

Auteurs

Ir. P. (Piet) Jacobs, Dr. Ing. A.A.L. (Roberto) Traversari, Ing. N.G. (Norman) Egter van Wissekerke
TNO, afdeling Buildings & Energy Systems

Effect van verontreiniging van de binnenlucht op de ziektelast in Nederland

Op basis van de methodiek beschreven door Morantes zijn schattingen gemaakt van de Nederlandse ziektelast ten gevolge van binnenlucht verontreinigingen. De ziektelast is uitgedrukt in Disability Adjusted Life Year (DALY). De DALY is de som van verloren levensjaren door vroegtijdige sterfte en het aantal jaren dat mensen met beperkingen leven ten gevolge van ziekte. Voor de schatting van het effect van stoffen op het aantal DALY zijn meetdata van Nederlandse studies naar de binnenluchtkwaliteit gebruikt. Uit de analyse blijkt dat fijnstof (PM_{10} en $PM_{2,5}$) verre weg de belangrijkste bijdrage (ca. 80%) levert aan het verlies aan gezonde levensjaren. Daarna volgen stikstofdioxide (10%), formaldehyde (8%) en radon (1,4%). Gegevens over de concentratie ozon en het aantal schimmelsporen ontbreken voor de Nederlandse situatie. Deze concentraties zijn gelijkgesteld aan buitenlandse gegevens Morantes (2023), waarmee de bijdrage aan de ziektelast wordt geschat op respectievelijk 1,9% en 0,6%. Samen zijn deze 6 stoffen verantwoordelijk voor ruim 99% van de binnenmilieu gerelateerde ziektelast.

In Nederland wordt tot nu toe veelal CO_2 als indicator voor de binnenluchtkwaliteit gebruikt. Eisen aan de ventilatie zijn hierbij gerelateerd aan een gewenste CO_2 concentratie, die zelf met name een basis heeft in de geuroverlast ten gevolge van bio-effluenten [de Gids, 2011]. De CO_2 -concentratie zelf heeft geen directe relatie met de gezondheid. Vaak wordt de blootstelling aan een stof gerelateerd aan de grenswaarden van de WHO of wettelijk vastgestelde eisen. Hiermee kan echter niet worden bepaald welke stoffen de meeste impact hebben op de gezondheid van mensen en wat het effect is van combinaties van blootstelling aan verontreinigende stoffen.

Een maat die in de epidemiologie vaak wordt gebruikt om de totale ziektelast aan te geven is Disability Adjusted Life Years (DALY). Hiermee is het mogelijk

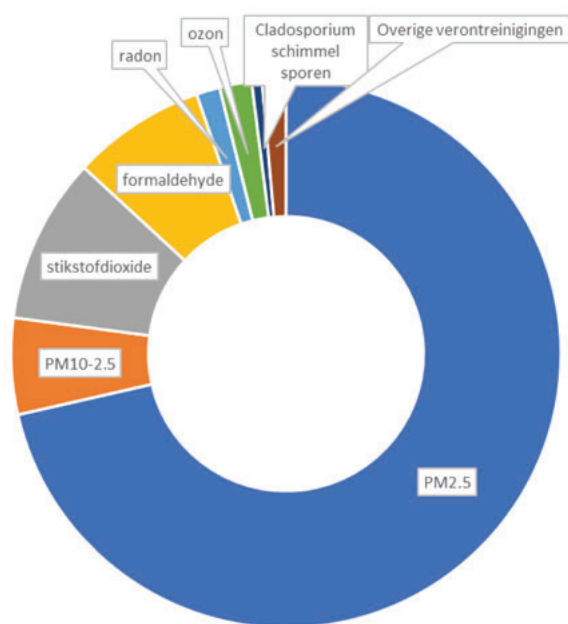
Highlights

- Fijnstof levert de belangrijkste bijdrage (ca. 80%) aan het verlies aan gezonde levensjaren
- Stikstofdioxide (10%), formaldehyde (8%), ozon (2%) en radon (1,4%) vormen samen met fijnstof de top van meest schadelijke stoffen
- Veel gegevens ontbreken, de laatste grootschalige monitoring is 20 jaar geleden uitgevoerd, nieuwe meetstudies zijn noodzakelijk om een compleet beeld te verkrijgen

om de gezondheidsschade van blootstelling aan verschillende stoffen bij elkaar op te tellen. De DALY is de som van verloren levensjaren door vroegtijdige sterfte en het aantal jaren dat mensen met beperkingen leven ten gevolge van ziekte. Hiervoor is voor elke beperking een factor vastgesteld tussen 0 en 1 [WHO 2020].

DALY is voor het eerst gebruikt in de "Global burden of disease Study" (Murray, 1990). Sindsdien is DALY één van de belangrijkste indicatoren om een ziektelast voor een populatie, bijvoorbeeld de bevolking van een land, te bepalen. In 2007 is in TVVL magazine het DALY-principe gebruikt om de ziektelast ten gevolge van verschillende woning- en installatieconcepten in te schatten [Koren, 2007]. Door het Lawrence Berkeley National Labs (LBNL) is in 2012 met de DALY-methode voor de belangrijkste binnenlucht verontreinigingen de ziektelast vastgesteld voor concentraties gemeten in de Verenigde Staten en landen met een vergelijkbare leefstijl [Logue, 2012]. Deze aanpak was echter ingewikkeld beschreven zodat alleen epidemiologen op basis van het artikel nieuwe berekeningen zouden kunnen maken. Het DALY-concept is recentelijk door de universiteit van Nottingham (Morantes, 2024) vertaald om het eenvoudiger toepasbaar te maken om de gezondheidsschade van (binnen)luchtverontreinigingen te schatten.

Dit artikel licht deze benadering kort toe en geeft een eerste schatting van de gezondheidsschade voor een typische Nederlandse woning. Daarbij wordt ook aangegeven van welke stoffen betrouwbare concentraties in de binnenlucht ontbreken of sterk verouderd zijn.



Figuur 1: Zes verontreinigingen dragen voor ruim 99% bij aan de totale binnenlucht gerelateerde DALY.

Intensiteit van gezondheidsschade

De schade intensiteit H_i is gedefinieerd als de toename van de hoeveelheid gezondheidsschade ten gevolge van binnenluchtverontreiniging uitgedrukt in DALY per eenheid van concentratie (C_i) per 100.000 mensen per jaar. Door Morantes [2024] is een overzicht van 44 verontreinigingen die in woningen voorkomen opgesteld. De gegevens hiervoor zijn afkomstig uit toxicologische en epidemiologische studies en hebben alleen betrekking op chronische ziekten en kwantificeren geen acute (kortstondige) effecten. Om deze reden is er bijvoorbeeld geen schade intensiteitsfactor voor koolmonoxide.

Per stof geldt dan: $Schade_i = H_i \cdot C_i$

Waarin:

- $Schade_i$ is de gezondheidsschade van stof i in DALY/10⁵ personen/jaar;
- H_i is de Schade intensiteit (Harm intensity) van stof i in DALY/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ /10⁵ personen/jaar;
- C_i is de gemiddelde jaarlijkse concentratie in de (binnen)lucht van stof i in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, KVE/ m^3 of Bq/ m^3 . (KVE= Kolonievormende eenheden met name voor bacteriën en schimmels, Bq = Becquerel met name voor Radon).

Sommerend over alle stoffen geldt: $Schade = \sum H_i$

DALY schatting voor een Nederlandse woning

In tabel 1 staan de 44 stoffen gerangschikt naar de bijdrage aan de ziektelast conform de schattingen van Morantes [2023]. Deze ziektelast is ingeschat op basis van concentratiedata in 31 landen uit de periode 2000 - 2020. De vet gedrukte rijen in tabel 1 geven stoffen aan waarvan concentratie data uit Nederlandse monitoringsprojecten zijn gevonden (NL). Hierbij is gezocht naar data die zoveel mogelijk een jaarlijkse blootstelling representeren.

Voor $\text{PM}_{2.5}$ zijn meetdata van het Be Aware project [Jacobs, 2020] gebruikt. In dit project is in 100 woningen van september 2017 tot oktober 2018 $\text{PM}_{2.5}$ met optische deeltjes tellers gemeten. Deze steekproef is redelijk representatief voor het Nederlandse woningbestand. Aandachtspunt hierbij wel is dat bij de selectie van de woningen rokers waren uitgesloten. Volgens het Trimbos Instituut rookte in 2023 19% van de volwassenen. Van de mensen die niet zelf roken wordt 8,1% minimaal 1 keer per week en 2,7% zelfs elke dag in een binnenruimte blootgesteld aan tabaksrook [Trimbos 2023].

Representatieve PM_{10} meetdata over het binnenmilieu in Nederlandse woningen is bijzonder schaars. GGD Groningen heeft in een klein aantal Groningse woningen in de winter van 2009 gedurende twee dagen gravimetrisch PM_{10} gemeten [Hall, 2009]. De buitenconcentratie bedroeg in deze periode op deze locaties gemiddeld 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. In 9 woningen zonder

Verontreiniging	Gemeten concentratie [µg/m³]	Schade intensiteit [DALY/ (µg/m³)/10 ⁵ personen per jaar]	Schade [DALY/10 ⁵ pers. jaar]	Bijdrage aan totale DALY [%]
PM _{2,5}	8,2 (NL)	60	492	71,9
PM _{10-2,5}	10,3 (NL)	3,8	39	5,7
Stikstofdioxide	11,8 (NL)	5,7	67	9,8
Formaldehyde	12,6 (NL)	4,3	54,18	7,9
Radon	21,7 ¹ (NL)	0,44	9,548	1,4
Ozon	10	1,3	13	1,9
Schimmel sporen	160 ²	0,026	4,16	0,6
Subtotaal 6 belangrijkste				99,2
acrylonitrile	0,71	1,2	0,852	0,13
acroleïne	0,6	1,2	0,72	0,11
crotonaldehyde (trans)	0,65	1,1	0,715	0,11
acetaldehyde	13	0,053	0,689	0,10
zwaveldioxide	0,41	1,3	0,533	0,08
naftaleen	1,1	0,36	0,396	0,06
carbon tetrachloride	0,35 (NL)	0,52	0,182	0,03
styreen	1,6	0,11	0,176	0,03
benzeen	1,35 (NL)	0,067	0,09045	0,01
1,3-butadiene	0,43	0,27	0,1161	0,02
limoneen	16,1 (NL)	0,0093	0,14973	0,02
carbon disulfide	0,31	0,29	0,0899	0,01
methyl tert-butyl ether	3,3	0,026	0,0858	0,01
1,1-dichlooretheen	0,48	0,15	0,072	0,01
vinylchloride	0,072	0,98	0,07056	0,01
1,2-dibromethaan	0,018	3,4	0,0612	0,01
cadmium (II)	0,011	5,3	0,0583	0,01
isopreen	6	0,0092	0,0552	0,01
ethanol	110	0,0005	0,055	0,01
chrom (VI)	0,0031	17	0,0527	0,01
tetrachlooretheen	0,2 (NL)	0,052	0,0104	0,00
1,2,2-trichloorethaan	0,2 (NL)	0,15	0,03	0,00
hexachloorbutadien	1,3	0,03	0,039	0,01
1,2-dichloorethaan	0,45 (NL)	0,052	0,0234	0,00
2-butoxyethanol	2,7	0,01	0,027	0,00
xyleen	3,8 (NL)	0,0034	0,01292	0,00
1,4-dichloorbenzeen	0,2 (NL)	0,012	0,0024	0,00
benzyl chloride	0,22	0,062	0,01364	0,00
tolueen	9,55 (NL)	0,00087	0,0083085	0,00
dichloormethaan	0,67	0,01	0,0067	0,00
1,1,2,2-tetrachloorethaan	0,04	0,13	0,0052	0,00
2-ethylhexanol	1,7	0,0029	0,00493	0,00
methylmethacrylaat	0,082	0,051	0,004182	0,00
hexaan	0,45 (NL)	0,0018	0,00081	0,00
trichloorethyleen	0,45	0,0035	0,001575	0,00
chloromethaan	1,6	0,00027	0,000432	0,00
2-methoxyethanol	0,021	0,0028	0,0000588	0,00
Totaal			685	100

¹ Bq/m³² KVE/m³

rokers bedroeg de concentratie gemiddeld $14,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In één van de woningen met roker bedroeg de concentratie in de woonkamer gemiddeld $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Indien deze woning wordt meegenomen bedraagt de PM_{10} concentratie gemiddeld $18,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De $\text{PM}_{10-2,5}$ fijnstof fractie op basis van voorgaande onderzoeken bedraagt dan $18,5 - 8,2 = 10,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Voor stikstofdioxide (NO_2) zijn meetdata uit het CLASP project [Jacobs, 2023] verkregen. In dit project is in januari 2023 in 40 Nederlandse woningen, waarvan 80% op gas kookte en 20% elektrisch, gedurende twee weken NO_2 gemeten. Tijdens de meetperiode was er sprake van relatief hoge NO_2 buitenconcentraties. Door Delgado [2024] is hiervoor gecorrigeerd en is op basis van concentraties in de buitenlucht uit 2021 de gemiddelde NO_2 concentratie in de binnenlucht uitgerekend voor huishoudens die op gas koken ($14,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en huishoudens die elektrisch koken ($8,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Op basis van Eurostat data [2022] kookt nog ruim 60% van de Nederlanders op gas en volgt een gemiddelde NO_2 concentratie in de woning van $11,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Formaldehyde is gedurende het stookseizoen van 2004/2005 voor het laatst grootschalig gemeten [Dongen & Vos, 2007]. In 358 woningen is in de keuken en in een tweede ruimte waarin veel spaanplaat of multiplex aanwezig was gedurende een week gemeten. De gemiddelde concentratie in deze twee ruimtes was vergelijkbaar en bedroeg $12,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Van de 37 vluchtige organische stoffen (VOC) waarvan een Schade Intensiteit bekend is, zijn door Hall [2009] van 10 VOC's de concentraties in woningen gedurende zomer en winter gerapporteerd [RIVM, 2009]. Voor de overige 27 VOC met HI zijn de door Morantes gerapporteerde internationale waarden aangehouden.

Voor Radon is een concentratie aangehouden van $21,7 \text{Bq}/\text{m}^3$. Deze is gemeten in de RIVM meetcampagne

2022 – 2023 in 2682 woningen [RIVM, 2024]. De gemeten waarde was hoger dan in de voorgaande campagne uitgevoerd in 2013/2014 waarin $15,7 \text{Bq}/\text{m}^3$ is gemeten. Als mogelijke verklaring geeft RIVM dat mensen mogelijk minder zijn gaan ventileren tijdens de energie crisis. Ventileren voorkomt dat de radon concentratie in een ruimte oploopt.

Wat betreft de concentratie ozon in Nederlandse woningen zijn geen gemeten concentraties gevonden. Voor het uit de buitenlucht afkomstige deel kan een schatting worden gemaakt door aan te nemen dat de binnenconcentratie circa 25% van buitenconcentratie bedraagt [Nazaroff, 2021]. De buitenconcentratie in Nederland is gemiddeld $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (www.samenmeten.nl/ozon-o3). Dit resulteert in een concentratie van $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wat 20% hoger is dan de door Morantes gerapporteerde waarde.

In de "Schade" benadering wordt als schimmel indicator het aantal Kolonie Vormende Eenheden (KVE) Cladosporium gebruikt. Omdat voor Nederland geen waardes bekend zijn, is de door Morantes gerapporteerde KVE aangehouden. Voordeel ten opzichte van conventionele methodes waarin visueel schimmel wordt vastgesteld is dat de concentratie in de binnenlucht wordt gemeten, wat een betere indicatie is voor de blootstelling. Nadeel is dat slechts van 1 schimmel soort het aantal KVE is meegenomen, hierdoor wordt het effect van schimmels mogelijk onderschat. Eerdere schattingen kwamen op een bijdrage van 11% aan de ziektelast door vocht en schimmel [Jantunen, 2011]. Mogelijk komt dit ook omdat in vochtige huizen de blootstelling aan andere stoffen, door beperkte ventilatie, vaak ook hoger is.

Tabel 1: Concentraties en Schade voor de Nederlandse woningen, vetgedrukte waarden zijn afkomstig uit Nederlandse monitoringsprojecten, de overige concentraties zijn ontleend aan Morantes [2024].

Discussie

De ziektelast in Nederland is met 685 DALYs per 100.000 personen per jaar lager dan de door Morantes (2024) wereldwijd gemiddelde ziektelast van 2200 DALYs/10⁵ personen/jaar. Dit komt met name door de lagere fijnstof concentraties (voor PM_{2,5} een concentratie van 8,2 in plaats van 26 µg/m³ en voor PM₁₀ 18,5 in plaats van 62 µg/m³). Onduidelijk is wat het effect van binnenshuis roken is op de PM_{2,5} concentratie omdat in bijna alle Nederlandse studies rokers van deelname zijn uitgesloten.

Uit de analyse blijkt dat ook in Nederland fijnstof (PM_{2,5} en PM_{10-2,5}), met bijna 80%, de grootste impact heeft op de ziektelast (DALY) door verontreinigingen in de binnenlucht. Daarna volgen stikstofdioxide (10%), formaldehyde (9%), ozon uit de buitenlucht (1,6%), radon (1,4%) en schimmels (0,6%). Samen zijn deze 6 verontreinigingen verantwoordelijk voor ruim 99% van de binnenmilieu gerelateerde ziektelast, zie figuur 1.

Uitgaande van dat een DALY in Nederland circa €80.000 kost [Zorginstituut Nederland, 2024] bedraagt de binnenmilieu gerelateerde ziektelast in Nederland bijna €10 miljard per jaar.

Een reductie van de fijnstofconcentratie in de binnenlucht met 5% levert dus een gezondheid gerelateerde besparing op van circa €0,5 miljard per jaar. Deze reductie van de fijnstofconcentratie in de binnenlucht lijkt op de korte termijn

eenvoudiger te realiseren dan een reductie van de fijnstofconcentratie in de buitenlucht. Mede doordat mensen het grootste deel van de tijd in gebouwen (binnen) doorbrengen is het verbeteren van de binnenluchtkwaliteit een effectieve maatregel. Dit zou kunnen door woningen die voorzien zijn van balansventilatie uit te rusten met fijnstof filters en om in bestaande woningen luchtreinigers met HEPA filters te gebruiken. Een andere effectieve maatregel is het faciliteren van goede kookafzuiging met afvoer naar buiten. Samen kunnen deze twee maatregelen de blootstelling aan fijnstof in een woning halveren [Jacobs, 2020].

Belangrijke concentratie data die voor Nederlandse woningen ontbreken zijn de PM_{10-2,5} fractie, ozon en de concentratie van schimmelsporen. Toepassing van ozon emitterende apparaten zoals luchtreinigers en filters in afzuigkappen op de concentratie ozon binnenshuis zijn een aandachtspunt voor nader onderzoek. Volgens een literatuurstudie genereren de meeste luchtreinigers die op basis van ozon werken een ozonconcentratie die de grenswaarde van 40 µg/m³ (WHO) ruimschoots overschrijdt [Nederlandse Voedsel- en Warenautoriteit, 2023].

Referenties

- Dongen J., Vos H., Gezondheidsaspecten van woningen in Nederland, TNO 2007-D-R0188/A, 2007. https://www.vzinfo.nl/sites/default/files/2021-11/tno-rapport_gezondheidsaspecten_van_woningen.pdf
- De Gids W, Ventilatie, achtergrond van de eisen, RVO-168-1501/RP-DUZA, 2011.
- Delgado et al., Assessment of the health impacts and costs associated with indoor nitrogen dioxide exposure related to gas cooking in the European Union and the United Kingdom, Universitat Jaume I, Castellon de la Plana, Spain, 2024. <https://repositori.uji.es/items/156fbd65-070d-4ca4-9856-9415513d505f>
- Eurostat, Energy consumption in households 2022. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/58200.pdf>
- Hall E.F., Dusseldorp A. Aries M.B.C., Knoll B., Verbindingen in lucht en huisstof van Woningen, RIVM rapport 609021087/2009.
- Jacobs et al., Openbaar eindrapport TKI Be Aware - Bewustwording van binnenluchtkwaliteit in woningen: bronnen en effectieve energie efficiënte interventie strategieën, TNO rapport 2020 R10627, april 2020.
- Jacobs et al, Health effects in EU from cooking on gas – Phase II field study, TNO rapport R11809, 2023. <https://publications.tno.nl/publication/34641471/zDOXiz/TNO-2023-R11809.pdf>
- Jantunen et al., Promoting actions for healthy indoor air (IAIAQ), 2011. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4beb6973-83f8-49a9-a6c8-d31a6d75a247>
- Koren et al, Gezondheidseffecten van woningen, TVVL magazine, 1, 2007.
- Logue et al, A Method to Estimate the Chronic Health Impact of Air Pollutants in U.S. Residences, Environ Health Perspect 120:216–222 (2012). <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1104035>
- Morantes G, et al., Harm from Residential Indoor Air Contaminants, Environmental Science & Technology, 2024. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c07374>
- Murray CJ, Lopez AD, Jamison DT. The global burden of disease in 1990: summary results, sensitivity analysis and future directions. Bull World Health Organ. 1994;72(3):495-509. PMID: 8062404; PMCID: PMC2486716.
- Nazaroff W.W., Weschler C.J., Indoor ozone: concentrations and influencing factors, Indoor Air 2021. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/ina.12942>
- Nederlandse Voedsel- en Warenautoriteit, Advies van BuRO over de gezondheidsrisico's van ozonemissie uit luchtreinigers, 2023. <https://www.nvwa.nl/documenten/consument/consumenten-artikelen/non-food/overige-non-food/advies-van-buro-over-de-gezondheidsrisico's-van-ozonemissie-uit-luchtreinigers>
- RIVM, Radon in Nederlandse woningen, op reguliere werkplekken en voor het publiek toegankelijke Gebouwen Resultaten meetcampagne 2022-2023, RIVM-rapport 2024-0126. DOI 10.21945/RIVM-2024-0126
- Trimbos, Factsheet Kerncijfers roken 2023, <https://www.trimbos.nl/aanbod/webwinkel/tri-64-010-kerncijfers-roken-2023/>
- WHO, WHO methods and data sources for global burden of disease estimates 2000 – 2019, 2020. https://cdn.who.int/media/docs/default-source/gho-documents/global-health-estimates/ghe2019_daly-methods.pdf?sfvrsn=31b25009_7
- Zorginstituut Nederland, Beoordelingskader kosteneffectiviteit van zorg - Afweging van effecten en kosten, 2024. <https://www.zorginstituutnederland.nl/actueel/nieuws/2015/06/26/zorginstuut-stelt-rapport-%E2%80%98kosteneffectiviteit-in-de-praktijk%E2%80%99-vast>