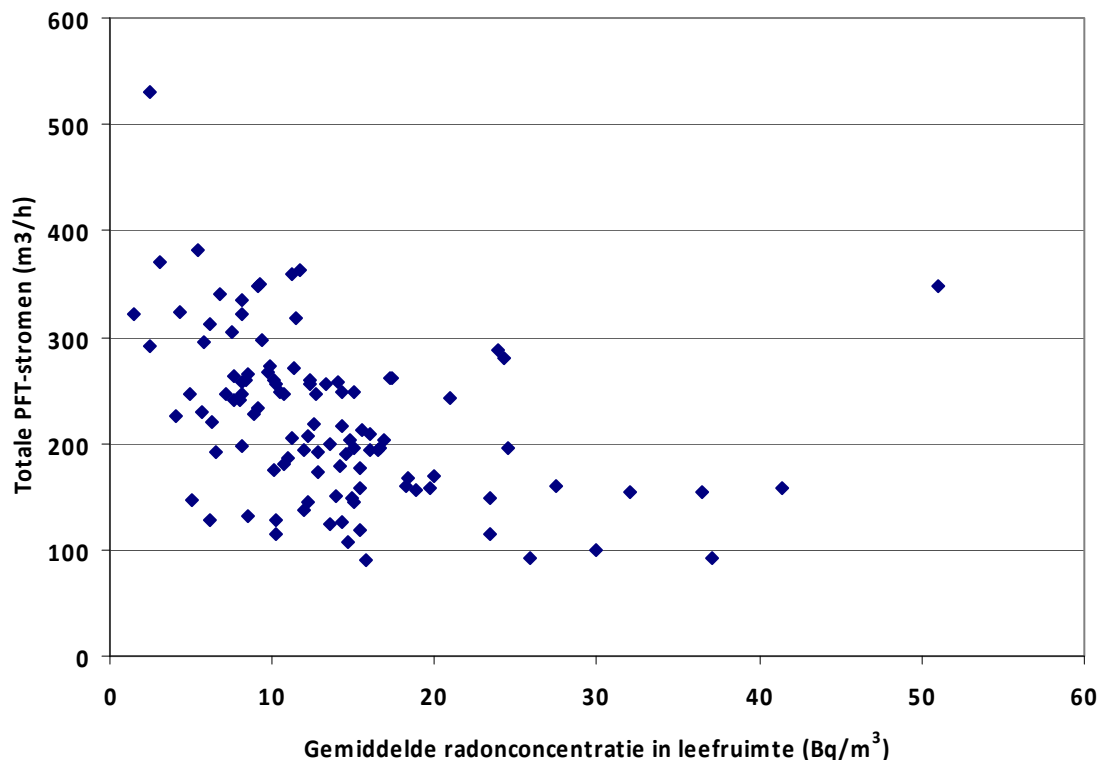
**Tabel 7. Radonconcentraties in VERA-project.**

	woonkamer	slaapkamer	hal	centrale hal	kruipruimte
gemiddelde ( $\text{Bq/m}^3$ )	13,8	13,0	15,6	12,9	45,4
mediaan ( $\text{Bq/m}^3$ )	12,2	10,8	12,5	9,9	28,4
aantal metingen	301	296	292	47	149

### 5.1 Radonconcentratie en ventilatie

#### 5.1.1 Correlatie tussen radonconcentratie en totale luchtstroom

Hoe meer er in een woning geventileerd wordt, des te groter zijn de luchtstromen en des te lager zijn - volgens verwachting - de gemiddelde radonconcentraties. Om te controleren of dit inderdaad uit de meetgegevens volgt, zijn in Figuur 5 per woning de luchtstromen naar buiten - 'door de leefruimte heen' - uitgezet tegen de gemiddelde radonconcentraties in de leefruimte (woonkamer, slaapkamer en hal).



Figuur 5. PFT-stromen versus radonconcentratie.

Deze grafiek laat een duidelijk verband zien tussen totale PFT-stroom en gemiddelde radonconcentratie in de leefruimte. Hier zijn enkele opmerkingen bij te plaatsen.

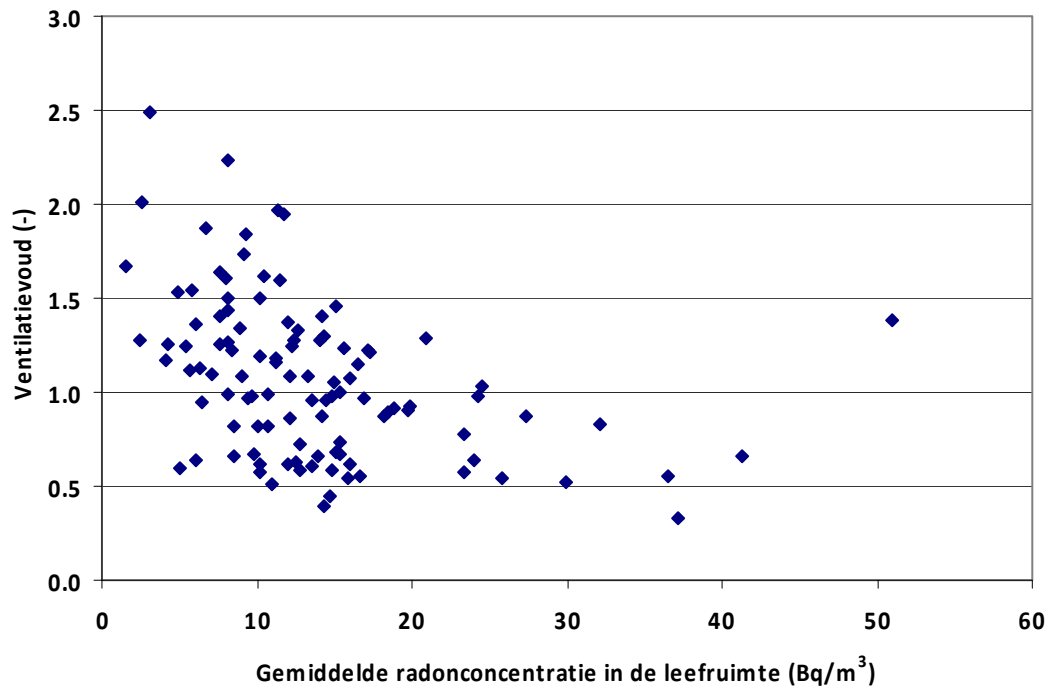
#### Outlier

Er is één evidente outlier: één woning met een gemiddelde radonconcentratie in de leefruimte van 51 Bq/m<sup>3</sup>. Deze woning is door de eerdere selecties gekomen omdat de uitkomsten van het stromingsmodel voldoen aan vooropgestelde waarden. De hoge gemiddelde waarde is afkomstig van een extreme waarde in de slaapkamer van de betreffende woning. In de 107 eengezinswoningen die we nu analyseren is de mediane radonconcentratie in de slaapkamer 9 Bq/m<sup>3</sup> en de op één na hoogste waarde 43 Bq/m<sup>3</sup>. De outlier heeft de waarde 131 Bq/m<sup>3</sup>. Er zijn geen (andere) objectieve redenen om deze meting te diskwalificeren. De waarde lijkt echter onwaarschijnlijk hoog, vooral in een huis waar, zoals uit de grafiek volgt, goed wordt geventileerd. Een meetfout is echter niet uit te sluiten. Er zijn daarom aparte analyses uitgevoerd met en zonder deze specifieke woning.

#### Vertekening grafiek

Het beeld in de grafiek wordt vertekend door, ten eerste, het gegeven dat de radonproductie in woningen verschillend is; hiervoor is moeilijk te corrigeren. Ten tweede zijn de volumes van de woningen verschillend. Om dit te verhelpen zijn de volumes van de gemeten ruimten bepaald door uit de bouwtekeningen van de huizen de dimensies te bepalen. Het volume van de meetruimten in de woningen in de survey was gemiddeld 220 m<sup>3</sup>, dat van de woonkamer 100 m<sup>3</sup> en dat van de kruipruimte 42 m<sup>3</sup>.

Het delen van de PFT-stromen op de volumes levert, in Figuur 6, de relatie op tussen ventilatievoud - het aantal maal dat per uur in de meetruimten het totale volume lucht wordt ververst - en gemiddelde radonconcentratie in de leefruimte. Deze grafiek wijkt kwalitatief weinig af van Figuur 5.



Figuur 6. Ventilatievoud versus radonconcentratie.

In Tabel 8 zijn nu voor beide grafieken correlatiecoëfficiënten gegeven, voor zowel de groep van 107 woningen als de groep van 106 woningen zonder outlier. Hierbij zijn de correlatiecoëfficiënten berekend voor het verband tussen de radonconcentratie en de inverse waarde van de PFT-stroom dan wel ventilatievoud. De verwachting is dat tussen deze grootheden een lineair verband bestaat. Alle correlatiecoëfficiënten zijn getest op significantie door de p-waarde te bepalen. Deze is in alle gevallen veel kleiner dan 0,05.

Tabel 8. Correlatiecoëfficiënten ventilatie en radonconcentratie.\*

correlatiecoëfficiënt van:	107 woningen	106 woningen, zonder outlier
PFT-stroom en radonconcentratie	0,41	0,51
ventilatievoud en radonconcentratie	0,41	0,50

\* de correlatiecoëfficiënten zijn berekend voor radonconcentratie versus  $1/(PFT\text{-stroom})$  en  $1/(\text{ventilatievoud})$

Deze resultaten maken duidelijk dat er - volgens verwachting - een verband is tussen radonconcentratie in de woning en de ventilatie.

In [11] staat het verslag van een vergelijkbaar onderzoek met PFT-metingen in 117 Deense eengezinswoningen. De correlatie tussen radonconcentratie en ventilatievoud die daar is gevonden is significant, maar kleiner ( $R = 0,28$ ,  $p < 0,001$ ) dan in onze studie. Dit gegeven schept, ondanks

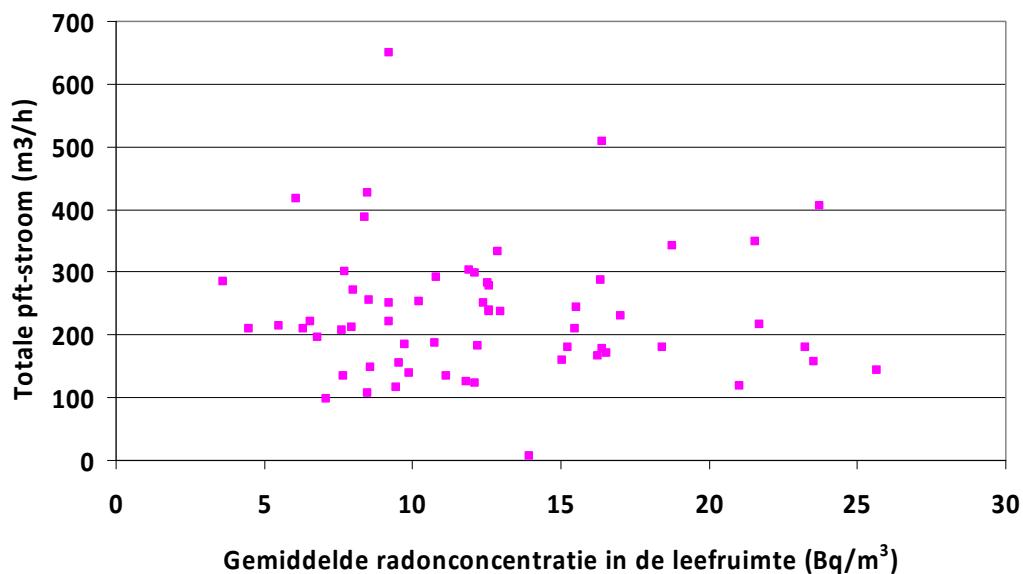


de ervaren moeilijkheden bij de analyse van de metingen, toch enig vertrouwen in de resultaten en het gebruikte model.

### 5.1.2 Driezoneanalyse

We nemen aan dat de correlatie tussen radonconcentratie en PFT-stroom en/of ventilatievoud zoals we die hebben bepaald in de vorige paragraaf kan dienen als kwaliteitscriterium voor de PFT-metingen. Als er geen verband lijkt te zijn tussen radonconcentratie en PFT-stromen in een bepaalde verzameling woningen, stellen we dat voor deze verzameling het stromingsmodel niet geldig is.

Dit kwaliteitscriterium voor PFT-metingen passen we toe op de resultaten voor de berekeningen met drie zones. Het blijkt namelijk dat, wanneer we een vergelijkbare correlatiegrafiek (zie Figuur 7) opstellen voor de woningen waarin met drie zones is gerekend, er geen significant ( $R = 0,04$ ,  $p = 0,76$ ) verband lijkt te bestaan tussen gemeten radonconcentratie en (de inverse waarde van) de PFT-stroom.



Figuur 7. PFT-stromen versus radonconcentratie voor driezonewoningen.

Een definitieve verklaring voor dit resultaat is niet gevonden. De PFT-stromen en radonconcentraties zijn niet significant anders dan bij de woningen uit de groep van vier zones, en ook bij de plaatsing en het ophalen van de meetapparatuur zijn niet extra veel fouten gemaakt.

Een mogelijke verklaring is de volgende: in de driezonewoningen ontbreekt meestal de kruipruimte. We weten dat het gebruikte stromingsmodel niet goed werkt als ruimten onderling zijn doorgemengd - als bijvoorbeeld de deur tussen de woonkamer en de hal vaak open staat. Anders gezegd: hoe meer deuren er open (kunnen) staan in een woning, des te slechter werkt het model. In een driezonemodel is er doorgaans één goed afgesloten ruimte minder dan in een vierzonemodel, of anders gezegd: er staan relatief meer deuren open. Het model zal daarom

minder betrouwbare resultaten opleveren bij drie zones of minder, dan bij vier zones, als we ervan uitgaan dat twee van die zones in veel gevallen vermoedelijk onderling zijn doorgemengd.

## 5.2 Bepaling radonbrontermen

Het radon dat in woningen wordt aangetroffen is afkomstig uit verschillende bronnen. Het komt de woning binnen vanuit de buitenlucht waar het afkomstig is uit de grond. Vanuit de bodem belandt het ook in de kruipruimte, die vaak in direct contact staat met de ondergrond. De belangrijkste bijdrage wordt geleverd door de bouwmaterialen.

Een belangrijk doel van de PFT-metingen was om inzicht te krijgen in de radonproductie in de verschillende meetruimten en de herkomst van het radon in bijvoorbeeld de woonkamer.

We hebben twee verschillende methoden gebruikt om de radonbrontermen te bepalen.

### Methode 1 - stromingsanalyse

In Bijlage A zijn de formules gegeven voor de massabalans voor de PFT's. Dezelfde formules gelden ook voor de radonconcentraties. Omdat we met de stromingsanalyse de luchtstromen kunnen bepalen en de radonconcentraties gemeten zijn, levert ons dit de radonbrontermen op.

### Methode 2 - partitionering

Een alternatieve wijze om de brontermen te berekenen is om de stromingsanalyse over te slaan en de partitionering van de tracerconcentraties/radon te bekijken: hoeveel van de tracergassen/radon geproduceerd in de verschillende ruimten wordt in welke verdeling teruggevonden in de andere ruimten? Dit verschaft ons ook kennis over de oorsprong van het radon in de woonkamer.

De twee methoden hebben vergelijkbare waarden voor de radonbronsterktes opgeleverd. De numerieke waarden uit Tabel 9 zijn verkregen met behulp van methode 1.

**Tabel 9. Radonbronsterktes (Bq/h).**

ruimte	gemiddeld huis	mediaan huis	schatting uit exhalatie
woonkamer	552	547	519
slaapkamer	145	124	241
hal	530	871	231
kruipruimte	791	670	867

In de eerste en tweede kolom van Tabel 9 staan de resultaten van de berekeningen van de brontermen. Hierbij is de radonconcentratie gecorrigeerd voor de achtergrondconcentratie van  $3 \text{ Bq/m}^3$ . In de derde kolom staat het resultaat van een eenvoudige schatting voor de exhalatie van radon uit de muren en de bodem. Hierbij zijn uit de berekende mediane volumes van de woningen de wand- en bodemoppervlakten bepaald en zijn deze vermenigvuldigd met de exhalatietempi van bouw materiaal en de bodem. Voor de exhalatietempi zijn de volgende waarden aangenomen: bouw materiaal:  $1 \text{ (mBq/m}^2\text{)/s}$ , zandbodem:  $3 \text{ (mBq/m}^2\text{)/s}$ . Deze waarden zijn afkomstig uit het basisdocument Radon [12].

Zoals verwacht is de radonproductie in de kruipruimte relatief groot ten gevolge van de andere waarden en in de slaapkamer relatief klein. Er zijn enkele zaken die opvallen bij bestudering van deze tabel: er is een aanzienlijk verschil tussen het gemiddelde en mediane huis als we kijken naar

de radonbronterm in de hal. Daarnaast is de waarde voor de radonbronterm in de hal hoger dan verwacht en overtreft zij de radonbronterm in de kruipruimte voor het mediane huis.

De eerste-ordeschatting voor exhalatie lijkt redelijk overeen te komen met de op grond van de ventilatiemetingen berekende waarden voor de woonkamer en de kruipruimte. Hierbij dient aangetekend te worden dat in deze schatting de resultaten zeer gevoelig zijn voor de aannames voor de exhalatietempi. Het is duidelijk dat het resultaat voor de hal sterk afwijkt van het resultaat berekend op basis van de PFT-metingen. Dit is nog een aanwijzing dat de hal als meetruimte problemen oplevert. De resultaten van de twee soorten berekeningen worden vergelijkbaar als we het mediane volume van de hal sterk opschroeven. Dit zou erop duiden dat toch in veel gevallen de hal in verbinding zou hebben gestaan met bijvoorbeeld een open zolder.

### 5.2.1 Herkomst radon in woonkamer

Methode 2 (partitionering) geeft een directe schatting van de bijdrage uit verschillende bronnen aan de radonconcentratie in de woonkamer. Bij een achtergrondradonconcentratie van  $3 \text{ Bq/m}^3$  volgt in Tabel 10 de verdeling van radon afkomstig uit leefruimte, buitenlucht en kruipruimte, ook in vergelijking met vorige resultaten.

**Tabel 10. Bijdrage aan radonconcentratie in de woonkamer uit verschillende bronnen.**

percentages	leefruimte	buiten	kruipruimte
huidige studie - gemiddelde huis	67	22	11
huidige studie - mediane huis	67	23	10
Stoop et al. [2]	69	17	14

Duidelijk is dat de verschillen tussen het gemiddelde en mediane huis klein zijn, en dat het verschil met de resultaten uit [2] beperkt blijven. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat ‘buiten’ in onze studie betekent: alles buiten de meetruimten. Hier vallen dus ook bijvoorbeeld een tweede en derde slaapkamer onder. Verder moet worden vermeld dat in [2] de achtergrondconcentratie relatief hoog is verondersteld en de radonconcentratie binnen overschat werd omdat vermoedelijk veel thoron is gemeten [3].

## 5.3 Overige bevindingen

### 5.3.1 Verband PFT-ventilatie en mechanische ventilatie

In het VERA-project zijn naast de PFT-metingen ook metingen verricht aan de mechanische ventilatiesystemen. Hierbij is van de ventilatiesystemen de mechanische ventilatiecapaciteit in verschillende standen gemeten. Er is bovendien door bewoners een enquête ingevuld waarin onder meer naar het ventilatiegedrag is gevraagd. Hieruit is opgemaakt wat de ventilatiestromen in verschillende ruimten zijn. Hoewel het twee zeer verschillende methoden betreft, verwachtten we a priori een verband tussen de ventilatiestromen berekend op de hierboven beschreven manier en de stromen op basis van de PFT-metingen.

In Tabel 11, die deels al voorkwam in [3], staan de resultaten van de mechanische ventilatiemetingen en de resultaten van de PFT-metingen. Met daggemiddelde mechanische ventilatie wordt bedoeld dat de gemeten instantane capaciteit is vermenigvuldigd met het gebruik

in uren per dag. Uit deze tabel is op te maken dat de ventilatiewaarden berekend met de PFT-analyse getalsmatig niet veel afwijken van die van de gemeten mechanische ventilatie. Het verschil kan worden verklaard door het effect van het openen van ramen, dat een kortstondige luchtstroom naar buiten veroorzaakt. Dit keert wel terug in de PFT-analyse maar niet in de mechanische ventilatiemetingen.

**Tabel 11. Vergelijking mechanische ventilatie en PFT-luchtstromen.**

<b>ventilatie in woonkamer (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>gemiddeld huis</b>	<b>mediaan huis</b>
mechanische ventilatie* - laagste stand	30	25
mechanische ventilatie* - daggemiddelde	33	30
PFT-stromen - 178 woningen**	40	40
PFT-stromen - 107 woningen	50	53

\* over een groep van ongeveer 200 woningen

\*\* pft-stromen uitgerekend voor de groep van 178 woningen inclusief meergezinswoningen

Om bij individuele woningen vast te stellen of er een verband bestaat tussen mechanische ventilatie en PFT-stromen zijn van de 107 analysewoningen er 65 geselecteerd waar mechanische ventilatiegegevens van beschikbaar waren. Voor deze woningen is de correlatie berekend: hieruit bleek geen significant verband tussen de gemeten ventilatiestromen en de berekende PFT-stromen.

### 5.3.2 Trendanalyse

Voor verschillende gemeten en berekende variabelen is onderzocht of er een ontwikkeling in de periode 1994 tot 2003 is waar te nemen. In Tabel 12 is af te lezen dat uit deze data geen significant verband blijkt tussen bouwjaar enerzijds en PFT-stroom, (totale) ventilatievoud en daggemiddelde mechanische ventilatie anderzijds. Er is dus geen uitspraak te doen over een verandering van deze variabelen in de tijd op basis van de resultaten uit dit onderzoek.

**Tabel 12. Verband tussen bouwjaar en enkel variabelen.**

<b>bouwjaar versus →</b>	<b>ventilatievoud totaal</b>	<b>PFT-stroom totaal</b>	<b>mechanische ventilatie</b>
aantal woningen	105	105	202
correlatiecoëfficiënt	-0,04	-0,03	0,08
p-waarde	0,7	0,7	0,4

### 5.3.3 Type ventilatie en radonconcentratie

De in de VERA-woningen gebruikte ventilatiesystemen kunnen worden onderverdeeld in vier categorieën. Voor elk van deze categorieën zijn de gemiddelde en mediane radonconcentratie in de woonkamer berekend. De resultaten hiervan staan in Tabel 13. Alleen woningen waar de radonconcentratie in de woonkamer succesvol bepaald is, zijn opgenomen in de tabel.

Tabel 13. Verband ventilatietype en radonconcentratie  $C_{Rn}$ .

categorie	aantal	$C_{Rn}$ gemiddeld (Bq/m <sup>3</sup> )	$C_{Rn}$ mediaan (Bq/m <sup>3</sup> )	std. dev.
natuurlijke toevoer, natuurlijke afvoer	9	20	19	13
mechanische toevoer, natuurlijke afvoer	2	22	22	18
<b>natuurlijke afvoer, totaal</b>	<b>11</b>	<b>21</b>	<b>19</b>	<b>8</b>
natuurlijke toevoer, mechanische afvoer	268	14	12	7
mechanische toevoer, mechanische afvoer	22	13	12	13
<b>mechanische afvoer, totaal</b>	<b>290</b>	<b>14</b>	<b>12</b>	<b>8</b>

Het verschil tussen woningen met natuurlijke afvoer en woningen met mechanische afvoer is groot en opvallend. Uit een statistische analyse blijkt echter dat het verschil niet statistisch significant is bij een betrouwbaarheid van 95 %. Dit kan worden verklaard door het kleine aantal woningen met een natuurlijke afvoer.

## 6 Conclusies

De ventilatiemetingen uitgevoerd in het kader van het VERA-project worden in dit hoofdstuk besproken en geëvalueerd. Hierbij wordt stilgestaan bij de toepassing van de PFT-methode en de hiermee ervaren problemen. De feitelijke resultaten van de ventilatiemetingen worden gepresenteerd en de resultaten van het combineren van deze metingen met de radonmetingen worden gegeven.

### 6.1 Evaluatie PFT-methode

Bij de opzet van het VERA-project [4] is besloten ventilatiemetingen uit te voeren met de PFT-methode op grond van de volgende argumenten:

- de methode is relatief eenvoudig en vraagt geen uitgebreide apparatuur;
- de methode is redelijk beproefd - zij is namelijk al in een eerdere survey toegepast;
- de methode kan naast informatie over ventilatie van een ruimte ook informatie verschaffen over de herkomst van de lucht uit andere ruimten.

Vooraf dat laatste punt maakt het in theorie mogelijk om vast te stellen uit welke ruimten het radon afkomstig is dat in bijvoorbeeld de woonkamer wordt gemeten. Hierdoor is toekenning van radonbronnen (bouw materiaal, bodem, buitenlucht) mogelijk.

Bij toepassing van de PFT-methode in het VERA-project hebben zich echter enkele problemen voorgedaan. Ondanks de eenvoud van het type meting is een aantal oorzaken aan te wijzen waardoor theorie en praktijk soms niet met elkaar in overeenstemming gebracht konden worden.

#### **Administratieve problemen en defecten**

Door in vier ruimten per woning te meten, is per woning een aanzienlijk aantal bronnen en adsorbers nodig. Een niet onaanzienlijk deel daarvan is door verschillende oorzaken lopende het jaar van de survey ongeschikt geworden:

- bronnen en adsorbers zijn opgezogen, verplaatst, opgegeten, gestolen, ontoegankelijk geworden of verdwenen;
- door plaatsers en ophalers van de apparatuur zijn soms administratieve fouten begaan - soms is bijvoorbeeld een verkeerd adsorbernummer genoteerd;
- een aantal adsorbers is defect geraakt;
- een aantal adsorbers heeft, gezien de meetresultaten, op enig moment nabij een bron gelegen of heeft een defecte afsluiting gehad.

#### **Technische en modelmatige problemen**

De ventilatiestromen tussen vier verschillende ruimten (en de buitenlucht) kunnen worden beschreven met een matrix van meetgegevens. Bij berekeningen met deze matrix blijken sommige stromen 'oneindig' groot te worden en/of negatief. Deze problemen treden op als bijvoorbeeld twee ruimten goed gemengd zijn en vrijwel dezelfde tracerconcentratie hebben.

In sommige gevallen zijn negatieve ventilatiestromen berekend doordat de concentratie van een bron hoger was in een andere ruimte dan de ruimte waarin de bron zich bevond. Hier kunnen

verschillende oorzaken aan ten grondslag liggen. Bijvoorbeeld: de bron bevond zich zo dicht bij een deur dat een groot deel van het vrijgekomen gas buiten de bedoelde ruimte terechtgekomen is, of de adsorber in de ruimte waar zich de bron bevond, heeft niet goed gefunctioneerd. Het is meestal niet mogelijk geweest te achterhalen wat er precies gebeurd is.

### **Aantal bemeten ruimten**

Toepassing van het model in situaties waarbij bovengenoemde problemen optreden, leidt veelal tot fysisch onmogelijke uitkomsten. Daarom is besloten selecties uit het bestand van woningen te maken, waarbij een gelijk aantal luchtstromen gemeten is. Zo is van het totale aantal woningen in de survey, 304, slechts bij 164 een- en meergezinswoningen ook daadwerkelijk in vier ruimten de ventilatiemeting succesvol uitgevoerd en bij 120 in drie ruimten. In de overige woningen is hooguit in twee ruimten gemeten. Omdat in een deel van de vierzonewoningen negatieve luchtstromen zijn vastgesteld, is uiteindelijk verder gerekend met een deelverzameling van 107 eengezinswoningen.

### **(On)nauwkeurigheid van metingen**

De volgende aspecten hebben de nauwkeurigheid van de ventilatiemetingen beïnvloed:

- de temperatuur beïnvloedt de emissie van tracergas; de onzekerheid in de totale productie van tracergassen bedraagt daardoor enkele procenten;
- om verzadiging van de adsorbers gedurende de lange meetperiode te voorkomen hadden deze een verkleinde opening; de reductiefactor wordt geschat op 95, met een fout van  $\pm 4,5$  %; het is echter mogelijk dat door verstopping van deze opening een nog grotere reductie is opgetreden;
- de onnauwkeurigheid van uitlezing van de adsorbers in het laboratorium bedroeg circa 10 %.
- het ventilatiegedrag is seizoensafhankelijk: voor het effect hiervan is moeilijk een schatting te maken;
- de volumes van de verschillende ruimten zijn binnen circa 10 % vastgesteld, behalve de hal ( $\pm 25$  %) waarvan het volume vanwege trapgaten en soms aansluitende zolders lastig exact is te bepalen;
- diverse moeilijk in te schatten onzekerheden.

Van sommige van deze aspecten is de omvang nauwelijks vast te stellen, hetzelfde geldt voor de onzekerheden in de modelmatige berekeningen. Dit maakt dat de totale onzekerheid van de uitkomsten aanzienlijk is, maar ook lastig te kwantificeren.

### **De hal**

Het is duidelijk gebleken in dit onderzoek dat van de verschillende meetruimten, de hal de meeste problemen opleverde. Samenvattend kunnen we stellen dat hier drie oorzaken aan ten grondslag liggen:

- De hal is als ruimte vaak goed doorgemengd met de woonkamer en soms ook de slaapkamer. Dit blijkt ook uit analyses waarbij is gekeken naar de correlatie tussen de PFT-concentraties van aangrenzende ruimten, waarbij duidelijk is dat een hoge concentratie in de woonkamer meestal samengaat met een hoge concentratie in de hal. Dit heeft tot gevolg gehad dat het gehanteerde stromingsmodel in veel woningen geen fysisch acceptabele uitkomsten heeft opgeleverd.

- Het volume van de hal is moeilijk te bepalen geweest uit de bouwtekeningen. Het vermoeden bestaat dat in veel gevallen de hal in contact staat met een open zolder.
- Omdat er verschillende instructies bestonden voor de plaatsing van bronnen en adsorbers voor verschillende typen woningen, is dit in de hal vaak misgegaan: in relatief veel gevallen is een verkeerd aantal bronnen geplaatst.

## 6.2 Resultaten van de ventilatiemetingen

### 6.2.1 Algemene resultaten

Uit de meetresultaten voor de verzameling van 107 woningen blijkt dat de effectieve luchtstroom van de hal naar buiten steeds de grootste is, en veel luchtstromen zeer klein zijn, zoals de uitwisseling tussen de slaapkamer en de kruipruimte. Zie Figuur 4 voor een gedetailleerd overzicht in een mediane eengezinswoning. De uitwisseling tussen enerzijds de hal en anderzijds de slaap- of woonkamer is aanzienlijk en de kruipruimte ten slotte lijkt relatief geïsoleerd te zijn van de rest van de woning.

Op basis van het gemiddelde volume van een woonkamer van circa 100 m<sup>3</sup> in deze survey, kan een gemiddeld ventilatievoud met alleen buitenlucht van 0,5 h<sup>-1</sup> worden vastgesteld. De mechanische ventilatie is hier voor een belangrijk deel verantwoordelijk voor. Voor de slaapkamer ligt het ventilatievoud rond de 0,7 h<sup>-1</sup> en voor de hal op 1,7 h<sup>-1</sup>.

Voor de meergezinswoningen is gevonden dat er een grote uitwisseling is tussen slaapkamer, woonkamer en hal. Deze ruimten zijn veelal goed gemengd. Dit maakt de ventilatiestroommetingen zeer onzeker.

Uit een trendanalyse volgt dat mechanische ventilatie, het totale ventilatievoud en de totale luchtstroom door de woning bepaald met de PFT-methode, niet gecorreleerd zijn aan het bouwjaar van de woningen. Er lijkt dus geen sprake van een verandering van deze variabelen in de tijd.

### 6.2.2 Resultaten voor individuele woningen

Directe toepassing van het in hoofdstuk 3 beschreven model voor individuele woningen leidt in de meeste gevallen tot fysisch onmogelijke resultaten. Dit zou kunnen worden verklaard doordat in veel woningen twee of meer ruimten onderling goed gemengd zijn, waardoor oplossing van het model niet direct mogelijk is, of doordat woningspecifieke effecten een belangrijke rol spelen. Gezien de opzet van het model zijn beide verklaringen plausibel. Om deze hypothesen te testen zijn geavanceerde statistische technieken ingezet. Deze leverden echter geen bevredigende resultaten op. Hierbij leken de grote variatie tussen de woningen en correlaties tussen sommige luchtstromen een belangrijke rol te spelen.

Op grond van de beschikbare data is het daarom niet mogelijk gebleken uitspraken te doen over alle stromen tegelijk in individuele woningen in de steekproef. We beperken ons in dit rapport dan ook tot gemiddelde en mediane resultaten, met uitzondering van paragraaf 5.1 waar de correlatie tussen de individuele ventilatiestromen en de radonconcentraties zijn bepaald. Tweezonemodellen geven voor de stromen tussen woonkamer, slaapkamer en kruipruimte wel in veel gevallen plausibele resultaten. Deze geven echter geen beeld van de ventilatie in de gehele woning.



### **6.3 Combinatie van ventilatie- en radonmetingen**

De uitkomsten van de ventilatiemetingen bieden de mogelijkheid om te bepalen waar het radon in een woonruimte vandaan komt. Daarnaast kan hiermee het effect van ventilatie op de radonconcentratie vastgesteld worden.

Hoe meer er in een woning geventileerd wordt, des te groter zijn de luchtstromen en des te lager zijn - volgens verwachting - de gemiddelde radonconcentraties. Deze correlatie is inderdaad aangetroffen bij de verzameling van 107 woningen waar het vierzonemodel heeft gewerkt.

Op basis van een massabalans van de PFT en ook van het aanwezige radon kan een schatting worden gemaakt van de radonbrontermen in de verschillende ruimten. Deze lijken in overeenstemming te zijn met het exhalatietempo van de bouwmaterialen en onderliggende bodem. Bij de hal is er wel een groot verschil tussen de schatting van het exhalatietempo en de berekende bronterm. Dit heeft mogelijk te maken met de onzekerheid in de inschatting van het volume van de hal. In veel huizen loopt de hal via het trappenhuis door naar een open zolder.

Het blijkt verder dat de radonconcentratie in de woonkamer voor circa 67 % bepaald wordt door de bouwmaterialen in die woonkamer, voor 22 % door de buitenlucht en voor 11 % door de kruipruimte, dat wil zeggen de bodem. Vergeleken met de vorige survey is de bijdrage van de buitenlucht dus groter. Dit wordt echter vooral veroorzaakt door de in de nieuwe survey lagere gemeten waarden van radonconcentraties in het binnenmilieu.

## Literatuur

- [1] Put LW, Veldhuizen A, De Meijer RJ – Radonconcentraties in Nederland, Verslag van SAWORA – project A2, rapport KVI-111i, Groningen (1985).
- [2] Stoop P, Glastra P, Hiemstra Y, De Vries L, Lembrechts J – Results of the second Dutch national survey on radon in dwellings, RIVM Report 610058006, Bilthoven (1998).
- [3] Blaauboer RO, Dekkers SAJ, Slaper H, Bader S - Stralingsbelasting in nieuwbouwwoningen - voorlopige resultaten. RIVM briefrapport 610790004 (2008)
- [4] Blaauboer RO - Opzet van het Ventilatie Radononderzoek. RIVM-rapport 610790002 (2008)
- [5] Opzet ventilatiemetingen in kader van DRASIN, Notitie met kenmerk V043138abA3.ls door LEJJ Schaap, Lichtveld Buis en Partners BV, Utrecht, 23 maart 2004. (bijlage 2)
- [6] Dietz RN, Cote EA – Air infiltration measurements in a home using a convenient perfluorocarbon tracer technique, Environment International, Vol.8, pp. 419-433 (1982)
- [7] Leaderer BP, Schaap L, Dietz RN – Evaluation of the perfluorocarbon tracer technique for determining infiltration rates in residences, Environmental Science and Technology, Vol. 19, No. 12, pp. 1225-1232 (1985)
- [8] d'Ottavio, TW, Senum, GI, Dietz, RD. Error Analysis Techniques for Perfluorocarbon Tracer Derived Multizone Ventilation Rates. Building and Environment. Vol.23, pp. 187-194 (1988)
- [9] Ward, J.H. (1963). Hierarchical groupings to optimize an objective function. Journal of the American Statistical Association 58:236-244.
- [10] Blaauboer RO, Smetsers RCGM - Variations in outdoor radiation levels in the Netherlands. Proefschrift Rijksuniversiteit Groningen (1996)
- [11] Andersen CE, Bergsoe NC, Majborn B, Ulbak K - Radon and Natural Ventilation in Newer Danish Single-Family Houses. Indoor Air. Vol. 7 pp. 278-286 (1997)
- [12] Vaas LH et al. Basisdocument Radon. RIVM-Rapport 710401014 (1991)



## Bijlage A

### Formules stromingsanalyse

Voor de PFT-metingen zijn vier verschillende bronnen met tracergassen gebruikt, één voor elke meetruimte. In Tabel A staan de bronsterktes S voor deze bronnen vermeld.

Tabel A. Gegevens PFT-experimenten.

meetruimte	S (nL/h) (T=21,5 °C)	temperatuur gemeten T <sub>gem</sub> (°C)	aantal bronnen	S (nL/h) bij T <sub>gem</sub>	CATS Sampling Rate (L/d)
kruipruimte	1572	14,9	2	2411	0,201
centrale hal	1572	17,6	1	1347	0,201
slaapkamer	398	20,1	2	754	0,188
woonkamer	445	21,3	2	882	0,177
hal	333	20,6	1-2*	320, 641	0,177

\*bij eengezinswoningen zijn twee bronnen in de hal geplaatst, bij meergezinswoningen één

De door BNL gerapporteerde PFT-waarden c(pL) worden omgerekend naar gemiddelde PFT-concentraties C(pL/L) met de volgende formule:

$$C = c/(r*SR*t).$$

Hier is SR(L/d) de zogeheten sampling rate van de CATS, r(-) de restrictiefactor en t(d) de tijdsduur van de metingen. De restrictiefactor is uiteindelijk bepaald op 95 [12].

Voor een enkele zone kan nu eenvoudig de effectieve luchtstroom q(m<sup>3</sup>/h) berekend worden door de concentratie te delen op de bronsterkte:

$$q = S/C.$$

Hierbij gelden de volgende definities:

- q<sub>i-j</sub>: luchtstroom van ruimte i naar ruimte j
- Q<sub>0</sub> = q<sub>1-0</sub>+q<sub>2-0</sub>+q<sub>3-0</sub>+q<sub>4-0</sub>: totale luchtstroom naar buiten (of naar binnen)
- Q<sub>1</sub> = q<sub>1-0</sub>+q<sub>1-2</sub>+q<sub>1-3</sub>+q<sub>1-4</sub>: totale luchtstroom naar of vanuit de woonkamer (equivalent voor andere ruimten)

Zoals besproken in hoofdstuk 3 is de aanname gemaakt dat de concentraties en luchtstromen constant in de tijd zijn. De massabalans per ruimte impliceert: wat uit een ruimte verdwijnt, moet gelijk zijn aan wat geproduceerd wordt en wat binnenkomt; voor een stationaire situatie:

$$Q_1*CA_1 = S_1 + q_{2-1}*CA_2 + q_{3-1}*CA_3 + q_{4-1}*CA_4.$$

Hierbij is S<sub>1</sub> de bronsterkte in ruimte 1 en CA<sub>1</sub> de concentratie van de tracer A gemeten in ruimte 1. Met vier verschillende tracers en vier verschillende ruimten levert dit zestien formules op, zoals voor de massabalans van tracer C in ruimte 2 - voor de duidelijkheid: er is geen productie van tracer C in ruimte 2, en dus geen bronterm S:

$$Q_2 \cdot CC_2 = q_{1-2} \cdot CC_1 + q_{3-2} \cdot CC_3 + q_{4-2} \cdot CC_4.$$

Deze zestien formules zijn in matrixvorm weer te geven:

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{s}.$$

Omdat de concentraties  $\mathbf{C}$  zijn gemeten en de brontermen  $\mathbf{s}$  zijn gegeven, kan nu de luchtstroomvector worden berekend door beide zijden van de bovenstaande formule met de inverse van  $\mathbf{C}$  te vermenigvuldigen:

$$\mathbf{C}^{-1} \mathbf{C} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{s} \rightarrow \mathbf{q} = \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{s}.$$

De luchtstroomvector  $\mathbf{q}$  heeft 16 componenten en beschrijft de luchtuitwisseling binnen een woning en die tussen de woning en de buitenlucht.

## Bijlage B

In Tabel B zijn de resultaten van de tweezonemodellering voor meergezinswoningen samengevat:

**Tabel B: Luchtstromen (m<sup>3</sup>/h) in meergezinswoningen: tweezonemodel.**

		<b>van:</b>					
		<b>kruipruimte</b>	<b>centrale hal</b>	<b>woonkamer</b>	<b>slaapkamer</b>	<b>hal</b>	
<b>naar:</b>	kruipruimte	-	-	5	1	6	
		-	-	3	0	6	
		-	-	(0) 4	(0) 4	(0) 2	
centrale hal	-	-	20	16	78	steeds:	
	-	-	9	4	18	gemiddelde	
	-	-	(3) 31	(2) 33	(6) 28	mediaan	
woonkamer	4	6	-	51	97	aantal*	
	1	3	-	31	68		
	(0) 4	(3) 31	-	(2) 68	(26) 18		
slaapkamer	1	11	37	-	28		
	1	5	20	-	14		
	(0) 4	(2) 33	(2) 68	-	(30) 13		
hal	8	66	79	34	-		
	8	14	68	27	-		
	(0) 2	(6) 28	(26) 18	(30) 13	-		

\* tussen haakjes het aantal woningen met niet-fysische resultaten

**RIVM**

Rijksinstituut  
voor Volksgezondheid  
en Milieu

Postbus 1  
3720 BA Bilthoven  
[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)