



Vlaanderen
is milieu

Milieuschadetekosten van verschillende technologieën voor woningverwarming

Milieuschadetekosten van verschillende technologieën voor woningverwarming

Sander de Bruyn, Reinier van der Veen, Marisa Korteland, Marijn Bijleveld

CE Delft

**Studie uitgevoerd in opdracht van MIRA,
Milieurapport Vlaanderen**

Maart 2019



INHOUDSTAFEL

| | |
|--|----|
| DOCUMENTBESCHRIJVING | 4 |
| Inhoudstafel..... | 5 |
| Inhoudstafel figuren | 8 |
| inhoudstafel tabellen..... | 9 |
| Samenvatting..... | 13 |
| SUMMARY | 19 |
| 1 Inleiding..... | 25 |
| 1.1 Aanleiding | 25 |
| 1.2 Doel van het project en subdoelen..... | 25 |
| 1.3 Methodologische aanpak op hoofdlijnen | 26 |
| 1.4 Afbakening | 27 |
| 1.5 Leeswijzer..... | 27 |
| DEEL I - Methodologie | |
| 2 Kwantificering van de milieuschadetekosten | 30 |
| 2.1 Inleiding..... | 30 |
| 2.2 Waarderingsgrondslagen voor milieueffecten | 30 |
| 2.3 Overzicht van literatuur rondom milieuschadetekosten | 31 |
| 2.3.1 Grote Europese onderzoeksprojecten naar de impact-pathwaybenadering | 31 |
| 2.3.2 Milieuprijzen en schadetekostenkentalen | 32 |
| 2.3.3 VITO (2010) | 33 |
| 2.3.4 Ricardo-AEA (2014) | 34 |
| 2.3.5 CE Delft (2017a) | 34 |
| 2.3.6 MethodenKonvention (2012) | 35 |
| 2.3.7 Irish damage costs..... | 36 |
| 2.3.8 Discussie en conclusie | 36 |
| 2.4 Verbijzondering naar woningverwarming in Vlaanderen van schadetekosten van fijn stof, SO ₂ , NO _x , NMVOS en NH ₃ | 37 |
| 2.4.1 Methodiek op hoofdlijnen | 37 |
| 2.4.2 Aanpassing Concentration Response Functies | 38 |
| 2.4.3 Aanpassing bevolkingsopbouw | 39 |
| 2.4.4 Aanpassing achtergrondconcentraties | 39 |
| 2.4.5 Aanpassing van de waardering | 40 |
| 2.4.6 Toepassing karakterisatiefactoren..... | 41 |
| 2.4.7 Differentiatie naar woningverwarming | 42 |
| 2.5 Gehanteerde milieuschadetekosten in deze studie..... | 43 |
| 2.5.1 Resultaten: gemiddelden voor Vlaanderen | 43 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 6.2 | Scenario 1 – Aanpassing vervangingsgraad alle installaties | 99 |
| 6.3 | Scenario 2 – Handhaving huidige brandstofmix in 2030 | 101 |
| 6.4 | Scenario 3 – Vergelijking houtinstallaties en houttypes en overschakeling op lokale pellets | 102 |
| 6.5 | Scenario 4 – Rookgasreiniging bij houtinstallaties..... | 102 |
| 6.5.1 | Katalysator bij houtkachels | 103 |
| 6.5.2 | Filter bij houtkachels en –ketels | 103 |
| 6.6 | Scenario 5 – Nieuwste installatietypen en geen gebruik van open haarden | 104 |
| 7 | Conclusies | 106 |
| | Referenties | 111 |
| bijlage 1 | Definities | 116 |
| bijlage 2 | Emissiefactoren van energiedragers..... | 118 |
| bijlage 3 | Overzicht studies schadekosten..... | 132 |
| bijlage 4 | Extra uitwerkingen milieuschadekosten..... | 135 |
| bijlage 5 | Rendementen houtgestookte installaties..... | 141 |



| | |
|--|-----|
| figuur 22: milieuschadeposten door totale emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten – verdeling over energiedragers | 93 |
| figuur 23: aandelen houtinstallaties in de milieuschadeposten van de totale emissies van houtverbruik voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015..... | 94 |
| figuur 24: milieuschadeposten door directe emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten – verdeling over emissiestoffen..... | 96 |
| figuur 25: milieuschadeposten door directe emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten – verdeling over energiedragers | 96 |
| figuur 26: milieuschadeposten door totale emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten – verdeling over emissiestoffen..... | 98 |
| figuur 27: milieuschadeposten door totale emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten – verdeling over energiedragers | 98 |
| figuur 28: overzicht van milieuschadeposten van diverse technieken en leeftijdsklassen van verwarmingstoestellen in euro's per GJ geleverde warmte (logaritmische schaal) | 107 |
| figuur 29: overzicht van milieuschadeposten van diverse technieken van verwarmingstoestellen in euro's per GJ geleverde warmte: meest moderne toestellen (normale schaal) | 108 |

INHOUDSTAFEL TABELLEN

| | |
|---|----|
| tabel 1: overzicht van berekende schadepostenkengetallen woningverwarming Vlaanderen, uitsluitend waarderingen voor emissies die > 0,1% van de totale milieuschadeposten veroorzaken | 14 |
| tabel 2: overzicht van de ontwikkeling van milieuschadeposten (M€/jaar) door ruimteverwarming bij diverse varianten en vergeleken ten opzichte van de huidige schadeposten | 18 |
| table 3: damage cost indices calculated for emissions from domestic heating in Flanders (only for emissions causing > 0.1% of total environmental damage costs) | 20 |
| table 4: Trends in environmental damage costs (M€/a) due to domestic space heating in alternative variants compared with current estimates..... | 24 |
| tabel 5: overzicht van schadeschattingen gedifferentieerd naar hoogte van de schoorsteen voor Duitsland en EU27 volgens de MethodenKonvention (UBA, 2012) in euro's (2010) per ton | 35 |
| tabel 6: overzicht van voornaamste databronnen en scope van de aanpassingen op de NEEDS- resultaten in deze studie..... | 38 |
| tabel 7: aanpassingen waarderingsstructuur..... | 41 |
| tabel 8: overzicht gehanteerde schadepostenverhoudingen uit Duitsland in euro's (2010) per ton emissie | 42 |
| tabel 9: gemiddelde schadeposten in Vlaanderen voor emissies naar lucht vanuit een gemiddelde schoorsteen op een gemiddelde locatie, prijzen in € ₂₀₁₅ /kg emissie..... | 43 |
| tabel 10: schadeposten speciaal voor woningverwarming in Vlaanderen voor directe emissies door woningverwarming | 44 |
| tabel 11: aantal wooneenheden en totaal verbruik per energiedrager voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 | 49 |
| tabel 12: inverse rendementen van elektriciteitsverbruikende installaties (CE Delft, 2017b) | 50 |
| tabel 13: percentages wooneenheden per installatietype voor alle energiedragers (VITO, 2011; VITO, 2017a) | 52 |

| | |
|---|----|
| tabel 14: percentages installaties per bouwjaarklasse (Verbeeck en Ceulemans, 2015a) | 53 |
| tabel 15: percentages houtinstallaties per houttype (VITO, 2011) | 53 |
| tabel 16: installatierendementen van verwarmingsinstallaties per energiedrager | 54 |
| tabel 17: directe emissies van woningverwarming in Vlaanderen in 2015 per energiedrager (kg) | 56 |
| tabel 18: directe emissies in Vlaanderen in 2015 per houtinstallatietype (totalen, in kg) | 57 |
| tabel 19: gehanteerde achtergrondgegevens en bronnen per brandstof voor berekening indirecte emissies per MJ brandstof | 61 |
| tabel 20: emissiefactoren van indirecte emissies (ketenemissies) van fossiele energiedragers en elektriciteit in kilogram per PJ energiedrager (Ecoinvent, 2018) | 63 |
| tabel 21: emissiefactoren van indirecte emissies (ketenemissies) van diverse houttypen als energiedrager in kilogram per PJ hout (Ecoinvent, 2018) | 64 |
| tabel 22: indirecte emissies van woningverwarming in Vlaanderen in 2015 per energiedrager (kg)..... | 66 |
| tabel 23: vergelijking directe emissies en indirecte emissies gerelateerd aan woningverwarming in Vlaanderen in 2015 | 68 |
| tabel 24: Bijbouw, herbouw en nieuwbouw per energiedrager/warmtechniek in Vlaanderen in 2021-2030 (# wooneenheden) | 72 |
| tabel 25: aangenomen vervangingsgraad van warmte-installaties voor de verschillende energiedragers in Vlaanderen voor de periode 2021-2030 | 72 |
| tabel 26: inschatting van het aantal Vlaamse wooneenheden per energiedrager in 2030 | 74 |
| tabel 27: aantal wooneenheden en totaal verbruik per energiedrager voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 en 2030 | 76 |
| tabel 28: vergelijking van directe emissies van woningverwarming in Vlaanderen - 2015 en 2030 | 77 |
| tabel 29: relatieve bijdrage aan directe emissies van energiedragers bij woningverwarming in Vlaanderen in 2015 en 2030 | 78 |
| tabel 30: indirecte emissies van woningverwarming in Vlaanderen in 2030 per energiedrager (kg)..... | 79 |
| tabel 31: vergelijking directe emissies en indirecte emissies gerelateerd aan woningverwarming in Vlaanderen in 2030 | 80 |
| tabel 32: milieuschadekosten voor de nieuwste installatietypes per GJ geleverde warmte gerekend met de centrale waardes van de milieuprijzen..... | 84 |
| tabel 33: milieuschadekosten per installatietype per GJ geleverde warmte gerekend met de centrale waardes van de milieuprijzen – installaties met verschillende bouwjaren..... | 85 |
| tabel 34: Vergelijking milieuschadekosten voor houtinstallaties en houttypes per GJ geleverde warmte gerekend met de centrale waardes van de milieuprijzen inclusief volledige toerekening van de CO ₂ -kosten van directe emissies, voor de nieuwste technieken | 86 |
| tabel 35: vergelijking milieuschadekosten voor houtinstallaties en houttypes per GJ geleverde warmte gerekend met de centrale waardes van de milieuprijzen zonder toerekening van de CO ₂ -kosten van directe emissies, nieuwste technieken | 87 |
| tabel 36: milieuschadekosten door directe emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadekosten uitgesplitst naar energiedrager..... | 89 |



| | |
|--|-----|
| tabel 37: milieuschadetekosten per energiedrager voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015, in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten, totale emissies | 92 |
| tabel 38: milieuschadetekosten van houtinstallaties uitgesplitst naar houttype in Vlaanderen in 2015 in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten, totale emissies | 93 |
| tabel 39: milieuschadetekosten ten gevolge van directe emissies per energiedrager voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten | 94 |
| tabel 40: milieuschadetekosten ten gevolge van totale emissies (direct én indirect) per energiedrager voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten | 97 |
| tabel 41: vergelijking milieuschadetekosten van een halvering van de vervangingsgraad ten opzichte van het 2030-scenario voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten | 100 |
| tabel 42: vergelijking milieuschadetekosten van diverse vervangingsgraden voor alleen houtgestookte installaties voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 ten opzichte van het 2030-scenario in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten | 100 |
| tabel 43: totale milieuschadetekosten voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030, in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten, vergelijking 2030-scenario met een fictief scenario waarbij de brandstofmix voor woningverwarming onveranderd blijft ... | 101 |
| tabel 44: totale milieuschadetekosten voor woningverwarming in Vlaanderen, in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten, vergelijking huidige situatie en scenario 3 (alleen lokale houtpellets in houtinstallaties)..... | 102 |
| tabel 45: totale milieuschadetekosten voor woningverwarming in Vlaanderen, in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten, vergelijking huidige situatie en scenario 4a (katalysator bij houtkachels)..... | 103 |
| tabel 46: totale milieuschadetekosten voor woningverwarming in Vlaanderen, in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten, vergelijking huidige situatie en scenario 4b (filter bij houtkachels en -ketels) | 104 |
| tabel 47: totale milieuschadetekosten voor woningverwarming in Vlaanderen, in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten, vergelijking huidige situatie en scenario 5 (nieuwste installatietypen en geen gebruik open haarden)..... | 105 |
| tabel 48: overzicht van de ontwikkeling van milieuschadetekosten (M€/jaar) door ruimteverwarming bij diverse varianten en vergeleken ten opzichte van de huidige schadetekosten | 109 |
| tabel 49: overzicht emissiestoffen (VITO, 2017a; VMM, 2017a) | 119 |
| tabel 50: overzicht van emissiefactordata van huishoudelijke verwarmingsinstallaties uit verschillende bronnen..... | 120 |
| tabel 51: vergelijking van emissiefactoren in kg/PJ voor open haard en houtkachels in verschillende bronnen. De brede ranges worden veroorzaakt door variaties in metingen, veroorzaakt door verschillende meetcondities en installatiekenmerken | 123 |
| tabel 52: verwachte aandelen van technologieën in elektriciteitsproductie in België in 2030 (Federaal Planbureau 2017; eigen aannames) | 125 |
| tabel 53: emissiefactoren voor directe emissies van aardgas (kg/PJ) (VMM, 2017a) | 127 |
| tabel 54: emissiefactoren voor directe emissies van stookolie (kg/PJ) (VMM, 2017a) | 127 |

////////////////////////////////////

| | |
|--|-----|
| tabel 55: emissiefactoren voor directe emissies van hout – gemiddelden* voor verschillende houttypes (kg/PJ) (VMM, 2017a) | 129 |
| tabel 56: emissiefactoren voor directe emissies van hout – gemiddelden* voor verschillende installatietypen (kg/PJ) (VMM, 2017a) | 130 |
| tabel 57: emissiefactoren voor directe emissies van propaan/butaan/LPG en steenkool, en voor indirecte emissies van elektriciteit (kg/PJ) (VMM, 2017a) | 131 |
| tabel 58: overzicht van de aanpassingen aan de berekeningen van milieuprijzen voor België in NEEDS (2008) voor deze studie | 136 |
| tabel 59: waardering in €/t emissies in het jaar 2010 voor menselijke gezondheid met prijzen uit het jaar 2000 volgens de NEEDS Excel-tool..... | 136 |
| tabel 60: factoren gebruikt voor ophoging van de schadekosten voor gezondheid uit NEEDS door veranderingen in de CRF, bevolkingsomvang en bevolkingssamenstelling..... | 138 |
| tabel 61: overzicht van prijzen gehanteerd in de berekening van milieuschadecosten in NEEDS (2008) en de huidige studie gebaseerd op CE Delft (2017a)..... | 139 |
| tabel 62: emissies van luchtvervuilende emissies, aanname modellering MET-NO en actuele waarden | 139 |
| tabel 63: inschatting schadelijkheid van emissies op het thema menselijke gezondheid in vergelijking met de NEEDS-modelresultaten voor 2010 | 140 |
| tabel 64: rendementen van houtverbrandingsinstallaties..... | 141 |



tabel 1: overzicht van berekende schadekostenkengetallen woningverwarming Vlaanderen, uitsluitend waarderingen voor emissies die > 0,1% van de totale milieuschadecosten veroorzaken

| Emissie naar lucht | Centrale waarde | Range** |
|--|-----------------|---------------|
| CO ₂ | € 0,057 | € 0,037-0,094 |
| CH ₄ | € 1,77 | € 0,47-2,92 |
| Black carbon (>10% PM _{2,5})* | € 717 | € 512-1.101 |
| PM _{2,5} ruimteverwarming stad* | € 183 | € 131-281 |
| PM _{2,5} ruimteverwarming platteland* | € 84 | € 60-129 |
| PM _{2,5} niet gespecificeerd* | € 79,7 | € 56,9-122,4 |
| PM ₁₀ ruimteverwarming stad* | € 104 | € 74-161 |
| PM ₁₀ ruimteverwarming platteland* | € 47 | € 33-73 |
| PM ₁₀ niet gespecificeerd* | € 55,7 | € 39,8-86,1 |
| NO _x ruimteverwarming stad | € 32 | € 23-51 |
| NO _x ruimteverwarming platteland | € 16 | € 11-25 |
| NO _x niet gespecificeerd | € 22,8 | € 15,7-36,6 |
| SO ₂ | € 20,9 | € 14,8-32,8 |
| NH ₃ | € 34,8 | € 23,1-58,6 |
| NMVOS | € 2,8 | € 2,1-4,2 |
| CO | € 0,13 | € 0,09-0,2 |
| Pb | € 5.908 | € 3.967-6.596 |

Noot: Cijfers zijn afgerond als zwevende drie kommagetal met uitzondering van emissies voor ruimteverwarming PM_{2,5}, PM₁₀ en NO_x die op hele cijfers zijn afgerond in verband met grotere onzekerheidsmarges.

* In de berekeningen is PM₁₀ onderverdeeld in drie fracties (a) elementair carbon indien dit aandeel groter is dan 10% van de PM_{2,5}-emissies; (b) PM_{2,5} minus het aandeel black carbon indien aandeel BC groter is dan 10%; (c) Het deel PM₁₀ dat niet in PM_{2,5} zit. Dit is gedaan om dubbeltellingen te voorkomen.

** Onder- en bovenwaarden geven onzekerheid in de waarderingen weer voor milieuschade.

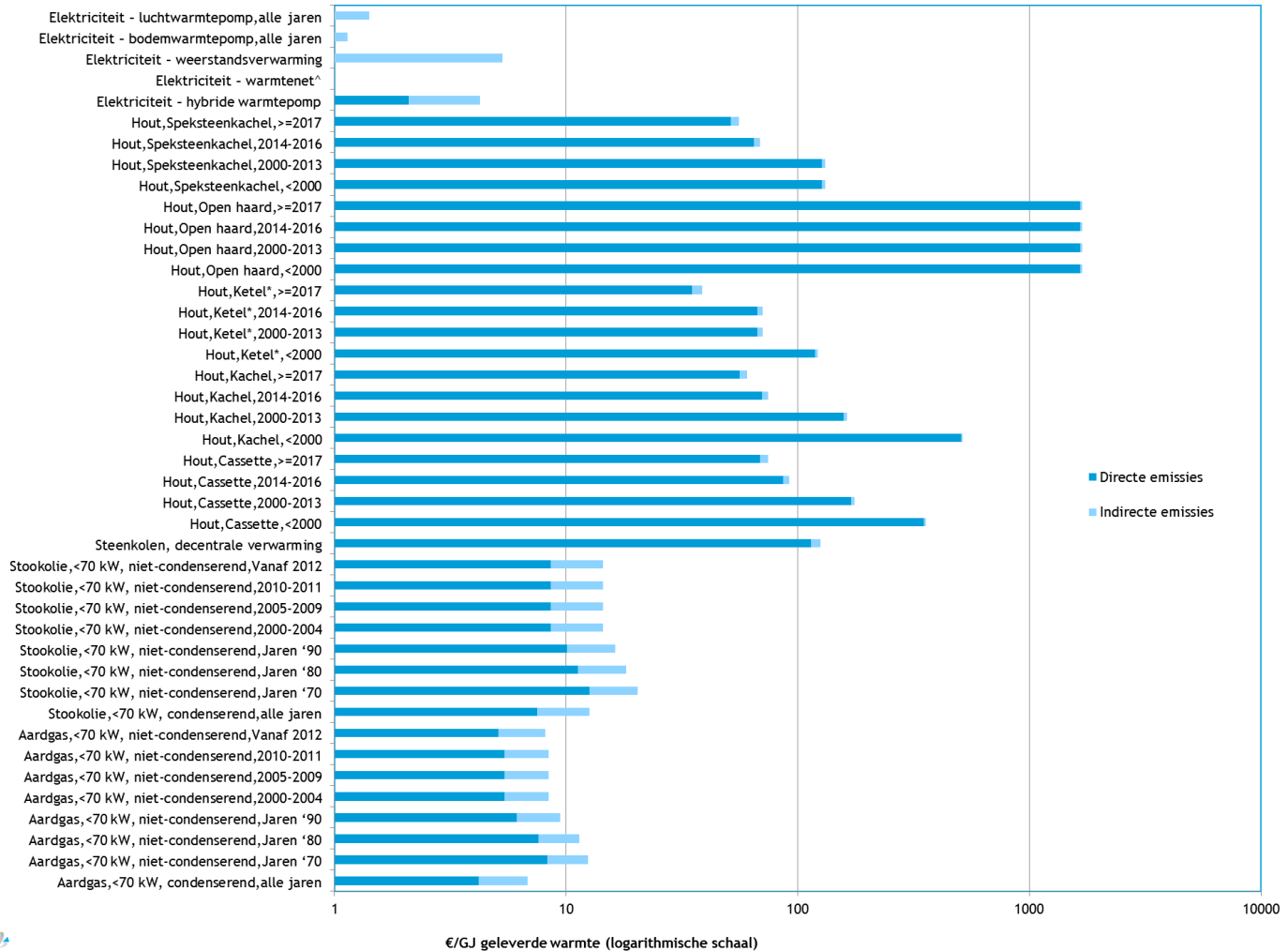
De emissies van woningverwarming zijn zowel op het niveau van de individuele techniek als voor geheel Vlaanderen bepaald rekening houdend met rendementen van verwarmingsinstallaties. We onderscheiden daarbij directe en indirecte emissies. Directe emissies zijn emissies die uit de schoorsteen van de woning zelf komen. Directe emissies ontstaan in Vlaanderen. Indirecte emissies zijn emissies die bij de productie van de energiedragers vrijkomen, zoals bijvoorbeeld methaan bij de aardgaswinning. Indirecte emissies kunnen ook tot schade buiten Vlaanderen leiden. Emissies die in de woning ontstaan door niet-gesloten toestellen voor ruimteverwarming zijn niet meegenomen in onze studie.

Door de emissies met de schadekostenkengetallen te vermenigvuldigen ontstaat inzicht over de hoogte van de milieuschadecosten. Figuur 1 geeft inzicht in de milieuschadecosten van de diverse toestellen gebruikt voor ruimteverwarming onderverdeeld naar techniek en leeftijdsklassen. De schaal van de figuur is logaritmisch. Over het algemeen blijkt dat technieken die gebruik maken van hout een veel hogere milieuschadecost hebben dan technieken die gebruik maken van aardgas of stookolie. Uit figuur 1 blijkt dat de milieuschadecosten enorm verschillen tussen de diverse technieken en brandstofsoorten. Open haarden zijn veruit de meest vervuilende verwarmingstechniek. Verwarming van woningen met behulp van open



haarden is ongeveer 250 maal schadelijker dan verwarming met moderne condenserende gasgestookte toestellen.

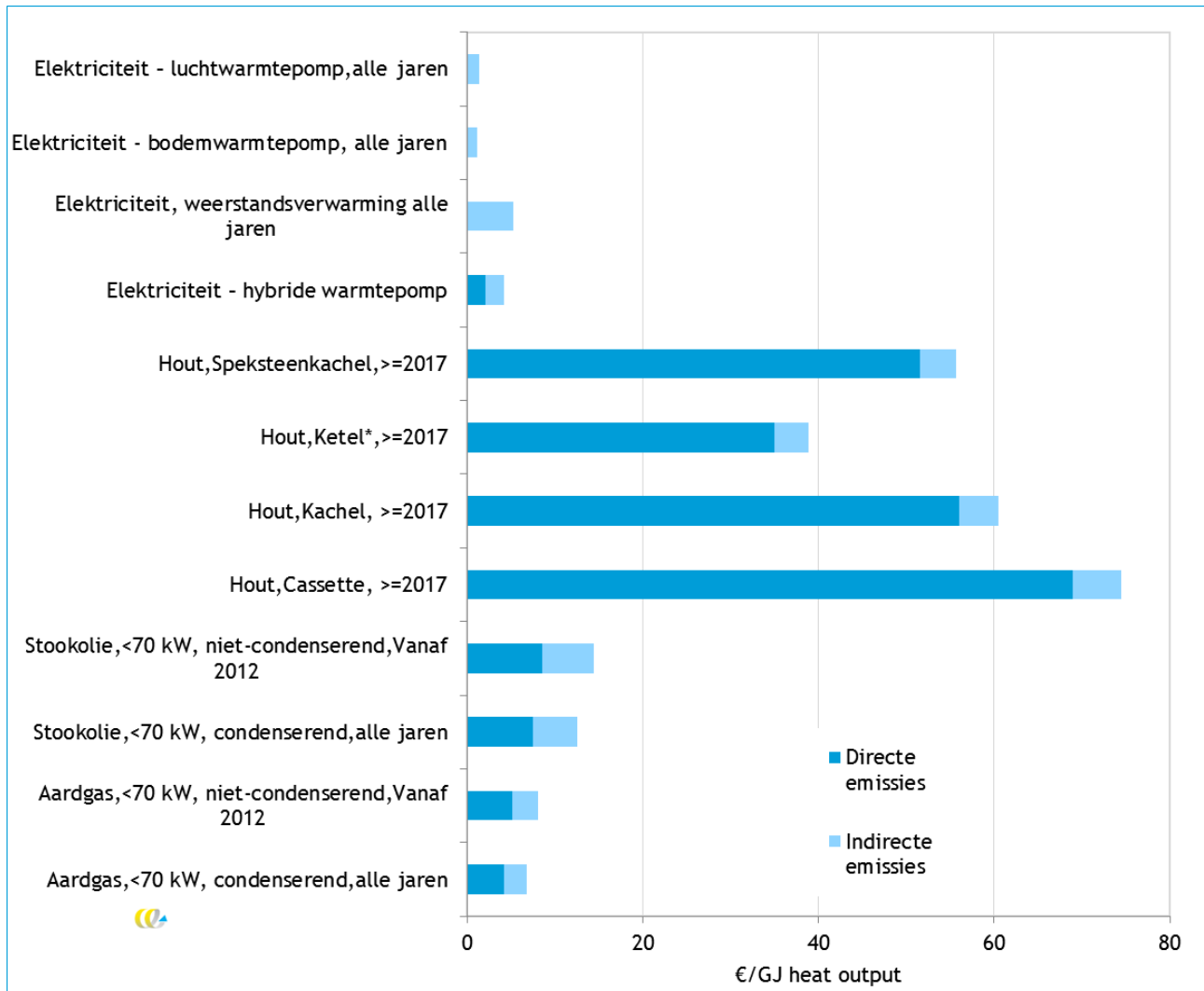
figuur 1: overzicht van milieuschadeposten van diverse technieken en leeftijdsklassen van verwarmingstoestellen in euro's per GJ geleverde warmte (logaritmische schaal)



Noten: * Voor houtgestookte ketels is een gemiddelde genomen van de brandstof met de hoogste emissies en de brandstof met de laagste emissies. Effecten van houtgestookte installaties zijn inclusief schadeposten voor (biogene) CO₂-emissies.
 ^ Het elektriciteitsverbruik van een warmtenet betreft de elektriciteit die nodig is om aard- of restwarmte te leveren aan huishoudens. Er is geen rekening gehouden met een dervingsfactor voor eventuele rendementsverliezen bij de installatie die restwarmte levert.

In figuur 2 is eenzelfde onderverdeling gemaakt, maar dan alleen met de nieuwste toestellen die per brandstof kunnen worden ingezet. Hieruit blijkt dat de toestellen die gebruik maken van warmtepompen de laagste milieuschadeposten kennen. Uit deze figuur blijkt ook dat de houtgestookte toestellen voor ruimteverwarming, ook de meest moderne kachels en ketels, nog steeds milieuschadeposten kennen die een factor 5 tot 12 hoger zijn dan de milieuschadeposten van de schoonste gasgestookte alternatieven (een condenserende ketel).

figuur 2: overzicht van milieuschadecosten van diverse technieken van verwarmingstoestellen in euro's per GJ geleverde warmte: meest moderne toestellen (normale schaal)



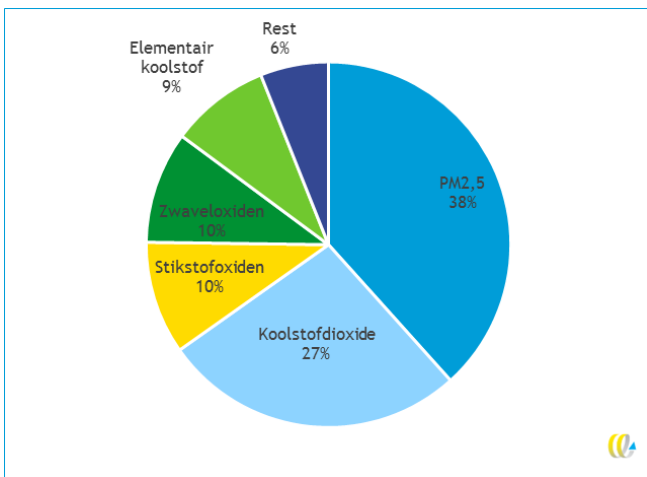
Noot: * Voor houtgestookte ketels is een gemiddelde genomen van de brandstof met de hoogste emissies en de brandstof met de laagste emissies. Effecten van houtgestookte installaties zijn inclusief schadecosten voor (biogene) CO₂-emissies.

Op basis van deze cijfers en de voorkomens van de diverse technieken in de Vlaamse huishoudens, is een inschatting gemaakt van de totale milieuschadecosten in Vlaanderen. In 2015 bedroeg de totale milieuschadecost ten gevolge van woningverwarming in Vlaanderen 2,6 miljard, waarbij 2,1 miljard het gevolg is van directe emissies en ongeveer 0,5 miljard het gevolg van de in dit onderzoek onderzochte indirecte emissies. In figuur 3 is de verdeling van de totale kosten over emissiestoffen te zien, en in figuur 4 de verdeling over energiedragers. De grootste oorzaak van de milieuschadecosten betreft emissies van fijn stof (PM_{2,5}) die ongeveer 38% van de berekende milieuschadecosten beslaat voor de totale emissies. Daarnaast is ook CO₂ belangrijk voor ongeveer 27% van de totale milieuschadecosten. Het gebruik van hout als middel voor woningverwarming is in zijn totaliteit verantwoordelijk voor ongeveer 50% van de totale milieuschadecosten (en 60% van de milieuschade door de directe emissies). Dit ondanks het feit dat houtstook maar wordt toegepast in 1,6% van de huishoudens als hoofdverwarming en in 19,1% van de huishoudens als bij- of sfeerverwarming. Als de CO₂-emissies van houtstook niet worden meegerekend

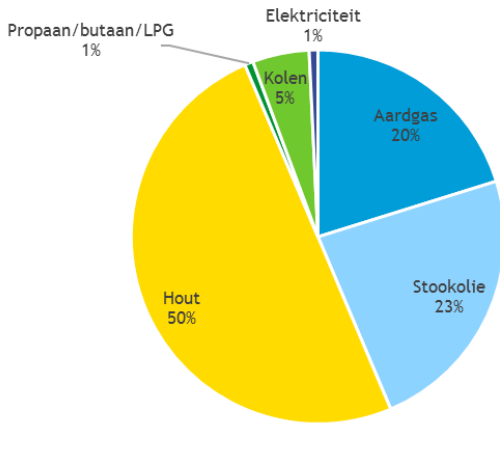


(vanwege het feit dat dezelfde hoeveelheid CO₂ bij de groei van het hout uit de atmosfeer is gehaald) zullen de totale milieuschadecosten met ca. 3,0% (80 miljoen euro) dalen. De resultaten van de milieuschadecosten worden daarom niet beïnvloed door de keuze hoe om te gaan met CO₂-emissies van biomassa.

figuur 3: milieuschadecosten door totale emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadecosten – verdeling over emissiestoffen



figuur 4: milieuschadecosten door totale emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadecosten – verdeling over energiedragers



Van alle houtgestookte toestellen zijn open haarden veruit de meest milieuvriendelijke. Eén GJ warmte geleverd door een open haard kent ruim 1.600 maal hogere milieuschadecosten dan één GJ warmte geleverd door een warmtepomp. Het gebruik van open haarden in Vlaanderen is in totaliteit verantwoordelijk voor ongeveer 5% van de totale milieuschadecosten, 130 miljoen euro per jaar.

Tot op zekere hoogte is er bij het gebruik van hout als woningverwarming een verschil in de diverse soorten hout die verstoekt kunnen worden. Het verstoken van pellets leidt over het algemeen tot de laagste milieuschadecosten, behalve bij de nieuwste ketels, waar het verstoken van houtafval tot de laagste kosten leidt. Het verstoken van houtafval in de nieuwste ketels leidt met milieuschadecosten van € 33,71 per GJ



geleverde warmte tot de laagst mogelijke milieuschadekosten bij het verbranden van hout. Toch zijn hierbij de milieuschadekosten nog steeds een factor 5 hoger dan een modern condenserend gasgestookt toestel. Het verschil tussen lokale pellets en pellets uit Canada en Noord-Amerika zijn de indirecte emissies. Hierdoor liggen de schadekosten van pellets uit Canada en Noord-Amerika ongeveer 10% hoger bij alle nieuwste installatietypen (met uitzondering van de open haard).

In diverse scenario's en toekomstverwachtingen is verder onderzocht wat het effect is van aanpassingen in de berekeningen. Deze kunnen relevant zijn voor verdere studie. Tabel 2 geeft een overzicht van deze scenario's en toekomstverwachtingen die zijn gehanteerd in deze studie en hun invloed op de totale milieuschadekosten.

tabel 2: overzicht van de ontwikkeling van milieuschadekosten (M€/jaar) door ruimteverwarming bij diverse varianten en vergeleken ten opzichte van de huidige schadekosten

| | Directe emissies | Totale emissies | Reductie totale emissies t.o.v. 2015 |
|--|------------------|-----------------|--------------------------------------|
| 1. Huidige situatie 2015 | 2.131 | 2.644 | |
| 2. Huidige situatie 2015 zonder CO ₂ -kosten houtverbranding | 2.051 | nb | -4%* |
| 3. Situatie 2030 na invoering Energieplan | 1.691 | 2.131 | -19% |
| 4. Situatie 2030 met vervangingsgraad naar 10% | 1.097 | 1.536 | -42%/-28%^ |
| 5. Situatie 2015 als er alleen pellets worden verstoekt bij houtinstallaties | 1.729 | 2.242 | -15% |
| 6. Situatie 2015 als alle houtkachels worden uitgerust met katalysator | 1.932 | 2.444 | -8% |
| 7. Situatie 2015 als open haarden niet langer worden gebruikt en alle toestellen vervangen worden door de nieuwste technieken binnen hun soort | 1.137 | 1.647 | -38% |

nb = niet beschouwd in deze studie

* Reductie ten opzichte van de directe emissies, niet totale emissies.

^ -28% is de reductie ten opzichte van 2030 na invoering van het Energieplan.

Volgens het scenario 2030 zijn de jaarlijkse milieuschadekosten van de totale emissies gedaald met ongeveer 19% ten opzichte van de huidige situatie. Dit komt deels door de natuurlijke vervanging van verwarmingstoestellen en deels door de invoering van het Energieplan. De vervangingsgraad is van deze invloeden waarschijnlijk dominant. Indien de vervangingsgraad een factor 2-4 zou worden verhoogd naar 10% per jaar, zouden de milieuschadekosten met ongeveer 42% dalen ten opzichte van de huidige situatie (of 28% ten opzichte van de situatie in 2030 na invoering van het Energieplan). Indien alleen nog maar pellets worden verstoekt in de hout verbruikende installaties, zouden de milieuschadekosten met 15% dalen. Indien men alle huidige houtkachels zou uitrusten met katalysatoren zouden de schadekosten met 8% dalen.

Een significante daling kan worden verkregen als men alle verwarmingstoestellen vervangt door de meest moderne varianten binnen elke brandstofklasse en men tegelijkertijd geen open haarden meer zou gebruiken. Een dergelijke variant zou de milieuschadekosten met 38% doen dalen ten opzichte van de huidige situatie (33% door de vervanging van alle oude toestellen en 5% door het niet gebruiken van open haarden).



SUMMARY

Domestic heating is one of the factors contributing to air pollution in the built environment. According to the World Health Organization, WHO, air pollution is one of the main causes of death in many countries, particularly emissions of particulates (PM_{2.5}). This pollution is particularly problematic in the built environment, where people live and work and are constantly inhaling polluted air. Besides damage to health, air pollution resulting from domestic heating also damages ecosystems and buildings, while burning fossil fuels contributes to climate change.

In economic science increasing efforts are being made to quantify this damage and express it monetarily. This damage manifests itself in a range of respiratory and cardiovascular disorders due to emissions of particulates and other pollutants, adverse effects on ecosystems and human health due to photochemical oxidant formation (smog), damage to buildings and heritage sites due to particulates and other pollutants, damage to nature due to the eutrophying effects of nitrogen deposition, and the costs of mitigating climate change. All these forms of pollution-related damage imply a loss of economic welfare. The present study estimates the environmental damage costs associated with domestic heating in Flanders, to improve understanding of this damage and of how these costs differ across the various technologies used for heating Flemish homes.

Calculating environmental damage costs is essentially a four-step process:

1. Emissions: what quantitative emissions are in fact associated with home heating, broken down by heating method and fuel type?
2. Dispersion: where do these emissions go?
3. Impacts: what effect do they have on humans, animals and ecosystems?
4. Valuation: how are these impacts to be valued?

A study encompassing all four of these steps is normally very labour-intensive, requiring elaboration of both dispersion and dose-response models. In most studies of environmental damage costs steps 2 to 4 are therefore collapsed into so-called '*Damage cost indices*': country-specific averages for the relationship between emissions at an average location, via dispersion through to valuation of impacts that are expressed in €/kg emission.

On the basis of the available literature on damage cost indices and the most recent WHO understanding on the damage caused by environmental pollution, this study calculates the most appropriate environmental damage costs for domestic heating in Flanders.



table 3 reports the damage cost indices calculated on the basis of the present study. The damage costs of PM_{2.5}, PM₁₀ and NO_x differ for the urban and rural environment, the former being higher because of the higher population density in towns and cities.



table 3: damage cost indices calculated for emissions from domestic heating in Flanders (only for emissions causing > 0.1% of total environmental damage costs)

| Atmospheric emission | Central value | Range** |
|---|---------------|---------------|
| CO ₂ | € 0.057 | € 0.037-0.094 |
| CH ₄ | € 1.77 | € 0.47-2.92 |
| Black carbon (>10% PM _{2.5})* | € 717 | € 512-1101 |
| PM _{2.5} space heating, urban* | € 183 | € 131-281 |
| PM _{2.5} space heating, rural* | € 84 | € 60-129 |
| PM _{2.5} unspecified* | € 79.7 | € 56.9-122.4 |
| PM ₁₀ space heating, urban* | € 104 | € 74-161 |
| PM ₁₀ space heating, rural* | € 47 | € 33-73 |
| PM ₁₀ unspecified* | € 55.7 | € 39.8-86.1 |
| NO _x space heating, urban | € 32 | € 23-51 |
| NO _x space heating, rural | € 16 | € 11-25 |
| NO _x unspecified | € 22.8 | € 15.7-36.6 |
| SO ₂ | € 20.9 | € 14.8-32.8 |
| NH ₃ | € 34.8 | € 23.1-58.6 |
| NMVOG | € 2.8 | € 2.1-4.2 |
| CO | € 0.13 | € 0.09-0.20 |
| Pb | € 5908 | € 3967-6596 |

Note: Figures are rounded to three floating-point decimals, apart from space-heating emissions of PM_{2.5}, PM₁₀ and NO_x, which are rounded to an integer because of the wide uncertainty margins.

* To avoid double-counting, in the calculations PM₁₀ was broken down into three fractions: (a) elementary carbon, if this fraction was > 10% of PM_{2.5} emissions; (b) PM_{2.5} minus the black carbon fraction if the latter was >10%; (c) the PM₁₀ fraction not included in PM_{2.5}.

** Range gives the uncertainty in the valuation of environmental impacts.

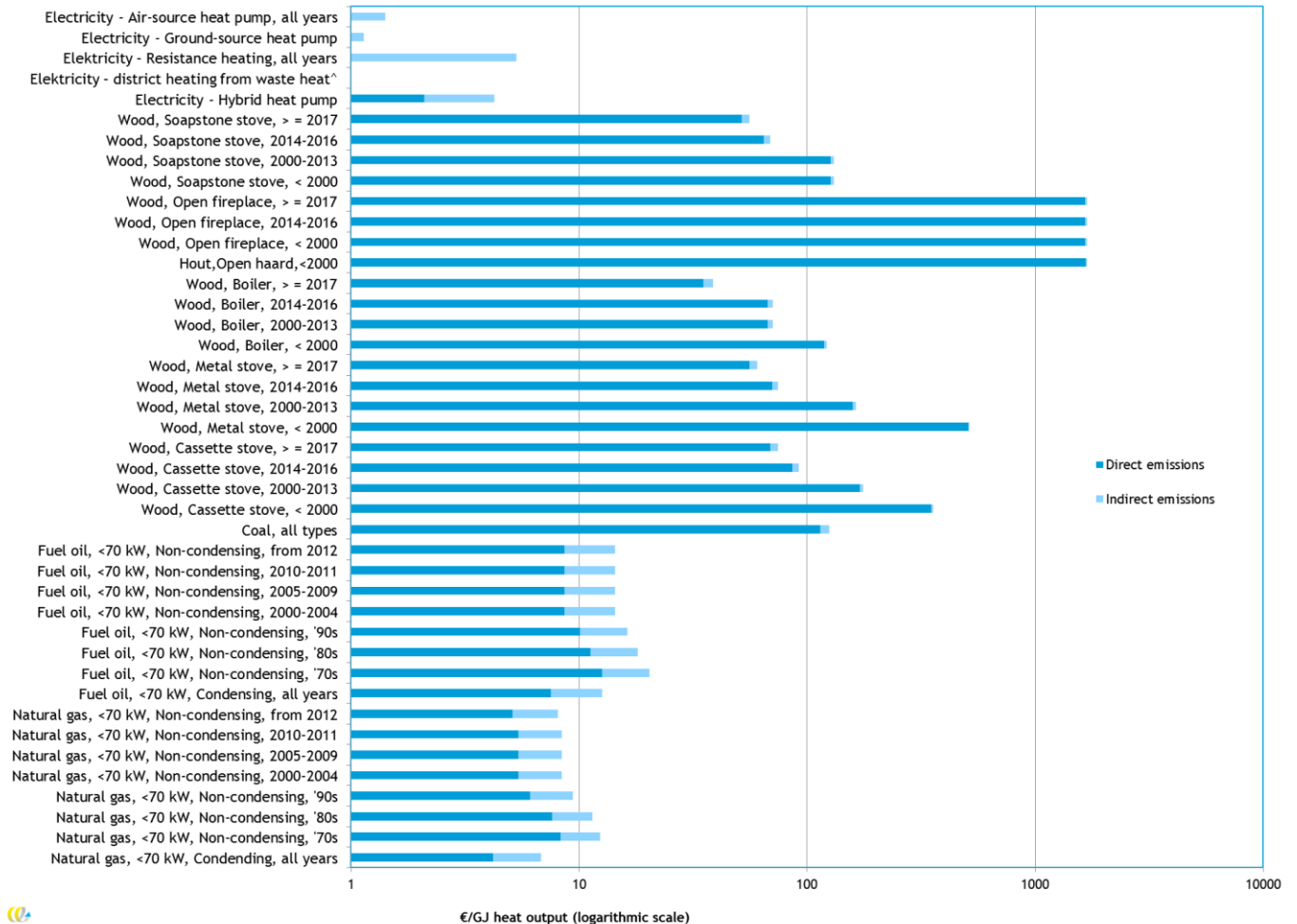
Domestic heating emissions were calculated for each individual heating method and for Flanders as a whole. Direct and indirect emissions were distinguished. Direct emissions are those leaving rooftop chimneys and thus occurring in Flanders. Indirect emissions are those occurring during the production of energy carriers, such as methane emissions from natural gas extraction, and will often also lead to damage outside Flanders. Indoor emissions due to unenclosed space-heating systems are not included in this study.

Multiplying quantitative emissions by damage cost indices yields figures for environmental damage costs. Figure 5, with a *logarithmic* scale, summarizes the damage costs associated with the various kinds of space heating, broken down by technology and age class. Wood-burning heating systems generally have far higher environmental damage costs than systems using natural gas or fuel oil. The figure also shows that there are enormous differences in damage costs across the various technologies and fuels. Open fireplaces are by far the most polluting form of domestic space heating – about 250 times worse than a modern condensing gas-fired appliance. Figure 6, with a *normal* scale, provides a similar breakdown, but now restricted to the latest models of appliance for each respective fuel. As can be seen, heat-pump systems



have the lowest environmental damage costs. The figure also shows that even the most advanced wood-burning stoves and boilers still have 5-12 times higher damage costs than the cleanest gas-burning alternatives (condensing boilers).

figure 5: environmental damage costs of space-heating technologies by type and age class (€/GJ heat output, logarithmic scale)

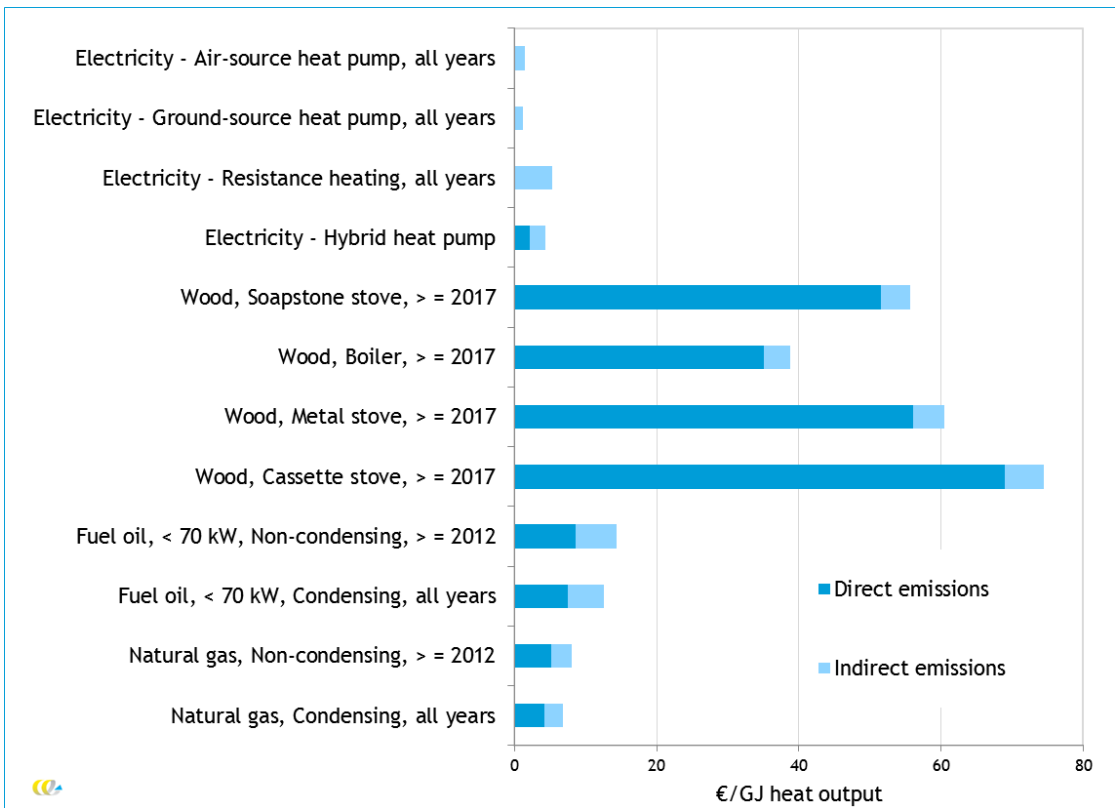


Notes: * For wood-fired boilers, the average was taken of fuels with highest and lowest emissions. The impacts of wood-fired appliances include those of CO₂ emissions.
 ^ The electricity consumption of a heat network relates to the electricity needed to supply geothermal or residual heat to households. No loss factor has been taken into account for any efficiency losses at the installation that supplies residual heat.

Combining these figures and statistics on use of the various heating appliances by Flemish households, total environmental damage costs were estimated. In 2015 the damage costs associated with domestic space heating in Flanders totalled 2.6 billion euro, of which 2.1 billion euro are due to direct emissions and around 0.5 billion euro to the indirect emissions included in the present study.



figure 6: environmental damage costs of space-heating technologies: most advanced appliances (€/GJ heat output, normal scale)



Note: for wood-fired boilers, the average was taken of fuels with highest and lowest emissions. The impacts of wood-fired appliances include those of CO₂ emissions.

Figure 7 shows the respective contributions of the various pollutants to total costs, while figure 8 provides a breakdown by energy carrier. Particulate emissions (PM_{2.5}) are the single largest factor in environmental damage costs, contributing about 38% with respect to total emissions. In second place come CO₂ emissions, accounting for around 27% of total environmental costs. Wood-burning for space heating in its various forms accounts for about 50% of total damage costs (and 60% of environmental damage due to direct emissions). This is despite wood-burning being used by a mere 1.6% of Flemish households as the main form of heating and by 19.1% of households as supplementary heating or ‘mood heating’. If the CO₂ emissions of wood-burning are excluded (because the same amount of CO₂ was absorbed from the atmosphere during tree growth) the environmental damage costs decline by about 3.0% (€ 80 mln./year). The damage costs are therefore essentially unaffected by how the CO₂ emissions of biomass are calculated.



figure 7: environmental damage costs of total emissions from domestic space heating in Flanders in 2015, calculated using central damage-cost value: breakdown by pollutant

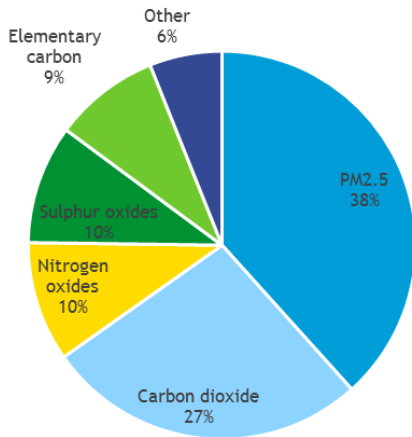
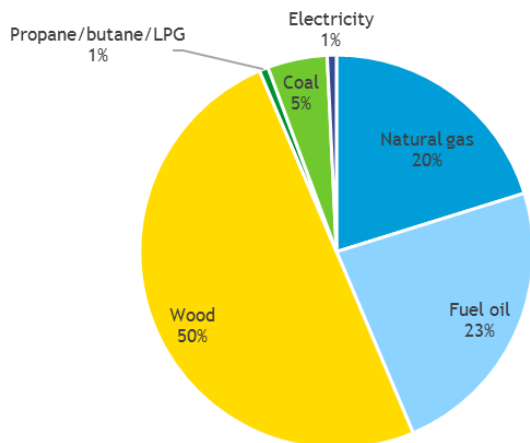


figure 8: environmental damage costs of total emissions from domestic space heating in Flanders in 2015, calculated using central damage-cost value: breakdown by energy carrier



Open fireplaces are by far the most polluting form of wood-burning: one GJ of heat supplied by an open fireplace causes over 1,600 times higher environmental damage costs than one GJ of heat from a ground source heat pump. Open fireplaces are used above all as ‘mood heating’, however. Overall, their use in Flanders accounts for about 5% of aggregate environmental damage costs: € 130 mln./year.

There is a certain amount of difference depending on the kind of wood fuel used for domestic space heating. Wood pellets generally have the lowest environmental damage costs, except with the latest boilers, where waste wood has the lowest costs: € 33.71/ GJ heat output, the very lowest for any kind of wood-burning. Even so, these damage costs still exceed those of a modern condensing gas-fired appliance by a factor 5. The difference between locally produced pellets and those imported from Canada or the US



derives from the indirect emissions, which make the damage costs of imported pellets burned in any of the latest appliances (apart from open hearths) around 10% higher.

Under various scenarios and projections, the impact of modelling adjustments was also examined. These may be relevant for further study. table 4 summarizes these scenarios and projections and reports their impact on the total environmental damage costs.

table 4: trends in environmental damage costs (M€/a) due to domestic space heating in alternative variants compared with current estimates

| | Direct emissions | Total emissions | Reduction in total emissions rel. to 2015 |
|---|------------------|-----------------|---|
| Current situation, 2015 | 2.131 | 2.644 | |
| Current situation, 2015, excl. CO ₂ costs of wood-burning | 2.051 | n.a. | -4%* |
| 2030, after roll-out of National Energy Plan | 1.691 | 2.131 | -19% |
| 2030, replacement rate to 10% | 1.097 | 1.536 | -42%/-28%^ |
| 2015, only pellets in wood-burning appliances | 1.729 | 2.242 | -15% |
| 2015, all wood-burning appliances with catalytic converter | 1.932 | 2.444 | -8% |
| 2015, zero open fireplaces plus across-the-board replacement by latest appliances | 1.137 | 1.647 | -38% |

n.a. = not applicable in this study

* Reduction relative to direct emissions.

^ -28% compared to the situation in 2030, after the roll-out of the National Energy Plan.

In the 2030 scenario, the annual environmental damage costs associated with the sum total of emissions are about 19% less than they are today. This improvement is due partly to the natural replacement of heating appliances and partly to roll-out of the National Energy Plan, with the rate of replacement probably the dominant factor. With the replacement rate raised by a factor 2-4 to 10% per annum, damage costs would decline by around 42% compared with the current situation. If all wood-burning appliances were to burn only pellets, damage costs would be about 15% lower. If all today's wood-burning appliances were fitted with a catalytic converter, damage costs would drop by 8%.

The most significant reduction would be achieved by replacing every domestic heating appliance by the latest variant for the fuel concerned and at the same time discontinuing use of open fireplaces altogether. This variant would reduce the environmental damage costs by 38% compared with the current situation (33% due to replacement of outmoded appliances, 5% to phase-out of open hearths).



- het berekenen van de totale milieuschadeposten door woningverwarming in Vlaanderen;
- het vergelijken op milieuschadeposten van diverse relevante scenario's die meer inzicht kunnen bieden in beleidsmatige opties in de toekomst.

1.3 Methodologische aanpak op hoofdlijnen

De methodiek die wordt gehanteerd in deze studie is het berekenen van de milieuschadeposten, zowel op het niveau van de individuele technieken om een woning te verwarmen, als op het niveau van de totale milieuschadeposten van Vlaanderen.

De berekening voor beide outputs kent grotendeels overlappende berekeningen. De berekening is in essentie een matrixvermenigvuldiging waarbij technische gegevens over emissies van installaties wordt gekoppeld aan sociale gegevens over hoe vaak deze installaties voorkomen in Vlaanderen en hoe vaak ze worden gebruikt én milieu-economische informatie over de effecten van milieuvuiling en de schade die wordt veroorzaakt aan de milieuvuiling.

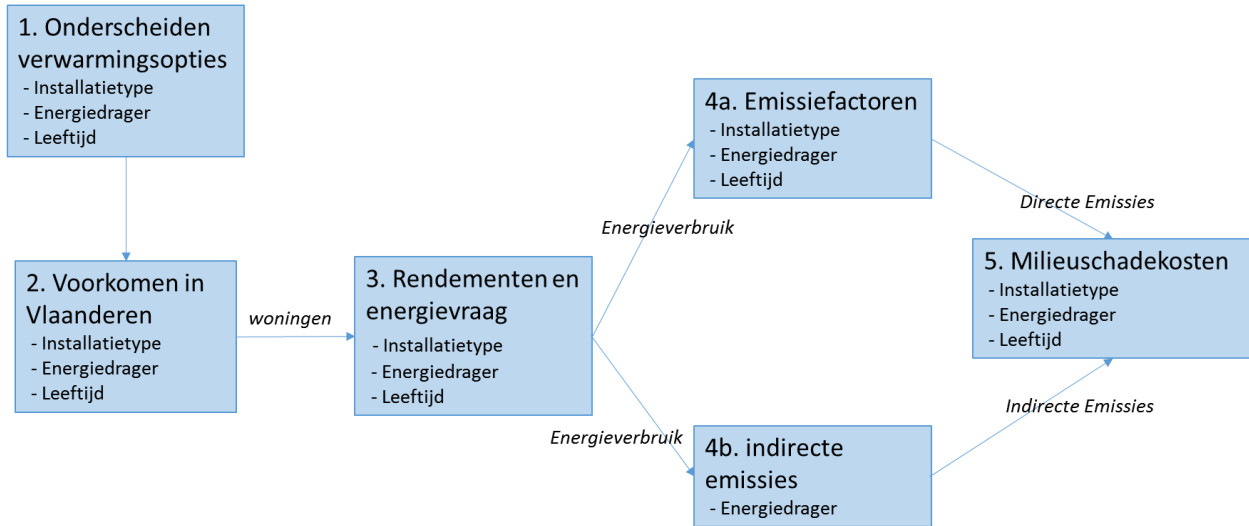
Centraal bij de berekeningen in dit rapport staat een indeling van verwarmingstoestellen in:

- installatietypen
- energiedragers
- leeftijdsklassen

We volgen hierbij dus de indeling uit VITO (2017a). Installatietypen zijn de technische installaties waarmee warmte wordt opgewekt. We maken hierbij een onderscheid naar ketels, alleenstaande gesloten verwarming (kachels), open haarden, etc. Energiedragers zijn de brandstoffen of elektriciteit waarop de installaties warmte kunnen opwekken. Tot slot delen we de verwarmingstoestellen ook nog in naar leeftijdsklassen. Deze indeling wordt vervolgens in stap 2 gebruikt om gegevens te verzamelen over het aantal wooneenheden dat in Vlaanderen gebruik maakt van deze verwarmingsopties (zie figuur 1 voor uitleg over de gekozen aanpak). Vervolgens onderzoeken we de energievraag in deze wooneenheden en koppelen we die informatie aan de rendementen van de verwarmingsinstallaties om het energieverbruik te bepalen. Het energieverbruik vormt vervolgens enerzijds input voor de emissiefactoren (per installatietype, energiedrager en leeftijdsklasse) waardoor de totale directe emissies kunnen worden berekend. Anderzijds vormt het energieverbruik ook input voor de bepaling van de indirecte emissies die optreden in de keten van brandstofwinning tot levering aan de deur van de consument. De directe en indirecte emissies die optreden vormen vervolgens input van de milieuschadeposten waardoor de totale milieuschadeposten in Vlaanderen kunnen worden berekend. Daarnaast kan de milieuschadeposten ook worden uitgedrukt per verwarmingstoestel om zo een vergelijking te kunnen maken welke verwarmingstoestellen de hoogste milieuschadeposten kennen en welke verwarmingstoestellen de laagste milieuschadeposten kennen.



figuur 9: aanpak in deze studie voor bepaling milieuschadeprijzen: onderlinge vergelijking installatietype en energiedrager en totaal voor Vlaanderen



1.4 Afbakening

De studie is uitgevoerd met de volgende afbakeningen:

- Onder woningverwarming wordt de gebouwenverwarming binnen de residentiële sector verstaan, zoals gedefinieerd bij de Emissie Inventaris Lucht van de VMM.
- Er wordt uitsluitend gekeken naar emissies van luchtverontreiniging. Emissies in de bodem (olie) of water worden niet meegenomen.
- De luchtvervuilende emissies die in deze studie beschouwd worden zijn emissies van fijn stof (PM_{2,5}, PM₁₀, black carbon); NO_x, SO₂, NH₃, CO, PAKs (benzo(a)pyreen), dioxines, NMVOS, broeikasgassen (CO₂, CH₄, N₂O, roet) en zware metalen (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni, Se en Zn).
- We voeren berekeningen uit voor de huidige situatie (2014-2016) met een doorkijkje naar de toekomst in 2030. Er worden geen historische data verzameld over emissies in bijvoorbeeld het jaar 2000.
- In deze studie beschouwen we enkel de effecten van woningverwarming op luchtverontreiniging in de buitenlucht en op het klimaat. Eventuele effecten van woningverwarming op het binnenmilieu wordt in deze studie niet gekwantificeerd omdat daar onvoldoende gegevens over voorhanden zijn. Bedacht moet worden dat WHO (2018) berekende dat wereldwijd ongeveer 40% van de jaarlijkse doden door luchtverontreiniging ontstaan door verontreiniging van het binnenmilieu. Dit is echter vooral het geval in ontwikkelingslanden waar mensen vaak nog op biomassa in niet geventileerde huizen koken.

1.5 Leeswijzer

Het restant van het onderzoek valt in twee delen uiteen. Deel I, de hoofdstukken 2 tot en met 4, vormt het methodologische achtergronddeel van dit rapport. De hoofdstukken 5 en 6 behandelen de resultaten van dit onderzoek. In het methodologische deel bevat hoofdstuk 2 uitleg over de berekening van de milieuschadeprijzen van Vlaanderen. De theorie van milieuschadeprijzen wordt behandeld, een overzicht van studies met milieuschadeprijzen wordt gepresenteerd en een op Vlaanderen gerichte berekening van de

milieuschadeposten die wordt gehanteerd in dit rapport wordt toegelicht. Hoofdstuk 3 bevat vervolgens een analyse van de huidige emissies in Vlaanderen door woningverwarming. Dit hoofdstuk kijkt allereerst naar de gebruikte technieken, warmtelevering en emissies die ontstaan ten gevolge van de vraag naar woningverwarming in Vlaanderen. Hoofdstuk 4 kijkt vervolgens naar de emissies in het scenario van 2030 die ontstaan als de bestaande plannen rondom de energietransitie tot uitvoering worden gebracht.

In het resultaatendeel worden de resultaten op de milieuschadeposten van woningverwarming in Vlaanderen gepresenteerd. Hoofdstuk 5 bevat vervolgens een analyse van de schadeposten ten gevolge van zowel de huidige als toekomstige vraag naar woningverwarming: zowel de schadeposten per eenheid geleverde warmte voor de diverse technieken als de totale schadeposten voor Vlaanderen worden beschouwd. In hoofdstuk 6 worden enkele scenario's gepresenteerd en geanalyseerd op hun schadeposten. Uiteindelijk bevat hoofdstuk 7 conclusies en aanbevelingen die op basis van deze studie kunnen worden getrokken.

Er zijn twee soorten bijlagen bij dit project: de bijlage in deze rapportage bevat uitwerkingen op het gebied van het overzicht van schadeposten in de literatuur, emissiefactoren, een overzicht van aanvullende data voor het bepalen van de milieuschadeposten in Vlaanderen en een overzicht van de berekende rendementen voor houtgestookte installaties. Daarnaast bevat de rapportage een digitale bijlage waarin gedetailleerde tabellen zijn opgenomen die te groot waren om op papier gedrukt te worden. Terwijl de belangrijkste tabellen wel te vinden zijn in deze rapportage, bevat de digitale bijlage op sommige vlakken een grotere mate van detail. Deze digitale bijlage is te vinden op de website van de VMM en van CE Delft.



Deel I

Methodologie



2 KWANTIFICERING VAN DE MILIEUSCHADEKOSTEN

2.1 Inleiding

Milieuschadekosten zijn de financieel gewaardeerde negatieve effecten van milieuvervuiling. Milieuvervuiling heeft effecten op zogeheten 'end-points'. Men onderscheidt in de literatuur diverse end-points, zoals menselijke gezondheid (mortaliteit en morbiditeit), diverse vormen van ecosysteemdiensten, schade aan gebouwen en materialen, grondstofuitputting en hinder (geluidshinder en visuele hinder) (CE Delft, 2017a). Milieuschadekosten geven dan de welvaartsverliezen weer die optreden ten gevolge van milieuvervuiling op deze end-points.

Bij de bepaling van milieuschadekosten van emissies, zoals die van woningverwarming, spelen altijd vier aspecten een belangrijke rol:

- 1 De emissies zelf: hoeveel emissies ontstaan er daadwerkelijk bij woningverwarming?
- 2 De verspreiding van die emissies over het milieu: waar komen die emissies terecht?
- 3 De effecten van die emissies op de receptoren: mensen, dieren en ecosystemen waar deze emissies terechtkomen en die tot negatieve effecten op hun functioneren leidt.
- 4 De waardering van deze negatieve effecten.

Idealiter worden elk van deze vier aspecten gemeten en bepaald. Dit zou echter een enorme onderzoekslast betekenen die al snel het onderzoeksbudget zou uitputten. Daarom wordt er vaak gewerkt met een combinatie van emissiefactoren en schadekostenkengetallen. Emissiefactoren geven dan de emissies van een activiteit weer, veelal bepaald op basis van verbruikte brandstoffen. De emissies van woningverwarming worden bepaald in hoofdstuk 3. Kengetallen vatten dan de stappen 2-4 hierboven samen en geven dus een samengesteld effect van verspreiding, dosis-effectrelaties en waardering van emissies samen. De bepaling van deze kengetallen is onderwerp van dit hoofdstuk.

2.2 Waarderingsgrondslagen voor milieueffecten

Milieuvervuiling leidt tot ziekte en vroegtijdig overlijden bij mensen. De WHO heeft diverse malen uitgebreid verslag gedaan van de gezondheidseffecten van luchtverontreiniging (WHO, 2005; 2011; 2013; 2014). Deze effecten zijn aangetoond in epidemiologisch onderzoek. Indien volgens epidemiologisch onderzoek een verhoogde concentratie van een specifieke vervuilende stof leidt tot een zekere stijging van het aantal gevallen van een zekere ziekte (en indien deze ziekte de gemiddelde levensverwachting van mensen met een bepaald aantal jaren vermindert) kunnen we volgens medische statistieken komen tot een aantal verloren jaren als gevolg van een ziekte. Op deze manier zijn veel effecten van luchtverontreiniging in de epidemiologische literatuur gekwantificeerd.

Naast epidemiologisch onderzoek bestaat er ook toxicologisch onderzoek. De gezondheidseffecten van diverse toxische stoffen zijn uitgebreid beschreven door zowel de WHO (zie bijvoorbeeld WHO, 2010) als een breed scala van toxicologische literatuur.



De vraag is vervolgens: hoe erg is het dat iemand ziek wordt ten gevolge van luchtverontreiniging? Daarvoor kijken economen graag naar de betalingsbereidheid. De betalingsbereidheid geeft aan hoeveel geld mensen van hun inkomen willen opofferen voor een extra eenheid milieukwaliteit? Dit wordt algemeen aangeduid als de betalingsbereidheid of Willingness-to-Pay (WTP). Een andere optie is om te kijken naar de mate waarin mensen bereid zijn om milieuschade te accepteren. Dit is de acceptatiebereidheid ofwel Willingness-to-Accept (WTA). De concepten WTP en WTA worden dus beide gedefinieerd in termen van individuele voorkeuren.

Het schatten van de betalingsbereidheid is een centrale leerstelling in de milieueconomie en kan worden aangepakt op verschillende manieren, te verdelen in vier categorieën (CE Delft, 2017a):

- 1 Waardering van schade op basis van gebleken voorkeuren (revealed preferences). Deze voorkeuren blijken uit de daadwerkelijk gemaakte keuzes van mensen, bijvoorbeeld rondom hun betalingsbereidheid voor het kopen van een woning in gebieden met vervuilde lucht.
- 2 Waardering van schade op basis van verklaarde voorkeuren (stated preferences). Hierbij worden vragenlijsten gebruikt om de betalingsbereidheid van mensen te meten voor het handhaven of verbeteren van de milieukwaliteit¹.
- 3 Waardering van schade op basis van herstelkosten: de kosten die moeten worden gemaakt om de schade te herstellen.
- 4 Waardering van schade op basis van preventiekosten: de kosten van maatregelen om de emissies die de schade veroorzaken te reduceren.

Over het algemeen geldt dat er vanuit de economische wetenschap een afnemende voorkeur is voor gebruik in economische waarderingstudies: directe waardering van de schade op basis van gebleken voorkeuren is te prefereren boven de andere methoden en waardering op basis van preventiekosten is de minst aan te bevelen methode (CE Delft, 2017a). Op deze algemene regel zijn echter veel uitzonderingen denkbaar. Zo is bij klimaatverandering de schade (de Social Cost of Carbon) dermate onzeker dat de preventiekostenmethode, in bepaalde gevallen, een betere graadmeter voor de waardering van klimaatverandering kan vormen.

2.3 Overzicht van literatuur rondom milieuschadeprijzen

2.3.1 Grote Europese onderzoeksprojecten naar de impact-pathwaybenadering

Er zijn diverse studies verschenen die deze milieuschadeprijzen hebben proberen te kwantificeren. Meest bekend zijn de zogeheten ExternE-onderzoeken die sinds 1991 vanuit Europese onderzoeksgelden zijn gefinancierd waarin is getracht de externe kosten van elektriciteitsproductie in kaart te brengen. Uiteindelijk waren bij het project meer dan 50 onderzoeksgroepen uit meer dan 20 landen betrokken. Het project NEEDS (New Energy Externalities Developments for Sustainability), een onderzoeksproject van de Europese Commissie uit 2004-2008, is het laatste onderzoek dat in dit kader is uitgevoerd.

¹ Voor veel milieuvraagstukken is het lastig om de betalingsbereidheid via bevraging te achterhalen omdat de meeste mensen niet precies begrijpen wat milieukwaliteit voor hun leven betekent. Enquêtes met vragen zoals 'hoeveel bent u bereid te betalen voor een reductie van de emissies van SO₂ met 1 kton?' zullen niet leiden tot betekenisvolle resultaten omdat 1 kton SO₂-emissie een abstract begrip blijft. Daarom moeten de vragen zorgvuldig worden opgesteld zodat de respondenten zich kunnen uitspreken over concrete zaken die ze kunnen begrijpen. Dit betekent dat de betalingsbereidheid voornamelijk wordt geschat op het end-pointniveau en concrete milieueffecten betreft zoals menselijke gezondheid, veerkracht van het ecosysteem of de gevolgen voor gewassen, vis en biodiversiteit (CE Delft, 2017a).

Andere belangrijke projecten waren ExternE, MethodEx (Methods and data on environmental and health externalities) en CASES (Cost Assessment for Sustainable Energy Systems). De projecten hebben geresulteerd in een model (Ecosense) en een Exceltool die gebruikt kunnen worden bij het inschatten van externe kosten van een reeks van luchtvervuilende emissies in diverse Europese landen. Er zijn in deze projecten echter geen eenduidige waarderungen voor emissies van woningverwarming ontwikkeld. De focus lag primair op de sector energieproductie, al zijn voor anderen sectoren, zoals industrie, land- en tuinbouw en afval, in het project MethodEx ook kostenschattingen ontwikkeld.

Naast NEEDS, is er in Europa een tweede benadering geweest om milieuschadeprijzen te berekenen: CAFE-CBA. Dit model is verder ontwikkeld door onder meer Holland (2014), IIASA (2014) en gebruikt bij de beleidsvoorbereiding rondom de Europese afspraken over grensoverschrijdende luchtverontreiniging.

Zowel NEEDS als CAFE-CBA gaan uit van de zogeheten impact-pathwaybenadering (IPA) waarbij de relatie tussen emissies, via atmosferisch transport naar dosiseffectrelaties werd gebracht. Vervolgens werden de effecten monetair gewaardeerd. In feite bestaan NEEDS en CAFE-CBA uit vier aan elkaar gekoppelde modellen/databases:

- 1 Emissiedatabases (en/of voorspellingen).
 - 2 Verspreidingsmodellen die de vertaalslag maakt van emissies naar concentraties en een combinatie is van meteorologische modellen met modellen die effecten in de atmosferische chemie beschrijven.
 - 3 Concentration Response Functies (CRFs) die de vertaalslag maakt van concentratie naar fysieke effecten op end-points zoals gezondheid, ecosysteemdiensten en gebouwen.
 - 4 Monetaire waardering van deze fysieke effecten.
- In het Handboek Schaduwrijzen 2010 van CE Delft (CE Delft, 2010) worden beide methoden in meer detail beschreven.

2.3.2 Milieuprijzen en schadeprijzen

Op basis van deze Europese onderzoeksprojecten hebben diverse onderzoekers getracht om eenheidskosten per kg vervuiling af te leiden. Dit gebeurt bijna altijd, zonder uitzondering, op basis van de ExternE/NEEDS-projecten. Dit komt omdat deze projecten een grotere mate van transparantie bezitten over, bijvoorbeeld, de concentration/response functies dan de CAFE-CBA-projecten die een sterker modelmatig karakter hebben. Hierdoor is het lastiger om die resultaten te beoordelen op hun mate van wetenschappelijke kwaliteit en relevantie en aan te passen aan de nieuwste wetenschappelijke inzichten. Door de meer modulaire opbouw van het NEEDS-project is daarbij een dergelijke aanpassing wel mogelijk.

De volgende literatuur is door ons gebruikt in het kader van het onderzoek:

- Vito (2010). Leo De Nocker, Hans Michiels, Felix Deutsch, Wouter Lefebvre, Jurgen Buekers, Rudi Torfs, Actualisering van de externe milieuschadeprijzen (algemeen voor Vlaanderen) met betrekking tot luchtverontreiniging en klimaatverandering. Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2010/03, VITO.
- Ricardo-AEA (2014), Update of the Handbook on External Costs of Transport.
- CE Delft (2017a), Handboek Milieuprijzen 2017: Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts. Dit handboek wordt in Nederland voorgeschreven voor gebruik in maatschappelijke kosten-batenanalyses (MKBAs) en andere waarderungen van milieu-impacts.



- UBA (2012), MethodenKonventionen 2.0, in Duitsland voorgeschreven voor waarderingen van Milieu-impacts/MethodenKonvention 3.0.
- EnvEcon (2015), Marginal Damage Cost Estimates for Air Pollutants in Ireland - 2015.

Daarbij zijn deze studies door ons beoordeeld op:

- de bepalingswijze van schadekosten (op basis van stated preferences, revealed preferences, herstelkosten, preventiekosten);
- de impacts op end-pointniveau die worden onderscheiden (mortaliteit, morbiditeit, IQ-effecten, ecosysteemdiensten, biodiversiteit, gebouwen, materialen, grondstoffen);
- toepasbaarheid op Vlaanderen;
- beschikbaarheid van cijfers voor de in de offerte genoemde emittenten: PM_{2,5}, PM₁₀, black carbon, NO_x, SO₂, NH₃, CO, PAK (benzo(a)pyreen), dioxines, NMVOS (benzeen), broeikasgassen (CO₂, CH₄, N₂O, roet), zware metalen (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni, Se en Zn);
- de mate waarin de recentste WHO-studies (WHO, 2013, 2014) over luchtverontreiniging (en met name de aanpassingen rond de schadelijkheid van O₃, NO_x en black carbon) onderdeel vormen van de schadeschattingen;
- differentiatie naar de hoogte van uitstoot en naar bevolkingsdichtheid;
- de mate waarin de gebruikte methodologie (wetenschappelijk, internationaal) breed aanvaard is;
- de toepasbaarheid op zowel directe als indirecte emissies;
- de onzekerheidsmarges die bestaan op de kengetallen en de oorsprong van deze onzekerheidsmarges.

Overigens bestaat er naast bovenstaande bronnen meer literatuur, zoals LNE (2007), die een overzicht van relevante waarderingstudies voor Vlaanderen geeft. Deze studie is echter minder recent en minder toegespitst op de specifieke waardering van emissies van woningverwarming en daarom niet betrokken in het onderhavige overzicht.

Hieronder worden de diverse handboeken kort besproken. Vergelijkende overzichten van de handboeken zijn te vinden in bijlage 2.

2.3.3 VITO (2010)

Het onderzoeksrapport geeft milieuschadekosten specifiek voor Vlaanderen en buurregio's, waarbij de focus vooral ligt op de gezondheidseffecten van luchtverontreinigende stoffen en broeikasgassen². Voor emissies naar lucht is gebruik gemaakt van schadekostenmethodiek. Het onderzoeksrapport maakt hierbij gebruik van het ExterneE onderzoek (NEEDS, 2008), met aanpassingen op basis van emissiedata, verspreidingsmodellen en blootstellingskaarten die specifiek voor Vlaanderen en buurregio's gelden. Deze data is onder andere verkregen via MIRA-traject en komt uit modellen zoals BelEUROS, IFDM-RIO en ExDaly. Emissies in twee typen sectoren worden beschouwd:

- energie, industrie, huishoudens en diensten; én
- transport.

² De andere impacts worden wel meegenomen, maar niet in detail berekend.

Dit betekent dat er naast emissies van hoge of lage schouwen, ook uitlaatemissies worden gerapporteerd, met onderscheid naar verkeer in de stad, op de snelweg en op het platteland. Hierbij gaat het overigens om de marginale externe gezondheidskosten van de sectoren als geheel in Vlaanderen, niet op specifieke locaties of trajecten. De impact van emissies op de volksgezondheid in andere Europese landen worden meegenomen op basis van EcoSense Web. Voor broeikasgassen is gebruik gemaakt van preventiekosten, al worden schattingen van de 'social cost of carbon' wel (ter vergelijking) gerapporteerd. De cijfers zijn gebaseerd op een meta-analyse van verschillende modellen en studies.

2.3.4 Ricardo-AEA (2014)

Deze studie vormt een update van het eerder uitgebrachte handboek Externe kosten van transport (2008). Per kostenonderdeel (congestie, ongevallen, luchtvervuiling, geluid, klimaatverandering en up- en downstreamprocessen, infrastructuur) wordt beschreven welke methodologische ontwikkelingen zich hebben voorgedaan en of er nieuwe input en/of output data beschikbaar is gekomen.

Voor congestiekosten worden transportmodellen aangeraden (zoals FORGE). De marginale kosten van (risico op) ongevallen is berekend op basis van de CARE-database. Wat betreft luchtvervuiling maakt het rapport gebruik van NEEDS (2008), waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen drie typen bevolkingsdichtheid (rural, suburban en urban). De schadekosten worden gecombineerd met voertuig specifieke emissiefactoren van de betreffende stoffen. Per transporttype wordt een model aangeraden.

2.3.5 CE Delft (2017a)

Het Milieuprijzen Handboek van CE Delft (2017a) geeft waarderingen in Nederland voor emissies naar water, lucht en bodem vanuit een gemiddelde uitstootbron op een gemiddelde uitstootlocatie in het jaar 2015 (inclusief klimaatemissies). In het Handboek Milieuprijzen en de website worden waarderingen voor meer dan 2.500 milieugevaarlijke stoffen op drie niveaus gepresenteerd: een onder- en een bovenwaarde en een centrale waarde. De onder- en bovenwaardes worden meestal gebruikt als onzekerheid over waarderingen expliciet moet worden gemaakt, zoals voorgeschreven in Nederlandse MKBAs. De centrale waarde is een waarde die, bijvoorbeeld, op midpoint-niveau kan worden gebruikt in levenscyclusanalyses (LCAs).

Het Handboek maakt gebruik van de modellering uit NEEDS en brengt daar drie aanpassingen op aan:

- 1 Veranderde emissieniveaus resulterend in lagere achtergrondconcentraties. Dit wordt meegenomen door gebruik te maken van verschillende modelruns uit het NEEDS-project waarbij de schadelijkheid is doorgerekend voor verschillende niveaus van emissies ten gevolge van 'policy scenarios'.
- 2 Veranderde inzichten in de concentratieresponsefuncties ten gevolge van het WHO-onderzoek (WHO, 2013).
- 3 Veranderende inzichten in de waardering van de effecten van emissies op de menselijke gezondheid.

2.3.6 MethodenKonvention (2012)³

De publicatie Methodenkonvention uit 2012 (UBA, 2012) maakt gebruik van NEEDS en het model dat in het kader van NEEDS is opgesteld (EcoSense). Op basis hiervan worden specifieke schadekosten in Euros (prijsniveau 2010) voor Duitsland ontwikkeld voor emissies van PM_{2,5}/PM₁₀, NO_x, SO₂, NH₃, NMVOS en CO₂. Alle berekeningen en uitgangspunten zijn conform NEEDS. Naast NEEDS wordt ook de toepassing van NEEDS in het Exiopol-onderzoek meegenomen.

In vergelijking met andere publicaties besteedt het document meer aandacht aan de differentiatie van de schadekosten afhankelijk van de hoogte van schoorsteen en de bevolkingsdichtheid waarbij ook de schoorsteenemissies voor woningverwarming worden meegenomen. Hierna staat de tabel B6 uit de Methodenkonvention vermeld die deze differentiatie geeft (tabel 5).

tabel 5: overzicht van schadeschattingen gedifferentieerd naar hoogte van de schoorsteen voor Duitsland en EU27 volgens de MethodenKonvention (UBA, 2012) in euro's (2010) per ton

| € 2010/t Emission | Schadeschattingen voor Duitsland | | Schadeschattingen voor EU27 | |
|--|----------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|
| | Stedelijk | Landelijk | Stedelijk | Landelijk |
| PM _{2,5} (Elektriciteit) | 30.600 | 30.600 | 18.600 | 18.600 |
| PMcoarse (Elektriciteit) | 1.200 | 1.200 | 700 | 700 |
| PM ₁₀ (Elektriciteit) | 21.800 | 21.800 | 13.200 | 13.200 |
| PM _{2,5} (Industrie) | 56.000 | 55.400 | 33.500 | 33.000 |
| PMcoarse (Industrie) | 3.200 | 2.900 | 2.100 | 1.900 |
| PM ₁₀ (Industrie) | 40.100 | 39.700 | 24.100 | 23.700 |
| PM _{2,5} (Ruimteverwarming) | 127.200 | 58.500 | 85.000 | 39.200 |
| PMcoarse (Ruimteverwarming) | 11.400 | 2.900 | 8.600 | 2.200 |
| PM ₁₀ (Ruimteverwarming) | 92.500 | 41.800 | 62.100 | 28.100 |
| NO _x (Elektriciteit) | 12.300 | 12.300 | 8.000 | 8.000 |
| NO _x (Industrie/Ruimteverwarming) | 15.400 | 15.400 | 10.500 | 10.500 |
| SO ₂ (Elektriciteit) | 12.400 | 12.400 | 9.200 | 9.200 |
| SO ₂ (Industrie/Ruimteverwarming) | 13.200 | 13.200 | 10.100 | 10.100 |
| NMVOS (allen) | 1.700 | 1.700 | 1.500 | 1.500 |
| NH ₃ (allen) | 26.800 | 26.800 | 19.100 | 19.100 |

Deze verhoudingen kunnen ook relevant zijn voor de ontwikkeling van een specifieke set van schadekosten in dit project voor Vlaanderen.

We merken overigens op dat UBA (2012) geen definitie geeft van wat stedelijk is en landelijk. In overleg met de auteurs moeten we stedelijk opvatten als een gemiddelde van de schadekosten in gebieden die een meer dan gemiddelde bevolkingsdichtheid hebben en landelijk als een gemiddelde voor gebieden die een minder dan gemiddelde bevolkingsdichtheid hebben.

³ Eind 2018 is de nieuwe MethodenKonvention 3.0 gelanceerd. Deze MethodenKonvention is pas aan het einde van de looptijd van het huidige onderzoek beschikbaar gekomen en daarom niet meegenomen bij de beoordeling van de methoden voor kostenschattingen.

2.3.7 Irish damage costs

Voor Ierland heeft consultancybureau ENVECON ook schadekosten berekend. Men heeft zich hier *niet* gebaseerd op NEEDS maar gebruik gemaakt van een econometrisch gravitatiemodel dat de relatie tussen emissies en concentraties heeft ingeschat voor Ierland. Een consequentie van deze benadering is dat emissies die buiten Ierland terecht zijn gekomen (vermoedelijk) niet meetellen als schadekost. Dit is een fundamenteel andere aanpak dan de hierboven geschetste benaderingen op basis van de Externe-onderzoeken (zoals NEEDS) waarbij er een uniforme waardering werd gekozen onafhankelijk van de vraag of de schade in binnen- of buitenland optrad.

Het onderzoek heeft zowel effecten op gezondheid, biodiversiteit alsmede gewassen en gebouwen berekend voor de klassieke emittenten: SO₂, NO_x, PM_{2,5}, NH₃ en NMVOS. Voor de effecten op gezondheid is men uitsluitend uitgegaan van de gezondheidseffecten van fijn stof en ozon: er zijn geen directe gezondheidseffecten van NO_x meegenomen. In vergelijking met andere studies mist het handboek transparantie over gebruikte methodes, cijfers en aannames.

In vergelijking met andere onderzoeken wordt hier wel impacts van ozonvorming op biodiversiteit (bv. huidmondjes van bladeren) gekwantificeerd – een effect dat meestal niet wordt meegenomen. Daarnaast kent het onderzoek ook een onderscheid in schadelijkheid van emissies uitgesplitst naar diverse dichtheden van bevolking. Daarbij valt op dat de variatie in schadelijkheid niet het grootst is voor PM_{2,5} (zoals gebruikelijk in studies), maar in NH₃. Hier wordt geen verklaring voor gegeven in de rapportage.

2.3.8 Discussie en conclusie

De diverse handboeken kennen elk hun voor- en nadelen. Het handboek van VITO (VITO, 2010) heeft als pluspunt dat het specifiek op Vlaanderen is gericht. Het Milieuprijzen Handboek (CE Delft, 2017a) heeft als belangrijk voordeel dat het volledig gebruik maakt van de laatste gezondheidsinzichten van de WHO en dat alle emissies van schadekosten kunnen worden voorzien, de MethodenKonvention (UBA, 2012) heeft als voordeel dat er onderscheid wordt gemaakt tussen de diverse bronnen van emissies en het Ierse milieuprijzenhandboek is, tot slot, het enige handboek dat biodiversiteitsimpacts voor NMVOS-kwantificeert.

Daarnaast kennen alle methoden ook diverse nadelen. Als grootste nadeel van alle methoden behalve het VITO-onderzoek betreft de toepasbaarheid: de emissiekengetallen zijn niet direct toepasbaar op Vlaanderen. Daarentegen kent het VITO-handboek weer als nadeel dat het niet is gebaseerd op de 2013 WHO-standaards voor het kwantificeren van impacts op gezondheid en dat niet alle vervuiling die relevant is voor dit onderzoek ermee wordt gekwantificeerd.

Mede daarom hebben we besloten in dit onderzoek om de waarden uit het Handboek Milieuprijzen te gebruiken in dit onderzoek: dit is de enige bron waarbij waarderingen voor alle gevraagde stoffen te vinden is. Om het nadeel van de niet-specifiek op Vlaanderen gerichte situatie te ondervangen hebben we voor de meest belangrijke schadekosten, PM_{2,5}/PM₁₀, SO₂, NO_x, NH₃ en NMVOS, een specifiek op Vlaanderen toegespitste berekening uitgevoerd. Voor de andere emissiestoffen is dit niet mogelijk in het kader van dit onderzoek.

In paragraaf 2.4 geven we aan hoe we de specifieke Vlaamse waarden voor PM_{2,5}/PM₁₀, SO₂, NO_x, NH₃ en NMVOS hebben berekend. In paragraaf 2.5 geven we een overzicht van de numerieke waarde van de milieuschadekosten die we in deze studie gebruiken.



tabel 6: overzicht van voornaamste databronnen en scope van de aanpassingen op de NEEDS-resultaten in deze studie

| | Deze studie | Scope van betrokken data |
|--|---|---|
| 1 Concentratieresponsefuncties | Gebaseerd op WHO (2013) | Europees/wereldwijd |
| 2 Bevolkingsopbouw | Gebaseerd op Statbel | Vlaamse gewest |
| 3 Achtergrondconcentraties | Gebaseerd op modellering van NEEDS | België (er is geen informatie over Vlaanderen beschikbaar binnen het NEEDS-model) |
| 4a Aanpassing waardering gezondheid | Gebaseerd op Handboek Milieuprijzen (CE Delft, 2017a) | West-Europees gemiddelde cijfer |
| 4b Aanpassing waardering biodiversiteit | Gebaseerd op Kuik et al., 2008 | Vlaanderen bevolkingsdichtheid en Nature 2000-gebieden |
| 5a Relatief gewicht van stoffen op midpointthema | Gebaseerd op methode uit Handboek Milieuprijzen (CE Delft, 2017a) | Vlaanderen m.u.v. humane toxiciteit (waarvoor Nederlandse cijfers zijn betrokken) |
| 5b Karakterisatiefactoren | ReCiPe net als in het Handboek Milieuprijzen | West-Europees gemiddelde |
| 6 Verbijzondering naar emissies woningverwarming | MethodenKonvention 2.0 (UBA, 2012) | Duitsland |

Uiteraard zou het beter zijn als bij elke aanpassing er data specifiek voor Vlaanderen kon worden gebruikt, maar dat is niet mogelijk omdat deze data er niet zijn. Door een aantal componenten in de modellering zoveel mogelijk toe te passen op de situatie in Vlaanderen en voor de andere componenten West-Europese gemiddelden te gebruiken wordt er wel toegewerkt naar een situatie waarin de Vlaamse context van de schadekosten wordt gemaximaliseerd.

Hieronder worden de aanpassingen op de NEEDS-resultaten verder toegelicht, in bijlage 4 staan de aanpassingen in meer kwantitatief detail vermeld.

2.4.2 Aanpassing Concentration Response Functies

De Concentration Response Functions (CRFs) zijn in het NEEDS-model gebaseerd op de stand van zaken rondom de schadelijkheid van luchtverontreiniging rond 2005. Toen had de WHO een grote studie gebaseerd rondom de schadelijkheid van luchtverontreiniging (WHO, 2005). Recent is er in de context van WHO meer inzicht gekomen in de schadelijkheid van milieuvervuilende stoffen (WHO 2013, 2014). Daarom zijn de CRFs die zijn gehanteerd in NEEDS (2008a) niet altijd meer actueel. In dit onderzoek zijn de CRFs die in NEEDS zijn gehanteerd bekeken en is bediscussieerd of ze volledig zijn. Op basis daarvan is besloten dat in het NEEDS-project geen effecten van chronische smog zitten verwerkt en dat de NEEDS-resultaten dus geen adequate afspiegeling vormen van de huidige stand van zaken in de wetenschap rondom schadelijkheid van luchtvervuiling. Op basis hiervan zijn de CRFs voor NMVOS en NO_x naar boven toe bijgesteld.

Alle CRFs die zijn gehanteerd in dit project zijn aangepast naar de aanbevolen waarden op basis van WHO (2013) en WHO (2014). Het betreffen hier waarden die worden aanbevolen voor Europees gebruik. In het recente EU28 Handboek Milieuprijzen van CE Delft (CE Delft, 2017a) staat precies beschreven welke aanpassingen zijn gedaan. Voor Vlaanderen is het percentage van de bevolking dat leeft in gebieden waar de jaarlijkse concentratie van NO₂ boven de 20 µg/m³ ligt, 34% in 2015⁴. Dit getal is genomen bij de bepaling van de impact van de CRF.

⁴ Zie MIRA-indicator (of info Frans Fierens): [Aandeel van de bevolking blootgesteld aan te hoge NO2-concentratie in lucht](#)

2.4.3 Aanpassing bevolkingsopbouw

De bevolkingsopbouw is gebaseerd op de gegevens van het Vlaamse gewest via Statbel. De informatie betreft het jaar 2018. De leeftijdscohorten zijn van belang omdat sommige vormen van luchtvervuiling alleen ouderen treffen terwijl andere vormen van luchtvervuiling alleen effecten hebben op de beroepsbevolking (zoals ziekteverzuim en het gerelateerde verlies aan arbeidsproductiviteit). De leeftijdscohorten worden voor het Vlaamse gewest gebaseerd op informatie uit Eurostat die is aangeleverd door Statbel. De leeftijdscohorten en omvang van de bevolking geeft de situatie van 1 januari 2018 weer. De beroepsbevolking is gebaseerd op de gegevens van Statbel over het percentage van de bevolking dat één of meer uur per week een betaalde baan heeft. Deze informatie is dezelfde als in Eurostat.

De invloed van de aanpassing van de bevolkingsopbouw betekent dat de schadekosten iets hoger worden doordat de effecten van vervuiling zwaarder wegen bij de oudere bevolking. In bijlage 4 staat een gevoeligheidsanalyse van de impact van de aanpassing van de bevolkingsopbouw op de schadekosten.

2.4.4 Aanpassing achtergrondconcentraties

Delen van het NEEDS-model, zoals het verspreidingsmodel en het model van de atmosferische chemie, zijn voor ons niet herleidbaar. Maar omdat er van het NEEDS-project veel modelruns beschikbaar zijn voor schattingen van emissiereductiescenario's, is de onderliggende modelstructuur tot op zekere mate te herleiden. Besloten is om uit te gaan van de emissiescenario's 2010 en 2020 uit de Exceltool van NEEDS (en gebruikt in het verspreidingsmodel Ecosense). Vervolgens is de daadwerkelijke emissie van 2015 geschaald op het verschil tussen 2010 en 2020 waarden. De resultaten daarvan zijn voorgelegd en besproken met experts op het gebied van atmosferische chemie en verklaringen voor een stijging of daling van de schadekosten per kg stof zijn van een argumentatie voorzien. Op deze manier is er een aanpassing gemaakt voor de lagere achtergrondconcentraties van de schadelijke stoffen anno 2015 en de invloed daarvan op de schadeschattingen.

Deze manier van werken laat zien dat de schadekosten van PM_{2,5} en PM₁₀ lineair verlopen met de emissies, maar dat de schadekost (per kg emissie) van vooral SO₂ en NO_x toeneemt bij lagere emissies van deze stoffen. De reden heeft te maken met de vorming van secundair fijn stof. Belangrijkste vormen van secundair fijn stof zijn ammoniumsulfaat ((NH₄)₂SO₄) en ammoniumnitraat (NH₄NO₃). Beide stoffen ontstaan via een aantal reacties uit de luchtverontreinigingscomponenten ammoniak (NH₃), stikstofoxiden (NO_x) en zwaveldioxide (SO₂). De hoeveelheid ammoniak is de belangrijkste determinant in de vorming van secundaire aerosolen: als de hoeveelheid ammoniak vermindert, vermindert ook de schadelijkheid van SO₂ en NO_x – ook als de emissies van die stoffen niet afnemen. Als, aan de andere kant, de emissies van SO₂ en NO_x verminderen zonder een meer dan evenredige vermindering van NH₃, dan zal de schadekost van deze stoffen toenemen, omdat er 'relatief' meer secundair stof gevormd zal worden per hoeveelheid uitgestoten SO₂ en NO_x. Voor Vlaanderen nemen de emissies van deze drie stoffen af tussen 2010 en 2020, maar deze afname is vooral groter bij NO_x en SO₂. Het gedeelte dat reageert met NH₃ daalt niet even sterk. Hierdoor is er dus naar verhouding meer NH₃ waarmee NO_x of SO₂ kan reageren in de lucht. Dit is de primaire reden dat een daling in emissies NO_x en SO₂, als het niet vergezeld gaat met een nog sterkere daling in NH₃, leidt tot hogere schadekosten per kg emissie voor deze stoffen. Zolang NH₃ niet versterkt wordt aangepakt bij emissiebestrijding zal dit voor Vlaanderen voortduren.

De schadekosten van NMVOS nemen af bij lagere concentraties omdat dit betekent dat de emissie van NMVOS vaker bijdraagt aan concentraties die onder de drempelwaarde komt te liggen van 35 ppb. Onder deze drempelwaarde zijn er geen gezondheidseffecten te verwachten volgens WHO (2005).



In bijlage 3 wordt een overzicht gegeven van de gehanteerde invloed van deze aanpassing op de eindresultaten.

2.4.5 Aanpassing van de waardering

De volgende effecten worden in het Handboek Milieuprijzen (CE Delft, 2017a) monetair gewaardeerd:

- Mortaliteitseffecten: vroegtijdig overlijden gebaseerd op een waardering van de VOLY (Value of Life Years). De centrale waarde in het Handboek Milieuprijzen is op basis van een literatuuroverzicht bepaald op € 70.000 per jaar. Deze waarde wordt ook verondersteld in de update van de MethodenKonvention van de UBA (UBA, 2018, forthcoming) en is ook gebruikt in de Europese waardering van de impacts van transportemissies (CE Delft, INFRAS, forthcoming). In het Handboek Milieuprijzen worden ook onder- en bovenwaardes geformuleerd (een ondergrens van € 50.000 en een bovengrens van € 100.000).
- Morbiditeitseffecten: ziektelast ten gevolge van milieuvervuiling, gewaardeerd met een waardering voor een QALY (Quality Adjusted Life Years). De QALY waardering in het Handboek Milieuprijzen bedraagt € 70.000 per jaar. In het Handboek Milieuprijzen is besloten voor de onder- en centrale waarde eenzelfde waardering voor de QALY op te nemen, maar voor de bovenwaarde uit te gaan van € 110.000/QALY. Deze benadering volgen we hier ook. Voor bepaalde ziektekosten, zoals medicijngebruik, kankergevallen ten gevolge van straling of humane toxiciteit, zuigelingensterfte, IQ, etc., zijn de waarderingen uit het Handboek Milieuprijzen gevolgd. Deze zijn gebaseerd op de literatuur en bevatten een West-Europees gemiddelde. Voor precieze beschrijving van de waarderingen voor morbiditeit verwijzen we naar het handboek. Voor een overzicht van deze waarderingen, zie bijlage 3.
- Voor de waardering van biodiversiteitsimpacts (uitgedrukt in PDF = Potentially Disappeared Fraction) gebruiken we, net als in het Handboek Milieuprijzen, de herstelkosten uit NEEDS (2006) als centrale waarde en de mediane en gemiddelde waarde uit Kuik et al. (2008) als de onder- en bovenwaarde. De herstelkosten zijn verondersteld hetzelfde te zijn als in Nederland. Voor de onder- en bovenwaarde is wel een specifieke Vlaamse waardering gekozen door de Vlaamse bevolkingsdichtheid (485 cap/km²) en de gemiddelde grootte van de 55 Vlaamse Natura 2000-gebieden in te vullen in de meta-analyse vergelijking van Kuik et al. (2008). Dit leidt tot een iets hogere waardering voor biodiversiteit in Vlaanderen dan het gemiddelde van Nederland. Daarbij moet opgemerkt worden dat de schadekosten van biodiversiteitsverlies veel onzekerder zijn dan die van gezondheid. De totale bijdrage van milieuvervuiling aan biodiversiteitsverlies is overigens maar gering en het grootste deel van de totale schadekosten van milieuvervuiling wordt bepaald door de impacts op menselijke gezondheid. Verlies aan landbouwgewassen is gewaardeerd met dezelfde prijzen als in het Handboek Milieuprijzen CE Delft (2017a).

Tabel 7 geeft een overzicht van de aanpassingen in de waardering.



tabel 7: aanpassingen waarderingsstructuur

| Prijspeil | In NEEDS (2008) | Deze studie |
|---------------------------------|--|---|
| | Prijzen 2008 | Prijzen 2015 |
| Waardering mortaliteitseffecten | VOLY van € 40.000 chronisch, vermoedelijk in prijsniveau 2005. Dit komt overeen met een waardering voor België van ongeveer € 48.000. | Waardering van een centrale waarde van € 70.000 met € 50.000 als onderwaarde en € 100.000 als bovenwaarde, in prijzen 2015. |
| Waardering morbiditeitseffecten | Waardering van diverse ziektegevallen en IQ-effecten overeenkomend met een waardering voor een QALY van ongeveer € 40.000 (prijsniveau 2000/2005). | Waardering van diverse ziektegevallen en IQ-effecten overeenkomend met een waardering van een QALY van gemiddeld € 70.000 met een range van € 50.000 tot € 110.000. |
| Waardering ecosystemen | € 0,56/PDF/m ² gebaseerd op gemiddelde Europese waardering uit Kuik et al. (2008). | Een range van € 0,22/PDF/m ² tot € 1,70/PDF/m ² (prijzen 2015) gebaseerd op eigen berekeningen voor Vlaanderen op basis van de vergelijking in Kuik et al. (2008). Als centrale waarde is € 0,66 gekozen. |

De waardering van CO₂-emissies verdient nog een aparte vermelding. In Nederland was de waardering voor CO₂-emissies voorgeschreven door de overheid doordat de Tweede Kamer het advies van de werkgroep Discontovoet overnam waarin, naast een voorgeschreven discontovoet in maatschappelijke kosten-batenanalyses ook een voorgeschreven CO₂-prijs stond vermeld. De gedachte hierachter was dat niet alleen de discontovoet grote impact heeft op kosten-batenanalyses maar de CO₂-prijs ook, en dat er een relatie bestaat tussen de hoogte van de discontovoet en de hoogte van de CO₂-prijs.

Voor België geldt deze verplichting niet. Daarom volgen we voor België niet het Handboek Milieuprijzen uit 2017 maar dezelfde redenering als in het eerdere Handboek Schaduwrijzen (2010) is gebruikt waarbij preventiekosten werden genomen als basis voor de waardering van CO₂-emissies met een centrale waardering voor de vastgestelde Europese beleidsdoelen voor 2030 en als hoge variant het optimale emissiepad dat de EU zou moeten volgen wil zij de 2-gradendoelstelling halen. De marginale kosten behorend bij beide emissiepaden is berekend voor Europa in Aalbers et al., (2016). Als onderwaarde nemen we de gemiddelde schadekosten volgens Gerlach en van den Bijgaart (2015). Deze bedragen € 37/tCO₂.

Bij de toepassing van waarderingen is ervoor gezorgd dat alle waarderingen worden weergegeven in het prijspeil van 2015. Eventuele omrekeningen, zoals bij de waardering van biodiversiteit, is gebeurd aan de hand van gegevens over de geharmoniseerde consumentenprijsindex van Eurostat. Voor biodiversiteit is tevens een relatieve prijsstijging van 1% per jaar aangenomen, conform de uitgangspunten in het Handboek Milieuprijzen (CE Delft, 2017a)⁵.

2.4.6 Toepassing karakterisatiefactoren

Via het aangepaste NEEDS-model (zie aanpassingen stap 1-4) worden de schadekosten van NO_x, SO₂, NH₃, PM_{2,5}, PM₁₀, NH₃ en NMVOS berekend. De uitkomsten van de herziene berekeningen dienen vervolgens, net als in het Handboek Milieuprijzen, als input in het ReCiPe-karakterisatiemodel. Hierbij worden er, aan de hand van de waarderingen voor deze stoffen, een waarde uitgerekend voor de midpoints: fijn stofvorming, smogvorming (fotochemische oxidantvorming) en verzuring. Midpoints is het fysisch-chemisch

⁵ Bij een inkomensgroei van 2% komt dit overeen met een inkomenselasticiteit van 0,5.

niveau waarin de effecten van de stoffen onderling kunnen worden vergeleken. Daarbij is dezelfde routine gehanteerd als in het Handboek Milieuprijzen (CE Delft, 2017a). Dit verdelen is gebeurd aan de hand van de daadwerkelijke emissies in Vlaanderen (totalen) in 2015, zoals weergegeven op [Emissies luchtverontreiniging en broeikasgassen](#).

Voor humane toxiciteit hebben we geen aparte berekening uitgevoerd maar de waardering uit Nederland genomen die is gebaseerd op een West-Europees gemiddelde. Dit is overeenkomstig NEEDS (2008) waarbij voor humane toxiciteit van zware metalen alleen wordt gewerkt met een West-Europees gemiddelde en er geen onderscheid wordt gemaakt in schadelijkheid van de diverse landen. Zoals aangegeven in het Handboek Milieuprijzen is de waardering van humane toxiciteit met grote onzekerheid omgeven, met name op het gebied van de CRFs, en zou nader onderzocht moeten worden in toekomstig onderzoek. De waardering van Cd, dioxines, arseen, nikkel en kwik is direct gebeurd in het Handboek Milieuprijzen. Op basis daarvan is er een waardering afgeleid voor het midpoint 'humane toxiciteit'. Door toepassing van karakterisatiefactoren kan vervolgens een waardering voor PAKs, zink en selenium worden afgeleid. Meer informatie is te vinden in het Handboek Milieuprijzen (CE Delft, 2017a).

2.4.7 Differentiatie naar woningverwarming

In het NEEDS-model worden alleen de emissies van elektriciteitscentrales aanvullend gemodelleerd. Hierbij blijkt dat de schadelijkheid van met name PM_{2,5}-emissies ongeveer een factor 2 lager wordt dan het gemiddelde cijfer. Voor de zware metalen is er geen onderscheid gemaakt tussen de gemiddelde waardes en de waardes van elektriciteitscentrales.

Om een inschatting te kunnen maken van de schadelijkheid van emissies van woningverwarming kijken we naar het Duitse handboek over waarderingen van emissies, de MethodenKonvention, die een gedetailleerd onderscheid maakt naar de diverse bronnen van uitstoot voor PM_{2,5} en PM₁₀. Tabel 8 geeft de resultaten weer.

tabel 8: overzicht gehanteerde schadekostverhoudingen uit Duitsland in euro's (2010) per ton emissie

| | Gemiddelde | Elektriciteit | Ruimteverwarming | | Verkeer | |
|-------------------|------------|---------------|------------------|------------|---------|------------|
| | Duitsland | | Stad | Platteland | Stad | Platteland |
| PM _{2,5} | 55.400 | 30.600 | 127.200 | 58.500 | 364.100 | 122.800 |
| PM ₁₀ | 39.700 | 21.800 | 92.500 | 41.800 | nb | nb |

nb = niet beschouwd in deze studie

Het voorstel is om de verhoudingen tussen het gemiddelde cijfer en het cijfer voor ruimteverwarming uit deze studie te gebruiken voor emissies van PM_{2,5}, PM₁₀. Voor black carbon bevelen we geen aanpassing aan omdat hiervoor geen literatuur beschikbaar is. Daarbij merken we ook op dat de relatieve schadelijkheid van roet is vastgesteld in epidemiologische studies en dat roetemissies vooral door verkeer in steden plaatsvindt. Daarom kan de verhouding tussen PM_{2,5} voor steden en platteland niet zonder meer worden toegepast op black carbon zonder opnieuw de relatieve schadelijkheid vast te stellen. Ook voor zware metalen vinden we een aanpassing op basis van de verhouding in PM_{2,5} ongewenst omdat belangrijke effecten van zware metalen via de voedselketen plaatsvinden. Het is in het kader van het huidige onderzoek (en onderzoeksbudget) niet mogelijk om een inschatting te maken van de directe effecten van zware metalen via inademing en de indirecte effecten via opname in de voedselketen.



Er zijn aanwijzingen dat ook NO₂ op leefniveau uitgestoten tot extra schade kan leiden. Ons voorstel is om hier een differentiatie te maken naar stad en platteland onder de veronderstelling dat de bevolking in steden is blootgesteld aan concentraties groter dan 20/μg/m³, en bevolking op het platteland niet is blootgesteld aan dergelijke concentraties.

2.5 Gehanteerde milieuschadeprijzen in deze studie

2.5.1 Resultaten: gemiddelden voor Vlaanderen

Tabel 9 geeft de resultaten weer van de gebruikte schadeprijzen van emissies naar lucht in Vlaanderen waarbij de hierboven beschreven aanpassingen zijn gevolgd. Deze emissies zijn gemiddelde emissies voor Vlaanderen voor een gemiddelde hoogte van de schoorsteen.

tabel 9: gemiddelde schadeprijzen in Vlaanderen voor emissies naar lucht vanuit een gemiddelde schoorsteen op een gemiddelde locatie, prijzen in €₂₀₁₅/kg emissie

| Emissie naar lucht | Afk | Centrale waarde | Range*** | Bron |
|---|---|-----------------|-----------------|---------------------------|
| Koolstofdioxide | CO ₂ | € 0,057 | € 0,037-0,094 | Berekening |
| Methaan | CH ₄ | € 1,77 | € 0,47-2,92 | Berekening ^{^/#} |
| Lachgas | N ₂ O | € 15,10 | € 3,9-24,9 | Berekening [^] |
| Black carbon (boven 10% PM _{2,5})** | BC | € 717 | € 512-1.101 | Berekening |
| Fijn stof | PM _{2,5} | € 79,7 | € 56,9-122,4 | Berekening |
| Fijn stof | PM ₁₀ | € 55,7 | € 39,8-86,1 | Berekening |
| Stikstofoxiden | NO _x | € 22,8 | € 15,7-36,6 | Berekening |
| Zwavel dioxide | SO ₂ | € 20,9 | € 14,8-32,8 | Berekening |
| Ammoniak | NH ₃ | € 34,8 | € 23,1-58,6 | Berekening |
| Vluchtige organische stoffen (niet-methaan) | NMVOS | € 2,8 | € 2,1-4,2 | Berekening |
| Koolstofmonoxide | CO | € 0,13 | € 0,09-0,2 | Berekening [#] |
| Cadmium | Cd | € 1.159 | € 798-1.831 | CE Delft, 2017a |
| Arsenicum | As | € 1.033 | € 703-1.228 | CE Delft, 2017a |
| Lood | Pb | € 5.908 | € 3.967-6.596 | CE Delft, 2017a |
| Kwik | Hg | € 34.481 | € 24.766-53.632 | CE Delft, 2017a |
| Nikkel | Ni | € 133 | € 75-225 | CE Delft, 2017a |
| Chroom* | Cr | € 0,53 | € 0,15-1,02 | CE Delft, 2017a |
| Benzo(a)pyrene | C ₂₀ H ₁₂ | € 11,40 | € 8,4-17,7 | CE Delft, 2017a |
| Koper | Cu | € 4,40 | € 1,5-10,9 | CE Delft, 2017a |
| Selenium | Se | € 90 | € 65-141 | CE Delft, 2017a |
| Zinc | Zn | € 11,80 | € 2,25-31,60 | CE Delft, 2017a |
| Dioxine | C ₁₂ H ₄ Cl ₄ O ₂ | € 67.100.000 | € 49-104 mln | CE Delft, 2017a |

Noot:

* Chroom betreft de inschatting voor Chroom, maar niet voor Chroom VI die apart zou moeten worden onderscheiden.

** Alleen het aandeel van black carbon emissies dat boven 10% van PM_{2,5} wordt uitgestoten wordt meegeteld als extra emissies. In de berekeningen is PM₁₀ onderverdeeld in drie fracties (a) elementair carbon indien dit aandeel groter is dan 10% van de PM_{2,5}-emissies; (b) PM_{2,5} minus het aandeel black carbon indien aandeel BC groter is dan 10%; (c) Het deel PM₁₀ dat niet in PM_{2,5} zit. Dit is gedaan om dubbeltellingen te voorkomen.

*** De range betreft de onzekerheidsrange met betrekking tot waardering, niet met betrekking tot overige onzekerheden.

[^] Berekend op basis van karakterisatiefactoren IPCC 2013, dezelfde als gehanteerd in het Handboek Milieuprijzen (CE Delft, 2017a).

[#] Berekend op basis van karakterisatiefactoren ReCiPe voor fotochemische oxidantvorming.

Hierbij valt mogelijk op dat de schadekosten van toxische stoffen vaak relatief laag liggen ten opzichte van, bijvoorbeeld, fijn stof en NO_x. Dit komt omdat de onzekerheid bij de schadekosten van toxische stoffen erg groot zijn. Bestaande methoden om de schadekosten van toxische stoffen te vergelijken met andere stoffen laten hele grote verschillen zien. Vanwege deze redenen is in CE Delft (2017a) een conservatieve aanname genomen bij het waarderen voor toxische stoffen. De aanbeveling uit het handboek luidt om de waardering van toxische stoffen als voorlopig te beschouwen en dat deze waardering in meer detail zou moeten worden onderzocht in toekomstig onderzoek.

2.5.2 Resultaten: specifiek voor woningverwarming

Tabel 10 geeft de resultaten aangepast voor de woningverwarming waarbij we de aanpassingen uit stap 6 hebben toegepast.

tabel 10: schadekosten speciaal voor woningverwarming in Vlaanderen voor directe emissies door woningverwarming

| | Centrale waarde | Range |
|------------------------------|-----------------|-----------|
| PM _{2,5} stad | € 183 | € 131-281 |
| PM _{2,5} platteland | € 84 | € 60-129 |
| PM ₁₀ stad | € 104 | € 74-161 |
| PM ₁₀ platteland | € 47 | € 33-73 |
| NO _x stad | € 32 | € 23-51 |
| NO _x platteland | € 16 | € 11-25 |

Noot: In de berekeningen is PM₁₀ onderverdeeld in drie fracties (a) elementair carbon indien dit aandeel groter is dan 10% van de PM_{2,5}-emissies. Deze waardering is niet gedifferentieerd tussen stad en platteland omdat informatie over het verschil in schadelijkheid tussen stad en platteland niet beschikbaar is (zie ook bijlage 4); (b) PM_{2,5} minus het aandeel black carbon indien aandeel BC groter is dan 10%; (c) Het deel PM₁₀ dat niet in PM_{2,5} zit. Dit is gedaan om dubbelstellingen te voorkomen.

De schadekosten liggen hierbij boven de gemiddelde schadekosten die in tabel 10 vermeld staan. Dat komt doordat woningverwarming plaatsvindt in lage schoorstenen die meer schadelijk zijn dan de gemiddelde schadelijkheid van emissies. Daarnaast zijn emissies in steden nog extra schadelijk in vergelijking met het landelijke gemiddelde.

Een eenduidige definitie van stad en platteland bestaat niet in het statistische systeem van Vlaanderen. In deze studie hanteren we daarom de indeling conform VITO (2011) waarbij 45% van de bevolking in steden woont en 55% op het platteland.

Verder veronderstellen we dat in de steden twee derde van de bevolking leeft in gebieden met een jaar-gemiddelde boven de 20 µg/m³ NO₂. In het platteland gaat het dan om slechts 8% van de bevolking. Dit zijn aannames: ook een stedeling kan een deel van zijn tijd doorbrengen in gebieden met lagere concentraties aan NO₂ en een inwoner van het platteland kan een deel van zijn tijd doorbrengen in gebieden met een hogere concentratie aan NO₂. Het is niet doenlijk in het kader van dit onderzoek om dit precies te bepalen. De invloed op de totale milieuschadekosten van woningverwarming van deze aanname is ook relatief beperkt: het totale getal van 34% van de bevolking die leeft in gebieden met een NO₂-concentratie boven de 20 µg/m³ is veel bepalender.



3 BEPALEN VAN DE HUIDIGE EMISSIES VAN WONINGVERWARMING

3.1 Inleiding

Naast de kengetallen voor schadekosten vormen de emissies van woningverwarming een belangrijke determinant in de berekening van de schadekosten per techniek en totaal voor Vlaanderen. In dit hoofdstuk worden de emissies per energiedrager en verwarmingstechniek van woningverwarming in Vlaanderen berekend⁶. De berekende emissies worden dan in hoofdstuk 5 gerelateerd aan de data over milieuschadekosten zodat een inschatting kan worden gemaakt van de milieuschadekosten voor woningverwarming per verwarmingstoestel en voor Vlaanderen als geheel.

De emissies zullen zowel op het niveau van de individuele techniek gebruikt voor woningverwarming als voor geheel Vlaanderen worden bepaald. We onderscheiden daarbij directe en indirecte emissies. Directe emissies zijn emissies die uit de schoorsteen van de woning zelf komen. De methodiek voor het bepalen van de indirecte emissies zijn emissies die bij de productie van de energiedragers vrijkomen. Daarnaast zijn er ook nog emissies die in de woning ontstaan door niet-gesloten toestellen voor ruimteverwarming. Deze emissies worden door ons niet meegenomen in deze studie.

In dit hoofdstuk worden de emissies voor het jaar 2015 bepaald en in hoofdstuk 4 voor het jaar 2030. In dit hoofdstuk beginnen we in paragraaf 3.2 met een toelichting op de gebruikte methodiek voor het bepalen van de directe emissies. In paragraaf 3.3 wordt vervolgens uitgelegd welke databronnen zijn gebruikt bij het bepalen van de directe emissies en in paragraaf 3.4 worden de resultaten getoond met een overzicht van de directe emissies die vrijkomen bij woningverwarming in Vlaanderen in 2015, zowel in totaal als per energiedrager. Vervolgens wordt in paragraaf 3.5 de methodiek voor de bepaling van de indirecte emissies toegelicht, met in paragraaf 3.6 de berekende emissiefactoren en in paragraaf 3.7 de presentatie van de indirecte emissies die samenhangen met woningverwarming in Vlaanderen in 2015.

3.2 Methodiek voor bepaling emissies

Voor de bepaling van de directe emissies sluiten we zoveel mogelijk aan bij de systematiek die door VITO (2017a) is gebruikt maar voegen daar twee zaken aan toe:

- 1 Een analyse rondom de rendementen van houtgestookte installaties.
- 2 Een analyse van de indirecte emissies die ontstaan bij de productie van energiedragers.

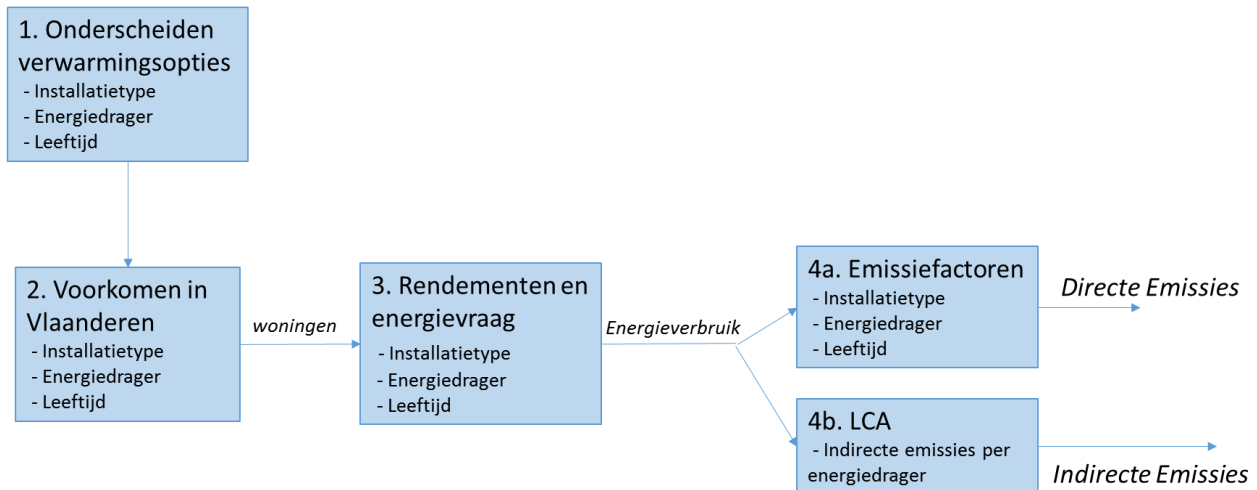
De focus op indirecte emissies betekent dat wij ook een breder pallet aan verwarmingstechnieken beschouwen dan VITO (2017a) waarbij we ook installaties meenemen die geen directe emissies kennen maar wel indirecte emissies, zoals warmtepompen of elektrische kachels.

Figuur 10 geeft een overzicht van de aanpak. Allereerst wordt er een indeling gemaakt van onderscheiden verwarmingstoestellen, die worden onderscheiden naar installatietype, brandstof en leeftijdsklasse.

⁶ Omdat veel van de benodigde data het jaar 2015 betreft, is gekozen voor de berekening van emissies en emissiekosten voor dit jaar.

Vervolgens wordt gekeken hoe vaak deze verwarmingstechnieken voorkomen in Vlaanderen. Dit levert dan informatie op over het aantal woningen dat gebruik maakt van een bepaald verwarmingstoestel. Vervolgens wordt aan de hand van rendementen en energiebehoefte bepaald wat het energieverbruik per toestel is. Vervolgens wordt deze informatie over het energieverbruik gekoppeld aan emissiefactoren om de directe emissies te bepalen, en worden de emissiefactoren van de indirecte emissies bepaald via een levenscyclusanalyse (SimaPro). De totale emissies zijn dan de som van de directe en indirecte emissies.

figuur 10: aanpak bij berekening van emissies



In formulevorm kan de berekening als volgt worden opgezet:

$$E_j = \sum_{i,b,t} W_{i,b,t} * \left(\frac{D}{R_{i,b,t}} \right) * EF_{j,i,b,t}$$

Waarbij E = emissie, W = aantal woningen, R = rendement (in %), D = warmtebehoefte en EF is de emissiefactor en de subscript j is voor de emissies (bv. SO₂, PM_{2,5}, etc.), subscript i voor het installatietype, b voor de energiedrager en t voor de leeftijdsklasse.

De subscripts bepalen de indeling van de studie. Net als in VITO (2017a) maken we onderscheid naar de volgende energiedragers:

- aardgas
- stookolie
- propaan/butaan/LPG
- steenkool
- hout

Bij aardgas, stookolie, propaan/butaan/LPG en steenkool differentiëren we, net als in VITO (2017a) tussen centrale en decentrale installaties. Verder wordt bij aardgas en stookolie onderscheid gemaakt tussen condenserende en niet-condenserende installaties (ketels), en tussen installaties groter dan 70 kW en kleiner dan 70 kW. Installaties groter dan 70 kW betreffen collectieve verwarming. Deze begrippen worden gedefinieerd in bijlage 1.



Daarnaast onderscheiden we in deze studie vijf soorten toestellen waarmee hout kan worden ingezet als brandstof ten behoeve van woningverwarming (ook wel 'houtinstallatietypen' genoemd):

- open haard
- (hout)kachel
- (hout)ketel
- cassette
- speksteen-/tegelkachel

Deze toestellen (installatietypen) worden ook gedefinieerd in bijlage 1.

Naast deze brandstofverbruikende technieken nemen we ook additionele warmtetechnieken mee die elektriciteit of (rest)warmte gebruiken:

- warmtenet
- weerstandsverwarming
- bodemwarmtepomp
- luchtwarmtepomp
- hybride warmtepomp⁷

Deze lijst van additionele technieken is niet uitputtend. Andere technieken zijn door ons niet meegenomen omdat deze nauwelijks een rol spelen in woningverwarming in Vlaanderen⁸.

Voor het gebruik van hout als brandstof maken we onderscheid naar de volgende houttypen (zie ook VITO (2017a)): briketten, houtkrullen, pellets, snoeihout, stukhout, en houtafval, waarbij houtafval verder is onderverdeeld in onbehandeld, verontreinigd behandeld en niet-verontreinigd behandeld houtafval. Zowel het gebruik van houtinstallatietypen als van houttypen heeft namelijk effect op de emissies.

Voor wat betreft hout maken we in de berekening een expliciet onderscheid tussen hoofdverwarming en bijverwarming. Het merendeel van het houtverbruik voor woningverwarming in Vlaanderen vindt plaats in bijverwarmingsinstallaties (dit is vaak sfeerverwarming), en dus zijn de meeste emissies van houtstook in Vlaamse woningen gerelateerd aan bijverwarming.

⁷ Een hybride warmtepomp is een combinatie van een warmtepomp en een andere verwarmingsinstallatie. We nemen in deze studie aan dat dit gaat om een luchtwarmtepomp en een CV-ketel op aardgas.

⁸ De zonneboiler is door ons niet meegenomen, omdat deze meestal alleen wordt ingezet voor de levering van sanitair warm water. Dit is omdat de warmteproductie niet toereikend is voor woningverwarming (CE Delft, 2017b). Groengas en waterstof zijn ook niet meegenomen, omdat deze energiedragers momenteel niet worden gebruikt voor woningverwarming in Vlaanderen, en ook niet worden genoemd als toekomstige energiedrager in het Energieplan Vlaanderen 2021-2030, kortweg 'Energieplan' (Vlaamse Regering, 2018).

3.3 Gebruikte gegevens voor de berekening van de directe emissies

Om de directe emissies van woningverwarming in Vlaanderen in 2015 te berekenen hebben we de volgende gegevens nodig:

- het aantal wooneenheden per energiedrager in Vlaanderen in 2015;
- het totale brandstofverbruik voor woningverwarming per energiedrager;
- verbruiksaandelen per energiedrager voor verschillende installatietypes (onderverdeeld naar leeftijdsklasse) en houttypes, rekening houdend met de rendementen van de verschillende verwarmingstoestellen;
- emissiefactoren voor de verschillende installatietypes, brandstoffen en leeftijdsklassen.

De bepaling van deze gegevens beschrijven we hieronder afzonderlijk in de diverse subparagrafen.

3.3.1 Aantal wooneenheden per energiedrager

Het aantal wooneenheden per energiedrager dat gebruikt is in deze studie, is voor het grootste deel afkomstig uit VITO (2017a). Omdat VITO (2017a) geen aantallen wooneenheden bevat voor wat betreft het gebruik van elektriciteitsverbruikende warmtetechnieken, zijn er aanvullende berekeningen uitgevoerd.

Het aantal wooneenheden dat in 2015 iets anders gebruikt dan fossiele brandstof of hout voor woningverwarming hebben we op basis van VITO (2017a) gelijkgesteld aan 236.724, ofwel 8,1% van het totale aantal wooneenheden in 2015 van 2.920.045⁹. In 2017 waren er 23.987 *warmtepompen* in Vlaamse woonhuizen, en in 2014 waren er 13.327¹⁰. Door middel van interpolatie komen we uit op ca. 17.000 warmtepompen in 2015. De verwachte aantallen warmtepompen per jaar in het Energieplan Vlaanderen laten een verhouding tussen bodemwarmtepomp, luchtwarmtepomp en hybride warmtepomp van 1:1:3 zien. Deze verhouding hebben we toegepast op het aantal van 17.000, wat resulteert in 3.400 bodemwarmtepompen, 3.400 luchtwarmtepompen en 10.200 hybride warmtepompen. Voor het resterende aantal wooneenheden van 219.724 wooneenheden (236.724 minus 17.000) nemen we aan dat 95% *weerstandsverwarming* heeft en 5% is aangesloten op een *warmtenet*. We baseren dit op het feit dat in 2014 12% van de Vlaamse gezinnen elektrische verwarming als hoofdverwarming had (VREG, 2014)¹¹. Het is niet bekend hoeveel huishoudens warmte betrekken van een warmtenet¹², maar in totaal wordt er jaarlijks 560 GWh warmte geleverd aan afnemers (Vlaamse Regering, 2018).

In 2015 werd in Vlaanderen 12,6 PJ hout verbruikt voor woningverwarming (VITO, 2017b). Het gemiddelde houtverbruik in een bijverwarmingsinstallatie is 49,1% van het gemiddeld houtverbruik in een hoofdverwarmingsinstallatie (gebaseerd op VITO (2011)¹³). Rekening houdend met het feit dat 45.434 Vlaamse wooneenheden in 2015 hout gebruikten voor hoofdverwarming, tegenover 558.998 woonheden voor

⁹ Dit aantal is het totale aantal wooneenheden in Vlaanderen in 2015 minus de som van het aantal wooneenheden dat een fossiele brandstof of hout als hoofdverwarming gebruikt (VITO, 2017a).

¹⁰ [Recordaantal nieuwe warmtepompen in Vlaamse huizen](#)

¹¹ Dit omvat ook accumulatieverwarming (weerstandsverwarming in combinatie met warmteopslag), wat jarenlang is gepromoot door de overheid. [Mega-Turteltaks in sociale woonwijk](#)

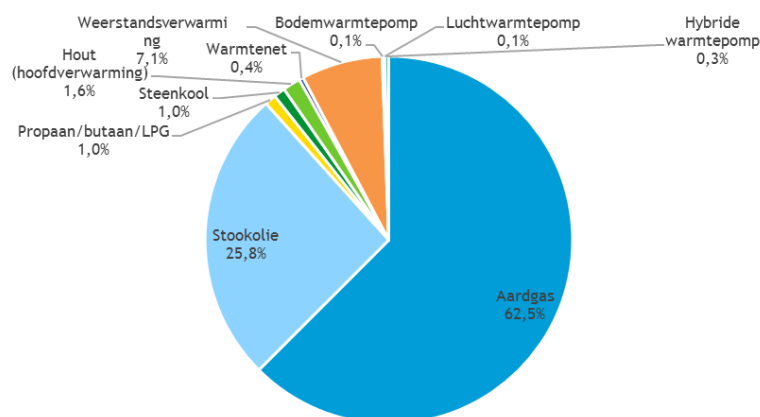
¹² Kaat Jaspers, VITO, email-correspondentie d.d. 22 augustus 2018.

¹³ Dit is berekend op basis van een gemiddeld verbruik bij hoofdverwarming van 63.740 MJ per jaar, en een gemiddeld verbruik bij bijverwarming van 31.275 MJ per jaar (VITO, 2011).

bijverwarming (VITO, 2017a), kan worden berekend dat 10,8 PJ hout voor *bijverwarming* wordt gebruikt en 1,8 PJ hout voor hoofdverwarming.

Het aantal wooneenheden per energiedrager wordt weergegeven in figuur 11. Hieruit blijkt dat meer dan de helft (62,5%) van het aantal wooneenheden in 2015 gebruik maakt van aardgas als brandstof. Ook het aantal wooneenheden dat verwarmt met stookolie is relatief groot (25,8%). De overige technieken beslaan slechts iets meer dan 10% waarbij weerstandsverwarming de belangrijkste techniek is op dit moment (7,1%). Slechts 1,6% van de huishoudens gebruikt hout als hoofdverwarming.

figuur 11: aandelen energiedragers/warmtechnieken in totaal aantal wooneenheden voor hoofdverwarming in Vlaamse huishoudens in 2015



Toch is dat niet het hele verhaal voor houtverbranding, omdat houtverbranding vooral ook wordt gebruikt als bijverwarming. Tabel 11 geeft het aantal wooneenheden en het totale brandstofverbruik per energiedrager en het percentage wooneenheden. Hieruit blijkt dat 19% van de wooneenheden hout verbruikt als bijverwarming. 86% van het totale houtverbruik wordt gebruikt voor bijverwarming: dit is equivalent aan 6,6% van het totale energieverbruik voor woningverwarming.

tabel 11: aantal wooneenheden en totaal verbruik per energiedrager voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015

| Energiedragers/warmtechnieken | Aantal wooneenheden | Totaal brandstofverbruik (PJ) | Percentage wooneenheden |
|--|---------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Aardgas [^] | 1.825.308 | 85,1 | 62,5% |
| Stookolie [^] | 754.179 | 57,7 | 25,8% |
| Propaan/butaan/LPG [^] | 29.200 | 2,1 | 1,0% |
| Steenkool [^] | 29.200 | 1,5 | 1,0% |
| Hout (hoofdverwarming) [^] | 45.434 | 1,79* | 1,6% |
| Hout (bijverwarming) [^] | 558.998 | 10,8* | 19,1% |
| Elektriciteit - warmtenet* | 10.986 | 0,01 | 0,4% |
| Elektriciteit - weerstandsverwarming * | 208.738 | 4,38 | 7,1% |
| Elektriciteit - bodemwarmtepomp* | 3.400 | 0,01 | 0,1% |
| Elektriciteit - luchtwarmtepomp* | 3.400 | 0,02 | 0,1% |
| Elektriciteit - hybride warmtepomp* | 10.200 | 0,06 | 0,3% |
| Aardgas - hybride warmtepomp* | | 0,29 | |
| Totaal hoofdverwarming | 2.920.045 | 164 | |

[^]: VITO (2017a) voor wooneenheden en VITO (2017b) voor brandstofverbruik.

*: Eigen berekeningen. Totalen betreft de totale hoofdverwarming en is de som van alle energiedragers/warmtechnieken minus hout (bijverwarming).

3.3.2 Totaal verbruik per energiedrager

Het totale brandstofverbruik per energiedrager (PJ) hebben we gebaseerd op de Energiebalans Vlaanderen 1990-2016, hier kortweg ‘Energiebalans’, waarin totaalwaarden staan voor de Vlaamse huishoudens (VITO, 2017b). We nemen aan dat het totale biomassaverbruik door huishoudens volledig uit houtverbranding bestaat, iets dat wordt bevestigd door VITO (2011). Het totale brandstofverbruik per energiedrager in petajoule staat in tabel 11. De totale verbruikswaarden voor de elektriciteitsverbruikende installaties (warmtenet, weerstandsverwarming, bodemwarmtepomp, luchtwarmtepomp en hybride warmtepomp) zijn ingeschat¹⁴. Dit is gedaan op basis van het warmtegebruik per huishouden en de rendementen van installaties. Een goed geïsoleerd huis heeft maar 600 m³ gas per jaar nodig voor verwarming¹⁵. Uitgaande van 9,77 kWh/m³ aardgas (gerekend met de bovenste verbrandingswaarde)¹⁶ komt dit neer op 21 GJ per jaar (5.862 kWh).

Deze 21 GJ per huishouden is als startpunt genomen voor berekening van het totale verbruik voor alle elektriciteitsverbruikende installaties, in overweging nemend dat woningen goed geïsoleerd moeten zijn om deze installaties te kunnen gebruiken (CE Delft, 2017b). Het totale warmteverbruik per elektriciteitsverbruikende installatie is berekend door het warmteverbruik per huishouden (21 GJ) te vermenigvuldigen met het aantal wooneenheden per elektriciteitsverbruikende installatie (zie tabel 12). Het totale brandstofverbruik per elektriciteitsverbruikende installatie kan vervolgens worden verkregen door het totale warmteverbruik per installatie te vermenigvuldigen met het installatiespecifieke rendement. De gehanteerde (inverse) rendementen staan in tabel 12. Dit zijn door ons opgevat als zogeheten ‘productierendementen’, zoals in de bewoording van VITO (2017a, zie ook bijlage 5). Voor wat betreft de hybride warmtepomp nemen we aan dat deze uit een luchtwarmtepomp en een CV-ketel op aardgas bestaat, dat de helft van de warmte door de warmtepomp wordt geleverd, en dat de CV-ketel een rendement van 88% heeft (CE Delft, 2017b; VITO, 2017a). Voor het warmtenet is het rendement gebaseerd op de elektriciteit die nodig is om aard- of restwarmte te leveren. Bij de bepaling van het rendement van een warmtenet is geen rekening gehouden met een zogeheten ‘dervingsfactor’: rendementsverliezen die optreden bij de warmte leverende installatie.¹⁷

tabel 12: inverse rendementen van elektriciteitsverbruikende installaties (CE Delft, 2017b)

| Installatie | Invers rendement (GJ elektriciteit per GJ warmte) |
|----------------------|---|
| Warmtenet | 0,05 |
| Weerstandsverwarming | 1,0 |
| Bodemwarmtepomp | 0,2 |
| Luchtwarmtepomp | 0,25 |
| Hybride warmtepomp | 0,25 |

We gaan ervan uit dat de elektriciteitverbruikende verwarmingstechnieken worden ingezet in een woning als centraal verwarmingssysteem met meerdere radiatoren. Om de rendementen vergelijkbaar te maken met VITO (2017a) moeten hierbij tevens dan het verlies door het regelrendement, afgifterendement en

¹⁴ De Energiebalans geeft wel het totale elektriciteitsverbruik van huishoudens, maar dit omvat ook het verbruik voor verlichting en elektrische apparatuur. Deze cijfers konden daarom niet goed gebruikt worden om het verbruik van elektriciteit voor verwarming in te schatten.

¹⁵ [Isoleren en besparen](#)

¹⁶ [Omrekening MMBTU naar kubieke meter aardgas](#)

¹⁷ Hiermee is geen rekening gehouden omdat deze dervingsfactor per restwarmteleverende installatie kan verschillen (en ook gelijk aan nul kan zijn).

distributierendement worden meegenomen. Deze rendementen zijn elk verondersteld op 95%, gelijk aan deze rendementen bij een centraal gasgestookte verwarmingsketel, zoals bepaald in VITO (2017a).

3.3.3 Toedeling energieverbruik aan de verwarmingstoestellen

Per energiedrager hebben we een verdere opsplitsing gedaan naar het type installatie waarin de energiedrager wordt verstoekt. Deze analyse is gebaseerd op VITO (2017a). De digitale bijlage geeft het aantal wooneenheden weer waar de combinaties van installatietypes, bouwjaren, en houttypes optellen tot het totale brandstofverbruik per energiedrager.

Eerst hebben het aantal wooneenheden per energiedrager per installatietype-bouwjaar-klasse-houttype-combinatie (hier kortweg 'combinatie') berekend. Dit hebben we gedaan door het totale aantal wooneenheden per energiedrager te vermenigvuldigen met de *percentages wooneenheden per installatietype* (centraal/decentraal, condenserend/niet-condenserend, < 70 kW/> 70 kW, openhaard/cassette/houtkachel/speksteen- of tegelkachel/ketel), de *percentages installaties die in een bepaalde bouwjaar-klasse vallen*, en de *percentages installaties die een bepaald houttype gebruiken* (briketten, houtkrullen, pellets, snoeihout, stukhout, houtafval). Hierbij is aangenomen dat er geen correlatie is tussen houtinstallatietype, houttype en bouwjaar-klasse.

De bronnen die zijn gebruikt zijn als volgt weer te geven:

- De *percentages wooneenheden per installatietype* komen uit VITO (2017a) met een onderverdeling voor bijverwarming uit Vito (2011) en staan in tabel 13.
- De *percentages installaties die in een bepaalde bouwjaar-klasse vallen* zijn overgenomen van Verbeeck en Ceulemans (2015a), waarbij we aannemen dat de bouwjaar-klasseverdeling in 2012 zoals gedocumenteerd in deze bron ook geldig is voor 2015. Deze staan in tabel 14.¹⁸
- De *percentages installaties die een bepaald houttype gebruiken* komen uit VITO (2011), en staan in tabel 15.
- VITO (2011) maakt geen onderscheid tussen verontreinigd¹⁹ en niet-verontreinigd behandeld afvalhout. We nemen aan dat al het behandelde afvalhout niet-verontreinigd is.

Bij de toedeling van het totale energieverbruik per energiedrager in Vlaanderen in 2015, zoals gegeven door VITO (2017b), moet rekening worden gehouden met de installatierendementen van de verschillende installatietypen, omdat een installatie met een lager rendement een hoger energieverbruik per GJ geleverde warmte heeft. Door aan te nemen dat de warmtevraag per huishouden per energiedrager gelijk is (dus één waarde voor aardgas, één voor stookolie, etc.) kunnen we het aantal wooneenheden per combinatie corrigeren op basis van de installatierendementen, gebruikmakend van de formule:

$$V_j = \sum_{i,b,t,h} D_b * \left(\frac{1}{R_{i,b,t,h}} \right) * Q_{i,b,t}$$

¹⁸ We hebben één aanpassing gedaan aan de verdeling uit Verbeeck en Ceulemans (2015a): Het percentage houtstookinstallaties ouder dan 2000 is verlaagd met 5% en het percentage houtstookinstallaties met bouwjaar 2014-2016 is verhoogd met 5%. Omdat Verbeeck en Ceulemans (2015a) cijfers uit 2012 bevatten, komt daarin niet naar voren dat in de periode 2014-2016 houtstookinstallaties zijn vervangen en met deze aanname is de invloed van de vervangingsgraad in 2014 en 2015 (2,5% per jaar) meegenomen.

¹⁹ Verontreinigd behandeld afvalhout is hout dat is geïmpregneerd met houtverduurzamingsmiddelen, of geveerd, gelakt of verlijmd hout, waarbij er verontreinigende stoffen aan het hout zijn toegevoegd.



Waarbij V_j het totale energieverbruik in Vlaanderen van energiedrager b is, D is het standaardjaarverbruik van warmte van een wooneenheid die energiedrager b gebruikt, R is het rendement van de combinatie (i, b, t, h waarbij i het installatietype is, t de leeftijdsklasse en h het houttype voor b =hout) $Q_{i,b,t}$ is het aantal wooneenheden dat deze combinatie van brandstoffen, leeftijdsklassen en installatietypen gebruikt.

Voor gas, stookolie, steenkolen en propaan/butaan/LPG zijn de rendementen van de installaties reeds meegenomen in de cijfers van VITO (2017a) en deze hebben we overgenomen (zie tabel 16). Voor hout is dit niet het geval. Daarom is er voor hout een additionele inschatting gemaakt van de rendementen van de installaties in bijlage 5.

Voor de bepaling van de verbruiksaandelen voor bijverwarming is de totale hoeveelheid hout gebruikt voor bijverwarming van 10,8 PJ gealloceerd aan de 558.998 wooneenheden met bijverwarming, waarbij een andere verdeling van houtinstallatietypen is gebruikt dan bij hoofdverwarming (VITO, 2011). Zie tabel 13. We hebben hierbij aangenomen dat de verdeling van houttypes, verdeling van bouwjaarklassen en installatierendementen voor bijverwarming gelijk zijn aan die van hoofdverwarming.

tabel 13: percentages wooneenheden per installatietype voor alle energiedragers (VITO, 2011; VITO, 2017a)

| Brandstof | Centraal/decentraal, type houtinstallatie | Condenserend/niet-condenserend | Vermogen | Aandeel per energiedrager |
|--|---|--------------------------------|----------|---------------------------|
| Aardgas [^] | Centraal | Condenserend | < 70 kW | 25,0% |
| | Centraal | Condenserend | > 70 kW | 4,0% |
| | Centraal | Niet-condenserend | < 70 kW | 48,0% |
| | Centraal | Niet-condenserend | > 70 kW | 7,0% |
| | Decentraal | - | - | 16,0% |
| Stookolie [^] | Centraal | Condenserend | < 70 kW | 4,8% |
| | Centraal | Condenserend | > 70 kW | 1,8% |
| | Centraal | Niet-condenserend | < 70 kW | 65,8% |
| | Centraal | Niet-condenserend | > 70 kW | 20,8% |
| | Decentraal | - | - | 6,8% |
| Propaan/butaan/LPG [^] | Centraal | - | - | 84,0% |
| | Decentraal | - | - | 16,0% |
| Steenkool [^] | Centraal | - | - | 0,0% |
| | Decentraal | - | - | 100,0% |
| Hout (hoofdverwarming/bijverwarming)* | Open haard | - | - | 0%/15% |
| | Cassette | - | - | 15%/41% |
| | Kachel | - | - | 46%/38% |
| | Speksteen/tegelkachel | - | - | 20%/6% |
| | Ketel | - | - | 20%/0% |

[^]: VITO (2017a)

*: VITO (2011)

Het eerste getal bij hout betreft het aandeel hoofdverwarming, het tweede getal het aandeel bijverwarming.



tabel 14: percentages installaties per bouwjaarklasse (Verbeeck en Ceulemans, 2015a)

| Bouwjaarklasse | Olie | Gas | Hout |
|-----------------------|------|-----|------|
| Olie & gas | | | |
| jaren'70 | 22% | 6% | |
| jaren'80 | 18% | 9% | |
| jaren'90 | 33% | 23% | |
| 2000-2004 | 13% | 23% | |
| 2005-2009 | 8% | 22% | |
| 2010-2011 | 3% | 8% | |
| Vanaf 2012 | 3% | 8% | |
| Hout | | | |
| < 2000 | | | 56%* |
| 2000-2013 | | | 39% |
| 2014-2016 | | | 5%* |

*: Eigen aanpassing t.o.v. Verbeeck en Ceulemans (2015a): vermindering van perc. < 2000 met 5% en ophoging van perc. 2014-2016 met 5%.

tabel 15: percentages houtinstallaties per houttype (VITO, 2011)

| Houttype | Cassette | Kachel | Ketel | Open haard | Speksteen-/tegelkachel |
|--|----------|--------|-------|------------|------------------------|
| Briketten | 1,6% | 1,0% | 1,6% | 4,9% | 0,4% |
| Houtkrullen | 0,1% | 0,4% | 0,0% | 0,7% | 0,0% |
| Pellets | 0,8% | 7,6% | 3,7% | 1,9% | 1,8% |
| Snoeihout | 20,7% | 22,1% | 0,5% | 25,7% | 19,1% |
| Stukhout | 61,9% | 53,1% | 92,5% | 51,4% | 51,6% |
| Houtafval - onbehandeld | 13,3% | 15,2% | 1,6% | 10,0% | 26,2% |
| Houtafval - niet-verontreinigd behandeld | 1,6% | 0,7% | 0,0% | 5,3% | 1,0% |

tabel 16: installatierendementen van verwarmingsinstallaties per energiedrager

| Brandstof | Centraal/ decentraal | Vermogen | Condenserend /niet- condenserend | Bouwjaar- klasse | Installatie- rendement |
|------------------------|-------------------------|----------|--|---------------------|---------------------------|
| Aardgas [^] | Centraal | < 70 kW | Condenserend | | 88% |
| | | | Niet-condenserend | Jaren'70 | 56% |
| | | Jaren'80 | | 61% | |
| | | Jaren'90 | | 70% | |
| | | Jaren'00 | | 76% | |
| | | > 70 kW | Condenserend | | 84% |
| | Niet-condenserend | | | 67% | |
| Decentraal | | | | 66% | |
| Stookolie [^] | Centraal | < 70 kW | Condenserend | | 85% |
| | | | Niet-condenserend | Jaren'70 | 56% |
| | | Jaren'80 | | 63% | |
| | | Jaren'90 | | 70% | |
| | | Jaren'00 | | 75% | |
| | | > 70 kW | Condenserend | | 80% |
| | Niet-condenserend | | | 67% | |
| Decentraal | | | | 49% | |
| LPG [^] | Centraal | | | | 70% |
| | Decentraal | | | | 66% |
| Steenkool [^] | Centraal | | | | 57% |
| | Decentraal | | | | 42% |
| Hout* [*] | Open haard | | | | 10% |
| | Klassieke houtkachel | | | | 30% |
| | Kachel 2000-2013 | | | | 47% |
| | Moderne houtkachel | | | | 53% |
| | Ketel | | | | 75% |
| | Cassette | | | | 43% |
| | Speksteenkachel | | | | 58% |

[^]: VITO (2017a)

*: Biomass Procede (2018) en eigen berekeningen (zie bijlage 5)

Tabel D1 in de digitale bijlage geeft de berekende energieverbruiken per installatietype, leeftijdsklasse en brandstofsoort weer.

3.3.4 Emissiefactoren

De emissiefactoren voor residentiële verwarmingsinstallaties op aardgas, stookolie, hout, steenkool en propaan/butaan/LPG zijn aangeleverd door VMM voor een set van 22 emissiestoffen waarvan de milieuschadeprijzen worden berekend in deze studie (VMM, 2017a). Deze emissiefactoren geven aan hoeveel massa emissiestof er wordt geëmitteerd per energie-eenheid verbrande brandstof (EMEP/EEA, 2017b), en zijn omgerekend naar dezelfde eenheid (kg/PJ).

Bij elektriciteitverbruikende warmtetechnieken zijn er geen directe emissies. Voor aardgas dat wordt verbrand in huishoudens met een hybride warmtepomp gebruiken we de emissiefactoren van de centrale condenserende aardgasketel kleiner dan 70 kW. De emissiefactoren van hout worden zowel toegepast op hoofdverwarming als op bijverwarming. Verdere toelichting op de bepaling van de emissiefactoren is te vinden in bijlage 2.



Bij het gebruik van emissiefactoren dient men zich ervan te vergewissen dat dit gemiddelde waarden zijn voor een bepaalde generatie van toestellen. Er zit nog heel wat variatie in toestellen die voldoen aan de productnormering: sommige toestellen zullen beduidend meer uitstoten in de praktijk dan in lab-omstandigheden, andere toestellen blijven ook in werkelijke omstandigheden mogelijk ver onder normen. Voor dergelijke onzekerheden kan niet gecorrigeerd worden in het kader van dit onderzoek omdat dit veldwerk betreft en het uitvoeren van daadwerkelijke metingen. Het gebruik van emissiefactoren betekent dat we ons baseren op de gemiddelde uitstootwaarden zoals die in de literatuur zijn gerapporteerd.

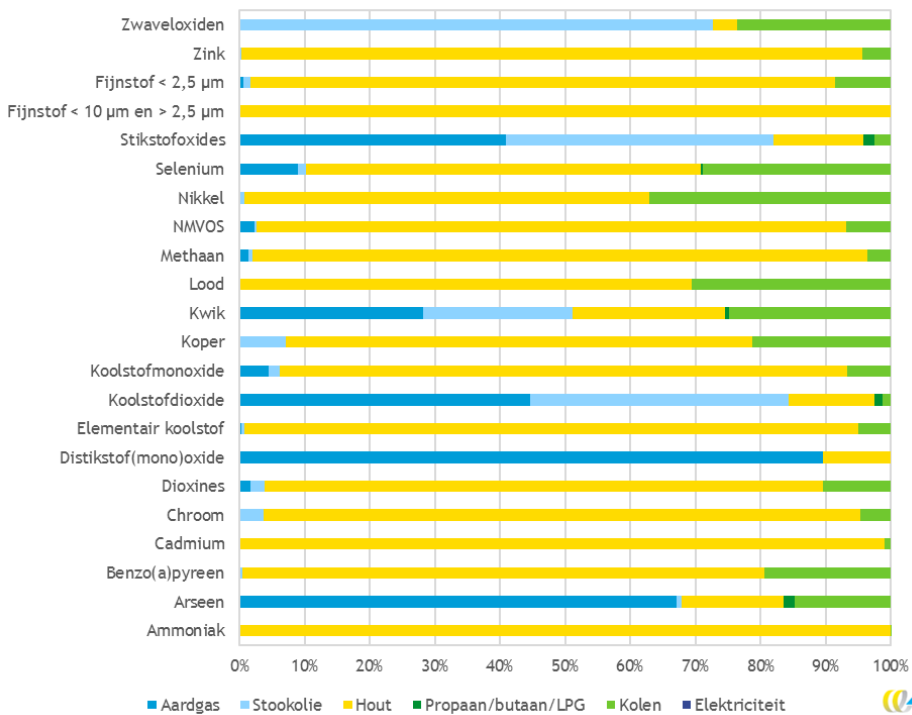
3.4 Resultaten: directe emissies

3.4.1 Emissies voor 2015

De emissies voor 2015 (kg) worden berekend door de verbruiksaandelen van energiedragers (PJ) te vermenigvuldigen met de emissiefactoren (kg/PJ). Dit levert een grote lijst op met emissies per energiedrager en per installatietype-bouwjaar-klasse-houttype-combinatie. De totale uitstoot per energiedrager is verkregen door de emissiewaarden voor dezelfde energiedrager bij elkaar op te tellen. In geval van hout worden de emissiewaarden van hoofd- en bijverwarming ook bij elkaar opgeteld. Tot slot levert het sommeren over de energiedragers de totale emissies van woningverwarming in Vlaanderen in 2015 op.

In tabel 17 staan de berekende directe emissies, weergegeven per energiedrager en totaal. Figuur 12 bevat een grafische weergave van de aandelen van energiedragers in de directe emissies. De directe emissies van fossiele brandstoffen en hout zijn de emissies die vrijkomen bij verbranding; de directe emissies van elektriciteit zijn de emissies die vrijkomen bij de elektriciteitsproductie.

figuur 12: aandeel van energiedragers in directe emissies van woningverwarming in Vlaanderen in 2015



Alle brandstoffen dragen bij aan CO₂, maar de bijdrage van aardgas en stookolie is in relatieve zin het grootst bij deze emissiestof. Hetzelfde geldt voor NO_x. Opvallend is dat houtstook verantwoordelijk is voor meer dan 90% van de fijn stofemissies door woningverwarming in Vlaanderen. Voor de meeste andere emissiestoffen draagt hout ook het meeste bij aan de uitstoot, ondanks het relatieve lage aandeel van hout in het totale energieverbruik (7,7% van het totale verbruik van energiedragers in huishoudens). Uitzonderingen op de dominante emissiebijdrage van hout zijn arseen, N₂O, CO₂, kwik, NO_x en SO_x.

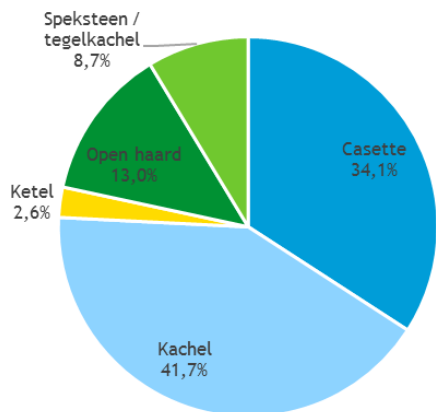
Directe emissies per houtstookinstallatietype

De directe emissies van het gebruik van hout als brandstof voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 zijn uitgesplitst naar de verschillende houtstookinstallatietypes in tabel 18. Als we kijken naar de relatieve bijdrage van de verschillende houtstookinstallatietypes, dan zien we dat cassettes en kachels elk verantwoordelijk zijn voor ongeveer een derde van de emissies. Dit is terug te voeren op de aandelen cassettes en kachels van het totaal aantal houtstookinstallaties in Vlaamse huishoudens, die eveneens elk tenminste een derde bedragen.²⁰ In

²⁰ Aandelen van houtinstallatietypes in Vlaanderen in 2015 als percentage van het totale aantal houtinstallaties (hoofd- plus bijverwarming): cassette 39,4%, kachel 38,5%, ketel 1,5%, open haard 14,0%; speksteen/tegelskachel 6,6%.



figuur 13: gemiddelde bijdrage van houtinstallatietypes aan directe emissies van PM_{2,5} door houtverbranding voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 (percentages)



3.4.2 CO₂-emissies van houtstook

In bovenstaande cijfers is de CO₂-uitstoot van houtgestookte installaties meegenomen bij de bepaling van de emissies. Daar is discussie over mogelijk. Vaak wordt echter beredeneerd dat emissies van biomassa niet meetellen bij de CO₂-emissies omdat het hierbij gaat om verbranding van eerder opgeslagen koolstof. Dit is onder meer het geval in het Europese emissiehandelssysteem EU ETS waarbij biomassa meetelt met een emissiefactor van nul voor CO₂-uitstoot. Daar zijn ook wel argumenten tegen te maken, zowel voor houtafval als voor nieuw stukhout. In hoofdstuk 5 berekenen we het effect van het niet meenemen van de CO₂-emissies van houtstook op de milieuschadeposten.

Houtafval: geen cascadering

Het uitgangspunt van de Vlaamse regering is om voor houten producten een zo hoogwaardig mogelijke toepassing na te streven, na afdanking (OVAM, 2018). Dit is het principe van cascadering, ofwel prioritering. De Vlaamse Overheid omschrijft dit als volgt: "Uitgangspunt is dat zowel biomassa uit primaire productie als uit rest- en afvalstromen, in de eerste plaats moeten instaan voor het garanderen van de voedselzekerheid (voeding en diervoeder), in de tweede plaats voor het gebruik als grondstof en in de derde plaats voor het gebruik als energiebron. Bij het gebruik van biomassa moet steeds rekening gehouden worden met de hele levenscyclus." (Vlaamse overheid, 2013).

Echter, de stook van stukhout en van houtpellets afkomstig van primair hout voldoen niet aan dit uitgangspunt. Ook bij resthout (takken, houtkrullen) is er een reëel risico dat deze direct voor bio-energie wordt gebruikt in plaats van dat het in producten wordt ingezet. Daarom is er ook een argument te maken om de CO₂-emissies wel mee te nemen bij de bepaling van de directe emissies.

Koolstofschuld (carbon debt)

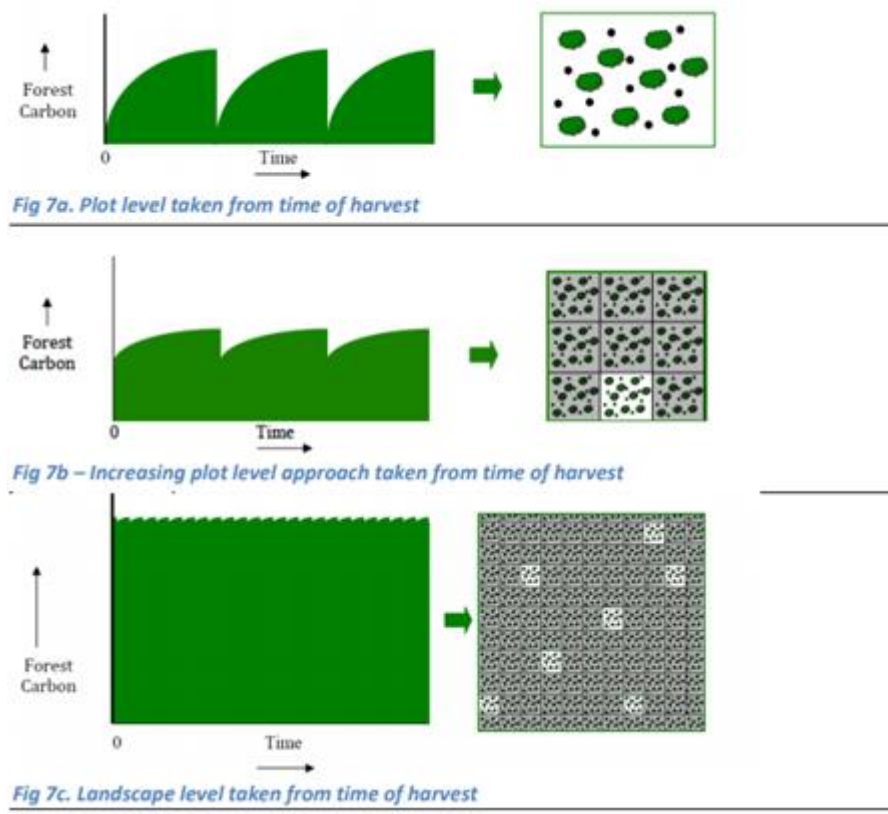
De term koolstofschuld staat internationaal bekend als *carbon debt*. Als er op grote schaal hout wordt verstoekt (als vervanging van fossiele brandstoffen) dan zal er een additionele vraag naar hout ontstaan. De extra houtkap die dit teweegbrengt zorgt voor een verlaging van het vastgelegde koolstof in het (productie)bos en in de bodem. Slechts als dit hout wordt vervangen — door aanplant en groei van een



nieuwe boom — wordt afname van vastgelegde koolstof weer aangevuld. Het hout is in theorie CO₂-neutraal — het heeft tijdens zijn groei CO₂ opgenomen. Maar als de houtkap langere tijd leidt tot een vermindering van de koolstof vastgelegd in het bos, dan is er alsnog een reële netto CO₂-emissie die bijdraagt aan het klimaatprobleem.

Of er een (langdurige) koolstofschuld plaatsvindt hangt van de schaalgrootte, groeitempo van de boom en het bosbeheer. AEBIOM et al., (2013) laat zien dat op 'plotniveau' de afname van koolstof in het bos aanzienlijk kan zijn, maar dat bij een bestaand beheerd bos op landschapniveau de afname van koolstof relatief kleiner kan zijn. Dit wordt toegelicht in figuur 14. Situatie 7a beschouwt daarin één *plot*: er wordt geogst, opnieuw geplant en opnieuw geogst aan het einde van de rotatieperiode. 7b beschouwt een bosperceel waarbij jaarlijks uit opeenvolgende *plots* wordt geogst, tot de rotatieperiode is bereikt. 7c representeert een bestaand (oud) bos waarbij geogste en opnieuw beplante percelen elkaar afwisselen zodanig dat het totale koolstof in het bos nagenoeg wordt behouden.

figuur 14: tijdsverloop en koolstofgehalte in bos, bij diverse schaalgrootte en mate van boskap (AEBIOM et al., 2013)



Er is vooral een risico op *carbon debt* bij stook van hout dat niet afkomstig is van rest- of afvalhout. Het speelt geen rol bij het gebruik van afvalhout, resthout (takken en dergelijke) en hout van bomen die om zijn gevallen uit een bestaand bos of tuin. Het risico op carbon debt wordt dus groter als de vraag naar hout voor energie toeneemt. Als aan het cascaderingsprincipe wordt voldaan neemt het risico op carbon debt af.



De indicatie 'market for' geeft aan dat transport naar de consument is inbegrepen. Er is gebruik gemaakt van de best passende regio, naar beschikbaarheid. België {BE} indien beschikbaar, anders 'region Europe' {RER} of Zwitserland²¹ {CH}. Een enkele keer is slechts globale informatie beschikbaar: {GLO} en 'rest of world' {RoW}.

Tabel 19 geeft inzicht in de gehanteerde proceskaarten, verbrandingswaarden en bronnen gehanteerd bij deze berekeningen.

tabel 19: gehanteerde achtergrondgegevens en bronnen per brandstof voor berekening indirecte emissies per MJ brandstof

| Brandstoftype | Geselecteerde proceskaart Ecoinvent | Opm. | Verbrandingswaarde (onderwaarde) | Bron |
|--|---|---------------------------|----------------------------------|---------|
| Aardgas | Natural gas, high pressure {BE} market for | N.v.t. | 31,65 MJ/m ³ | [1] |
| Stookolie, lichte | Light fuel oil {RER} market for | N.v.t. | 40,6 MJ/kg | [2] |
| Propana/butaan/LPG | Liquefied petroleum gas {RoW} market for | N.v.t. | 45,5 MJ/kg | [2] LPG |
| Steenkool | Hard coal briquettes {GLO} market for | N.v.t. | 1 MJ/MJ | [2] |
| Houtkrullen, hardhout | Shaving, hardwood, measured as dry mass {CH} planning, beam, hardwood, air dried | | 15,4 MJ/kg | [2] |
| Houtkrullen, zachthout | Shaving, softwood, measured as dry mass {CH} planning, beam, softwood, air dried | | | |
| Geperst hout: pellets/briketten, lokaal | Wood pellet, measured as dry mass {RER} market for wood pellet | N.v.t. | | |
| Geperst hout: pellets/briketten, Canada of Noord-Amerika | Wood pellet, measured as dry mass {RER} market for wood pellet | Transport toegevoegd (**) | | |
| Snoeihout | Bundle, energy wood, measured as dry mass {GLO} market for | N.v.t. | | |
| Stukhout, hardhout | Sawnwood, hardwood, raw, dried (u=20%) {RER} production | | | |
| Stukhout, zachthout | Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER} production | | | |
| Houtafval, Onbehandeld | Verwerking afvalhout tot brandstof | Eigen modellering (*) | | |
| Houtafval, Verontreinigd behandeld | Verwerking afvalhout tot brandstof | | | |
| Houtafval, Niet-verontreinigd behandeld | Verwerking afvalhout tot brandstof | | | |

Voetnoten bij de tabel:

* Eigen modellering van milieu-ingrepen voor ketenemissies afvalhout.

Het model omvat: Versnipperen van afvalhout: 2 tot 5 kWh elektriciteit per ton hout. Bron: http://ecp-biomass.eu/sites/ecp-biomass.eu/files/books/ECP%20TF%20Versnipperen_LG_HP_2nd.pdf; Transport naar verbrandingslocatie: 50 tot 200 km, met een middelgrote truck, Euro 5.

** Transport van houtpellets uit Canada of Noord-Amerika is bepaald met <https://sea-distances.org/> 3.156 zeemijl = 5.844 km. Afgerond naar 6.000 km, om ook transport per schip van binnenland (Ottawa) naar de kust (Quebec) op te nemen.

Bronnen:

[1] <https://nl.wikipedia.org/wiki/Verbrandingswarmte> .

[2] https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html. Hierin staat ook de onderwaarde van verbranding (lower heating value).

²¹ De Ecoinvent-database is opgezet in Zwitserland.

3.6 Emissiefactoren indirecte emissies

Tabel 20 en tabel 21 tonen de emissiefactoren van de indirecte emissies (ketenemissies) van de diverse energiedragers die zijn bepaald conform de methodiek in paragraaf 3.5. De emissiefactoren zijn uitgedrukt in kilogram per petajoule (kg/PJ) en kunnen daarom direct gekoppeld worden aan jaarlijks verbruik van de energiedrager in Vlaanderen en aan de milieuprijzen per kilogram emissie. We hebben ons hierbij beperkt tot de emissies die ook zijn meegenomen bij de bepaling van de directe emissies: ammoniak, arseen, benzo(a)pyreen, cadmium, chroom, dioxine, distikstof(mono)oxide, elementair koolstof, koolstofdioxide, koolstofmonoxide, koper, kwik, lood, methaan, NMVOS, nikkel, selenium, stikstofoxides, fijn stof (PM₁₀ en PM_{2,5}), zink en zwaveloxiden. Dit is uiteraard een beperkte set van de totale impacts van energiedragers waarbij ook impacts op landgebruik, radioactiviteit en biodiversiteit dienen te worden beschouwd. Deze overige impacts zijn echter niet gekwantificeerd in dit onderzoek. Dit is een belangrijke beperking bij de interpretatie van de indirecte emissies in dit onderzoek.

Emissiefactoren voor de beschouwde stoffen ten gevolge van indirecte emissies zijn bepaald door de Ecoinvent-proceskaarten van de energiedragers door te rekenen: alle emissies naar lucht worden bepaald, door de gehele voorketen heen. Bijvoorbeeld: CO₂-emissies uit de voorketen van aardgas komen voort uit gaswinning en -behandeling en elektriciteitsverbruik voor transport. Figuur 15 geeft een voorbeeld van een proceskaart voor aardgas: het diagram met daarin de CO₂-emissie per onderliggende ketenfase van aardgas.

De emissiefactoren van de indirecte emissies van elektriciteit zijn bepaald met behulp van analyses in SimaPro, gebruikmakend van de Ecoinvent-database. Voor 2015 is daarbij uitgegaan van de huidige elektriciteitsproductiemix van België, en voor 2030 voor de verwachte productiemix in dat jaar²². Zie bijlage 2 voor verdere toelichting.

Hier lichten we enkele resultaten toe:

- De indirecte emissies naar lucht komen veelal voort uit verbranding van fossiele brandstoffen voor productie en transport. Voor de winning en opwerking van de fossiele energiedragers is in de regel meer brandstof benodigd dan voor het zagen en bewerken van de houten energiedragers.
- De indirecte emissies voor geperst hout (pellets/briketten) uit Canada of Noord-Amerika zijn relatief hoog, in vergelijking met de andere houten energiedragers, vanwege de grote transportafstand naar Vlaanderen.
- Emissie van ammoniak komt voort uit de productie van biogas (dat wordt ingezet voor productie van elektriciteit) en bij steenkool van de explosieven die gebruikt worden bij de winning.
- Houtafval heeft over de gehele linie de laagste indirecte emissies. Dit komt omdat er slechts wat elektriciteit en transportbrandstof benodigd zijn om het houtafval gereed te maken voor verbranding. Het afval krijgt geen emissies voor de teelt toebedeeld; dit komt immers al toe aan de oorspronkelijke toepassing van het hout.

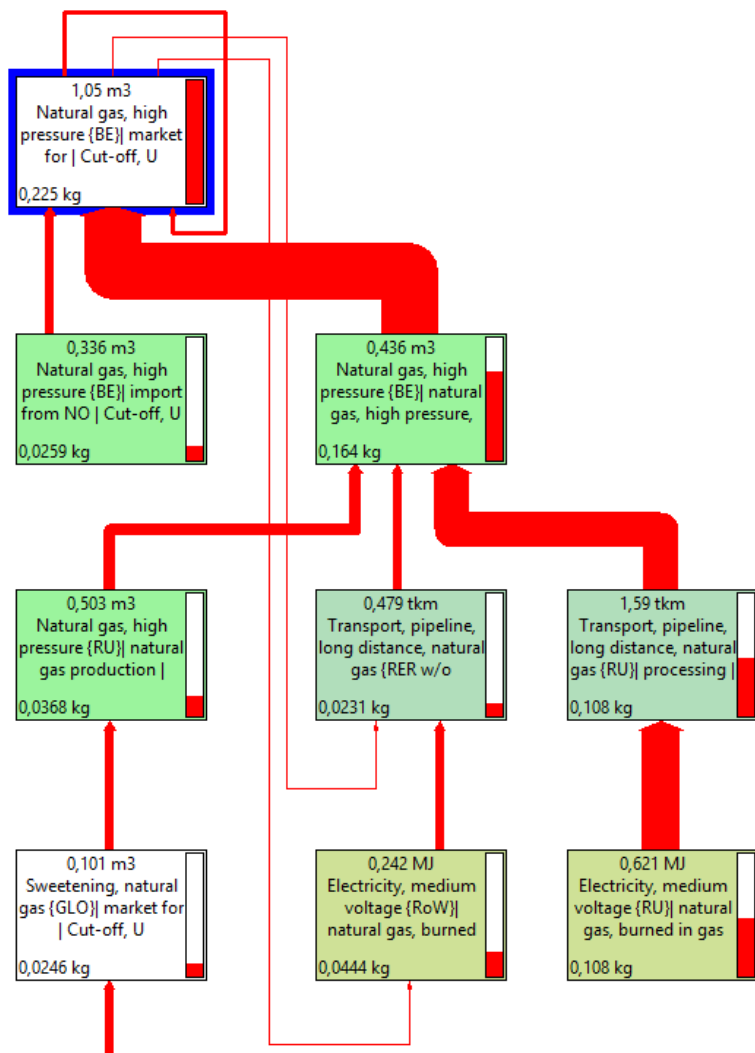
²² Van belang is het om te beseffen dat we bij deze analyse steeds uitgaan van de gemiddelde productiemix in Vlaanderen en niet van de marginale productiemix. Zonder een precies model van de elektriciteitsmarkt is het in deze studie voor ons niet mogelijk te bepalen wat de marginale unit is van productie in Vlaanderen. Wel kan men verwachten dat de marginale units meestal zullen bestaan uit gas- of kolengestookte eenheden en daarom vervuilender zullen zijn dan het gemiddelde. Bij de interpretatie van de waarden voor de elektriciteitsmarkt moet daarmee rekening worden gehouden in deze studie.

tabel 21: emissiefactoren van indirecte emissies (ketenemissies) van diverse houttypen als energiedrager in kilogram per PJ hout (Ecoinvent, 2018)

| Emissie, stofnaam | | Houtkrullen hardhout | Houtkrullen zachthout | Geperst hout (pellets/briketten), lokaal | Geperst hout (pellets/ briketten) Canada, Noord-Amerika | Snoeihout | Stukhout hardhout | Stukhout zachthout | Houtafval |
|--|----------------------|-------------------------|--------------------------|--|---|-----------|----------------------|-----------------------|-----------|
| Koolstofdioxide | CO ₂ | 2.740.462 | 3.405.203 | 7.262.890 | 11.534.838 | 4.099.002 | 8.448.692 | 9.166.888 | 1.612.139 |
| Methaan | CH ₄ | 4.002 | 5.035 | 20.849 | 25.686 | 5.347 | 17.359 | 17.188 | 1.539 |
| Lachgas | N ₂ O | 235 | 168 | 616 | 730 | 156 | 341 | 326 | 79 |
| Fijn stof < 2,5 µm | PM _{2,5} | 5.104 | 1.784 | 6.597 | 9.194 | 2.137 | 7.723 | 7.363 | 616 |
| Fijn stof 2,5-10 µm | PM _{2,5-10} | 1.326 | 1.394 | 1.972 | 3.976 | 1.345 | 3.342 | 3.253 | 628 |
| Stikstofoxiden | NO _x | 17.117 | 12.629 | 23.877 | 80.231 | 23.789 | 44.219 | 50.139 | 4.969 |
| Zwavel dioxide | SO ₂ | 4.847 | 5.865 | 21.048 | 74.013 | 9.423 | 18.693 | 20.675 | 2.385 |
| Ammoniak | NH ₃ | 300 | 371 | 2.325 | 2.824 | 161 | 582 | 553 | 48 |
| Vluchtige organische stoffen (niet-methaan) | NMVOS | 3,91E-08 | 3,91E-08 | 6,84E-08 | 7,01E-08 | 8,06E-08 | 1,41E-07 | 2,82E-07 | 3,92E-08 |
| Koolstofmonoxide | CO | 24.576 | 30.307 | 19.065 | 29.348 | 26.891 | 88.180 | 52.266 | 3.402 |
| Cadmium | Cd | 0,2 | 0,1 | 0,5 | 0,6 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 0,1 |
| Arsenicum | As | 0,4 | 0,4 | 1,5 | 2,0 | 0,5 | 1,1 | 1,3 | 0,1 |
| Lood | Pb | 4,9 | 4,5 | 6,7 | 7,5 | 4,1 | 9,5 | 8,4 | 2,6 |
| Kwik | Hg | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,1 | 0,29 | 0,34 | 0,03 |
| Nikkel | Ni | 1,5 | 1,5 | 4,2 | 26,3 | 3,0 | 4,7 | 5,4 | 0,64 |
| Chroom, algemeen | Cr | 4,1 | 6,0 | 9 | 10 | 5 | 10 | 13 | 0,6 |
| Chroom-VI | Cr-VI | 0,10 | 0,15 | 0,24 | 0,28 | 0,12 | 0,25 | 0,33 | 0,02 |
| Benzo(a)pyreen | B(a)P | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 0,06 |
| Koper | Cu | 21,3 | 22,6 | 19,0 | 19,9 | 20,5 | 44,4 | 33,5 | 16,0 |
| Selenium | Se | 0,1 | 0,1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Zink | Zn | 25,4 | 16,2 | 18,8 | 20,6 | 11,6 | 31,6 | 22,6 | 8,2 |
| Dioxine | PCDD-F | 2,18E-06 | 1,29E-06 | 2,27E-06 | 3,84E-06 | 1,04E-06 | 2,99E-06 | 2,94E-06 | 2,89E-07 |
| Koolstof | C | 1,58E-03 | 2,61E-03 | 2,01E-02 | 2,03E-02 | 5,02E-04 | 2,08E-03 | 2,20E-01 | 1,74E-04 |

////////////////////////////////////

figuur 15: voorbeeld van proceskaart: de indirecte CO₂-emissies afkomstig uit de voorketen van aardgas



3.7 Resultaten: omvang indirecte emissies woningverwarming Vlaanderen

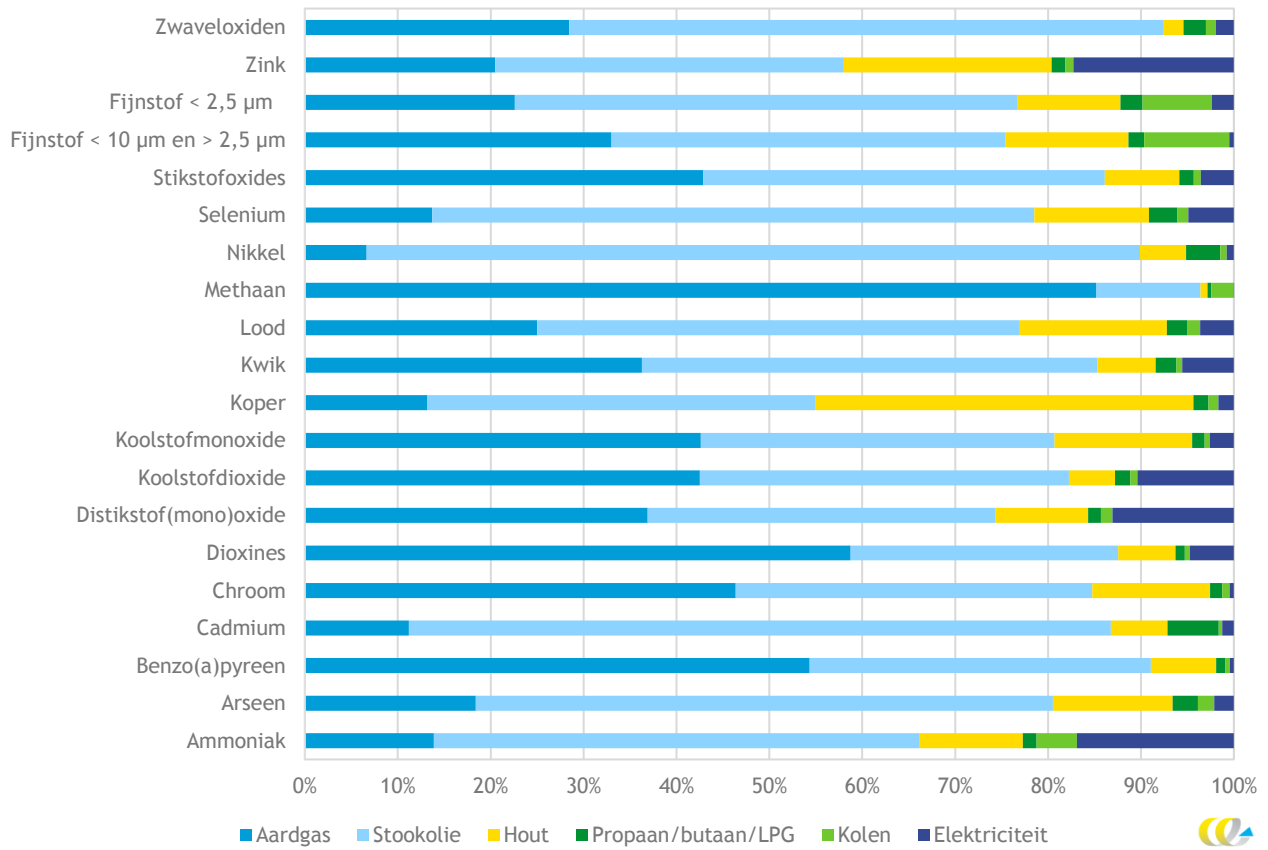
In tabel 22 staan de berekende indirecte emissies gerelateerd aan woningverwarming in Vlaanderen in 2015. Figuur 16 bevat een grafische weergave van de aandelen van energiedragers in de indirecte emissies. De verhouding van de indirecte emissies voor verschillende energiedragers is consistent over de emissie-stoffen heen, maar anders dan bij de directe emissies: Waar bij de directe emissies hout verantwoordelijk is voor het overgrote deel van de uitstoot, levert bij de indirecte emissies stookolie de grootste bijdrage, gevolgd door aardgas, en daarna pas hout.



tabel 22: indirecte emissies van woningverwarming in Vlaanderen in 2015 per energiedrager (kg)

| | Aardgas | Stookolie | Hout | Propan/ butaan/ LPG | Kolen | Elektriciteit | Totaal |
|--|-------------|-------------|------------|---------------------------|------------|---------------|---------------|
| Ammoniak | 7.601 | 28.619 | 6.086 | 806 | 2.378 | 9.244 | 54.733 |
| Arseen | 17,1 | 57,7 | 11,9 | 2,5 | 1,7 | 2,0 | 92,9 |
| Benzo(a)pyreen | 34,2 | 23,1 | 4,4 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 62,9 |
| Cadmium | 8,5 | 57,7 | 4,7 | 4,2 | 0,3 | 1,0 | 76,4 |
| Chroom | 418 | 346 | 114 | 12 | 7 | 4 | 902 |
| Dioxine | 0,00025 | 0,00012 | 0,00003 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00002 | 0,00042 |
| Distikstof(mono)oxide | 12.383 | 12.579 | 3.345 | 454 | 420 | 4.389 | 33.569 |
| Elementair koolstof | 0,08 | 0,10 | 1,61 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,80 |
| Koolstofdioxide | 731.031.344 | 682.427.478 | 85.285.828 | 28.455.277 | 13.309.284 | 178.344.637 | 1.718.853.849 |
| Koolstofmonoxide | 1.349.149 | 1.204.718 | 468.828 | 42.256 | 17.196 | 82.535 | 3.164.682 |
| Koper | 111 | 352 | 342 | 14 | 9 | 14 | 842 |
| Kwik | 17,1 | 23,1 | 2,9 | 1,1 | 0,3 | 2,6 | 47,1 |
| Lood | 128 | 265 | 81 | 11 | 7 | 19 | 512 |
| Methaan | 17.673.274 | 2.320.463 | 155.572 | 83.108 | 502.649 | 2.935 | 20.737.999 |
| NMVOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.616 | 1.616 |
| Nikkel | 68 | 854 | 51 | 38 | 7 | 8 | 1.026 |
| Selenium | 8,5 | 40,4 | 7,7 | 1,9 | 0,8 | 3,1 | 62,3 |
| Stikstofoxides | 2.415.710 | 2.431.593 | 451.278 | 88.374 | 42.560 | 200.472 | 5.629.987 |
| Fijn stof < 10 µm en > 2,5 µm (PM _{2,5-10}) | 73.956 | 94.974 | 29.698 | 3.791 | 20.531 | 1.146 | 224.096 |
| Fijn stof met diameter < 2,5 µm (PM _{2,5}) | 130.918 | 313.311 | 64.585 | 13.747 | 43.295 | 13.643 | 579.498 |
| Zink | 205 | 375 | 224 | 15 | 9 | 173 | 1.000 |
| Zwaveloxiden | 2.484.201 | 5.581.898 | 193.287 | 208.209 | 95.213 | 169.006 | 8.731.813 |

figuur 16: aandeel van energiedragers in indirecte emissies van woningverwarming in Vlaanderen in 2015²³



²³ Volgens de database zijn er nauwelijks indirecte emissies van NMVOS en elementair koolstof (>10% PM_{2,5}). Deze zijn daarom niet in de figuur opgenomen.



In tabel 23 worden de relatieve bijdrage van directe en indirecte emissies met elkaar vergeleken. De emissiestoffen zijn hier gerangschikt op aflopend aandeel van de directe emissies in de totale emissies. Deze vergelijking laat een wisselend beeld zien: Bij de helft van de emissiestoffen leveren de directe emissies de grootste bijdrage aan de totale emissies, en bij de andere helft van de emissiestoffen de indirecte emissies. Te zien is dat 86% van de CO₂-uitstoot van woningverwarming in Vlaanderen in 2015 afkomstig is van de verbranding van brandstoffen voor de woningverwarming. Bij PM_{2,5} is dit 93%, terwijl 55% van de PM_{2,5-10}-emissies gerelateerd zijn aan de productie en transport van de brandstoffen, en aan elektriciteitsproductie voor de elektriciteitsverbruikende warmtetechnieken.

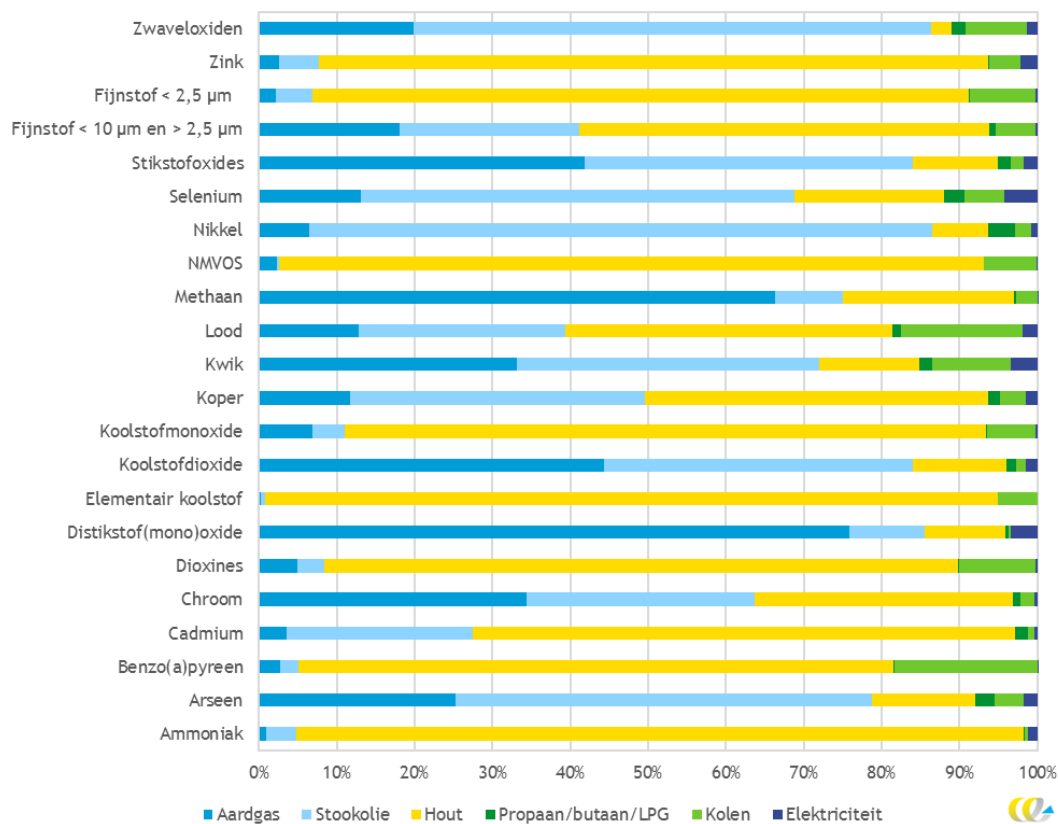
tabel 23: vergelijking directe emissies en indirecte emissies gerelateerd aan woningverwarming in Vlaanderen in 2015

| Emmissiestof | Directe emissies (kg) | Indirecte emissies (kg) | Aandeel directe emissies |
|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Elementair koolstof | 853.834 | 1,80 | 100% |
| NMVOS | 6.606.272 | 1.616 | 100% |
| Benzo(a)pyreen | 1.163 | 62,9 | 95% |
| Dioxines | 0,007 | 0,00042 | 94% |
| Koolstofmonoxide | 45.203.216 | 3.164.682 | 93% |
| Fijn stof < 2,5 µm | 7.848.258 | 579.498 | 93% |
| Ammoniak | 708.303 | 54.733 | 93% |
| Zink | 6.776 | 1.000 | 87% |
| Koolstofdioxide | 10.752.120.000 | 1.718.853.849 | 86% |
| Distikstof(mono)oxide | 95.408 | 33.569 | 74% |
| Cadmium | 165 | 76,4 | 68% |
| Stikstofoxides | 5.843.869 | 5.629.987 | 51% |
| Lood | 491 | 512 | 49% |
| Fijn stof < 10 µm en > 2,5 µm | 186.026 | 224.096 | 45% |
| Kwik | 30,2 | 47,1 | 39% |
| Zwaveloxiden | 3.808.200 | 8.731.813 | 30% |
| Chroom | 316 | 902 | 26% |
| Methaan | 6.058.162 | 20.737.999 | 23% |
| Selenium | 10,4 | 62,3 | 14% |
| Arseen | 15,3 | 92,9 | 14% |
| Koper | 106 | 842 | 11% |
| Nikkel | 40,5 | 1.026 | 4% |

De directe, indirecte en totale emissies (de som van de directe en indirecte emissies) gerelateerd aan de verwarming van Vlaamse woningen uitgesplitst per energiedrager in 2015 zijn te vinden in de digitale bijlage. De aandelen van energiedragers in de totale emissies zijn weergegeven in figuur 17. We zien hier dat voor twaalf van meegenomen emissiestoffen hout de grootste bijdrage levert, voor zes stoffen is dit stookolie (arseen, kwik, nikkel, selenium, NO_x en SO_x), en voor vier stoffen aardgas (chroom, N₂O, CO₂ en CH₄). Afgezet tegen de aandelen van energiedragers in het totale energieverbruik voor woningverwarming in 2015 (aardgas 52,0%, stookolie 35,2% en hout 7,7%) laat dit zien dat vooral hout maar ook stookolie relatief veel bijdragen aan de totale emissies.

////////////////////////////////////

figuur 17: aandeel van energiedragers in totale emissies van woningverwarming in Vlaanderen in 2015



De totale directe emissies zoals die zijn berekend in deze studie verschillen ietwat van berekeningen in het kader van de Emissie-inventaris Lucht van de Vlaamse Milieumaatschappij over de directe emissies van woningverwarming in 2015 en VITO (2017a), vooral voor de emissies ten gevolge van houtgebruik. Dit komt onder meer door de volgende factoren:

- We hebben gebruik gemaakt van de recente update van de EMEP/EEA emissiefactoren juli 2017.
- Er is bij VITO (2017a) geen rekening gehouden met installatie specifieke rendementen bij houtgestookte verwarmingen. Dit hebben wij in deze studie wel gedaan.
- Er kunnen verschillen zijn opgetreden in de verdeling van houtverbruik over hoofd- en bijverwarming en de installatietypes die zijn gebruikt voor hoofd- en bijverwarming. Hier zou eventueel nog nadere studie voor kunnen worden aanbevolen.



tabel 24: Bijbouw, herbouw en nieuwbouw per energiedrager/warmtechniek in Vlaanderen in 2021-2030 (# wooneenheden)

| Energiedrager | Bijbouw | Herbouw | Nieuwbouw (totaal) |
|---------------------------------|---------|---------|--------------------|
| Aardgas* | 0 | 27.313 | 27.313 |
| Stookolie | 0 | 0 | 0 |
| Propaan/butaan/LPG | 0 | 0 | 0 |
| Steenkool | 0 | 0 | 0 |
| Hout ^o | 1.000 | 0 | 1.000 |
| Warmtenet [^] | 10.000 | 0 | 10.000 |
| Weerstandsverwarming | 0 | 0 | 0 |
| Bodemwarmtepomp [^] | 26.250 | 0 | 26.250 |
| Luchtwarmtepomp [^] | 26.250 | 0 | 26.250 |
| Hybride warmtepomp ^o | 0 | 20.187 | 20.187 |
| Totaal | 63.500 | 47.500 | 111.000 |

[^]: Vlaamse Regering (2018)

*: expert-inschatting

^o: eigen schatting

4.2.2 Vervanging van installaties

Voor elk van de energiedragers/warmtetechnieken nemen we een vervangingsgraad aan, in de vorm van een percentage van het aantal installaties dat per jaar wordt vervangen. Deze staan in tabel 25, en worden toegepast op de periode 2021-2030. De aannames zijn mede gebaseerd op het gegeven dat ca. 5% van de bestaande Vlaamse aardgasinstallaties per jaar wordt vernieuwd, en 2,5% van de stookolie-installaties (VITO, 2017a). Dit komt er op neer dat in de periode 2021-2030 1.240.026 bestaande installaties worden vervangen. We gaan er daarbij vanuit dat de oudste installaties worden vervangen²⁶.

tabel 25: aangenomen vervangingsgraad van warmte-installaties voor de verschillende energiedragers in Vlaanderen voor de periode 2021-2030

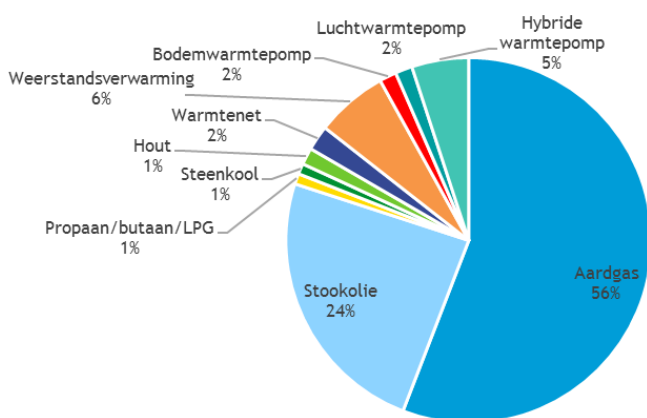
| Energiedrager/warmtetechniek | Vervangingsgraad |
|------------------------------|------------------|
| Aardgas | 5 %/jaar |
| Stookolie | 2,5 %/jaar |
| Propaan/butaan/LPG | 2,5 %/jaar |
| Steenkool | 2,5 %/jaar |
| Hout | 2,5 %/jaar |
| Warmtenet | 0 %/jaar |
| Weerstandsverwarming | 5 %/jaar |
| Bodemwarmtepomp | 5 %/jaar |
| Luchtwarmtepomp | 5 %/jaar |
| Hybride warmtepomp | 5 %/jaar |

²⁶ In 2017 had Vlaanderen bijna 1,5 miljoen woningen met een installatie ouder dan 15 jaar (Vlaamse Regering, 2018). De vervanging van 1,24 miljoen installaties in 2021-2030 betekent dus dat het merendeel van deze oude installaties wordt vervangen.

tabel 26: inschatting van het aantal Vlaamse wooneenheden per energiedrager in 2030

| Energiedrager | Aantal wooneenheden in 2015 | Percentage wooneenheden | Bijbouw | Oude installaties | Nieuwe installaties | Aantal wooneenheden in 2030 | Percentage wooneenheden |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------|-------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Aardgas | 1.825.308 | 62,5% | 0 | 912.654 | 754.080 | 1.666.734 | 55,9% |
| Stookolie | 754.179 | 25,8% | 0 | 188.545 | 154.774 | 720.409 | 24,1% |
| Propaan/butaan/LPG | 29.200 | 1,0% | 0 | 7.300 | 5.992 | 27.892 | 0,9% |
| Steenkool | 29.200 | 1,0% | 0 | 7.300 | 5.992 | 27.892 | 0,9% |
| Hout (hoofdverwarming) | 45.434 | 1,6% | 1.000 | 11.359 | 9.324 | 44.400 | 1,5% |
| Hout (bijverwarming) | 558.998 | 19,1% | 0 | 139.750 | 139.750 | 558.998 | 18,7% |
| Warmtenet | 10.986 | 0,4% | 10.000 | 0 | 45.000 | 65.986 | 2,2% |
| Weerstandsverwarming | 208.738 | 7,1% | 0 | 104.369 | 85.675 | 190.044 | 6,4% |
| Bodemwarmtepomp | 3.400 | 0,1% | 26.250 | 1.700 | 17.000 | 44.950 | 1,5% |
| Luchtwarmtepomp | 3.400 | 0,1% | 26.250 | 1.700 | 17.000 | 44.950 | 1,5% |
| Hybride warmtepomp | 10.200 | 0,3% | 0 | 5.100 | 145.188 | 150.288 | 5,0% |
| Totaal | 2.920.045 | 100% | 63.500 | 1.240.026 | 1.240.026 | 2.983.545 | 100,0% |

figuur 18: aandelen energiedragers/warmtechnieken voor hoofdverwarming in Vlaamse huishoudens in 2030



4.3 Totaal verbruik per energiedrager in 2030

Het totale verbruik per energiedrager in 2030 wordt berekend door het totale verbruik per energiedrager in 2015 te vermenigvuldigen met het aantal wooneenheden per energiedrager in 2030, te delen door het aantal wooneenheden per energiedrager in 2015, en ten slotte te vermenigvuldigen met een reductiefactor isolatiemaatregelen.

Het warmteverbruik wordt dus geschaald op basis van het aantal wooneenheden. We nemen aan dat de rendementen van installaties en de warmtebehoefte van huishoudens in 2030 hetzelfde zijn als die in 2015 en dat alleen isolatiemaatregelen tot een verandering in het brandstofverbruik per huishouden leiden.



tabel 27: aantal wooneenheden en totaal verbruik per energiedrager voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 en 2030

| Energiedragers voor woningverwarming Vlaanderen | Aantal wooneenheden in 2015 | Totaal verbruik energiedragers in 2015 (PJ) | Percentage | Aantal wooneenheden in 2030 | Totaal verbruik energiedragers in 2030 (PJ) | Percentage |
|---|-----------------------------|---|------------|-----------------------------|---|------------|
| Aardgas | 1.825.308 | 85,1 | 52,0% | 1.666.734 | 67,8 | 48,8% |
| Stookolie | 754.179 | 57,7 | 35,2% | 720.409 | 47,1 | 33,8% |
| Propan/butaan/LPG | 29.200 | 2,1 | 1,3% | 27.892 | 1,8 | 1,3% |
| Steenkool | 29.200 | 1,5 | 0,9% | 27.892 | 1,3 | 0,9% |
| Hout (hoofdverwarming) | 45.434 | 1,8 | 1,1% | 44.400 | 1,5 | 1,1% |
| Hout (bijverwarming) | 558.998 | 10,8 | 6,6% | 558.998 | 10,4 | 7,4% |
| Elektriciteit - warmtenet | 10.986 | 0,0 | 0,0% | 65.986 | 0,1 | 0,0% |
| Elektriciteit - weerstandsverwarming | 208.738 | 4,4 | 2,7% | 190.044 | 4,0 | 2,9% |
| Elektriciteit - bodemwarmtepomp | 3.400 | 0,0 | 0,0% | 44.950 | 0,2 | 0,1% |
| Elektriciteit - luchtwarmtepomp | 3.400 | 0,0 | 0,0% | 44.950 | 0,2 | 0,2% |
| Elektriciteit - hybride warmtepomp | 10.200 | 0,1 | 0,0% | 150.288 | 0,8 | 0,6% |
| Aardgas - hybride warmtepomp | | 0,3 | 0,2% | | 3,8 | 2,8% |
| Totaal | 2.920.045 | 164 | 100% | 2.983.545 | 139 | 100% |

4.4 Verbruiksaandelen per energiedrager in 2030

De verbruiksaandelen per energiedrager zijn de verbruikshoeveelheden in PJ voor verschillende combinaties van installatietypes, bouwjaren, en houttypes, welke optellen tot het totale brandstofverbruik per energiedrager.

De berekening van de verbruiksaandelen in 2030 en de daarvoor benodigde aantallen wooneenheden per combinatie zijn op dezelfde wijze uitgevoerd als voor het jaar 2015. We nemen hierbij aan dat de percentages wooneenheden per installatietype en de percentages installaties die een bepaald houttype gebruiken niet veranderen. De percentages installaties per bouwjaarklasse in 2030 zijn wel veranderd ten opzichte van 2015. Door de huidige verdeling van bouwjaren per energiedrager aan te passen aan de hand van de oude (te vervangen) installaties per energiedrager zijn we tot een verdeling van bouwjaarclassen in 2030 gekomen, welke is omgezet in percentages installaties per bouwjaarklasse. De verbruiksaandelen zijn te vinden in de digitale bijlage.

4.5 Verwachte directe emissies in 2030

De verwachte directe emissies voor 2030 (kg) worden op dezelfde manier berekend als voor 2015. We nemen aan dat de emissiefactoren niet veranderen tussen 2015 en 2030, behalve voor elektriciteit (zie bijlage 2). Voor alle vervangen installaties tot 2030 wordt gerekend met de emissiefactor horend bij de meest recente bouwjaarklasse³¹.

³¹ Dit is van toepassing op de energiedragers stookolie, aardgas en hout.

Vergelijking van de directe emissies van woningverwarming in 2015 met de inschatting van de directe emissies in 2030 geeft inzicht in hoe de emissies zich kunnen ontwikkelen wanneer het Energieplan Vlaanderen wordt opgevolgd en de daarin genoemde prognoses werkelijkheid worden. Zie tabel 28. In deze verwachting voor 2030 vermindert de totale uitstoot van woningverwarming voor alle emissiestoffen, ondanks de toename van het totale aantal Vlaamse wooneenheden met 2,2%. Omdat de emissies direct verband houden met het brandstofverbruik, zijn de relatieve uitstootreducties vergelijkbaar met de reductie in het totale verbruik van energiedragers voor woningverwarming (in de orde van -15%). De directe emissies per energiedrager zijn opgenomen in de digitale bijlage.

tabel 28: vergelijking van directe emissies van woningverwarming in Vlaanderen - 2015 en 2030

| Stof | Emissies in 2015 (kg) | Verwachte emissies in 2030 (kg) | Vershil (kg) | Vershil (%) |
|---|-----------------------|---------------------------------|----------------|-------------|
| Ammoniak | 708.303 | 586.855 | -121.448 | -17,1% |
| Arseen | 15,3 | 13,1 | -2,2 | -14,2% |
| Benzo(a)pyreen | 1.163 | 817 | -346 | -29,7% |
| Cadmium | 165 | 155 | -10 | -6,2% |
| Chroom | 316 | 294 | -22 | -6,9% |
| Dioxines | 0,0072 | 0,0051 | -0,0021 | -29,5% |
| Distikstof(mono)oxide | 95.408 | 81.693 | -13.715 | -14,4% |
| Elementair koolstof | 853.834 | 644.752 | -209.082 | -24,5% |
| Koolstofdioxide | 10.752.120.000 | 9.073.829.016 | -1.678.290.984 | -15,6% |
| Koolstofmonoxide | 45.203.216 | 36.388.415 | -8.814.801 | -19,5% |
| Koper | 106 | 96 | -9 | -8,7% |
| Kwik | 30,2 | 26,1 | -4,2 | -13,7% |
| Lood | 491 | 449 | -42 | -8,5% |
| Methaan | 6.058.162 | 5.623.542 | -434.620 | -7,2% |
| Niet-methaan vluchtige organische stoffen | 6.606.272 | 5.315.762 | -1.290.510 | -19,5% |
| Nikkel | 40,5 | 36,8 | -3,7 | -9,1% |
| Selenium | 10,4 | 9,4 | -1,0 | -9,5% |
| Stikstofoxides | 5.843.869 | 4.559.078 | -1.284.792 | -22,0% |
| Fijn stof < 10 µm en > 2,5 µm | 186.026 | 126.503 | -59.522 | -32,0% |
| Fijn stof < 2,5 µm | 7.848.258 | 5.634.838 | -2.213.420 | -28,2% |
| Zink | 6.776 | 6.335 | -440 | -6,5% |
| Zwaveloxiden | 3.808.200 | 3.165.455 | -642.745 | -16,9% |

Wanneer we een blik werpen op de relatieve bijdrages van de verschillende energiedragers op de directe emissies voor elk van de emissiestoffen en deze vergelijken met die van 2015 (zie tabel 29), dan is duidelijk dat de veranderingen tussen 2015 en 2030 geen groot effect hebben op de relatieve bijdrages. De emissiebijdrage van hout blijft dominant voor veel luchtverontreinigende stoffen. Ook de bijdrage van steenkool blijft aanzienlijk, ondanks het lage aandeel wooneenheden dat op steenkool verwarmt (1,0%). Bij de uitstoot van CO₂, NO_x en kwik hebben aardgas en stookolie een relatief grote bijdrage, en bij arseen en N₂O is aardgas verantwoordelijk voor meer dan de helft van de totale uitstoot, zowel in 2015 als in 2030.



tabel 29: relatieve bijdrage aan directe emissies van energiedragers bij woningverwarming in Vlaanderen in 2015 en 2030

| Stof | 2015 | | | | | | 2030 | | | | | |
|----------------------|------|------|------|-----|-------|---------|------|------|------|-----|-------|---------|
| | Gas | Olie | Hout | LPG | Kolen | Elektr. | Gas | Olie | Hout | LPG | Kolen | Elektr. |
| NH ₃ | 0% | 0% | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 0% | 0% |
| As | 67% | 1% | 16% | 2% | 15% | 0% | 66% | 1% | 17% | 2% | 15% | 0% |
| B(a)P | 0% | 0% | 80% | 0% | 19% | 0% | 0% | 0% | 76% | 0% | 24% | 0% |
| Cd | 0% | 0% | 99% | 0% | 1% | 0% | 0% | 0% | 99% | 0% | 1% | 0% |
| Cr | 0% | 4% | 92% | 0% | 5% | 0% | 0% | 3% | 92% | 0% | 4% | 0% |
| PCDD-F | 2% | 2% | 86% | 0% | 10% | 0% | 2% | 2% | 83% | 0% | 13% | 0% |
| N ₂ O | 90% | 0% | 10% | 0% | 0% | 0% | 88% | 0% | 12% | 0% | 0% | 0% |
| C | 0% | 1% | 94% | 0% | 5% | 0% | 0% | 1% | 93% | 0% | 6% | 0% |
| CO ₂ | 45% | 40% | 13% | 1% | 1% | 0% | 44% | 38% | 15% | 1% | 1% | 0% |
| CO | 4% | 2% | 87% | 0% | 7% | 0% | 5% | 2% | 86% | 0% | 7% | 0% |
| Cu | 0% | 7% | 72% | 0% | 21% | 0% | 0% | 6% | 74% | 0% | 20% | 0% |
| Hg | 28% | 23% | 23% | 1% | 25% | 0% | 27% | 22% | 25% | 1% | 25% | 0% |
| Pb | 0% | 0% | 69% | 0% | 31% | 0% | 0% | 0% | 71% | 0% | 29% | 0% |
| CH ₄ | 1% | 1% | 94% | 0% | 4% | 0% | 1% | 1% | 95% | 0% | 3% | 0% |
| NMVOS | 2% | 0% | 91% | 0% | 7% | 0% | 2% | 0% | 90% | 0% | 7% | 0% |
| Ni | 0% | 1% | 62% | 0% | 37% | 0% | 0% | 1% | 64% | 0% | 35% | 0% |
| Se | 9% | 1% | 61% | 0% | 29% | 0% | 8% | 1% | 63% | 0% | 27% | 0% |
| NO _x | 41% | 41% | 14% | 2% | 3% | 0% | 37% | 39% | 19% | 2% | 3% | 0% |
| PM _{2,5-10} | 0% | 0% | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 0% | 0% |
| PM _{2,5} | 1% | 1% | 90% | 0% | 9% | 0% | 1% | 1% | 88% | 0% | 10% | 0% |
| Zn | 0% | 0% | 95% | 0% | 4% | 0% | 0% | 0% | 96% | 0% | 4% | 0% |
| SO _x | 0% | 73% | 4% | 0% | 24% | 0% | 0% | 71% | 4% | 0% | 24% | 0% |

4.6 Verwachte indirecte emissies in 2030

De indirecte emissies in 2030 veranderen naar rato van de veranderingen in het gebruik van energiedragers, en in geval van elektriciteit ook als gevolg van de veranderde elektriciteitsproductiemix³². De indirecte emissies van elektriciteit (dus die van elektriciteitsproductie) dalen voor sommige stoffen, maar stijgen bijv. voor CO₂, omdat het aandeel aardgas toeneemt in de productiemix door de uitfasering van kernenergie.

In tabel 30 zijn de indirecte emissies per energiedrager in 2030 gepresenteerd. Stookolie en aardgas leveren de grootste bijdrage aan de indirecte emissies, gevolgd door hout. Elektriciteitsverbruikende verwarmingsinstallaties zijn verantwoordelijk voor vrijwel alle (indirecte) uitstoot van niet-methaan vluchtige organische stoffen (NMVOS), en voor 20-30% van de (indirecte) uitstoot van ammoniak, N₂O, CO₂ en zink³³, maar dragen voor 7% of minder bij aan de uitstoot van andere stoffen.

³² Alleen voor elektriciteit hebben we in deze studie gecorrigeerd voor de veranderingen in de productiemix. Er is geen rekening gehouden met eventuele technologische veranderingen die de emissies lager kunnen maken.

³³ Om dit in perspectief te plaatsen: Voor deze stoffen is de bijdrage van de directe emissies aan de totale emissies het grootst, zoals te zien in tabel 29.

Tabel 31 vergelijkt de indirecte emissies met de directe en totale emissies in 2030. De verhoudingen tussen de indirecte emissies en de directe emissies zijn soortgelijk aan die voor 2015 (zie tabel 23). De totale emissies (som van de directe en indirecte emissies) per energiedrager voor 2030 staan in de digitale bijlage.

tabel 30: indirecte emissies van woningverwarming in Vlaanderen in 2030 per energiedrager (kg)

| | Aardgas | Stookolie | Hout | Propan/ butaan/ LPG | Kolen | Elektriciteit | Totaal |
|--|-------------|-------------|------------|---------------------------|------------|---------------|---------------|
| Ammoniak | 6.380 | 23.370 | 5.672 | 693 | 2.044 | 10.955 | 49.114 |
| Arseen | 14,3 | 47,1 | 11,2 | 2,2 | 1,4 | 1,1 | 77,3 |
| Benzo(a)pyreen | 28,7 | 18,8 | 4,1 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 52,8 |
| Cadmium | 7,2 | 47,1 | 4,4 | 3,6 | 0,3 | 1,7 | 64,2 |
| Chroom | 351 | 283 | 107 | 10 | 6 | 4 | 762 |
| Dioxine | 2,09E-04 | 9,99E-05 | 2,45E-05 | 3,72E-06 | 1,96E-06 | 2,05E-05 | 3,60E-04 |
| Distikstof(mono)oxide | 10.394 | 10.271 | 3.132 | 390 | 361 | 10.465 | 35.014 |
| Elementair koolstof | 0,07 | 0,08 | 1,51 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,67 |
| Koolstofdioxide | 613.630.680 | 557.252.968 | 80.016.723 | 24.463.005 | 11.441.993 | 358.019.499 | 1.644.824.868 |
| Koolstofmonoxide | 1.132.481 | 983.742 | 440.239 | 36.328 | 14.783 | 171.411 | 2.778.985 |
| Koper | 93 | 287 | 321 | 12 | 8 | 14 | 736 |
| Kwik | 14,3 | 18,8 | 2,8 | 0,9 | 0,3 | 1,0 | 38,1 |
| Lood | 108 | 217 | 76 | 10 | 6 | 17 | 434 |
| Methaan | 14.835.018 | 1.894.831 | 145.788 | 71.448 | 432.127 | 6.440 | 17.385.652 |
| NMVOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,56E-08 | 3.803 | 3.803 |
| Nikkel | 57 | 697 | 48 | 32 | 6 | 7 | 848 |
| Selenium | 7,2 | 33,0 | 7,2 | 1,6 | 0,6 | 0,5 | 50,2 |
| Stikstofoxides | 2.027.757 | 1.985.577 | 423.668 | 75.975 | 36.588 | 293.696 | 4.843.262 |
| Fijn stof < 10 µm en > 2,5 µm (PM _{2,5-10}) | 62.079 | 77.554 | 27.875 | 3.259 | 17.650 | 183 | 188.600 |
| Fijn stof met diameter < 2,5 µm (PM _{2,5}) | 109.893 | 255.842 | 60.565 | 11.818 | 37.220 | 7.985 | 483.323 |
| Zink | 172 | 306 | 210 | 13 | 7 | 195 | 903 |
| Zwaveloxiden | 2.085.248 | 4.558.036 | 181.241 | 178.997 | 81.854 | 56.494 | 7.141.871 |

tabel 31: vergelijking directe emissies en indirecte emissies gerelateerd aan woningverwarming in Vlaanderen in 2030

| Stof | Indirecte emissies (kg) | Directe emissies (kg) | Totale emissies (kg) | Aandeel directe emissies |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|
| Elementair koolstof | 644.752 | 2 | 644.754 | 100% |
| NMVOS | 5.315.762 | 3.803 | 5.319.565 | 100% |
| Benzo(a)pyreen | 817 | 53 | 870 | 94% |
| Dioxines | 0 | 0 | 0 | 93% |
| Koolstofmonoxide | 36.388.415 | 2.778.985 | 39.167.400 | 93% |
| Ammoniak | 586.855 | 49.114 | 635.969 | 92% |
| Fijn stof < 2,5 µm | 5.634.838 | 483.323 | 6.118.161 | 92% |
| Zink | 6.335 | 903 | 7.239 | 88% |
| Koolstofdioxide | 9.073.829.016 | 1.644.824.868 | 10.718.653.883 | 85% |
| Cadmium | 155 | 64 | 219 | 71% |
| Distikstof(mono)oxide | 81.693 | 35.014 | 116.706 | 70% |
| Lood | 449 | 434 | 883 | 51% |
| Stikstofoxides | 4.559.078 | 4.843.262 | 9.402.339 | 48% |
| Kwik | 26 | 38 | 64 | 41% |
| Fijn stof < 10 µm en > 2,5 µm | 126.503 | 188.600 | 315.104 | 40% |
| Zwaveloxiden | 3.165.455 | 7.141.871 | 10.307.326 | 31% |
| Chroom | 294 | 762 | 1.056 | 28% |
| Methaan | 5.623.542 | 17.385.652 | 23.009.194 | 24% |
| Selenium | 9 | 50 | 60 | 16% |
| Arseen | 13 | 77 | 90 | 14% |
| Koper | 96 | 736 | 832 | 12% |
| Nikkel | 37 | 848 | 885 | 4% |

DEEL II

RESULTATEN EN ANALYSE



tabel 32: milieuschadeprijzen voor de nieuwste installatietypes per GJ geleverde warmte gerekend met de centrale waarden van de milieuprijzen

| Energiedrager/warmtetechniek | Grootte | Installatietype | Kosten directe emissies (€/GJ geleverde warmte) | Kosten totale emissies (€/GJ geleverde warmte) |
|---|---------|--------------------------------------|---|--|
| Aardgas | < 70 kW | Condenserende ketel | 4,17 | 6,79 |
| | < 70 kW | Niet-condenserende ketel, vanaf 2012 | 5,11 | 8,14 |
| | > 70 kW | Condenserende ketel | 4,49 | 7,23 |
| Stookolie | < 70 kW | Condenserende ketel | 7,53 | 12,61 |
| | < 70 kW | Niet-condenserende ketel, vanaf 2012 | 8,59 | 14,35 |
| | > 70 kW | Condenserende ketel | 8,13 | 13,53 |
| Hout | | Cassette, > = 2017 | 63,54 – 74,22* | 68,67 – 80,37* |
| | | Kachel, > = 2017 | 51,63 – 60,31* | 55,79 – 65,30* |
| | | Ketel, > = 2017 | 33,22 – 36,82* | 33,71 – 43,81* |
| | | Open haard, > = 2017 | 1.654 – 1.665* | 1.663 – 1.707* |
| | | Speksteen/tegelkachel, > = 2017 | 47,47 – 55,45* | 51,30 – 60,05* |
| Propan/butaan/LPG | | Centraal | 7,13 | 13,66 |
| Kolen | | Centraal | 114,19 | 125,12 |
| Elektriciteit – warmtenet [#] | | | 0,00 | 0,26 |
| Elektriciteit – weerstandsverwarming [^] | | | 0,00 | 5,20 |
| Elektriciteit – bodemwarmtepomp [^] | | | 0,00 | 1,04 |
| Elektriciteit – luchtwarmtepomp [^] | | | 0,00 | 1,31 |
| Elektriciteit – hybride warmtepomp [^] | | | 2,09 | 4,26 |

* Range wordt verklaard door het soort hout dat in de installatie wordt gestopt. Bij de berekeningen is uitgegaan van de waarden voor de stad. Indien de kachel in het platteland wordt neergezet kunnen de milieuschadeprijzen dalen. In de Bijlage tabellen staat een tabel die deze waarden weergeeft.

[^] Gerekend met een gemiddeld elektriciteitspark en rekening houdend met gebruik van elektrische verwarming voor een ketel met radiatoren. Indien met een marginaal elektriciteitspark (het park dat ingezet wordt bij een additionele vraag naar elektriciteit) zou worden gerekend zullen de schadeprijzen hoger zijn.

[#] Het elektriciteitsverbruik van een warmtenet betreft de elektriciteit die nodig is om aard- of restwarmte te leveren aan huishoudens. Er is geen rekening gehouden met een dervingsfactor voor eventuele rendementsverliezen bij de installatie die restwarmte levert.

Het blijkt uit deze tabel dat het gebruik van andere houtgestookte toestellen voor ruimteverwarming dan open haarden lagere schadeprijzen geeft. De schadeprijzen blijven evenwel in alle gevallen substantieel hoger dan bij gas- of oliegestookte eenheden. Voorts blijkt uit de analyse dat de niet-condenserende verwarmingseenheden hogere emissiekosten kennen dan de condenserende eenheden (20% hoger voor aardgasgestookte ketels en 14% voor stookoliegestookte ketels). Het toepassen van moderne hoogrendementsketels (condenserende gasgestookte toestellen) in plaats van niet-condenserende gas- of oliegestookte verwarmingseenheden kan dus ook de milieuschadeprijzen doen dalen, maar niet zoveel als vervanging van houtgestookte eenheden door gasgestookte eenheden.

5.2.2 Vergelijking van de milieuschadeprijzen voor verschillende leeftijden

In de woningverwarming vindt men nog installaties die enkele decennia oud zijn. Nieuwe installaties zijn evenwel vaak energiezuiniger en kennen lagere emissies per eenheid geleverde warmte. Tabel 33 geeft een overzicht van de milieuschadeprijzen en vergelijkt de diverse installatietypes onderverdeeld naar leeftijd,



per brandstofsoort. Voor hout geeft deze tabel tevens informatie over de diverse types die kunnen worden gebruikt bij het verwarmen van de woning op hout.

tabel 33: milieuschadecosten per installatietype per GJ geleverde warmte gerekend met de centrale waardes van de milieuprijzen – installaties met verschillende bouwjaren

| Energiedrager/ warmtetechniek | Installatietype | Bouwjaarklasse | Kosten directe emissies (€/GJ geleverde warmte) | Kosten totale emissies (€/GJ geleverde warmte) |
|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------|---|--|
| Aardgas | < 70 kW, condenserend [^] | - | 4,17 | 6,79 |
| | | < 70 kW, niet-condenserend | Jaren '70 | 8,29 |
| | | Jaren '80 | 7,61 | 11,38 |
| | | Jaren '90 | 6,06 | 9,35 |
| | | 2000-2004 | 5,38 | 8,41 |
| | | 2005-2009 | 5,38 | 8,41 |
| | | 2010-2011 | 5,38 | 8,41 |
| | | Vanaf 2012 | 5,11 | 8,14 |
| Stookolie | < 70 kW, condenserend [^] | - | 7,53 | 12,61 |
| | | < 70 kW, niet-condenserend | Jaren '70 | 12,58 |
| | | Jaren '80 | 11,18 | 18,05 |
| | | Jaren '90 | 10,07 | 16,24 |
| | | 2000-2004 | 8,59 | 14,35 |
| | | 2005-2009 | 8,59 | 14,35 |
| | | 2010-2011 | 8,59 | 14,35 |
| | | Vanaf 2012 | 8,59 | 14,35 |
| Hout* | Cassette* | < 2000 | 350,45 - 351,83 | 351,28 - 362,51 |
| | | 2000-2013 | 63,54 - 276,76 | 68,67 - 282,91 |
| | | 2014-2016 | 63,54 - 109,1 | 68,67 - 115,25 |
| | | > = 2017 | 63,54 - 74,22 | 68,67 - 80,37 |
| | Kachel* | < 2000 | 506,2 - 508,19 | 507,41 - 523,62 |
| | | 2000-2013 | 59 - 257 | 63,76 - 262,71 |
| | | 2014-2016 | 51,63 - 88,64 | 55,79 - 93,64 |
| | | > = 2017 | 51,63 - 60,31 | 55,79 - 65,3 |
| | Ketel* | < 2000 | 36,82 - 200,27 | 39,79 - 204,28 |
| | | 2000-2013 | 36,82 - 97,24 | 39,79 - 101,25 |
| | | 2014-2016 | 36,82 - 97,24 | 39,79 - 101,25 |
| | | > = 2017 | 33,22 - 36,82 | 33,71 - 43,81 |
| | Open haard* | < 2000 | 1659 - 1665 | 1662 - 1712 |
| | | 2000-2013 | 1654 - 1665 | 1659 - 1707 |
| | | 2014-2016 | 1654 - 1665 | 1659 - 1707 |
| | | > = 2017 | 1654 - 1665 | 1659 - 1707 |
| | Speksteen /tegelkachel* | < 2000 | 47,47 - 206,78 | 51,3 - 211,37 |
| | | 2000-2013 | 47,47 - 206,78 | 51,3 - 211,37 |
| | | 2014-2016 | 47,47 - 81,51 | 51,3 - 86,11 |
| | | > = 2017 | 47,47 - 55,45 | 51,3 - 60,05 |

* Range wordt verklaard door het soort hout dat in de installatie wordt gestopt. Bij de berekeningen is ervan uitgegaan van de waarden voor de stad. Indien de kachel in het platteland wordt neergezet kunnen de milieuschadecosten dalen. In de Digitale Bijlage staat een tabel die deze waarden weergeeft.

[^] Bij de indeling naar leeftijdsklassen wordt alleen onderscheid gemaakt voor niet-condenserende ketels. De emissiefactoren voor de condenserende ketels zijn niet gedifferentieerd naar leeftijdsklasse.



We observeren hier het volgende:

- De kosten van de emissies van de open haard liggen ongeveer 50 keer hoger dan die van een nieuwe ketel.
- De houtgestookte ketel komt naar voren als het installatietype met de laagste schadekosten voor het gebruik van hout als brandstof.
- Voor wat betreft de houttypes brengen pellets de laagste kosten met zich mee, behalve bij de nieuwste ketels, waar houtafval tot de laagste kosten leidt.
- Het verschil tussen lokale pellets en pellets uit Canada en Noord-Amerika zijn de indirecte emissies. Hierdoor liggen de schadekosten van pellets uit Canada en Noord-Amerika 10% hoger bij alle nieuwste installatietypen, behalve de open haard.
- Kijkend naar de kosten van de totale emissies lijkt de beste installatie-hout-combinatie te zijn om houtafval te stoken in de nieuwste ketel. Dit levert totale milieuschadecosten op van € 33,71 per GJ geleverde warmte. Toch levert dat altijd nog milieuschadecosten op die een factor 5 hoger liggen dan een condenserend gasgestookt toestel.

Bij deze cijfers zijn de CO₂-emissies ten gevolge van houtverbranding meegenomen. Zoals beargumenteerd in hoofdstuk 3 kan men ook van het standpunt uitgaan dat houtverbranding geen CO₂-emissies kent omdat het gaat om verbranding van eerder opgeslagen koolstof (zie ook de discussie in paragraaf 3.5). Als we voor biomassa de CO₂-uitstoot buiten beschouwing zouden laten, zouden de milieuschadecosten lager worden. In tabel 35 staan de milieuschadecosten per houtinstallatie zonder dat de CO₂-kosten van houtverbranding hierin zijn meegenomen. De milieuschadecosten voor de nieuwste installaties zijn nu 20-25% lager; voor de oudste installaties is dit 4-5% (behalve bij pellets, waar deze waarden eveneens 20% lager zijn).

tabel 35: vergelijking milieuschadecosten voor houtinstallaties en houttypes per GJ geleverde warmte gerekend met de centrale waarden van de milieuprijzen zonder toerekening van de CO₂-kosten van directe emissies, nieuwste technieken

| | Cassette | Kachel | Ketel | Open haard | Speksteen /tegelkachel |
|---|----------|--------|-------|------------|------------------------|
| Directe emissies (€/GJ geleverde warmte) | | | | | |
| Briketten | 58,68 | 47,67 | 24,66 | 1.595 | 43,84 |
| Houtafval - onbehandeld | 58,68 | 47,67 | 24,66 | 1.595 | 43,84 |
| Houtafval – niet-verontreinigd behandeld | 58,68 | 47,67 | 24,66 | 1.595 | 43,84 |
| Houtkrullen | 58,68 | 47,67 | 24,66 | 1.595 | 43,84 |
| Pellets - lokaal | 48,77 | 39,63 | 28,26 | 1.590 | 36,44 |
| Pellets – Canada en Noord-Amerika | 48,77 | 39,63 | 28,26 | 1.590 | 36,44 |
| Snoeihout | 58,68 | 47,67 | 24,66 | 1.595 | 43,84 |
| Stukhout | 58,68 | 47,67 | 24,66 | 1.595 | 43,84 |
| Totale emissies (€/GJ geleverde warmte) | | | | | |
| Briketten | 63,80 | 51,84 | 27,63 | 1.618 | 47,67 |
| Houtafval - onbehandeld | 59,51 | 48,36 | 25,15 | 1.599 | 44,46 |
| Houtafval – niet-verontreinigd behandeld | 59,51 | 48,36 | 25,15 | 1.599 | 44,46 |
| Houtkrullen | 60,72 | 49,34 | 25,85 | 1.604 | 45,37 |
| Pellets - lokaal | 53,90 | 43,79 | 31,23 | 1.613 | 40,27 |
| Pellets – Canada en Noord-Amerika | 60,83 | 49,42 | 35,25 | 1.643 | 45,45 |
| Snoeihout | 61,61 | 50,06 | 26,36 | 1.608 | 46,03 |
| Stukhout | 65,60 | 53,30 | 28,68 | 1.625 | 49,01 |



De bovenstaande observaties blijven allemaal ook van kracht als er geen CO₂-emissies aan houtstook worden toegerekend. Afvalhout verstoekt in ketels blijft de laagste milieuschadeprijzen kennen, van ruim € 25 per GJ geleverde warmte. Toch is dit altijd nog een factor 3,5 hoger dan de milieuschadeprijzen van gasgestookte condenserende toestellen (€ 6,79/GJ warmte) en een factor 100 dan de milieuschadeprijzen van de schoonste techniek (warmtenet op afvalwarmte zonder dervingsfactor).

5.3 Totale milieuschadeprijzen van woningverwarming in Vlaanderen

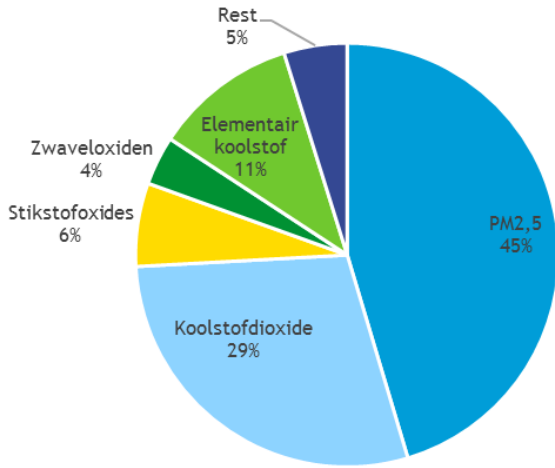
De totale milieuschadeprijzen van woningverwarming in Vlaanderen (in euro's) worden berekend door de milieuprijzen (in euro/kg) uit paragraaf 5.2 te vermenigvuldigen met de emissies (in kg) uit hoofdstukken 3 en 4. In deze paragraaf berekenen we de totale milieuschadeprijzen voor geheel Vlaanderen onderverdeeld naar energiedrager. Daarbij houden we ook rekening met het verschil in voorkomen in landelijke en stedelijke gebieden conform de aanpak besproken in paragraaf 2.5. In paragraaf 5.3.1 behandelen we de milieuschadeprijzen in 2015. In paragraaf 5.3.2 volgen de milieuschadeprijzen volgens het scenario 2030.

5.3.1 Resultaten 2015: Milieuschadeprijzen directe emissies

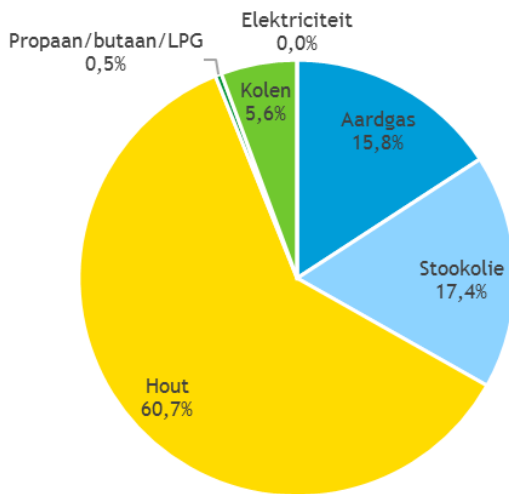
We rekenen allereerst de directe emissies ten gevolge van woningverwarming door met de centrale waarde van de milieuschadeprijzen. Tabel 36 geeft de uitkomst per energiedrager en de totale milieuschadeprijzen voor Vlaanderen. De verdeling van de milieuschadeprijzen over emissiestoffen is geïllustreerd in figuur 19 en de verdeling over energiedragers in figuur 20.

////////////////////////////////////

figuur 19: milieuschadetekosten door directe emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten – verdeling over emissiestoffen



figuur 20: milieuschadetekosten door directe emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten – verdeling over energiedragers



Uit tabel 36 blijkt dat de totale milieuschadetekosten door directe emissies van woningverwarming in Vlaanderen in 2015 ongeveer 2,1 miljard euro bedragen. Het verstoken van hout is daarbij verantwoordelijk voor 61% van de schadetekosten, terwijl hout slechts 7,7% van het energieverbruik voor woningverwarming inneemt. Naast hout zijn ook stookolie en aardgas gezamenlijk verantwoordelijk voor 33% van de schadetekosten. Kolen, hoewel nauwelijks nog gebruikt voor woningverwarming, is nog steeds verantwoordelijk voor 5,6% van de totale schadetekosten.



Als we kijken naar de diverse emissies die bijdragen aan de schadekosten, blijkt dat emissies van PM_{2,5} voor 45% verantwoordelijk zijn voor de totale schadekosten. Daarna komen de CO₂-emissies die voor 29% bijdragen aan de totale schadekosten. Emissies van zware metalen dragen relatief weinig bij aan de totale milieuschadekosten.

We hebben de milieuschadekosten doorgerekend met drie milieuprijzen: een ondergrens (minimumwaarde), een centrale waarde en een bovengrens (maximumwaarde), welke staan voor de onzekerheid in de waardering van de impacts van milieuvervuiling. Een verdere detaillering van de onder- en bovengrenzen uitgesplitst naar emissie en brandstofsoort is te vinden in de digitale bijlage. Uit deze berekening blijkt dat de milieuschadekosten dalen van 2,1 miljard euro in de centrale variant naar 1,5 miljard euro in de minimumvariant, en stijgen naar 3,4 miljard euro in de maximumvariant, als alleen de directe emissies worden beschouwd.

Bij de berekening van de milieuschadekosten voor directe emissies hierboven zijn de CO₂-emissies bij houtverbranding meegenomen. De verbranding van hout voor woningverwarming wordt soms echter gezien als CO₂-neutraal, omdat de CO₂ die vrijkomt eerder is opgenomen door het hout. Wanneer we de houtverbranding als CO₂-neutraal zien, zijn de bijbehorende milieuschadekosten voor CO₂-emissies gelijk aan nul. In dat geval dalen de totale milieuschadekosten van directe emissies in 2015 met 3,8% (80,4 M€) tot 2,05 miljard euro (centrale waarde).

5.3.2 Resultaten 2015: Milieuschadekosten totale emissies

Als we ook de emissies in de voorketen in ogenschouw nemen worden de jaarlijkse milieuschadekosten groter en stijgen met 24,0% tot 2,64 miljard euro (centrale waarde). Tabel 37 geeft de milieuschadekosten van de totale emissies (de directe plus de indirecte emissies) van woningverwarming in 2015. De verdeling van de milieuschadekosten over emissiestoffen is geïllustreerd in figuur 21 en de verdeling over energiedragers in



figuur 22.

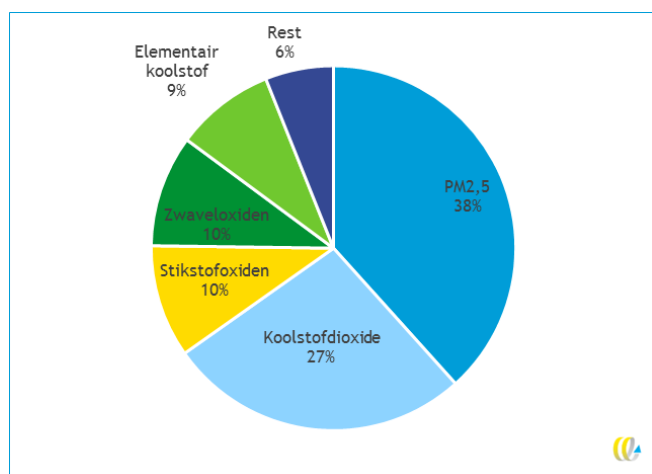
De CO₂-kosten van houtverbranding (directe emissies) zijn hier meegenomen. Wanneer deze niet worden meegerekend, dalen de milieuschadeprijzen met 3,0% (80,4 M€).



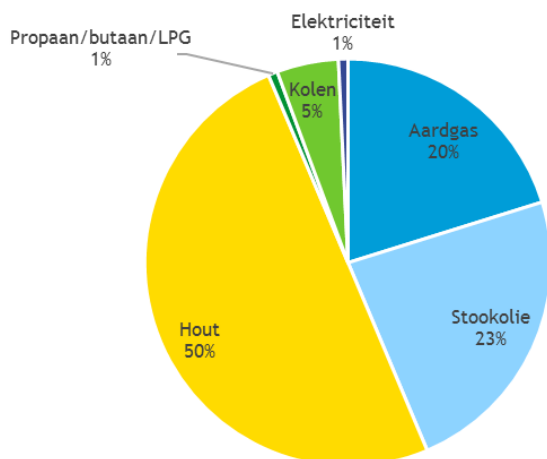
tabel 37: milieuschadeposten per energiedrager voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015, in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten, totale emissies

| | Aardgas | Stookolie | Hout | Propan/ Butaan/ LPG | Kolen | Elektriciteit | Totaal |
|-----------------------|--------------|--------------|----------------|---------------------|--------------|---------------|----------------|
| Ammoniak | 0,3 | 1,0 | 24,9 | 0,03 | 0,1 | 0,3 | 26,6 |
| Arseen | 0,03 | 0,1 | 0,01 | 0,003 | 0,004 | 0,002 | 0,1 |
| Benzo(a)pyreen | 0,0004 | 0,0003 | 0,01 | 0,00001 | 0,003 | 0,000003 | 0,01 |
| Cadmium | 0,01 | 0,1 | 0,2 | 0,005 | 0,002 | 0,001 | 0,3 |
| Chroom | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,00001 | 0,00001 | 0,000002 | 0,001 |
| Dioxines | 0,03 | 0,02 | 0,4 | 0,001 | 0,1 | 0,001 | 0,5 |
| Distikstof(mono)oxide | 1,5 | 0,2 | 0,2 | 0,01 | 0,01 | 0,1 | 1,9 |
| Elementair koolstof | 0,0001 | 1,1 | 232,0 | 3,0E-06 | 7,0E-07 | 2,2E-08 | 233,1 |
| Koolstofdioxide | 314,8 | 282,6 | 85,3 | 9,2 | 8,8 | 10,2 | 710,8 |
| Koolstofmonoxide | 0,4 | 0,3 | 5,2 | 0,01 | 0,4 | 0,01 | 6,3 |
| Koper | 0,0005 | 0,002 | 0,002 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,004 |
| Kwik | 0,9 | 1,0 | 0,3 | 0,04 | 0,3 | 0,1 | 2,7 |
| Lood | 0,8 | 1,6 | 2,5 | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 5,9 |
| Methaan | 31,4 | 4,2 | 10,4 | 0,2 | 1,3 | 0,01 | 47,3 |
| NMVOS | 0,4 | 0,04 | 16,7 | 0,01 | 1,3 | 0,005 | 18,4 |
| Nikkel | 0,01 | 0,1 | 0,01 | 0,005 | 0,003 | 0,001 | 0,1 |
| Selenium | 0,001 | 0,004 | 0,001 | 0,0002 | 0,0003 | 0,0003 | 0,01 |
| Stikstofoxides | 110,7 | 111,1 | 29,2 | 4,2 | 4,5 | 4,6 | 264,2 |
| PM _{2,5-10} | 4,1 | 5,4 | 38,7 | 0,2 | 1,1 | 0,1 | 49,6 |
| PM _{2,5} | 16,6 | 36,4 | 867,8 | 1,2 | 90,2 | 1,1 | 1.013,2 |
| Zink | 0,002 | 0,005 | 0,1 | 0,0002 | 0,004 | 0,002 | 0,1 |
| Zwaveloxiden | 51,9 | 174,6 | 6,9 | 4,4 | 20,8 | 3,5 | 262,1 |
| Totaal | 533,7 | 619,7 | 1.320,8 | 19,5 | 129,8 | 20,0 | 2.643,5 |

figuur 21: milieuschadeposten door totale emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten – verdeling over emissiestoffen



figuur 22: milieuschadeposten door totale emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten – verdeling over energiedragers



De resultaten zijn relatief vergelijkbaar met die van de directe emissies omdat de indirecte emissies minder belangrijk zijn in het geheel. De relatieve bijdrage van PM_{2,5} is nu 38%, terwijl stikstofoxides en zwavel-oxides relatief belangrijker worden. Hierbij dient te worden opgemerkt dat een deel van de indirecte emissies in andere landen neerslaat, waarbij de emissies zijn gewaardeerd met waarden voor Vlaanderen. Los van het ethisch vraagstuk of emissies in andere landen lager mogen worden gewaardeerd dan emissies in eigen land, is het in het kader van dit project niet mogelijk om precies te bepalen waar de indirecte emissies worden uitgestoten en welke waardering daar aan moet worden toegekend.

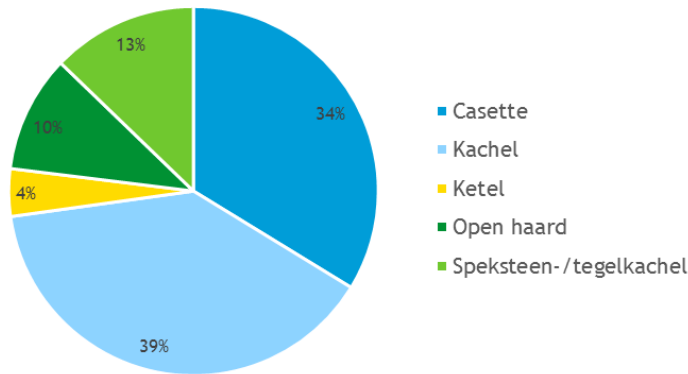
Uitsplitsing voor houtinstallaties en houttypes

In tabel 38 staan de milieuschadeposten van de totale emissies gerelateerd aan houtverbranding voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015 uitgesplitst per houtinstallatietype en per houttype. In figuur 23 zijn de aandelen van de verschillen houtinstallatietypen in de milieuschadeposten weergegeven. We observeren hier dezelfde verhoudingen als voor de gemiddelde bijdrage van houtinstallatietypen aan de totale emissies.

tabel 38: milieuschadeposten van houtinstallaties uitgesplitst naar houttype in Vlaanderen in 2015 in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten, totale emissies

| | Cassette | Kachel | Ketel | Open haard | Speksteen- /tegelkachel | Totaal |
|--|----------|--------|-------|------------|----------------------------|--------|
| Briketten | 7,1 | 5,2 | 0,9 | 6,7 | 0,7 | 21 |
| Houtafval - onbehandeld | 58,5 | 78,4 | 0,9 | 13,4 | 44,1 | 195 |
| Houtafval - niet-verontreinigd behandeld | 6,8 | 3,5 | 0 | 7,1 | 1,6 | 19 |
| Houtkrullen | 0,6 | 1,9 | 0 | 1,0 | 0 | 3,5 |
| Pellets | 2,5 | 30,9 | 0,5 | 2,6 | 0,8 | 37 |
| Snoeihout | 91,5 | 115,0 | 0,3 | 34,6 | 32,5 | 274 |
| Stukhout | 278,6 | 280,8 | 52,3 | 70,2 | 89,2 | 771 |
| Totaal | 446 | 516 | 55 | 136 | 169 | 1.321 |
| Aandeel houtinstallaties | 33,7% | 39,1% | 4,2% | 10,3% | 12,8% | |

figuur 23: aandelen houtinstallaties in de milieuschadetekosten van de totale emissies van houtverbruik voor woningverwarming in Vlaanderen in 2015



5.3.3 Resultaten 2030: Milieuschadetekosten directe emissies

In de analyse in hoofdstuk 4 lieten we zien dat de emissies van woningverwarming in 2030 mogelijk in de orde van 15% kunnen dalen als het Energieplan wordt uitgevoerd. De bijbehorende milieuschadetekosten van de directe emissies zijn te zien in tabel 39. De verdeling van de milieuschadetekosten over emissiestoffen is geïllustreerd in figuur 24 en de verdeling over energiedragers in figuur 25.

Deze resultaten laten een daling van de totale schadetekosten gerelateerd aan de directe emissies zien van 2,1 miljard euro in 2015 naar 1,7 miljard euro in het scenario van 2030 (-21,0%) (centrale waarde). De relatieve bijdrage van de diverse stoffen aan de milieuschadetekosten is ongeveer gelijk aan die in 2015: de schadetekost van PM_{2,5} telt mee voor ongeveer 40% in de totale schadetekosten. De meeste emissies dalen ook met ongeveer 21%. Bovendien zijn de verdelingen van de milieuschadetekosten over emissiestoffen en energiedragers voor het scenario van 2030 vergelijkbaar met de verdelingen voor 2015. Dit heeft te maken met het feit dat de milieuschadetekosten van elektriciteitsverbruikende toestellen zeer laag zijn, en met de aanname in het 2030-scenario dat de overschakeling op een warmtenet of warmtepomp geen verband houdt met de energiedrager/warmtechniek die huishoudens in de huidige situatie gebruiken.

tabel 39: milieuschadetekosten ten gevolge van directe emissies per energiedrager voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten

| | Aardgas | Stookolie | Hout | Propan/ Butaan/ LPG | Kolen | Elektriciteit | Totaal |
|-----------------------|----------|-----------|----------|---------------------------|----------|---------------|--------|
| Ammoniak | 0 | 0 | 20,4 | 0 | 0,01 | 0 | 20,5 |
| Arseen | 0,0089 | 0,0001 | 0,0023 | 0,0002 | 0,002 | 0 | 0,01 |
| Benzo(a)pyreen | 4,58E-07 | 4,30E-05 | 7,07E-03 | 1,15E-08 | 2,21E-03 | 0 | 0,01 |
| Cadmium | 2,08E-05 | 5,46E-05 | 1,78E-01 | 5,23E-07 | 1,49E-03 | 0 | 0,2 |
| Chroom | 2,89E-08 | 4,99E-06 | 1,44E-04 | 7,27E-10 | 6,83E-06 | 0 | 0,0002 |
| Dioxines | 0,007 | 0,008 | 0,2837 | 0,0002 | 0,04 | 0 | 0,3 |
| Distikstof(mono)oxide | 1,1 | 0 | 0,15 | 0 | 0 | 0 | 1,2 |
| Elementair koolstof | 0 | 0,9 | 230 | 0 | 0 | 0 | 230,9 |

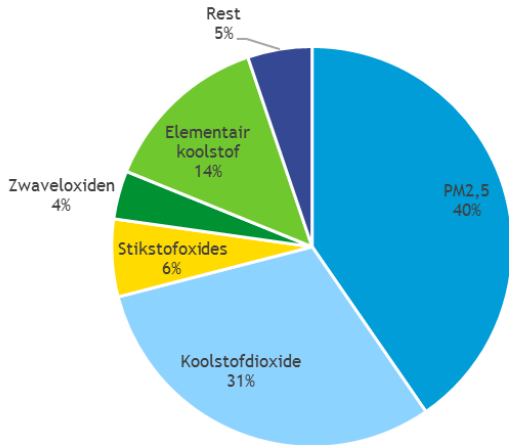


| | Aardgas | Stookolie | Hout | Propana/ Butaan/ LPG | Kolen | Elektriciteit | Totaal |
|----------------------|--------------|--------------|----------------|----------------------------|--------------|---------------|----------------|
| Koolstofdioxide | 229,2 | 199,0 | 75,5 | 6,5 | 7,0 | 0 | 517,2 |
| Koolstofmonoxide | 0,2 | 0,1 | 4,1 | 0,01 | 0,3 | 0 | 4,7 |
| Koper | 2,40E-08 | 2,70E-05 | 3,12E-04 | 6,04E-10 | 8,51E-05 | 0 | 0,0004 |
| Kwik | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,006 | 0,2 | 0 | 0,9 |
| Lood | 0,0006 | 0,003 | 1,9 | 0,00002 | 0,8 | 0 | 2,7 |
| Methaan | 0,1 | 0,1 | 9,4 | 0,004 | 0,3 | 0 | 9,9 |
| NMVOS | 0,4 | 0,04 | 13,3 | 0,01 | 1,1 | 0 | 14,8 |
| Nikkel | 4,86E-06 | 3,13E-05 | 3,15E-03 | 1,22E-07 | 1,72E-03 | 0 | 0,005 |
| Selenium | 7,10E-05 | 8,48E-06 | 5,32E-04 | 1,79E-06 | 2,32E-04 | 0 | 0,0008 |
| Stikstofdioxides | 39,2 | 41,6 | 20,1 | 1,9 | 3,0 | 0 | 105,8 |
| PM _{2,5-10} | 0 | 0,1 | 32,5 | 0 | 0 | 0 | 32,6 |
| PM _{2,5} | 5,1 | 9,3 | 594 | 0,1 | 74,6 | 0 | 683,0 |
| Zink | 1,27E-06 | 2,34E-04 | 0,07 | 3,20E-08 | 0,003 | 0 | 0,1 |
| Zwaveloxiden | 0 | 47,3 | 2,7 | 0 | 16,2 | 0 | 66,2 |
| Totaal (M€) | 275,6 | 298,6 | 1.004,7 | 8,5 | 103,5 | 0,0 | 1.690,9 |

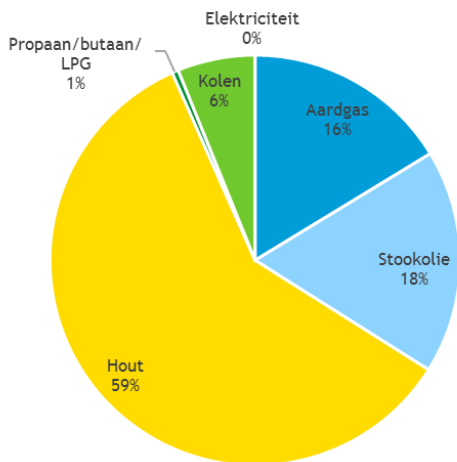
In de digitale bijlage staat ook een berekening van de milieuschadeprijzen voor 2020. Uit deze tabel blijkt dat de milieuschadeprijzen in 2020 beperkt dalen van 2,1 miljard euro in 2015 naar 2,0 miljard euro in 2020.

Indien we de CO₂-emissies van hout niet zouden meerekenen zouden de totale milieuschadeprijzen van de directe emissies in het scenario van 2030 met 4,5% (75,5 M€) dalen als gevolg van het niet meerekenen van de CO₂-kosten van houtverbranding.

figuur 24: milieuschadeposten door directe emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten – verdeling over emissiestoffen



figuur 25: milieuschadeposten door directe emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten – verdeling over energiedragers



5.3.4 Resultaten 2030: Milieuschadeposten totale emissies

In tabel 40 staan de milieuschadeposten van de totale emissies voor het scenario van 2030. De totale kosten bedragen 2,1 miljard euro, wat ten opzichte van de directe kosten in 2030 26% meer is.

In vergelijking met de totale kosten in 2015 vindt er een daling plaats van deze kosten van ca. 19%, wat in lijn is met de omvang van de directe emissiereducties.

De verdeling van de milieuschadeposten in het scenario van 2030 over emissiestoffen is te vinden in figuur 26 en de verdeling over energiedragers in figuur 27. Deze verdelingen zijn vergelijkbaar met die van 2015. Dit heeft te maken met het feit dat de milieuschadeposten van elektriciteitsverbruikende toestellen zeer

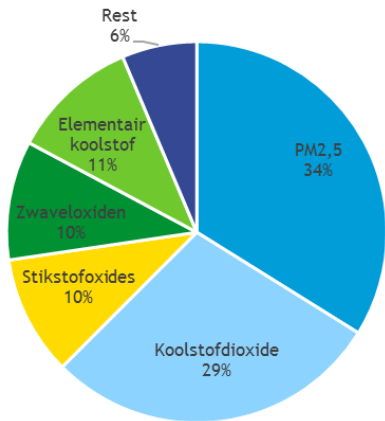


laag zijn, en met de aanname in het 2030-scenario dat de overschakeling op een warmtenet of warmtepomp geen verband houdt met de energiedrager/warmtechniek die huishoudens in de huidige situatie gebruiken.

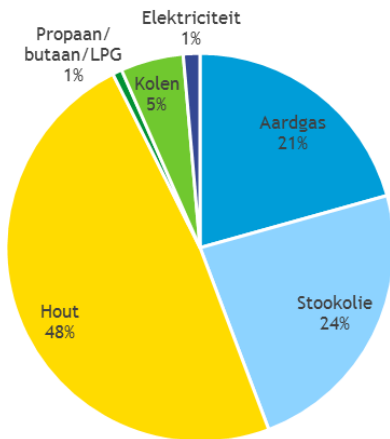
tabel 40: milieuschadetekosten ten gevolge van totale emissies (direct én indirect) per energiedrager voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten

| | Aardgas | Stookolie | Hout | Propan/ Butaan/ LPG | Kolen | Elektriciteit | Totaal |
|-----------------------|--------------|--------------|----------------|---------------------------|--------------|---------------|----------------|
| Ammoniak | 0,2 | 0,8 | 20,6 | 0,02 | 0,1 | 0,4 | 22,2 |
| Arseen | 0,02 | 0,05 | 0,01 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,1 |
| Benzo(a)pyreen | 0,0003 | 0,0003 | 0,01 | 0,00001 | 0,002 | 0,000004 | 0,01 |
| Cadmium | 0,01 | 0,1 | 0,2 | 0,004 | 0,002 | 0,002 | 0,3 |
| Chroom | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,00001 | 0,00001 | 0,000002 | 0,001 |
| Dioxines | 0,02 | 0,01 | 0,3 | 0,0004 | 0,04 | 0,001 | 0,4 |
| Distikstof(mono)oxide | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,01 | 0,01 | 0,2 | 1,8 |
| Elementair koolstof | 0,0001 | 0,9 | 229,9 | 2,6E-06 | 6,0E-07 | 3,6E-09 | 230,9 |
| Koolstofdioxide | 264,2 | 230,8 | 80,1 | 7,9 | 7,6 | 20,4 | 611,0 |
| Koolstofmonoxide | 0,4 | 0,2 | 4,1 | 0,01 | 0,3 | 0,02 | 5,1 |
| Koper | 0,0004 | 0,001 | 0,002 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,004 |
| Kwik | 0,7 | 0,8 | 0,3 | 0,04 | 0,2 | 0,03 | 2,2 |
| Lood | 0,6 | 1,3 | 2,3 | 0,1 | 0,8 | 0,1 | 5,2 |
| Methaan | 26,3 | 3,4 | 9,7 | 0,1 | 1,1 | 0,01 | 40,6 |
| NMVOS | 0,4 | 0,04 | 13,3 | 0,01 | 1,1 | 0,01 | 14,8 |
| Nikkel | 0,01 | 0,1 | 0,01 | 0,004 | 0,003 | 0,001 | 0,1 |
| Selenium | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,0001 | 0,0003 | 0,00005 | 0,01 |
| Stikstofoxides | 85,5 | 86,9 | 29,8 | 3,6 | 3,8 | 6,7 | 216,4 |
| PM _{2,5-10} | 3,5 | 4,4 | 34,0 | 0,2 | 1,0 | 0,01 | 43,1 |
| PM _{2,5} | 13,8 | 29,7 | 598,7 | 1,1 | 77,6 | 0,6 | 721,5 |
| Zink | 0,002 | 0,004 | 0,1 | 0,0002 | 0,003 | 0,002 | 0,1 |
| Zwaveloxiden | 43,6 | 142,6 | 6,5 | 3,7 | 17,9 | 1,2 | 215,5 |
| Totaal | 440,6 | 502,3 | 1.030,2 | 16,8 | 111,6 | 29,7 | 2.131,1 |

figuur 26: milieuschadecosten door totale emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadecosten – verdeling over emissiestoffen



figuur 27: milieuschadecosten door totale emissies voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 gerekend met de centrale waarde voor milieuschadecosten – verdeling over energiedragers



6 SCENARIOANALYSE

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden diverse scenario's gepresenteerd waarvan wij een berekening hebben uitgevoerd en hun invloed op de milieuschadetekosten hebben vergeleken. We zijn uitgegaan van vijf scenario's:

1. Aanpassing van de vervangingsgraad van verwarmingsinstallaties.
2. Handhaving huidige brandstofmix.
3. Vergelijking houtinstallaties en overschakeling houtinstallaties op lokale pellets.
4. Rookgasreiniging bij houtkachels en -ketels.
5. Gebruik van de nieuwste technieken voor hoofdverwarming en geen gebruik van open haarden.

Bij de scenario's zullen de milieuschadetekosten worden vergeleken met de huidige situatie voor Vlaanderen in 2015 zoals gepresenteerd in hoofdstuk 3 en paragraaf 5.3.1, en met het scenario voor 2030 zoals gepresenteerd in hoofdstuk 4 en paragraaf 5.3.2, dat in dit hoofdstuk het '2030-scenario' wordt genoemd.

6.2 Scenario 1 – Aanpassing vervangingsgraad alle installaties

De vervangingsgraad is een belangrijke parameter in onze studie. In het 2030-scenario veronderstellen we een jaarlijkse vervangingsgraad van 2,5 tot 5% van de bestaande installaties bij alle energiedragers/ warmtetechnieken (zie tabel 25). Het zou natuurlijk kunnen dat wij de vervangingsgraad evenwel te positief hebben ingeschat, en daarom hebben we scenario 1a uitgerekend waarbij we de vervangingsgraad halveren. Daarnaast kijken we wat er zou gebeuren als de vervangingsgraad zou worden verhoogd, om zo een inzicht te geven in de effecten op milieuschadetekosten als er beleidsmatig zou worden ingezet op de verhoging van de vervangingsgraad van warmtetoestellen.

Tabel 41 geeft aan wat er met de totale milieuschadetekosten zou gebeuren als de vervangingsgraad half zo groot zou zijn als wij in onze berekeningen hadden verondersteld. Dit laat zien dat een lagere vervangingsgraad een relatief gering verschil uitmaakt op de totale milieuschadetekosten: de milieuschadetekosten van de totale emissies zouden dan ongeveer 7% hoger worden.

////////////////////////////////////

tabel 41: vergelijking milieuschadeposten van een halvering van de vervangingsgraad ten opzichte van het 2030-scenario voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten

| | 2030-scenario | | Halvering vervangingsgraad | |
|------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) |
| Broeikasgassen | 528 | 653 | 536 | 663 |
| Fijn stof | 946 | 995 | 1.074 | 1.124 |
| Stikstofoxiden | 106 | 216 | 110 | 222 |
| Overig | 110 | 266 | 115 | 274 |
| Totaal | 1.691 | 2.131 | 1.836 | 2.282 |
| In % t.o.v. referentie | 100% | 100% | 109% | 107% |

Noot: In het 2030-scenario zijn de vervangingsgraden 5%/jaar voor aardgas, weerstandsverwarming en de verschillende typen warmtepompen, 2,5%/jaar voor stookolie, propaan/butaan/LPG, steenkool en hout, en 0%/jaar voor het warmtenet. In dit scenario zijn deze waarden gehalveerd.

tabel 42 geeft inzicht wat er met de jaarlijkse milieuschadeposten zou gebeuren als alleen voor houtstook zou worden afgeweken van de huidige vervangingsgraad van 2,5%, en huidige oude houtinstallaties versneld worden vervangen door nieuwe installaties van dezelfde types³⁷.

tabel 42: vergelijking milieuschadeposten van diverse vervangingsgraden voor alleen houtgestookte installaties voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030 ten opzichte van het 2030-scenario in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten

| Vervangingsgraad | 2030-scenario | | Verhoging vervangingsgraad | | | | | |
|------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | 2,5% | | 5% | | 7,5% | | 10% | |
| | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) |
| Broeikasgassen | 528 | 653 | 525 | 650 | 523 | 648 | 523 | 647 |
| Fijn stof | 946 | 995 | 707 | 755 | 513 | 562 | 367 | 415 |
| Stikstofoxiden | 106 | 216 | 107 | 217 | 108 | 218 | 109 | 219 |
| Overig | 110 | 266 | 103 | 258 | 100 | 256 | 100 | 255 |
| Totaal | 1.691 | 2.131 | 1.442 | 1.881 | 1.245 | 1.684 | 1.097 | 1.536 |
| In % t.o.v. referentie | 100% | 100% | 85% | 88% | 74% | 79% | 65% | 72% |

De resultaten laten zien dat de milieuschadeposten van de totale emissies zouden afnemen met 29% ten opzichte van 2015 (12% t.o.v. het 2030-scenario) als de vervangingsgraad van houtgestookte installaties zou toenemen tot 5% per jaar, en zelfs met 42% (28% t.o.v. het 2030-scenario) als de vervangingsgraad zou toenemen tot 10%. Een jaarlijkse vervangingsgraad van 10% zou maatschappelijke baten kennen ten waarde van 595 miljoen euro in Vlaanderen in 2030 ten opzichte van de huidige ingeschatte vervangingsgraad van 2,5%.

³⁷ Hierbij worden de oudste houtinstallaties het eerst vervangen, net zoals in het 2030-scenario.

6.3 Scenario 2 – Handhaving huidige brandstofmix in 2030

De ontwikkelingen tot 2030 worden bepaald door een combinatie van het Energieplan, de vervangingsgraad en aannames over de samenstelling van de woningvoorraad in Vlaanderen in 2030. In het hier bekeken scenario is verondersteld dat de brandstofsamenstelling in 2030 dezelfde zal zijn als nu. Concreet betekent deze aanname dat het Energieplan niet volledig zal worden uitgevoerd en dat er geen verschuiving in de brandstofmix zal teweeg worden gebracht door het beleid. In dit scenario bepalen dan alleen de vervangingsgraad van verwarmingsinstallaties en bijbouw van huizen de ontwikkeling van woningverwarming.

In tabel 43 staan de resultaten vermeld. Bij handhaving van de huidige brandstofmix stijgen de milieuschadekosten van de totale emissies van woningverwarming in Vlaanderen in 2030 t.o.v. het 2030-scenario met ongeveer 71 miljoen euro, een bedrag dat 2,7% is van de milieuschadekosten in 2015. De kostenreductie van 19% in het 2030-scenario wordt dus vooral veroorzaakt door de natuurlijke vervanging van verwarmingsinstallaties, en veel minder door de verschuivingen in de brandstofsamenstelling conform het Energieplan.

tabel 43: totale milieuschadekosten voor woningverwarming in Vlaanderen in 2030, in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadekosten, vergelijking 2030-scenario met een fictief scenario waarbij de brandstofmix voor woningverwarming onveranderd blijft

| | <i>Huidige situatie (2015)</i> | | 2030-scenario | | Scenario 2 (2030) | |
|------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) |
| Broeikasgassen | 625 | 760 | 528 | 653 | 549 | 676 |
| Fijn stof | 1.237 | 1.296 | 946 | 995 | 972 | 1.023 |
| Stikstofoxiden | 136 | 264 | 106 | 216 | 111 | 226 |
| Overig | 133 | 323 | 110 | 266 | 115 | 277 |
| Totaal | 2.131 | 2.644 | 1.691 | 2.131 | 1.747 | 2.202 |
| In % t.o.v. 2015 | 100% | 100% | 79% | 81% | 82% | 83% |

6.4 Scenario 3 – Vergelijking houtinstallaties en houttypes en overschakeling op lokale pellets

De analyse in paragraaf 5.2 liet zien dat het verstoken van houtafval in ketels de laagste totale milieuschadekosten kent van alle houtinstallaties. Voor een aantal andere verwarmingstechnieken kwamen pellets echter als schoonste houtbrandstof naar voren. Het derde scenario betreft een scenario waarbij alle houtgestookte installaties³⁸ overschakelen op lokale houtpellets, het houttype dat over het geheel genomen de laagste milieuschadekosten per GJ geleverde warmte veroorzaakt. Dit scenario vergelijken we met de huidige situatie (2015). In tabel 44 zijn de resultaten van dit scenario te zien. De overschakeling op lokale pellets resulteert in een afname van de milieuschadekosten per jaar van directe emissies van 19% (402 M€), en van de totale emissies van 15% (402 M€).³⁹

tabel 44: totale milieuschadekosten voor woningverwarming in Vlaanderen, in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadekosten, vergelijking huidige situatie en scenario 3 (alleen lokale houtpellets in houtinstallaties)

| | Huidige situatie (2015) | | Scenario 3 (2015) | |
|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) |
| Broeikasgassen | 625 | 760 | 625 | 761 |
| Fijn stof | 1.237 | 1.296 | 847 | 907 |
| Stikstofoxiden | 136 | 264 | 135 | 261 |
| Overig | 133 | 323 | 121 | 313 |
| Totaal | 2.131 | 2.644 | 1.729 | 2.242 |
| In % t.o.v. 2015 | 100% | 100% | 81% | 85% |

We hebben hierbij niet onderzocht of de lokale markt voldoende pellets kan leveren om aan deze vraag te voldoen.

6.5 Scenario 4 – Rookgasreiniging bij houtinstallaties

De analyse tot dusverre liet zien dat de emissies van houtgestookte installaties tot hoge milieuschadekosten leiden. Daar is in de literatuur en bij fabrikanten van houtgestookte installaties ook aandacht voor en er zijn diverse opties voorgesteld om de emissies te reduceren. In dit scenario bekijken we twee van deze opties:

- a het plaatsen van een katalysator bij houtkachels;
- b het plaatsen van een filter bij houtkachels en ketels.

In dit scenario onderzoeken we het effect daarvan op de milieuschadekosten in de huidige situatie (2015).

³⁸ Dit omvat ook bijverwarmingsinstallaties, incl. open haarden.

³⁹ Het feit dat de kostenreductie van de totale emissies gelijk is aan die van de directe emissies betekent dat de milieuschadekosten van de indirecte emissies per saldo gelijk blijven. Dit kan gebeuren doordat de indirecte emissies van sommige stoffen afnemen, maar bij andere juist weer toenemen als gevolg van de overschakeling op lokale pellets. Het blijkt dat dit een netto-effect op de kosten van indirecte emissies geeft van ongeveer nul.

6.5.1 Katalysator bij houtkachels

In dit scenario wordt aangenomen dat houtkachels worden voorzien van een katalysator, waarbij de volgende emissiereducties plaatsvinden: 35% fijn stof (PM_{2,5-10} en PM₁₀), 75% NMVOS, 82% CO, en 95% elementair koolstof.

Deze reducties zijn mogelijk volgens katalysatorleverancier MoreCAT. Sommige katalysatoren kunnen in het rookkanaal van een houtkachel worden geplaatst, andere als nageschakelde technologie (Procede Biomass, 2018). De aanschafkosten van een katalysator zijn 300-750 euro (ECN, 2017).

In tabel 45 staan de milieuschadeposten voor dit scenario. Te zien is dat de jaarlijkse milieuschadeposten van de totale emissies dalen met ca. 7,5% als gevolg van de toepassing van katalysatoren bij houtkachels, ofwel 200 miljoen euro per jaar. In Vlaamse huishoudens stonden in 2015 232.720 houtkachels (hoofd- plus bijverwarming); dit is 38,5% van het totale aantal houtstookinstallaties. Wanneer we in overweging nemen dat houtinstallaties verantwoordelijk zijn voor 50% van de milieuschadeposten van verwarmingsinstallaties in Vlaanderen, en houtkachels 39% van de totale kosten van houtstookinstallaties, dan zien we dat de afname van de milieuschadeposten van houtkachels aanzienlijk is. Uitgaande van bovengenoemde aanschafkosten zou de aanschaf van katalysatoren voor al deze kachels tot een eenmalige investering leiden van 70-175 miljoen euro plus de installatiekosten. Afhankelijk van de hoogte van deze installatiekosten lijkt het erop dat de kosten zich dus relatief snel zullen terugverdienen vanuit maatschappelijk perspectief.⁴⁰

tabel 45: totale milieuschadeposten voor woningverwarming in Vlaanderen, in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadeposten, vergelijking huidige situatie en scenario 4a (katalysator bij houtkachels)

| | Huidige situatie (2015) | | Scenario 4a (2015) | |
|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) |
| Broeikasgassen | 625 | 760 | 625 | 760 |
| Fijn stof | 1.237 | 1.296 | 1.045 | 1.103 |
| Stikstofoxiden | 136 | 264 | 136 | 264 |
| Overig | 133 | 323 | 126 | 316 |
| Totaal | 2.131 | 2.644 | 1.932 | 2.444 |
| In % t.o.v. 2015 | 100% | 100% | 91% | 92% |

6.5.2 Filter bij houtkachels en –ketels

Een andere optie is om alle⁴¹ houtkachels en –ketels te voorzien van een filter, waarmee fijn stof, elementair koolstof en zware metalen uit de uitstoot kunnen worden gefilterd. Procede Biomass (2018) haalt een onderzoek aan van Obernberger en Mandl (2011) waaruit blijkt dat elektrostatische filters 50-85% van de fijn stofuitstoot kan afvangen, afhankelijk van o.a. het type kachel of ketel, het type filter, het houttype en de opstartprocedure. Bij een kachel wordt de filter geplaatst in het rookkanaal of bij de rookgasuitmonding. Het stroomverbruik van het filter is 10-30 W (Procede Biomass, 2018) – deze is

⁴⁰ Een precieze berekening hangt naast de installatiekosten ook af van de gekozen disconteringsvoet. Daarbij moet eventueel ook in ogenschouw worden genomen de kosten van het financieren van vermogen vanuit het perspectief van huishoudens. Dergelijke berekeningen zijn niet uitgevoerd in het kader van het huidige onderzoek.

⁴¹ Het is technisch mogelijk om een filter te installeren in/op alle typen houtkachels en –ketels. Bij kachels wordt de filter geplaatst in het rookkanaal of bij de rookgasuitmonding. Ook bij ketels is dit veelal het geval (Procede Biomass, 2018).

verwaarloosbaar klein en daarom door ons niet meegenomen bij de berekeningen. De aanschafkosten van een elektrostatisch filter zijn ca. 1.200-1.500 euro (ECN, 2017).

In dit scenario gaan we uit van een reductie van 50% van fijne en grovere stoffracties door het plaatsen van een filter. Het plaatsen van een filter betekent dat ook elementair koolstof met minimaal 50% zal dalen. In tabel 46 staan de totale milieuschadetekosten van dit scenario. We zien dat de jaarlijkse milieuschadetekosten van de totale emissies van woningverwarming in Vlaanderen in dit scenario met 244 miljoen euro dalen. Dit is 9,2% van de kosten van de totale emissies in de huidige situatie, of 18% van de milieuschadetekosten van hout. De grootte van deze reductie heeft zijn oorsprong in het feit dat ca. 40% van de houtinstallaties in Vlaanderen een kachel of ketel is, PM_{2,5}, PM_{2,5-10} en elementair koolstof gezamenlijk 87% van de milieuschadetekosten van houtinstallaties innemen en de fijn stofemissies met 50% afnemen.

tabel 46: totale milieuschadetekosten voor woningverwarming in Vlaanderen, in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadetekosten, vergelijking huidige situatie en scenario 4b (filter bij houtkachels en -ketels)

| | Huidige situatie (2015) | | Scenario 4b (2015) | |
|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) |
| Broeikasgassen | 625 | 760 | 625 | 760 |
| Fijn stof | 1.237 | 1.296 | 994 | 1.052 |
| Stikstofoxiden | 136 | 264 | 136 | 264 |
| Overig | 133 | 323 | 133 | 323 |
| Totaal | 2.131 | 2.644 | 1.888 | 2.400 |
| In % t.o.v. 2015 | 100% | 100% | 89% | 91% |

6.6 Scenario 5 – Nieuwste installatietypen en geen gebruik van open haarden

In dit scenario vinden ten opzichte van de huidige situatie (2015) twee veranderingen plaats. Ten eerste worden oudere installatietypen die momenteel in gebruik zijn voor verbranding van aardgas, stookolie en hout vervangen door de nieuwste variant van hetzelfde installatietype die momenteel op de markt is. Dit gaat concreet om alle niet-condenserende aardgasketels en stookolieketels kleiner dan 70 kW met bouwjaar 2011 of ouder, en alle houtinstallaties met bouwjaar 2016 of ouder, omdat voor deze installatietypen in deze studie gerekend wordt met verschillende emissiefactoren voor verschillende bouwjaarklassen (zie de digitale bijlage)⁴². Ten tweede wordt er geen hout meer verstoekt in open haarden in dit scenario.

Het niet gebruiken van open haarden zal leiden tot een hoger energieverbruik van hoofdverwarmingsinstallaties. Omdat niet bekend is in welke mate open haarden effectief bijdragen aan de verwarming van huizen en welke hoofdverwarmingsinstallaties er precies staan in de huizen met een open haard, moeten we hier enkele aannames doen om dit hogere energieverbruik mee te nemen. In de huidige situatie gebruiken de open haarden in Vlaanderen (ca. 85.000 stuks) in totaal 1,1 PJ hout, wat met een installatierendement van 10% op 0,11 PJ warmte komt. We nemen aan dat 100% van deze warmte effectief bijdraagt

⁴² Ten opzichte van de huidige situatie worden 97% van de niet-condenserende olieketels kleiner dan 70 kW, 92% van de niet-condenserende aardgasketels kleiner dan 70 kW en 100% van alle houtketels, -kachels, cassettes, en speksteen/tegelmets (zowel hoofdverwarming als bijverwarming) vervangen. In totaal wordt ca. 52% van het totaal aantal verwarmingsinstallaties in Vlaanderen vervangen.

aan de verwarming van de wooneenheden en dat alle open haarden in huizen staan waar aardgas wordt verbruikt in de hoofdverwarmingsinstallatie. Rekenend met een gemiddeld rendement van aardgas-installaties van 72% is 0,15 PJ extra aardgas nodig om dezelfde hoeveelheid warmte te leveren. In onze berekeningen wordt deze 0,15 PJ verdeeld over alle hoofdverwarmingsinstallaties (rekening houdend met de installatierendementen).

De resultaten van het scenario, gepresenteerd in tabel 47, laten zien dat het gecombineerde effect van de vervanging van de genoemde installatietypen en het niet gebruiken van open haarden leidt tot een reductie van de jaarlijkse milieuschadekosten van de totale emissies van 38% (997 M€) tot 1,6 miljard euro. Van deze 38% komt 86% voor rekening van de nieuwste installatietypen en 14% voor het niet gebruiken van open haarden. Het vervangen van alle oude installaties leidt dus tot een kostenreductie van 33%, en het niet gebruiken van open haarden tot een kostenreductie van 5%.

tabel 47: totale milieuschadekosten voor woningverwarming in Vlaanderen, in mln euro's gerekend met de centrale waarde voor milieuschadekosten, vergelijking huidige situatie en scenario 5 (nieuwste installatietypen en geen gebruik open haarden)

| | Huidige situatie (2015) | | Scenario 5 (2015) | |
|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) | Kosten directe emissies (M€) | Kosten totale emissies (M€) |
| Broeikasgassen | 625 | 760 | 618 | 753 |
| Fijn stof | 1.237 | 1.296 | 287 | 345 |
| Stikstofoxiden | 136 | 264 | 120 | 248 |
| Overig | 133 | 323 | 112 | 301 |
| Totaal | 2.131 | 2.644 | 1.137 | 1.647 |
| In % t.o.v. 2015 | 100% | 100% | 53% | 62% |

7 CONCLUSIES

Woningverwarming draagt bij aan luchtverontreiniging in de bebouwde omgeving. Luchtverontreiniging, en dan met name de uitstoot van kleine stofdeeltjes ($PM_{2,5}$) is door de WHO bestempeld als een belangrijke doodsoorzaak in veel landen – belangrijker dan zaken als ondervoeding, overgewicht of alcohol en drugsgebruik (Health Effects Institute, 2018). Naast gezondheidsschade leidt luchtverontreiniging door woningverwarming ook tot schade aan ecosystemen en gebouwen en draagt het verstoken van brandstoffen bij aan klimaatverandering.

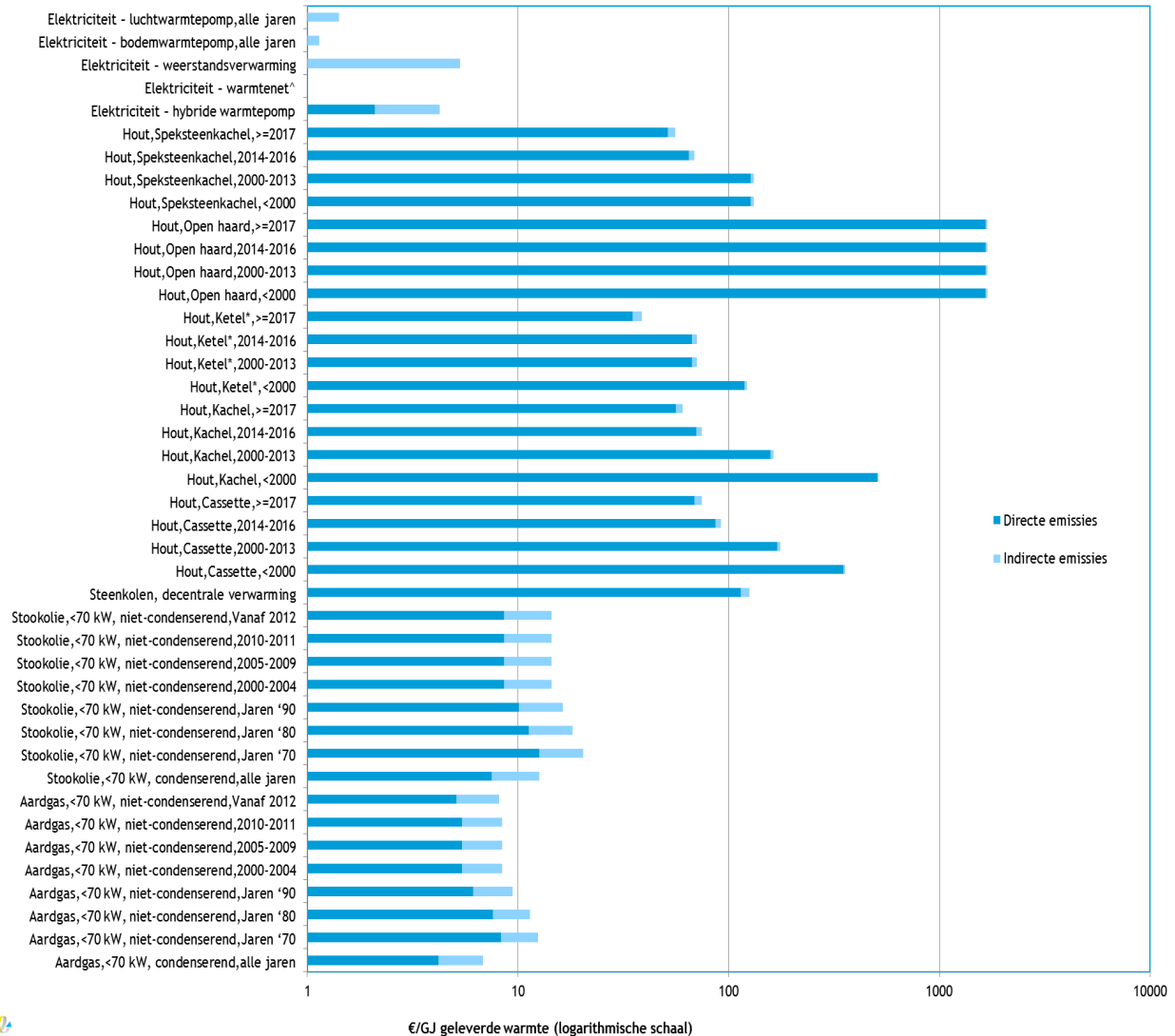
In de economische wetenschap is er in toenemende mate aandacht voor het kwantificeren én het monetair waarderen van deze schade. Op deze manier kan inzichtelijk worden gemaakt dat luchtverontreiniging leidt tot een lagere welvaart. Deze studie onderzoekt de milieuschadeprijzen ten gevolge van woningverwarming in Vlaanderen met als doel inzicht te krijgen welke milieuschadeprijzen samenhangen met woningverwarming in Vlaanderen en hoe de onderlinge verhouding in milieuschadeprijzen is voor de verschillende manieren om een woning te verwarmen.

Op basis van deze studie kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Woningverwarming leidt in Vlaanderen tot substantiële milieuschade aan menselijke gezondheid, ecosystemen, gebouwen en klimaat. Doordat woningverwarming per definitie in de gebouwde omgeving plaatsvindt, waar bevolkingsdichtheden groter zijn dan de landelijke gemiddelden, en de schoorstenen van woningverwarming een lagere hoogte hebben dan bijvoorbeeld bij elektriciteitscentrales, leidt woningverwarming vooral tot grote gezondheidsschade. In zijn totaliteit schatten we de milieuschade die ontstaat door woningverwarming in Vlaanderen op ongeveer 2,1 miljard per jaar voor de directe emissies en een additionele minimale 0,5 miljard euro per jaar voor de indirecte emissies (emissies in de voorketen bij de productie en transport van brandstoffen).
- Het gebruik van hout als middel voor woningverwarming is in zijn totaliteit verantwoordelijk voor 50% van de totale milieuschadeprijzen en 60% van de directe milieuschadeprijzen (zonder emissies in de voorketen). Dit ondanks het feit dat houtstook maar wordt toegepast in 1,6% van de huishoudens als hoofdverwarming en in 19,1% van de huishoudens als bij- of sfeerverwarming.
 - Er is een heel groot verschil in de milieuschadeprijzen per eenheid geleverde warmte voor de diverse technieken (zie figuur 28 en 29). Over het algemeen kennen op afvalwarmte (warmtenet) of elektriciteit gebaseerde warmtetechnieken (zoals weerstandsverwarming en warmtepompen) de laagste milieuschadeprijzen. Dit is niet bevreemdend aangezien de directe emissies dan nul zijn. Op hout en steenkolen gestookte toestellen leiden tot de hoogste milieuschadeprijzen. Veelgebruikte houtgestookte toestellen voor ruimteverwarming, ook de meest moderne kachels en ketels, kennen een factor 5-12 hogere milieuschadeprijzen dan de schoonste gasgestookte alternatieven (een condenserende ketel) (zie figuur 29).
- Van alle houtgestookte toestellen zijn open haarden veruit de meest milieuvervuilende. Eén GJ warmte geleverd door een open haard kent ruim 1.600 maal hogere milieuschadeprijzen dan één GJ warmte geleverd door een bodemwarmtepomp. Open haarden worden echter vooral als sfeerverwarming ingezet. Het gebruik van open haarden in Vlaanderen is in totaliteit verantwoordelijk voor ongeveer 5% van de totale milieuschadeprijzen, ca. 130 miljoen euro per jaar.
- Bovenstaande cijfers zijn inclusief toerekening van CO_2 -emissies aan houtverbranding. Als de CO_2 -emissies van houtstook buiten beschouwing worden gelaten, dalen de directe milieuschadeprijzen met

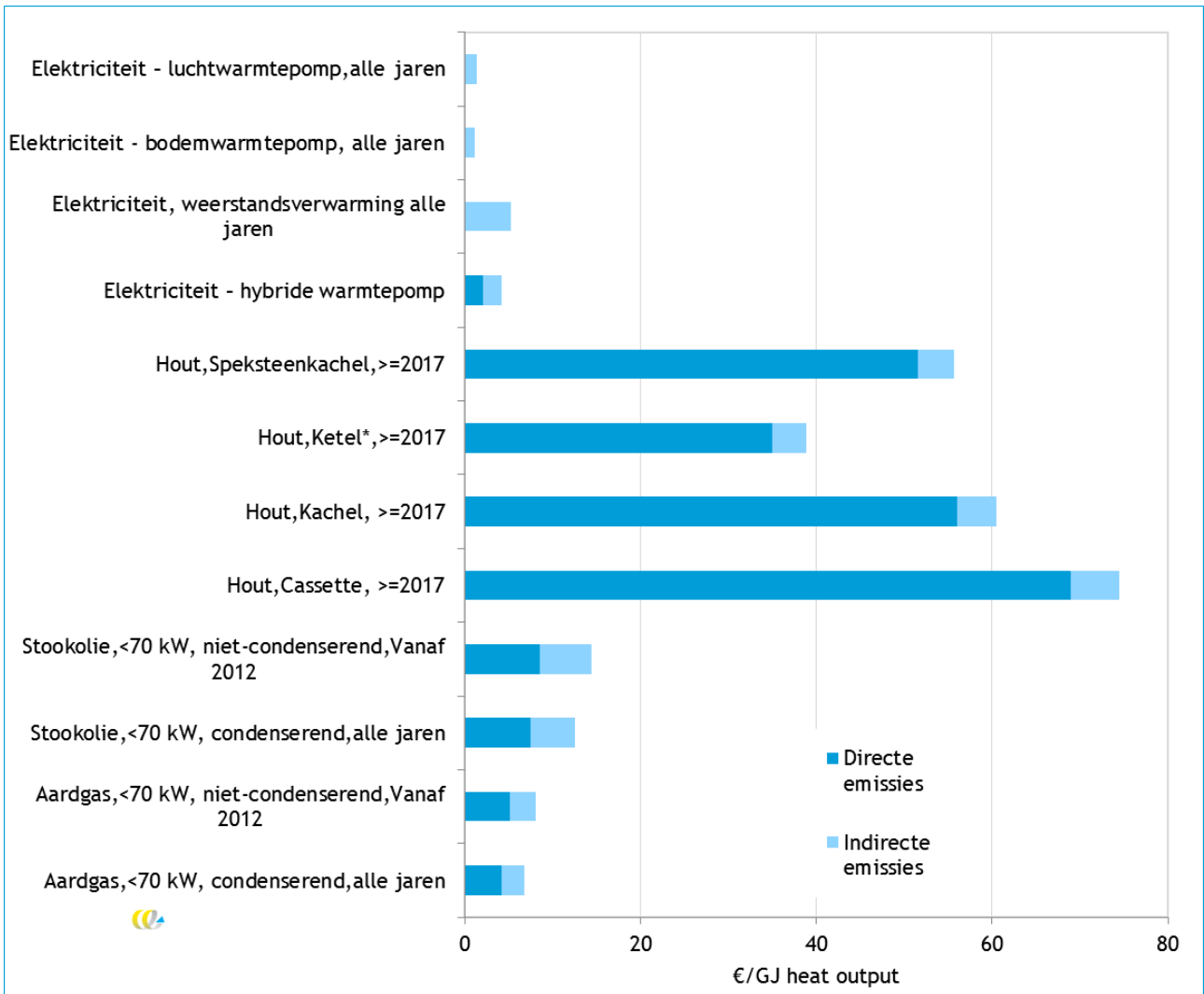
ongeveer 80 miljoen euro (4%). De resultaten van de milieuschadekosten worden daarom niet noemenswaardig beïnvloed door de keuze hoe om te gaan met CO₂-emissies van biomassa.

figuur 28: overzicht van milieuschadekosten van diverse technieken en leeftijdsklassen van verwarmingstoestellen in euro's per GJ geleverde warmte (logaritmische schaal)



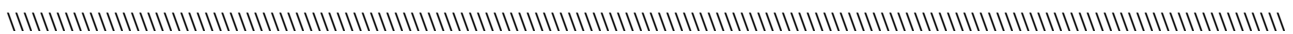
Noten: * Voor houtgestookte ketels is een gemiddelde genomen van de brandstof met de hoogste emissies en de brandstof met de laagste emissies. Effecten van houtgestookte installaties zijn inclusief schadekosten voor (biogene) CO₂-emissies.
 ^ Het elektriciteitsverbruik van een warmtenet betreft de elektriciteit die nodig is om aard- of restwarmte te leveren aan huishoudens. Er is geen rekening gehouden met een dervingsfactor voor eventuele rendementsverliezen bij de installatie die restwarmte levert.

figuur 29: overzicht van milieuschadecosten van diverse technieken van verwarmingstoestellen in euro's per GJ geleverde warmte: meest moderne toestellen (normale schaal)



Voorts blijkt uit de analyse dat de niet-condenserende verwarmingseenheden hogere emissiekosten kennen dan de condenserende eenheden (20% hoger voor aardgasgestookte ketels en 14% voor stookoliegestookte ketels). Het toepassen van moderne hoogrendementsketels (condenserende gasgestookte toestellen) in plaats van niet-condenserende gas- of oliegestookte verwarmingseenheden kan dus ook de milieuschadecosten doen dalen, maar niet zoveel als vervanging van houtgestookte eenheden door gasgestookte eenheden.

- Tot op zekere hoogte is er bij het gebruik van hout als woningverwarming een verschil in de diverse soorten hout die verstuikt kunnen worden. Het verstoken van pellets leidt over het algemeen tot de laagste milieuschadecosten, behalve bij de nieuwste ketels, waar het verstoken van houtafval tot de laagste kosten leidt. Het verstoken van houtafval in de nieuwste ketels leidt met milieuschadecosten van € 33,71 per GJ geleverde warmte tot de laagst mogelijke milieuschadecosten bij het verbranden van hout. Toch zijn hierbij de milieuschadecosten nog steeds een factor 5 hoger dan bij een modern condenserend gasgestookt toestel.



Het verschil tussen lokale pellets en pellets uit Canada en Noord-Amerika zijn de indirecte emissies. Hierdoor liggen de schadekosten van pellets uit Canada en Noord-Amerika ongeveer 10% hoger bij alle nieuwste installatietypen (met uitzondering van de open haard).

In diverse scenario's en toekomstverwachtingen is verder onderzocht wat het effect is op de milieuschadecosten van toekomstige veranderingen in de wijze van woningverwarming in Vlaanderen. Tabel 48 geeft een overzicht van de scenario's en toekomstverwachtingen die zijn gehanteerd in deze studie en hun invloed op de totale milieuschadecosten.

tabel 48: overzicht van de ontwikkeling van milieuschadecosten (M€/jaar) door ruimteverwarming bij diverse varianten en vergeleken ten opzichte van de huidige schadecosten

| | Directe emissies | Totale emissies | Reductie totale emissies t.o.v. 2015 |
|---|------------------|-----------------|--------------------------------------|
| 1. Huidige situatie 2015 | 2.131 | 2.644 | |
| 2. Huidige situatie 2015 zonder CO ₂ -kosten houtverbranding | 2.051 | nb | -4%* |
| 3. Situatie 2030 na invoering Energieplan | 1.691 | 2.131 | -19% |
| 4. Situatatie 2030 met vervangingsgraad naar 10% | 1.097 | 1.536 | -42%/-28%^ |
| 5. Situatie 2015 als er alleen pellets worden verstoekt bij houtinstallaties | 1.729 | 2.242 | -15% |
| 6. Situatie 2015 als alle houtkachels worden uitgerust met katalysator | 1.932 | 2.444 | -8% |
| 7. Situatie 2015 als open haarden niet langer worden gebruikt en alle toestellen vervangen worden door de nieuwste technieken | 1.137 | 1.647 | -38% |

Nb = niet beschouwd in deze studie.

* Reductie ten opzichte van de directe emissies, niet totale emissies.

^ -28% is de reductie ten opzichte van 2030 na invoering van het Energieplan.

Volgens het scenario 2030 zijn, na invoering van het Energieplan Vlaanderen (Vlaamse Regering, 2018), de jaarlijkse milieuschadecosten van de totale emissies gedaald met ongeveer 19% ten opzichte van de huidige situatie. Dit komt deels door de natuurlijke vervanging van verwarmingstoestellen en deels door de veranderingen in de brandstofvraag door invoering van het Energieplan. De vervangingsgraad is van deze invloeden waarschijnlijk dominant. Indien de vervangingsgraad een factor 2-4 zou worden verhoogd naar 10% per jaar, zouden in 2030 de milieuschadecosten met ongeveer 42% dalen ten opzichte van de huidige situatie (of 28% ten opzichte de veronderstelde situatie in 2030 na invoering van het Energieplan). Additioneel op het Energieplan worden in dit scenario de verouderde verwarmingstoestellen versneld afgeschreven en wordt alleen nog maar gebruik gemaakt van de meest moderne technieken binnen elk brandstoftype.

Een ander scenario dat is doorgerekend is het scenario waarbij alleen nog maar pellets worden verstoekt in de hout verbruikende installaties. In dat geval zouden de milieuschadecosten met 15% dalen. Indien men alle huidige houtkachels zou uitrusten met katalysatoren zouden de schadecosten met 8% dalen. De meest significante daling kan worden verkregen als men alle verwarmingstoestellen vervangt door de meest moderne varianten binnen elke brandstofklasse en men tegelijkertijd geen open haarden meer zou gebruiken. Een dergelijke variant zou de milieuschadecosten met 38% doen dalen ten opzichte van de huidige situatie (33% door de vervanging van alle oude toestellen en 5% door het niet gebruiken van open haarden).

Op deze resultaten zijn enkele voorbehouden van toepassing. Allereerst is deze studie uitgevoerd met kengetallen voor milieuschadecosten. Deze zijn aan onzekerheid onderhevig, zowel in de effectbepaling als



in de waardering. Voor de waardering zijn deze onzekerheden kwantitatief doorgerekend in deze studie. Die liet zien dat de totale directe milieuschadeposten van 2,1 miljard euro in 2015 een onzekerheidsmarge kennen van 1,5 miljard euro aan de ondergrens en 3,4 miljard euro aan de bovengrens.

Ook dient rekening gehouden te worden met het feit dat dit gemiddelde waarden zijn voor een bepaalde generatie van toestellen. Er zit nog heel wat variatie in toestellen die voldoen aan de productnormering: sommige toestellen zullen beduidend meer uitstoten in de praktijk dan in lab-omstandigheden, andere toestellen blijven ook in werkelijke omstandigheden mogelijk ver onder normen. Voor dergelijke onzekerheden kon niet gecorrigeerd worden in het kader van dit onderzoek.



VITO, 2017b. Energiebalans Vlaanderen: 1990-2016, depotnr. D/2017/3241/312, <https://emis.vito.be/nl/rapporten-energiebalans-vlaanderen>

Vlaamse overheid, 2013. Bio-economie in Vlaanderen - visie, strategie en aanzet tot actieplan van de Vlaamse overheid voor een duurzame en competitieve bio-economie in 2030, Interdepartementale Werkgroep Bio-Economie, depotnr. D/2013/3241/330, https://www.ewi-vlaanderen.be/sites/default/files/bestanden/biomassa_web.pdf

Vlaamse Regering, 2018. Conceptnota aan de Vlaamse Regering, betreffende Ontwerp Vlaams Energieplan voor de periode 2021-2030, <https://www.vlaanderen.be/nl/nbwa-news-message-document/document/0901355780248d70>

VMM, 2017a. Emissiefactordata van huishoudelijke verwarmingsinstallaties zoals gebruikt in VITO (2017a), aangeleverd door VMM.

VMM, 2017b. Lozingen in de lucht: 2000-2016, Emissie Inventaris Lucht, D/2017/6871/049, <https://www.vmm.be/publicaties/lozingen-in-de-lucht-2000-2016>

VMM en Universiteit Antwerpen, 2018. Literature review of emissions of modern wood combustion devices and emissions reducing technologies, under real-life conditions, final report

VREG, 2014. Resultaten enquête gezinnen 2014: Gedrag & ervaringen van huishoudelijke afnemers op de vrijgemaakte Vlaamse energiemarkt, RAPP-2014-13, <http://docplayer.nl/39061980-Resultaten-enquete-gezinnen-2014-gedrag-ervaringen-van-huishoudelijke-afnemers-op-de-vrijgemaakte-vlaamse-energiemarkt.html>

WHO, 2005. Global update on WHO Air quality Guidelines for particulate matter, ozon, nitrogen, dioxide and sulphur dioxide, Geneva: World Health Organization.

WHO, 2010. The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification: 2009. World Health Organization, 2010.

WHO, 2011. Burden of disease from environmental noise : Quantification of healthy life years lost in Europe, Copenhagen: World Health Organization (WHO).

WHO, 2012. Health effects of black carbon, Geneva: World Health Organization (WHO).

WHO, 2013. Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide, Geneva: World Health Organization (WHO).

WHO, 2014. WHO Expert Meeting : Methods and tools for assessing the health risks of air pollution at local, national and international level, meeting report 12-13 May, Bonn: World Health Organization (WHO).



BIJLAGEN



bijlage 1 Definities

Cassette: Een verbeterde versie van een open haard waarbij de verbrandingskamer is gesloten met deurtjes of schuiven. Hierdoor kan de luchttoevoer beter worden geregeld en wordt het rendement verhoogd.

Centrale verwarming: Een verwarmingssysteem waarbij de warmte centraal wordt opgewekt en met behulp van een warmteoverbrengend medium (meestal water) via een buizenstelsel wordt getransporteerd naar verschillende vertrekken in een gebouw.

Collectieve verwarming: Betreft verwarmingsinstallaties, meestal groter dan 70 kW, die meerdere huizen verwarmen, zoals een CV-ketel die een appartementencomplex verwarmt. Wordt ook wel blokverwarming genoemd.

Condenserende ketel: Een CV-ketel die een warmtewisselaar heeft waarin warmte van de rookgassen aan het retourwater wordt afgegeven, waardoor de energie-efficiëntie (rendement) hoger is dan bij een niet-condenserende ketel. Wordt ook wel een hoogrendementsketel (HR-ketel) genoemd.

Decentrale verwarming: Een verwarmingsinstallatie die alleen het vertrek verwarmt waarin de installatie zelf staat.

Directe emissies: De emissies die vrijkomen bij verbranding van brandstof voor woningverwarming.

Houtkachel: een verwarmingstoestel met een gesloten verbrandingskamer die stralingswarmte afgeeft. Een kachel verwarmt meestal één vertrek (decentrale verwarming), hoewel er ook situaties denkbaar zijn waarbij de warmte via leidingen wordt getransporteerd naar nabijgelegen ruimtes.

Houtketel: In een houtketel wordt water verwarmd dat via een buizenstelsel wordt overgebracht naar meerdere vertrekken. Dit is een CV-ketel (centrale verwarming).

HR-ketel (Hoogrendementsketel): Zie 'condenserende ketel'.

Hybride warmtepomp: Een hybride warmtepomp combineert een (elektrische) warmtepomp met de HR-ketel op aardgas. De warmtepomp kan ongeveer voor de helft van de warmtevraag zorgen.

Indirecte emissies: De emissies die gerelateerd zijn aan de voorketen van de brandstof, d.w.z. de emissies die vrijkomen bij de productie en het transport van de brandstof. In het geval van elektriciteit gaat het om de emissies die vrijkomen bij de elektriciteitsproductie.

Inzethaard: Zie Cassette.

Niet-condenserende ketel: Een CV-ketel die de warmte van de rookgassen niet gedeeltelijk terugwint met behulp van een warmtewisselaar, en daarom een lager rendement heeft dan een condenserende ketel.



Open haard: Een open haard bevat een verbrandingskamer met een opening aan de voorzijde die niet met deurtjes of schuiven kan worden afgesloten van de ruimte die wordt verwarmd. Sommige open haarden zijn eveneens voorzien van ingebouwde leidingen en een ventilator voor convectiewarmte (VITO, 2011). Een open haard wordt meestal ingezet als bijverwarming of als sfeerverwarming.

Totale emissies: De som van de directe emissies en de indirecte emissies.

Warmtepomp: Een warmtepomp gebruikt elektriciteit om warmte uit de lucht (luchtwarmtepomp) of bodem (bodemwarmtepomp) op te waarden voor de verwarming van woningen.

Weerstandsverwarming: Een elektrische weerstandsverwarming zet elektriciteit om in warmte. Dit gebeurt in het verwarmingselement (bijvoorbeeld een radiator) zelf. Er is geen centrale verwarmingsinstallatie nodig, zoals een ketel of warmtepomp. De verwarmingselementen kunnen wel als één systeem fungeren, waarbij je centraal kunt instellen hoe warm je elke ruimte wilt hebben.



bijlage 2 Emissiefactoren van energiedragers

Inleiding

Om in dit project tot een inschatting te komen van milieuschadeprijzen van verschillende technologieën voor woningverwarming in Vlaanderen, hebben we de emissiefactoren (hoeveelheid uitstoot per eenheid geleverde warmte) nodig van deze technologieën, van alle belangrijke emissiestoffen m.b.t. luchtverontreiniging en klimaatverandering, en voor verschillende brandstoffen. Verder willen we de afhankelijkheid van de emissiewaarden weten van de leeftijd van de warmte-installaties, en een onderscheid maken tussen individuele verwarming en collectieve verwarming (ook wel blokverwarming genoemd, zie bijlage 1). Het onderzoek beperkt zicht tot de huishoudelijke sector, en legt de focus op verbrandingsinstallaties. Houtverbrandingsinstallaties krijgen hier bijzondere aandacht, omdat deze installaties een bijdrage kunnen leveren aan de verduurzaming van het energieverbruik voor woningverwarming, maar ook stoffen emitteren die schadelijk zijn voor de gezondheid.

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd. Allereerst beschrijven we de emissiefactordata die de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) heeft verzameld, en die door VITO zijn gebruikt in diens rapport over emissies door gebouwenverwarming in Vlaanderen (VITO, 2017a; VMM, 2017a). Daarna vergelijken we deze data met emissiewaarden uit andere databronnen. Vervolgens gaan we in op emissies van houtverbrandingsinstallaties en collectieve verwarming, en tot slot beschrijven we hoe we emissiefactoren van elektrische verwarming en aardwarmtenetten kunnen berekenen, om in een latere fase een vergelijking te kunnen maken tussen emissies van verschillende woningverwarmingstechnologieën.

Emissiefactordata van VMM

VMM heeft de emissiefactorwaarden aangeleverd die ook gebruikt zijn in VITO (2017a). Deze emissiefactorwaarden zijn voor het grootste deel gebaseerd op EMEP/EEA (2017a) en IPCC (2006). Ook zijn waarden zo nodig aangepast op de emissienormen in Vlaanderen⁴³.

In de datalijst wordt een onderscheid gemaakt tussen de volgende brandstoffen: aardgas, stookolie, hout, kolen, en propaan/butaan/LPG. De emissiestoffen die hierin zijn opgenomen staan in tabel 49 met de stofsymbolen tussen haakjes (VITO, 2017a).

Voor installaties op aardgas en stookolie wordt onderscheid gemaakt tussen condenserende en niet-condenserende installaties (zie bijlage 1), en tussen installaties groter dan 70 kW en kleiner dan 70 kW. Installaties groter dan 70 kW zijn meestal collectieve installaties die meerdere huishoudens van warmte voorzien (VITO, 2017a). Bij hout als brandstof worden er zes houttypen en vijf installatietypen onderscheiden.

Houttypen: briketten, houtafval (met onderverdeling in niet-verontreinigd behandeld, verontreinigd behandeld, en onbehandeld), houtkrullen, pellets, snoeihout, stukhout.

Installatietypen: Cassette, kachel, ketel, open haard, speksteen/tegelkachel.

⁴³ Ronny Vercruyse (VMM), e-mail, 3 mei 2018.

tabel 49: overzicht emissiestoffen (VITO, 2017a; VMM, 2017a)

| Stoffengroep | Stoffen |
|---|---|
| Broeikasgassen | Distikstof(mono)oxide (N ₂ O), Koolstofdioxide (CO ₂), Methaan (CH ₄) |
| Ozonprecursoren | Koolstofmonoxide (CO), niet-methaan vluchtige organische stoffen (NMVOS) |
| Verzuring en vermesting | Ammoniak (NH ₃), stikstofoxides (NO _x), zwaveloxiden (SO _x) |
| Fijn stof | Elementair koolstof (C), stof met diameter < 10 µm (PM ₁₀), stof met diameter < 2,5 µm (PM _{2,5}) |
| Polyaromatische koolwaterstoffen (PAK's) | Benzo(a)pyreen (B(a)P), benzo(b)fluorantheen (B(b)Flu), benzo(k)fluorantheen (B(k)Flu), indeno(1,2,3-cd)pyreen (IP) |
| Persistente Organische Polluenten (POP's) | Dioxines (PCDD-F), hexachloorbenzeen (HCBz), polychloorbifenyl (PCB t) |
| Zware metalen | Arseen (As), Cadmium (Cd), Chroom (Cr), Koper (Cu), Kwik (Hg), Lood (Pb), Nikkel (Ni), Selenium (Se), Zink (Zn) |

Verder worden ook verschillende bouwjaren weergegeven voor de installaties op aardgas, stookolie en hout. Nieuwere installaties stoten in de regel lagere concentraties uit. Tot slot wordt voor de installaties op fossiele brandstoffen aangegeven of de installaties centraal of decentraal zijn. Decentrale installaties maken geen gebruik van een centrale ketel met warmte transporterende buizen naar verschillende kamers, maar produceren de warmte in de ruimtes zelf. In Vlaanderen wordt minder dan 16% van de woon-eenheden decentraal verwarmd, aannemende dat alle houtinstallaties behalve de houtketel decentraal zijn (VITO, 2017a).

Overzicht van databronnen

In tabel 50 wordt een overzicht gegeven van de gevonden databronnen met emissiefactoren van huishoudelijke verbrandingsinstallaties. Het gaat hier om Tier 2-emissies, waarbij tenminste de brandstof en het installatietype worden gespecificeerd.



De emissiefactordata van VMM (2017a) zijn beschreven in de vorige sectie. Deze data zijn afkomstig uit de IPCC guidelines 2006 (IPCC, 2006), en de emissiefactoren van verontreinigende stoffen komen voornamelijk uit de EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 (update juli 2017)⁴⁴ (EMEP/EEA, 2017a). Deze databronnen hebben wij ook opgezocht. EMEP/EEA (2017a) bevat nieuwe data t.o.v. de waarden in VMM (2017a)⁴⁵. Ook geeft EMEP/EEA (2017a) betrouwbaarheidsintervallen voor de emissiefactoren, en is de data uitgebreid gedocumenteerd (EMEP/EEA, 2017b).

Een vergelijking van de verschillende databronnen levert het volgende op:

Brandstoffen: Behalve VMM (2017a), EMEP/EEA (2017a) en IPCC (2006) omvat geen van gevonden bronnen de volle breedte aan brandstoftypen. TNO (2016), VITO (2011) en VMM en Universiteit Antwerpen (2018) richten zich op hout; TNO (2014) op aardgas.

Houttypen: Naast VMM (2017a) onderscheiden alleen VITO (2011) en VMM en Universiteit Antwerpen (2018) verschillende houttypen. In deze laatste bron worden ook verschillende houtsoorten, zoals beuk, eik en vurenhout, gespecificeerd.

Installatietypen: Alle bronnen onderscheiden verschillende installatietypen, maar de benamingen lopen uiteen, wat het lastiger maakt om emissiefactoren met elkaar te vergelijken.

Emissiestoffen: IPCC (2006) beperkt zich tot broeikasgassen; EMEP/EEA (2017a) juist tot andere emissiestoffen. Dit komt samen in VMM (2017a). CE Delft (2016) geeft echter alleen CO₂-emissiefactoren, TNO (2014) alleen NO_x-factoren, en VMM en Universiteit Antwerpen (2018) vier (voor houtverbranding belangrijke) schadelijke stoffen. TNO (2016) en VITO (2011) geven beide een lange lijst van emissiestoffen, die voor een groot deel overeenkomt met die van VMM (2017a).

Vermogens: VMM (2017a) maakt een onderscheid tussen installaties kleiner en groter dan 50 kW_{th}. EMEP/EEA (2017a) geeft emissiedata voor huishoudelijke installaties (categorie 1.A.4.b), maar ook data voor 'niet-huishoudelijke' installaties (Categorie 1.A.4.a), en collectieve verwarming voor huishoudens valt hier onder. De volgende vermogensklassen worden gebruikt: kleiner dan 50 kW (huishoudelijk), tussen 50 kW en 1 MW, en tussen 1 MW en 50 MW ('niet huishoudelijk') (EMEP/EEA,2017b). Er wordt echter niet bij de emissiefactordata zelf aangegeven om welke vermogensklasse het gaat.

Bouwjaren: Behalve VMM (2017a) geeft alleen TNO (2014) emissiefactoren voor verschillende aanschafjaren (maar dit is dus alleen voor NO_x bij aardgasgestookte installaties).

De vergelijking van emissiefactoren uit verschillende bronnen wordt bemoeilijkt doordat beschikbare data zijn gespecificeerd voor een beperkte groep brandstoffen en emissiestoffen, en leeftijden van installaties vaak niet worden gegeven. Bovendien zijn er verschillende wijzen waarop emissiefactoren kunnen worden gemeten en berekend. Metingen kunnen sterk variëren als gevolg van verschillende meetcondities en installatiekenmerken⁴⁶. In berekeningen kunnen verschillende aannamen worden gedaan. Emissiefactoren in de EMEP/EEA Guidebook 2016 (update juli 2017) worden berekend op basis van de standaard emissieconcentraties en de specifieke theoretische rookgasvolumes voor de verschillende brandstoffen, waardoor meetonauwkeurigheden worden voorkomen (EMEP/EEA, 2017b). In de praktijk zullen de emissiefactoren afwijken van de berekende waarden, omdat ze afhankelijk zijn van o.a. de leeftijd van de installatie, stookwijze en kwaliteit van de brandstof.

⁴⁴ Dit zullen we in het vervolg van dit document afkorten tot 'EMEP/EEA guidebook 2016'.

⁴⁵ De VMM heeft haar data al geüpdatet op basis van de EMEP/EEA guidebook 2016 update van juli 2017.

⁴⁶ Emissiefactoren zijn vaak gemiddelden. De helft van de betreffende installaties zal meestal een hogere emissiewaarde hebben dan de emissiefactor, en de andere helft een lagere waarde (Nussbaumer et al., 2008) (Dit gaat dus om installaties van hetzelfde type, met gebruik van soortgelijke meetmethoden).

Vergelijking van de emissiefactoren voor open haard en houtkachels in VITO (2011), TNO (2016) en VMM (2017a), die zich op hun beurt ook weer op verschillende bronnen baseren, bevestigt dat waardes sterk uiteen kunnen lopen (soms wel met een factor 100 verschil, maar vaker met een factor 2-5). Zie tabel 51, waarin de emissiestoffen staan die in alle drie de bronnen voorkomen.

De verschillen worden voor een groot deel veroorzaakt door het meenemen van verschillende typen kachels en open haarden, bouwjaren en gebruikte houttypen⁴⁷. Ook technologische ontwikkeling van installaties kan een rol spelen, omdat emissiefactorwaarden in verschillende jaren bepaald zijn. Bij fijn stof is niet altijd duidelijk of bij de metingen is rekening gehouden met condenseerbare verontreinigingen (TNO, 2016).

tabel 51: vergelijking van emissiefactoren in kg/PJ voor open haard en houtkachels in verschillende bronnen. De brede ranges worden veroorzaakt door variaties in metingen, veroorzaakt door verschillende meetcondities en installatiekenmerken

| Emissiestof | VITO (2011) | | TNO (2016) | | VMM (2017a) | |
|-------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------|-------------------|-------------------|
| | Kachel* | Open haard* | Kachel** | Open haard | Kachel*** | Open haard*** |
| B(a)P | 5,9-1.713 | 117-180 | 59-116 | 65 | 10-121 | 121 |
| B(b)Flu | 6,9-523 | 180-260 | 54-112 | 65 | 16-111 | 111 |
| B(k)Flu | 5,4-918 | 117 | 30-58 | 32 | 5-42 | 42 |
| Cd | 0,6-2,5 | 0,6-2,5 | 3,2 | 3,2 | 13 | 13 |
| PCDD-F | 0,000006-0,0102 | 0,00001-0,0294 | 0,00017 | 0,0016 | 0,0001-0,0097 | 0,0008-0,0097 |
| N2O | 4.000-18.500 | 9.000 | 4.000 | 4.000 | 0 | 9.000 |
| IP | 5,4-882 | 59 | 30-58 | 32 | 4-71 | 71 |
| CO ₂ | 95.000.000-132.000.000 | 95.000.000-132.000.000 | 112.000.000 | 112.000.000 | 112.000.000 | 112.000.000 |
| CO | 275.000-7.212.000 | 4.400.000-7.212.000 | 2.900.000-6.450.000 | 3.226.000 | 300.000-4.000.000 | 300.000-4.000.000 |
| Cu | 4,8-11,2 | 4,8-11,2 | 22 | 22 | 6 | 6 |
| Hg | 0,4 | 0,4 | 1,9 | 1,9 | 0,56 | 0,56 |
| Pb | 24-56 | 24-56 | 4,7 | 4,7 | 27 | 27 |
| CH ₄ | 259.000-2.190.000 | 190.000 | 300.000 | 300.000 | 497.000 | 0 |
| NMVOS | 720.000-1.500.000 | 720.000-1.500.000 | 252.000-774.000 | 1.290.000 | 10.000-600.000 | 600.000 |
| NO _x | 29.000-118.000 | 50.000-87.500 | 129.000 | 77.000 | 50.000-95.000 | 50.000 |
| PM ₁₀ | 70.000-1.450.000 | 300.000-1.156.000 | 52.000-194.000 | 161.000 | 52.000-760.000 | 840.000 |
| PM _{2,5} | 235.000-529.000 | 850.000 | 49.000-183.000 | 153.000 | 52.000-740.000 | 820.000 |
| Zn | 60-250 | 60-250 | 46 | 46 | 512 | 512 |
| SO _x | 5.900-20.000 | 10.000-12.500 | 13.000 | 13.000 | 11.000 | 11.000 |

*: Hier staat het bereik over verschillende waardes in het literatuuroverzicht van VITO (2011).

** : Hier staat het bereik over drie typen houtkachels: conventioneel, verbeterd en DINplus. TNO (2016) geeft verder enkele waarden.

***: Hier worden de minimum en maximum waarde gegeven (indien deze verschillen) over verschillende houttypes, houtbehandelingswijzen en bouwjaren.

⁴⁷ Deze informatie werd veelal niet gepresenteerd in VITO (2011) en TNO (2016), waardoor een gedetailleerdere vergelijking niet mogelijk was.

aandelen ook voor 2015 gelden, en hebben deze gebruikt om de emissiefactoren van elektriciteit in België in 2015 te bepalen.

Met SimaPro worden normaliter de volledige ketenemissies berekend. Om hier alleen de emissies die vrijkomen bij de elektriciteitsproductie te berekenen is een aangepaste analyse uitgevoerd. Voor de broeikasgassen is, conform de afspraken in het EU ETS, het biogene deel van de uitstoot (d.w.z., de broeikasgasemissies bij verbranding van biomassa) niet in de emissiefactoren opgenomen. De broeikasgasemissies verbonden aan de transformatie van land zijn ook niet meegenomen, omdat dit indirecte emissies zijn.

De emissiefactoren van elektriciteit geproduceerd in België in 2030 zijn ingeschat met SimaPro op basis van een verwachting van de elektriciteitsproductiemix in België in 2030 (zie tabel 52). Deze verwachting baseren we op een simulatiestudie⁵³ van de ontwikkeling van de elektriciteitsmarkt in België door Federaal Planbureau (2017). Omdat in die studie is uitgegaan van een volledige uitfasering van nucleaire energie (conform de ambitie van de regering⁵⁴), komt het aandeel nucleair op 0% in 2030. Verder nemen we aan dat de percentages ‘hydro – pumped storage’, ‘hydro – run of river’ en ‘wood chips – CHP’ hetzelfde zijn als in 2015, dat het aandeel van aardgas wordt onderverdeeld over verschillende typen centrales in dezelfde verhouding als in 2015, en dat het aandeel windenergie wordt onderverdeeld over onshore en offshore op basis van verwachte totale geïnstalleerde vermogens in 2030 (Federaal Planbureau, 2017; Vlaamse Regering 2018).

tabel 52: verwachte aandelen van technologieën in elektriciteitsproductie in België in 2030 (Federaal Planbureau 2017; eigen aannames)

| Technologie | Aandeel - 2015 | Aandeel - 2030 |
|---|----------------|----------------|
| Steenkool | 3,7% | 0,5% |
| Waterkracht - pumped storage | 2,2% | 2,2% |
| Waterkracht - run-of-river | 0,5% | 0,5% |
| Aardgas - combined cycle power plant | 13,1% | 28,9% |
| Aardgas - conventionele centrale | 3,0% | 6,7% |
| Nucleair - pressure water reactor | 56,3% | 0,0% |
| Olie | 0,0% | 0,0% |
| Wind - onshore | 4,9% | 8,8% |
| Wind - offshore | 3,2% | 13,2% |
| Biogas - WKK - gasmotor | 0,5% | 8,4% |
| Aardgas - WKK - combined cycle power plant – 400 MWel | 3,0% | 6,6% |
| Aardgas – WKK-conventionele centrale – 100 MWel | 7,0% | 15,5% |
| Olie - WKK | 0,0% | 0,0% |
| Houtsnippers - WKK – 6.667 kW - state-of-the-art 2014 | 2,6% | 2,6% |
| Zon-PV ⁵⁵ | 0,0% | 6,0% |
| Totaal | 100,0% | 100,0% |

⁵³ Dit omvat een simulatie met het PRIMES-model, een veelomvattend model van het Europese energiesysteem, waarin techno-economische kenmerken van productietechnologieën en het bij elkaar komen van vraag en aanbod in de elektriciteitsmarkt over de tijd worden gemodelleerd (Federaal Planbureau, 2017).

⁵⁴ <https://nl.wikipedia.org/wiki/Kernuitstap>

⁵⁵ Zon-PV staat niet in de Ecoinvent-database voor België in 2014; in werkelijkheid was het aandeel zon-PV ca. 3,8%.

De emissiefactoren van elektriciteit voor België in 2015 en 2030 zijn weergegeven in tabel 57.

De emissiefactoren voor 2030 zijn voor de meeste emissiestoffen (tot 86,5%) lager dan die van 2015, maar voor NO_x, cadmium, CO₂, CO, methaan, NMVOS en N₂O zijn de emissiefactoren 23-101% hoger.

Keuze emissiefactoren voor deze studie

Op basis van het bovenstaande overzicht van emissiefactordata concluderen we dat de data van VMM (2017a) het meest volledig, gedetailleerd en recent is voor wat betreft alle installatietypes en energiedragers, en daarom zal worden gebruikt in deze studie.

In tabel 53 t/m tabel 57 worden de emissiefactoren voor de directe emissies (in kilogram per petajoule) gegeven die we zullen gebruiken. In de digitale bijlage is de volledige lijst met gebruikte emissiefactoren te vinden.



bijlage 3 Overzicht studies schadekosten

Deze bijlage geeft een gedetailleerd overzicht van de diverse studies van milieuschadeposten die zijn beschouwd in deze studie.

Algemene kenmerken van de studie en de methode die is toegepast:

| Bron | Methode | Bepaling schadeposten* | | | |
|--|--|---|--|------------------------------------|---|
| | | SP | RP | HK | PK |
| VITO (2010), <i>Actualisering van de externe milieuschadeposten (algemeen voor Vlaanderen) met betrekking tot luchtverontreiniging en klimaatverandering</i> . MIRA/2010/03. | Gebaseerd op ExternE-NEEDS (2009), met integratie van Vlaamse modellen en data. | ja, voor impacts op gezondheid en biodiversiteit | ja, marktprijzen voor landbouwgewassen en materialen | ja, voor impacts op biodiversiteit | ja, voor broeikasgassen |
| Ricardo-AEA (2014), <i>Update of the Handbook on External Costs of Transport</i> . | Update van 2008 handboek, specifiek gebaseerd op transport. Per impactcategorie aanbevelingen voor gebruik van methodes en cijfers. Bijv. bij luchtvervuiling gebaseerd op NEEDS (2008) en de TREMOVE-model voor indirecte emissies. Geluidseffecten waarderen op basis van CE (2008, 2011). | ja, voor gezondheidseffecten | nee | nee | ja, voor broeikasgasemissies |
| CE Delft (2017), <i>Handboek Milieuprijzen 2017: Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts</i> . | Gebaseerd op NEEDS (2008) met belangrijkste aanpassing van: (a) CRF functies gebaseerd op WHO (2013); (b) bevolkingsomvang en -samenstelling 2016; (c) waardering (o.m. VOLY, morbiditeit, IQ, biodiversiteit) | ja, voor impacts op gezondheid en biodiversiteit | ja, marktprijzen voor landbouwgewassen en materialen | Nee | ja, voor broeikasgassen en eutrofiering van nitraat op water. |
| UBA (2012), <i>Ökonomische Bewertung von Umweltschäden: Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten</i> . Dessau, Umweltbundesamt (UBA). | Overgenomen uit NEEDS (2008) | ja, voor impacts op gezondheid en biodiversiteit | ja, marktprijzen voor landbouwgewassen en materialen | ja, voor impacts op biodiversiteit | |
| EnvEcon (2015), <i>Marginal Damage Cost Estimates for Air Pollutants in Ireland - 2015</i> . | Men heeft geen gebruik gemaakt van verspreidingsmodellen maar de relatie tussen emissies en verandering in concentratie gemodelleerd met econometrische technieken. E.a. betekent dat alle effecten die buiten het grondgebied van Ierland optreden niet zijn meegenomen. | Onduidelijk, maar vermoedelijk ja, voor impacts op gezondheid | Onduidelijk | Onduidelijk | Onduidelijk |

Noot: *SP = stated preferences, RP = revealed preferences, HK = herstellkosten, PK = preventiekosten.



Informatie over de meegenomen end-points:

| Bron | Impacts op endpointniveaus die worden onderscheiden | | | | | | | | | Toepasbaarheid op Vlaanderen |
|--------------------|---|-------------|-----|--|----------------|----------|------------|---|--|--|
| | mortaliteit | morbiditeit | IQ | ecosysteemdienste | biodiversiteit | gebouwen | materialen | grondstoffen | overig | |
| VITO (2010) | ja | ja | nee | ja, landbouw (granen, aardappelen, suikerbiet en erwten) | ja | ja | ja | nee | volksgezondheid andere EU landen | Ja, gericht op Vlaanderen en buurregio's. Niet voor specifieke locaties of trajecten, maar voor hele sector in Vlaanderen. |
| Ricardo-AEA (2014) | ja | ja | nee | ja | ja | ja | ja | nee | Geluid, congestie, ongevallen, infrastructurele belasting, overige milieu-impacts. | Gaat uit van EU-gemiddelden |
| CE Delft (2017) | ja | ja | ja | ja, diverse landbouwgewassen | ja | ja | ja | wel behandeld maar niet gekwantificeerd | Geluid | Niet zonermeer, gaat uit van Nlse waarden. Vanwege transparantie is omrekening Vlaanderen mogelijk. |
| UBA (2012) | ja | ja | nee | Effecten op natuur meegenomen bij verkeersingrepen (weg) | ja | ja | ja | nee | Omrekeningen naar verkeersmodi en brandstoffen | Niet zondermeer |
| EnvEcon (2015) | ja | ja | nee | Onduidelijk | ja | nee | nee | nee | | Nee |

Meegenomen stoffen:

Het volgende schema geeft een overzicht voor welke stoffen, die relevant zijn voor dit onderzoek, er milieuschadeposten zijn meegenomen in de diverse publicaties. Uit deze analyse blijkt dat de meeste stoffen zijn meegenomen in het CE Delft-onderzoek en de minste in het Ierse onderzoek van EnvEcon.

| Bron | Beschikbaarheid cijfers | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------------------------|------|-------|-------------------------|-----|-----|----------------------|------|----------|-------|-----|-------------|-------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| | PM2,5 | PM10 | Black | Nox | SO2 | NH3 | CO | PAKs | Dioxines | NMVOS | CO2 | CH4 | N2O | roet | As | Cd | CR | Cu | Hg | Pb | Ni | Se | Zn | Overig |
| VITO (2010) | ja | ja | nee | ja, excl. en incl. ozon | ja | ja | nee | nee | ja | ja | ja | ja | ja | nee | ja | ja | ja | nee | ja | ja | ja | nee | nee | Pmcoarse, SF6 en formaldehyde |
| Ricardo-AEA (2014) | ja | ja | nee | ja | ja | nee | ja | ja | nee | nee | ja | niet direct | niet direct | nee | ja | ja | ja | nee | ja | ja | ja | nee | nee | Onderscheid naar voertuigtipes (soort vervoer, brandstof, Euroklasse en bevolkingsdichtheid (rural, suburban en urban. |
| CE Delft (2017) | ja | ja | nee | ja | ja | ja | als benzo (a) pyreen | ja | ja | ja | ja | ja | ja | nee | ja | ja | ja | ja | ja | ja | ja | ja | ja | >2500 pollutants with emissions to air, water and soil |
| UBA (2012) | ja | ja | nee | ja | ja | nee | nee | nee | ja | ja | ja | niet direct | niet direct | niet direct | nee | nee | nee | nee | nee | nee | nee | nee | nee | |
| EnvEcon (2015) | ja | nee | nee | ja | ja | nee | nee | nee | nee | ja | nee | nee | nee | nee | nee | nee | nee | nee | nee | nee | nee | nee | nee | Resultaat is voorlopig, in toekomstig onderzoek kan nog worden gekeken naar de volgende organische verontreinigende stoffen en zware metalen voor taxatie; Benzeen, polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's), Dioxinen en Furanen, Kwik, Lood, Nikkel, Chroom, cadmium en arseen. Ook CH4 en koolwaterstoffen zijn niet meegenomen |

////////////////////////////////////

Een analyse van de overige kenmerken van de diverse studies:

| Bron | Schadeschatting op basis van WHO (2013) studie | Differentiatie naar de hoogte van uitstoot en naar bevolkingsdichtheid? | Toepasbaar op zowel directe als indirecte | Ruimtelijke en tijdschalen van milieu-impacts die worden meegenomen in de cijfers? | Onzekerheidsmarges | Andere kenmerken | Waarde VOLY/DALY | Prijspeil |
|---------------------|--|--|---|---|---|--|--|-----------|
| VITO (2010) | Nee | Ja, onderscheid tussen hoge schouwen, lage schouwen en verkeer (stad, platteland en snelweg). Blootstelling op basis van (Europese en lokale) bevolkingskaart en verwachte ontwikkeling hierin. | Nee, alleen directe emissies. | Kengetallen voor 2010 en 2020. Bij broeikasgasemissies jaren 2010, 2020, 2030, 2040 en 2050, zware metalen 2010. Cijfers voor Europa (EU-model). Aandacht voor waardering effecten in ontwikkelde v.s. ontwikkelingslanden. | Worden benoemd. | Structuur van het rapport is wat onduidelijk. | € 44.379/yoll na chronische blootstelling, € 66.569/yoll (volwassenen en pasgeborenen)(omgerekend naar € 2009) | 2009 |
| Ricardo- AEA (2014) | Nee | Deels, bij luchtvervuilende stoffen aandacht voor relevante parameters als locatie (rural, suburban, urban), tijdstip (peak, off-peak, night-time), voertuigspecificaties (e.g. EURO-normering). | Belang van indirecte emissies wordt benoemd. Voor wegverkeer, railverkeer, binnen- en luchtvaart worden pre-combustion effecten op luchtvervuiling en klimaatverandering gerapporteerd. | Cijfers voor 2010. Alleen EU-impacts. | Onderzekerheden worden benoemd. | | € 6.3550 per YOLL (€ 52.000 in 2000 prijspeil) | 2010 |
| CE Delft (2017) | ja | alleen voor PM2.5, PM10, Nox en SO2. | ja, maar geen apart cijfer voor elektriciteit (moet berekend worden) | Kengetallen voor 2015, en voor 2015,2020,2025,2030,2040,2050 voor broeikasgasemissies. Cijfers voor EU28 (verwacht Juli 2018). Geen waardering effecten ontwikkelingslanden | Gekwantificeerd voor waardering. Andere onzekerheden worden benoemd | | €50.000 voor onderwaarde, €70.000 centrale waarde en €110.000 bovenwaarde | 2015 |
| UBA (2012) | nee | Ja, er is een uitsplitsing ook naar Kleinfeueerung met schoorstenen van 3-20m hoogte mogelijk. | Ja, ook aparte waarden voor elektriciteit en andere brandstoffen | Kengetallen voor 2010. Broeikasgassen ook voor 2030 en 2050. | Worden benoemd maar niet gekwantificeerd. | Rapport alleen in Duts beschikbaar. | | |
| EnvEcon (2015) | ja, deels. Impact secundaire aerosolen en directe gezondheidsimpacts Nox niet meegenomen | wel naar bevolkingsdichtheid | Geen gegevens voor brandstoffen gegeven | | | Rapport is vaag, er staat geen vermelding van gebruikte VOLY en andere waarden, geen informatie over CRFs die zijn meegenomen, ook de ecoometrische relatie tussen emissies en concentraties is niet gegeven. Interessant is dat de biodiversiteitsimpacts van NMVOS zijn gekwantificeerd in dit in tt Handboek Milieuprijzen. | | |

////////////////////////////////////

bijlage 4 Extra uitwerkingen milieuschadetekosten

Black carbon

Black Carbon (BC, ook wel elementair carbon (EC) of roet genoemd) kent een gezondheids- en een klimaateffect. Het gezondheidseffect is onderzocht in WHO (2012) door middel van een systematische literatuurreview. WHO (2012) geeft aan dat er voldoende bewijs is in epidemiologische studies voor een verband tussen dagelijkse variaties in roetconcentraties met korte termijn veranderingen in de gezondheid. Onderzoek naar gezondheid op de korte termijn effecten suggereren ook dat BC een betere indicator is voor schadelijke deeltjesvormige stoffen uit verbrandingsbronnen dan ongedifferentieerde deeltjes (PM)-massa, maar dit geldt niet voor de langere termijn. E.a. betekent dat BC morbiditeit beter voorspelt dan PM_{2,5}, maar niet mortaliteit. Een praktisch probleem daarbij is dat de gezondheidseffecten van de emissies van BC moeilijk te scheiden zijn van de gezondheidseffecten van PM_{2,5}. Men zal dus moeten kiezen tussen hetzij het bepalen van de gezondheidseffecten aan de hand van Black Carbon, of het bepalen van de gezondheidseffecten aan de hand van PM_{2,5}. Dit zal mede afhangen van het aandeel black-carbon ten opzichte van PM_{2,5}-emissies. Op basis van WHO (2012) lijkt een Relative Risk voor een all-cause mortality van 1.05 tot 1.06 aannemelijk voor black carbon emissies. De toegepaste RR voor PM_{2,5}-emissies in deze studie bedraagt 1.006 – een factor 10 lager. We stellen voor om in de huidige studie deze verhouding te gebruiken. Dit betekent dat als de emissies van EC kleiner zijn dan 10% van de emissies van PM_{2,5}, we de schadelijkheid van de rookgassen bepalen aan de hand van de emissies van PM_{2,5}. Als de emissies van EC groter zijn dan 10% van de emissies van PM_{2,5} wordt de schadelijkheid van de extra emissies van EC met een RR van 1.06 bepaald. De factor waarmee de mortaliteit wordt opgehoogd wordt ook gebruikt om de morbiditeits-effecten mee op te hogen⁵⁶. In de praktijk voor residentiële woningverwarming betekent dit dat de schadelijkheid van de emissies van houtkachels met een additionele component voor de black carbon worden opgehoogd.

Deze waardering is niet gedifferentieerd tussen stad en platteland omdat informatie over het verschil in schadelijkheid tussen stad en platteland niet beschikbaar is. In deze studie is besloten om dit niet verder te onderzoeken omdat er geen verspreidingsmodellen beschikbaar zijn voor specifiek black carbon. Het is aannemelijk te veronderstellen dat de schadelijkheid van black carbon in de stedelijke omgeving met deze benadering wordt onderschat.

Black carbon heeft ook een klimaatimpact omdat het invloed heeft op de hoeveelheid zonlicht dat de aarde kan weerkaatsen. Doordat roet donker van kleur is absorbeert het meer zonlicht wat leidt tot een verdere temperatuurstijging. Dit is met name het geval wanneer de roetdeeltjes terecht komen op met sneeuw bedekte oppervlaktes, omdat met name deze oppervlaktes vrijwel al het zonlicht dat de aarde bereikt terugkaatsen. Er zijn ook emissies die een verkoelend effect hebben, zoals SO₂. SO₂ heeft zowel een direct als indirect verkoelend effect; de directe verkoeling wordt veroorzaakt doordat SO₂-deeltjes zonlicht weerkaatsen, het indirecte verkoelingseffect resulteert uit het feit dat SO₂-emissies bijdragen aan wolkvorming, hetgeen leidt tot een verkoeling (Fuglestad, et al., 2010). Hoewel deze effecten belangrijk kunnen zijn voor het bepalen van de effecten van klimaatverandering is IPCC van mening dat de wetenschappelijke onzekerheid nog te groot is om deze emissies in een Global Warming Potential uit te drukken. Daarom is dat hier ook niet ondernomen.

⁵⁶ Op basis van WHO (2012) zou men kunnen concluderen dat een lagere factor (bijvoorbeeld 5) kan volstaan voor het bepalen van de morbiditeitsimpacts. We wijzen er echter op dat de standaarddeviatie van de morbiditeitsimpacts groter is dan die van de mortaliteitsimpacts. Daarom is eenzelfde factor te hanteren voor morbiditeit en mortaliteit met het oogpunt op prudentie goed te verdedigen.



Detailberekeningen en opbouw milieuschadeprijzen

Op verzoek van VMM geven we hieronder meer uitleg over de berekeningen die zijn uitgevoerd om te komen tot een set van milieuprijzen voor Vlaanderen, zoals beschreven in hoofdstuk 2. We geven hier meer uitleg over de belangrijkste aanpassingen die zijn gedaan ten opzichte van de NEEDS-berekeningen uit 2008 zodat inzicht kan worden verkregen in de aanpassingen. De precieze argumentatie voor de aanpassingen en de gekozen waarderingen en aanpakken worden beschreven in het handboek Milieuprijzen (CE Delft, 2017a en 2018).

Uitgangspunt voor de berekeningen zijn de waarderingen vanuit NEEDS (2008) voor *België*, zoals weergegeven in de Exceltool. Deze Exceltool geeft waardering weer voor PM_{2,5}; SO₂; NO_x; NH₃; PM_{coarse} en NMVOS. Op deze waardering zijn er vier aanpassingen gedaan: tabel 58 geeft een overzicht van de gehanteerde aanpassingen.

tabel 58: overzicht van de aanpassingen aan de berekeningen van milieuprijzen voor België in NEEDS (2008) voor deze studie

| Aanpassingen | In NEEDS (2008) | Deze studie |
|---|--|--|
| 1 Concentratieresponsefuncties | Gebaseerd op WHO (2006) + eigen analyse | Gebaseerd op WHO (2013) |
| 2 Bevolkingsopbouw | Gebaseerd op SEDAC (UN) | Gebaseerd op Statbel |
| 3 Achtergrondconcentraties | Gebaseerd op modellering van MET-NO voor jaar 2010 | Gebaseerd op modellering MET-NO voor jaar 2020 aangepast aan verschil met daadwerkelijke emissies 2015 |
| 4a Aanpassing waardering gezondheid | Eigen WTP-onderzoek | Gebaseerd op Handboek Milieuprijzen |
| 4b Aanpassing waardering biodiversiteit | Gebaseerd op NEEDS (2006) | Gebaseerd op Kuik et al (2008). |

Startpunt NEEDS

Zoals gezegd is het startpunt van de analyse zijn de uitkomsten uit de NEEDS Excel tool voor België. Vanuit deze tool zijn we uitgegaan van het scenario: "External Costs [Euro2000 per tonne] - based on aggregation scheme "SIA_E_PPMc" for Human Health Impacts, based on average meteorology - corresponding to emissions from All SNAP-Sectors" omdat deze bron het meest overeenkomt met een generieke waardering voor de milieuschadeprijzen. De uitkomsten van deze bron zijn als volgt berekend waarbij we de emissies hebben doorgerekend in hun waardering in het startjaar 2000, om geen rekening te hoeven houden met de interne discontovoet en inkomenselasticiteiten die in het NEEDS-model vermeld staan.

tabel 59: waardering in €/t emissies in het jaar 2010 voor menselijke gezondheid met prijzen uit het jaar 2000 volgens de NEEDS Excel-tool

| Human Health | |
|-------------------|--------|
| NH ₃ | 21.871 |
| NMVOG | 1.569 |
| NO _x | 6.373 |
| PPM _{co} | 2.668 |
| PPM ₂₅ | 46.271 |
| SO ₂ | 8.543 |

Achter deze waarderingen ligt een tabel met berekeningen verscholen in het NEEDS-rapport. Deze tabel is indertijd opgenomen in het Handboek Schaduwrijzen van CE Delft (2010) en wordt hier gereproduceerd.



| Core Endpoints | pollutant | risk group (RG) | RGF value | Age Group (AG) | AGF value | Bevolkin gs groei | CRF [1/ug/m3] | phys. Impact per person per ug per m3 [1/ug/m3] | unit |
|--|-----------|--------------------------------|-----------|----------------|-----------|----------------------|----------------------|---|-------|
| Primary and SIA < 2.5 i.e. Particle < 2,5 um | | | | | | | | | |
| Life expectancy reduction - YOLL | PM2.5 | all | 1 | Total | 1 | 1.04 | 6.51E-04 | 6.77E-04 | YOLL |
| netto Restricted activity days (netRADs) | PM2.5 | all | 1 | MIX | 1 | 1.04 | 9.59E-03 | 9.97E-03 | days |
| Work loss days (WLD) | PM2.5 | all | 1 | Beroepsbe | 0.692 | 1.04 | 2.07E-02 | 1.49E-02 | days |
| Minor restricted activity days (MRAD) | PM2.5 | all | 1 | Adults_18 | 0.606 | 1.04 | 5.77E-02 | 3.64E-02 | days |
| Primary and SIA < 10 i.e. Particle < 10 um | | | | | | | | | |
| Increased mortality risk (infants) | PM10 | infants | 0.0019 | Total | 0.010 | 1.04 | 4.00E-03 | 7.82E-08 | cases |
| New cases of chronic bronchitis | PM10 | all | 1 | Adults_18 | 0.806 | 1.04 | 4.51E-05 | 3.78E-05 | cases |
| respiratory hospital admissions | PM10 | all | 1 | Total | 1.000 | 1.04 | 7.03E-06 | 7.31E-06 | cases |
| cardiac hospital admissions | PM10 | all | 1 | Total | 1.000 | 1.04 | 4.34E-06 | 4.51E-06 | cases |
| medication use/bronchodilator use | PM10 | Children with severe asthma | 0.049 | Children_ | 0.111 | 1.04 | 4.76E-03 | 2.69E-05 | cases |
| medication use/bronchodilator use | PM10 | asthmatics | 0.045 | Adults_20 | 0.784 | 1.04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | cases |
| lower respiratory symptoms (adult) | PM10 | symptomatic_a | 0.3 | Adults | 0.806 | 1.04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | days |
| lower respiratory symptoms (child) | PM10 | all | 1 | Children | 0.111 | 1.04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | days |
| Ozone [ug/m3] - from SOMO35 | | | | | | | | | |
| Increased mortality risk | SOMO35 | baseline_morta | 0.0099 | Total (YOL | 1.000 | 1.04 | 1.80E-03 | 1.85E-05 | YOLL |
| respiratory hospital admissions | SOMO35 | all | 1 | Elderly_65 | 0.200 | 1.04 | 3.43E-05 | 7.12E-06 | cases |
| MRAD | SOMO35 | all | 1 | Adults_18 | 0.606 | 1.04 | 1.15E-02 | 7.25E-03 | days |
| medication use/bronchodilator use | SOMO35 | asthmatics | 0.049 | Adults_20 | 0.784 | 1.04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | cases |
| LRS excluding cough | SOMO35 | all | 1 | Children | 0.111 | 1.04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | days |
| Cough days | SOMO35 | all | 1 | Children | 0.111 | 1.04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | days |
| NO2 [ug/m3] | | | | | | | | | |
| Increased mortality risk | NO2 | >20ug/m3 | 0.34 | Adults 30 | 0.665297 | 1.04 | 4.41E-04 | 1.04E-04 | YOLL |
| Prevalence of bronchitis in asthmatic child | NO2 | >20ug/m3 | 0.049 | Children_ | 0.163563 | 1.04 | 5.25E-03 | 4.38E-05 | cases |
| Hospital admissions due to respiratory dise | NO2 | all | 1 | Total | 1 | 1.04 | 1.11E-05 | 1.16E-05 | cases |

Noot: Verklarende variabelen: Risk Group, RG: group within the general population with a handicap; RGF value: share of RG within the general population; Age group, AG: groups distinguished by different age cohorts; AG value: share of different age cohorts; CRF: concentration-response function; YOLL: Years of Life Lost; RAD: Restricted Activity Days; SIA: Secondary Inorganic Aerosols; SOMO35: sum of ozone means over 35 ppb; WLD: Work Loss Days; MRAD: Minor Restricted Activity Days; LRS: lower respiratory symptoms.

Deze veranderingen zijn divers: sommige factoren leiden tot een hogere waardering voor de gezondheidsschadeposten van emissies, terwijl andere factoren leiden tot een lagere waardering voor de gezondheidsschadeposten van emissies. De netto invloed van zowel de veranderende bevolkingssamenstelling als de netto invloed van de verandering in CRF-functies is weer te geven in de volgende tabel:

tabel 60: factoren gebruikt voor ophoging van de schadeposten voor gezondheid uit NEEDS door veranderingen in de CRF, bevolkingssamenstelling en bevolkingssamenstelling

| | |
|-------------------|------|
| NH ₃ | 1.04 |
| NMVOG | 1.58 |
| NO _x | 1.62 |
| PPM _{CO} | 1.00 |
| PPM ₂₅ | 1.04 |
| SO ₂ | 1.04 |

Hieruit blijkt dat vooral emissies van NMVOG en NO_x leiden tot hogere schadelijkheid in vergelijking met de inschatting uit NEEDS (2008).



Aanpassing waardering

Vervolgens is de waardering ook aangepast aan het huidige prijspeil en de nieuwste inzichten in de waardering. Waardering voor elk van de impacts is opnieuw bekeken en geëvalueerd in het Handboek Milieuprijzen (CE Delft, 2017a). Daarbij is uitgegaan van een gemiddelde Europese waardering, conform de aanpak in NEEDS (2008) waarbij er geen individuele waardering per land kon worden vastgesteld. De voornaamste aanpassingen ten opzichte van de waardering die in NEEDS werd gehanteerd wordt weergegeven in de onderstaande tabel. Voor de argumentatie voor de gekozen waarden en alle precieze verschillen in aanpak verwijzen we naar CE Delft (2017a).

tabel 61: overzicht van prijzen gehanteerd in de berekening van milieuschadeprijzen in NEEDS (2008) en de huidige studie gebaseerd op CE Delft (2017a)

| | NEEDS waarde (prijzen 2000/2005)* | Gekozen in deze studie (prijspeil 2015) |
|---|--------------------------------------|--|
| Life expectancy reduction - YOLLchronic | 40 000 | 70 000 |
| Work loss days (WLD) | 295 | 150 |
| Increased mortality risk | 60 000 | 70 000 |
| IQ-points | 8.600 | 17.500 |
| respiratory hospital admissions | 2.000 | 2.360 |
| lower respiratory symptoms | 38 | 49 |

* Er is in het NEEDS-project waarschijnlijk geen eenduidig prijsniveau gekozen en de verschillende categorieën hebben waarschijnlijk een verschillend uitgangspunt qua prijsniveau. Zie CE Delft (2017a) voor een nadere beschouwing).

Aanpassing schadelijkheid secundaire aerosolen en NMVOS

De verspreiding van emissies in het NEEDS-project is ingeschat door een atmosferische transport-model van MET-NO voor het jaar 2010. De daadwerkelijke emissies in 2015 in België verschillen van die van waarmee de modellering is uitgevoerd. Tabel 62 geeft een overzicht van de verschillen:

tabel 62: emissies van luchtvervuilende emissies, aanname modellering MET-NO en actuele waarden

| | 2010 MET-NO | 2015 Statbel | Reductie |
|-------------------|----------------|-----------------|----------|
| NH ₃ | 79.387 | 65.407 | -18% |
| NMVOG | 150.390 | 119.266 | -21% |
| NO _x | 232.194 | 189.665 | -18% |
| PPM ₂₅ | 28.227 | 26.359 | -7% |
| SO ₂ | 98.513 | 43.782 | -56% |

Hieruit blijkt dat NH₃ en NO_x allebei met ongeveer 18% zijn gereduceerd, maar SO₂ veel sterker is gereduceerd. Om redenen toegelicht in hoofdstuk 2 betekent e.a. dat de relatieve schadelijkheid van met name SO₂, en in mindere mate NO_x toeneemt omdat de reductie in NH₃ niet meer dan evenredig heeft plaatsgevonden.

Aan de hand van de NEEDS-resultaten van verschillende emissiescenario's is een inschatting gemaakt wat dit zou betekenen voor de schadeprijzen. Tabel 63 geeft het overzicht van de correctiefactoren die zijn doorgevoerd voor de diverse emissies die zijn gebaseerd op de modellering van diverse emissiescenario's met MET-NO.

////////////////////////////////////
////////

tabel 63: inschatting schadelijkheid van emissies op het thema menselijke gezondheid in vergelijking met de NEEDS-modelresultaten voor 2010

| | |
|-------------------|------|
| NH ₃ | 80% |
| NMVOG | 55% |
| NO _x | 119% |
| PPM _{CO} | 100% |
| PPM ₂₅ | 100% |
| SO ₂ | 133% |

Dit laat zien dat de schadelijkheid van SO₂ en NO_x toeneemt doordat NH₃ niet meer dan evenredig is afgenomen. Tegelijkertijd laat het ook zien dat de schadelijkheid van NH₃ afneemt doordat er minder NO_x en SO₂ is om mee te reageren. De schadelijkheid van NMVOS neemt af doordat de emissies minder vaak boven de grenswaarden van 35 ppm zich bevinden.



bijlage 5 Rendementen houtgestookte installaties

Voor gas, stookolie, steenkolen en LPG/propana/butaan is er door VITO (2017a) een analyse gedaan op de rendementen. Deze zijn meegenomen bij het toedelen van de totale energieverbruik over de diverse toestellen. Voor hout ontbreekt een dergelijke analyse. Daarom is voor hout een aparte berekening opgezet conform de methodiek uit VITO (2017a).

In VITO (2017a) wordt het installatierendement gedefinieerd als het product van vier rendementen: het productierendement, het distributierendement, het afgifterendement en het regelrendement (VITO, 2017a). Volgens de omschrijving van VITO (2017a) is het productierendement de verhouding tussen de nuttige warmte afgegeven door de ketel aan de water/luchtkring en de energie die hiertoe werd verbruikt ter hoogte van de brander. Het distributierendement houdt rekening met de warmteverliezen langs de leidingen van het verwarmingscircuit. Het is de verhouding van de warmte die aan de afgifte-elementen wordt geleverd ten opzichte van de warmte die nuttig door de ketel werd geleverd. Het afgifterendement houdt rekening met warmteverliezen door temperatuurstratificatie in de leefruimte en met verliezen langs de achterzijde van afgifte-elementen die zich voor buitenwanden bevinden. Het is de verhouding van de warmte die nuttig aan de kamer wordt afgegeven ten opzichte van de warmte geleverd aan de afgifte-elementen. Het regelrendement tenslotte houdt rekening met het feit dat een regelsysteem in de praktijk nooit perfect de warmte op de juiste plaats en het juiste tijdstip voorziet. Het is de verhouding tussen de warmte die finaal en netto nuttig is voor het realiseren van de comfortcondities en de nuttige warmte die door de afgifte-elementen in de kamers terecht komt.

Voor hout hebben we een soortgelijke analyse ondernomen. Gebaseerd op Procédé Biomass (2018), VITO (2017a) en expertinschattingen⁵⁷ komen we tot een installatierendement voor houtinstallaties zoals gepresenteerd in tabel 64 waarbij het distributierendement van kachels gelijk is aan een decentraal gastoestel en voor ketels gelijk aan een centraal gasgestookte verwarmingseenheid zoals in VITO (2017a) bepaald. Het regelrendement is gelijk aan kolengestookte eenheden. Het afgifterendement is voor alle kachels gesteld op 95%, terwijl het productierendement is vastgesteld op basis van Procédé Biomass (2018).

tabel 64: rendementen van houtverbrandingsinstallaties

| Installatietype | Productie- rendement | Distributie- rendement | Afgifte- rendement | Regel- rendement | Installatie- rendement |
|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------|
| Open haard | 15% | 100% | 95% | 70% | 10% |
| Klassieke houtkachel | 45% | 100% | 95% | 70% | 30% |
| Kachel 2000-2013 | 70% | 100% | 95% | 70% | 47% |
| Moderne houtkachel | 80% | 100% | 95% | 70% | 53% |
| Ketel | 87% | 95% | 95% | 95% | 75% |
| Cassette | 65% | 100% | 95% | 70% | 43% |
| Speksteen kachel | 87% | 100% | 95% | 70% | 58% |

⁵⁷ Sander de Bruyn, CE Delft, november 2018.



