

Notitie: Duiding Milieuprestatie Warmtepompen in de bestaande bouw

TNO 2023 M10634 – 4 april 2023

Notitie: Duiding Milieuprestatie Warmtepompen in de bestaande bouw

Auteurs	R. (Rick) Scholtes, E.E. (Elisabeth) Keijzer, J.J. (Joachim) Koot, R.E.J. (Richard) Kemp
Rubricering rapport	TNO Publiek Rubricering titel
Rapporttekst	TNO Publiek
Bijlagen	TNO Publiek
Oplage	1
Aantal pagina's	39 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	4
Opdrachtgever	Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelatie
Projectnaam	Milieu en energieprestatie warmtepompen
Projectnummer	060.56840

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2023 TNO

Samenvatting

De duurzaamheid van warmtepompen staat in de aandacht vanwege recente nieuwsberichten over nieuwe inzichten in de milieu-impact van warmtepompen¹. De Ministeries van BZK en EZK hebben TNO gevraagd inzichtelijk te maken wat de milieu-impact van zowel de productie als de energieprestatie van warmtepompen is in vergelijking met cv-ketels en hybride systemen, en de gevoeligheden die in de huidige milieu-impactberekeningen zitten te duiden.

Bij het trekken van conclusies, moet worden benadrukt dat de analyse is uitgevoerd met een aantal beperkingen: binnen een zeer kort tijdsbestek, uitgaande van de bestaande achtergrondinformatie waarin enige inconsistenties zitten, alleen voor een beperkt aantal typen warmteopwekkingssystemen en energieverbruiksscenario's en berekend voor een tussenwoning uit de jaren '70, met label B.

Ondanks deze beperkingen, kunnen we concluderen dat de milieu-impacts² van warmtepompen weliswaar hoger zijn dan voor cv-ketels wat betreft productie, onderhoud en afvalverwerking, maar dat dit effect ruimschoots wordt gecompenseerd gedurende de gebruiksfase door een lager aardgasverbruik. Bovendien zal het verschil in milieu-impact de komende jaren groter worden naarmate de elektriciteitsmix verder verduurzaamt, zoals reeds gepland en in gang gezet is. Daarnaast is het wel mogelijk en nuttig om de milieu-impact van warmtepompen te verlagen, door in de eerste plaats in te zetten op koelmiddelen met een lagere impact op klimaatverandering en in de tweede plaats minder of anders om te gaan met koper.

TNO concludeert dit op basis van deze verkennende studie op basis van nu beschikbare, maar vaak inconsistente data. Echter, omdat we zijn uitgegaan van conservatieve aannames, is de verwachting dat een gedetailleerdere analyse niet leidt tot andere conclusies over de milieu-impact van (hybride-)warmtepompen ten opzichte van een cv-ketel. Nader onderzoek naar specifieke varianten is wel nodig om tot in detail uitspraken te kunnen doen over een groter aantal woningtypes, energieverbruiksscenario's en varianten in warmteopwekkingssystemen.

¹ <https://milieudatabase.nl/nl/actueel/nieuws/milieubelasting-warmtepomp-valt-hoger-uit/>

² Onder "milieu-impact" wordt een breed scala aan milieueffecten verstaan, die middels weging zijn opgeteld tot een éénpuntsscore, conform de in Nederland voorgeschreven Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	3
Inhoudsopgave.....	4
1 Inleiding.....	5
1.1 Aanleiding.....	5
1.2 Doel.....	5
1.3 Aanpak & reikwijdte.....	5
1.3.1 Algemene uitgangspunten.....	5
1.3.2 Gevolgde stappen en beperkingen.....	6
2 Beknopte toelichting: bepalen van milieu-impact in de woningbouw.....	8
2.1 LCA.....	8
2.2 LCA-regels in de Nederlandse bouw.....	8
2.3 MKI en CO ₂ -equivalenten.....	9
2.4 MPG.....	10
2.5 Energieprestatie.....	10
2.6 Combineren van materiaalprestatie en energieprestatie.....	10
3 Milieu-impact van materialen van warmteopwekkingssystemen.....	12
3.1 Milieu-impact van materialen cv-ketel.....	12
3.2 Milieu-impact van materialen hybride systeem.....	13
3.3 Milieu-impact van materialen all-electric warmtepomp.....	13
3.3.1 Overzichtsbeeld.....	13
3.3.2 Bandbreedte door type koudemiddel en hoeveelheid lekkage.....	14
3.4 Vergelijking warmteopwekkingssystemen.....	17
4 Milieu-impact van energieverbruik.....	19
4.1 Milieu-impact van energieverbruik in verschillende warmteopwekkingssystemen (huidige elektriciteitsmix).....	19
4.2 Milieu-impact van energieverbruik in verschillende warmteopwekkingssystemen (groene elektriciteit).....	20
5 Totaalbeeld: milieu-impact van materialen en energieverbruik tezamen.....	22
6 Conclusies & discussie.....	25
6.1 Conclusies.....	25
6.2 Discussiepunten.....	26
7 Ondertekening.....	28
 Bijlagen	
Bijlage A: Uitgangspunten berekening materialen cv-ketel.....	29
Bijlage B: Uitgangspunten berekening materialen hybride systeem.....	31
Bijlage C: Uitgangspunten berekening materialen all-electric warmtepomp.....	33
Bijlage D: Uitgangspunten energieverbruik woningen.....	36

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In februari 2023 is veel media-aandacht geweest over de milieu-impact van warmtepompen. De aanleiding hiervoor was een persbericht van Stichting Nationale Milieudatabase (hierna: sNMD), waarin toegelicht werd dat de milieu-impact van warmtepompen na onderzoek hoger bleek dan tot nu toe gedacht³. In de berichtgeving werd onder andere gesteld dat dit verstrekkende gevolgen zou kunnen hebben voor de bouwproductie en verduurzaming van de woningvoorraad (o.a. aanscherping van de zogeheten MPG-eis). Daarnaast levert het discussie op rondom de uitfasering van cv-ketels en de duurzaamheid van de alternatieve installaties.

Bij sNMD loopt momenteel een verdiepend onderzoek naar de milieu-impact van de productie van warmtepompen (zogeheten categorie 3 data; meer hierover in hoofdstuk 2), dit onderzoek is naar verwachting rond de zomer afgerond. De Ministeries van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (BZK) en van Economische Zaken en Klimaat (EZK) hebben echter op korte termijn (maart/april 2023) behoefte aan nadere duiding.

BZK en EZK hebben daarom aan TNO gevraagd om op korte termijn enige duiding te leveren over de milieu-impact van zowel de productie als ook de energieprestatie van warmtepompen toegepast in een tussenwoning uit de jaren '70, met label B en de gevoeligheden die in de gecombineerde milieu-impactberekeningen zitten.

1.2 Doel

Het doel van dit onderzoek is om inzichtelijk te maken wat de milieu-impact van zowel de productie als de energieprestatie van warmtepompen toegepast in een tussenwoning uit de jaren '70, met label B is in vergelijking met cv-ketels en hybride systemen, en de gevoeligheden die in de huidige milieu-impactberekeningen zitten. Daarom wordt in het volgende hoofdstuk eerst een korte uitleg gegeven van veelgebruikte begrippen zoals LCA, NMD, MKI, MPG, CO₂-emissie en EPC. Daar leggen we ook uit waarom we in deze notitie zowel een breed spectrum van milieueffecten (MKI) als ook broeikasgasemissies (CO₂-equivalenten) bespreken.

1.3 Aanpak & reikwijdte

1.3.1 Algemene uitgangspunten

TNO heeft desgevraagd in een kort tijdsbestek (7–31 maart) een bureaustudie uitgevoerd naar de milieu-impact en broeikasgasemissies van all-electric warmtepompen, hybride systemen en cv-ketels in bestaande bouw. Hierbij hebben we zowel naar de gebruikte materialen voor het warmteopwekkingssysteem gekeken als naar het energieverbruik gedurende de gebruikperiode van het warmteopwekkingssysteem.

³ <https://milieudatabase.nl/nl/actueel/nieuws/milieubelasting-warmtepomp-valt-hoger-uit/>

Dit onderzoek is zoveel mogelijk uitgegaan van de data en uitgangspunten die sNMD ook gehanteerd heeft (zoals de samenstelling van een warmtepomp), aangevuld met expertkennis (bijvoorbeeld wat betreft koudemiddelen) en openbare bronnen (bijvoorbeeld wat betreft energieverbruik). De reden voor deze aanpak was consistentie met bestaande inzichten (zoals gecommuniceerd door sNMD) en het korte tijdsbestek. Dit heeft als consequentie dat er geen diepliggende controle is geweest op de kwaliteit en recentheid van de data, noch op de achterliggende uitgangspunten van de drie vergeleken installaties, met mogelijke inconsistenties tot gevolg. Dit heeft echter geen gevolgen voor de overkoepelende conclusies. Bij het bespreken van de resultaten zal dit nader toegelicht worden.

1.3.2 Gevolgde stappen en beperkingen

Als eerste stap, hebben we de milieu-impact van de materialen van de warmteopwekkingssystemen in kaart gebracht op basis van communicatie van TNO met sNMD. Deze informatie hebben we vervolgens gemodelleerd in de standaard LCA-software SimaPro. Bij het verwerken van de informatie merkten we twee complicaties op. Ten eerste heeft sNMD de milieuberekeningen uitgevoerd in een andere software (NMD invoermodule) dan bij TNO voorhanden (SimaPro). Ondanks dat door het gebruik van andere software verschillen kunnen ontstaan, is door ons toch SimaPro gebruikt, om een aantal redenen: het is de standaard software die in de bouw gebruikt wordt en werkt volgens dezelfde rekenregels als de NMD invoermodule, maar het biedt daarentegen de mogelijkheid om zwaartepunten en variaties inzichtelijk te maken. De tweede complicatie bij het verwerken van de informatie over materialen, was dat er een opvallend verschil zat in de informatie van sNMD wat betreft de materialen voor hybride systemen en all-electric warmtepompen. Dit leidt ertoe dat er in het vergelijken van de systemen rekening gehouden moet worden met een bandbreedte van ten minste 10%. Op detailniveau maakt dit uit, maar voor de algehele conclusies van het onderzoek niet. In de volgende hoofdstukken zullen we dit nader uitleggen.

Als tweede stap, hebben we ingezoomd op de meest invloedrijke factor die uit de analyse van de milieu-impact van een gemiddelde warmtepomp naar voren kwam: koudemiddelen. We hebben een representatieve selectie gemaakt van mogelijke koudemiddelen die veel gebruikt werden of worden, en koudemiddelen die vooralsnog minder gebruikt worden maar wel beschikbaar zijn en een kleiner effect op klimaatverandering hebben. Voor zover mogelijk binnen dit korte tijdsbestek en de beperkt beschikbare data, hebben we geduid welke variaties er (binnenkort te verwachten) zijn in de markt en hoe dit doorwerkt in de resultaten en conclusies.

Als derde stap hebben we de milieu-impact van het energieverbruik van de warmteopwekkingssystemen over de gehele levensduur van de systemen in beeld gebracht. Hiervoor zijn we uitgegaan van de gemiddelde warmtevraag van een veelvoorkomend woning type: een tussenwoningen uit de jaren '70, met label B en een oppervlakte van 110 m². Hiermee zijn de meest voor de hand liggende eigenschappen in beeld voor een gemiddelde woning, maar is geen compleet beeld van alle mogelijke varianten in woningtypes geanalyseerd. Hiervoor is aanvullend onderzoek nodig waarbij een groter aantal woningtypes, energieverbruiksscenario's en varianten in warmteopwekkingssystemen (bijv. verschillende vermogens) beschouwd wordt. Vervolgens is op basis van de warmtevraag bepaald hoeveel energie er nodig is. In het geval van een cv-ketel betekent dit een bepaalde hoeveelheid gas. In het geval van een all-electric warmtepomp betreft dit een bepaalde hoeveelheid elektriciteit en voor een hybride systeem is dat een combinatie van gas en elektriciteit. Aan de hand van de standaard rekenmethodiek van de NMD (meer hierover in het volgende hoofdstuk) is vervolgens de milieu-impact van dit energieverbruik bepaald. Hierbij

hebben we zowel de huidige (“grijze”) als een meer duurzame (“groene”) elektriciteitsmix beschouwd.

De laatste stap van dit onderzoek was het combineren van de milieu-impact van de materialen en van het energieverbruik. We hebben verschillende mogelijkheden voor warmteopwekkingssystemen, koudemiddelen, energieverbruiken en elektriciteitsmixen met elkaar vergeleken, om zo een antwoord te geven op de hoofdvraag: hoe verhouden de milieu-impacts van verschillende energiesystemen zich tot elkaar wanneer er zowel naar materialen als energieverbruik gekeken wordt? In het laatste hoofdstuk trekken we de conclusie en geven we discussiepunten aan.

2 Beknopte toelichting: bepalen van milieu-impact in de woningbouw

Dit is een informatief hoofdstuk, waarin de methodiek achter de milieuprestatieberekeningen in de Nederlandse woningbouw wordt uitgelegd. Wat komt er kijken bij het berekenen van de milieu-impact van materialen, gehele woningen en hun energieverbruik? We starten met een introductie over de algemene rekenmethode: de LevensCyclusAnalyse (LCA). Daarna leggen we uit welke LCA-methode we in Nederland gebruiken en hoe dat gebruikt kan worden om de milieu-impact te berekenen en uit te drukken in zogeheten MKI- en MPG-scores. Daarnaast leggen we uit hoe de milieu-impact van energieverbruik in woningen berekend en vergeleken kan worden met de milieu-impact van de materialen waar de woning mee gebouwd is.

2.1 LCA

LevensCyclusAnalyse (LCA) is een methodiek waarmee milieueffecten (ook wel: milieu-impacts) van een product of dienst bepaald kunnen worden. In deze methode worden allereerst alle materialen en processen geïnventariseerd die een rol spelen in de gehele levenscyclus van een product, van grondstoffenwinning tot productie, onderhoud en uiteindelijke afvalverwerking.

Vervolgens wordt van al deze materialen en processen bepaald, meestal aan de hand van algemene milieudatabases zoals bijvoorbeeld het internationaal bekende *ecoinvent*⁴, welke emissies naar bodem, water en atmosfeer er optreden. Deze emissies kunnen vervolgens weer geclusterd worden in milieueffectcategorieën, bijvoorbeeld klimaatverandering (een gewogen optelsom van allerlei verschillende broeikasgasemissies) of ecotoxiciteit (een gewogen optelsom van allerlei nadelige effecten van giftige stoffen op planten en dieren). Ook voor deze zogenaamde levenscyclus impactanalyse (LCIA) bestaan standaardmethodes die voorschrijven welke milieueffectcategorieën beschouwd dienen te worden en welke karakterisatiefactoren gehanteerd moeten worden om emissies te clusteren tot milieueffectcategorieën.

2.2 LCA-regels in de Nederlandse bouw

In de Nederlandse bouwsector wordt vanuit de overheid voorgeschreven om met een specifieke methode en database te werken om de milieu-impact van bouwproducten te bepalen. Dit is vastgelegd in de Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken⁵ (hierna “de Bepalingsmethode”).

⁴ Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [27-03-2023] 21(9), pp.1218-1230.

⁵ Zie <https://milieudatabase.nl/nl/downloads-nmd/downloads-bepalingsmethode/>.

LCA-onderzoeken die uitgevoerd worden conform de Bepalingsmethode en getoetst worden door een onafhankelijke en erkend deskundige, mogen ingediend worden ter opname in de Nationale Milieudatabase (NMD). De NMD wordt beheerd door stichting NMD (sNMD) in opdracht van het BZK en bevat milieudata van duizenden producten, ook wel Environmental Product Declarations (EPDs) genoemd.

In de discussie over milieudata, is het van belang om te weten dat er drie categorieën data worden onderscheiden:

1. Categorie 1 is merkgebonden data van producenten en toeleveranciers; deze data is getoetst door een onafhankelijk deskundige.
2. Categorie 2 is merkongebonden data van groepen van fabrikanten en/of toeleveranciers en branches; deze data is getoetst door een onafhankelijk deskundige.
3. Categorie 3 is merkongebonden data van sNMD; deze data is niet altijd getoetst door een onafhankelijk deskundige volgens het volledige toetsingsprotocol. Recente data is vaak getoetst met een verkorte procedure, oudere data is soms op geen enkele wijze getoetst.

Van oudsher is het doel van de NMD dat er zoveel mogelijk info van “echte” producten in komt, oftewel categorie 1 en 2. Categorie 3 is bedoeld als generiek alternatief wanneer categorie 1 of 2 data niet representatief (of niet aanwezig) is. Dat betekent dat de datakwaliteit van categorie 3-data vaak lager is dan van de andere data. De afgelopen jaren is veel geïnvesteerd in verbetering en uitbreiding van de categorie 3-data, maar dat neemt niet weg dat er nog altijd oude data in deze datacategorie zitten, in vergelijking tot categorie 1 en 2 data, en waarvan de kwaliteit en de representativiteit nog verbeterd moet worden.

2.3 MKI en CO₂-equivalenten

Het uitvoeren van een LCA-onderzoek conform de Bepalingsmethode leidt tot een resultaat in 11 milieueffectcategorieën⁶ met elk een andere eenheid (bijv. kg CO₂-equivalenten voor klimaatverandering, kg CFC11-equivalenten voor ozonlaagaantasting, enz.). De Bepalingsmethode schrijft vervolgens voor dat alle milieueffectcategorieën opgeteld kunnen door middel van weging aan de hand van een monetaire waarde: milieukosten⁷. Iedere milieueffectcategorie kent een eigen weegfactor, vastgelegd in de Bepalingsmethode, op basis waarvan alle milieueffecten uitgedrukt kunnen worden in één getal: de MilieuKostenIndicator (MKI).

Daarnaast wordt in de praktijk in sommige gevallen naast de MKI ook separaat het effect op klimaatverandering gerapporteerd of gevraagd: “broeikasgasemissies” (ook wel: Global Warming Potential, GWP), wat wordt uitgedrukt in CO₂-equivalenten. De term “equivalenten” betekent dat de verschillende klimaatveranderende effecten van diverse stoffen hierin zijn meegenomen (bijv. methaan heeft een sterker broeikasgaseffect dan CO₂). In de Kamerbrief over de beleidsagenda normeren en stimuleren circulair bouwen⁸ kondigt de Minister tevens aan te willen onderzoeken hoe er naast de MPG-eis ook een CO₂-emissie-eis geïntroduceerd kan worden, vanwege de specifieke rol van klimaatdoelen en -beleid. Daarom beschouwen we in deze rapportage zowel de

⁶ Vanwege een wijziging in de bovenliggende Europese standaard (EN15804+A2) vindt er een geleidelijke transitieplaats naar een nieuwe set van 19 milieueffectcategorieën, die deels overlappen met de bestaande set. Meer hierover op <https://milieudatabase.nl/nl/milieudata-lca/informatie-voor-lca-uitvoerders/milieu-impact-categorieen/>.

⁷ Zie o.a. het “Handboek milieuprijzen” op de website van CE Delft: <https://ce.nl/method/milieuprijzen/>.

⁸ <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2022/12/23/kamerbrief-over-beleidsagenda-normeren-en-stimuleren-circulair-bouwen>.

gewogen som van verschillende milieueffecten in de vorm van MKI als ook broeikasgasemissies in de vorm van CO₂-equivalenten.

2.4 MPG

Door middel van een LCA kan dus de milieu-impact (MKI) van een bouwproduct bepaald worden. Alle bouwproducten die nodig zijn om één woning te bouwen en onderhouden over zijn levensduur, kunnen vervolgens bij elkaar opgeteld worden tot één gebouwscore, waarbij ook de vervangingen gedurende deze levensduur meegenomen dienen te worden. Om gebouwen van verschillende grootte en levensduur vervolgens te kunnen vergelijken, kan de gebouwscore (MKI) uitgedrukt worden in de MilieuPrestatie Gebouw (MPG). De MPG is simpelweg de MKI van het gebouw, gedeeld door het bruto vloeroppervlak en de levensduur ($MPG = MKI/m^2\text{jaar}$).

De MPG wordt ingezet middels het Bouwbesluit. Voor nieuwbouwwoningen en -kantoren (met een vloeroppervlak van minimaal 100 m²) moet sinds enkele jaren een berekening uitgevoerd worden, waarbij de MPG niet hoger mag zijn dan 0,8. Deze MPG-eis wordt de komende jaren nader aangescherpt en waarschijnlijk ook uitgebreid voor andere gebouwfuncties en renovatie van bestaande gebouwen⁹.

2.5 Energieprestatie

De voorgaande paragrafen beschrijven de milieu-impact ten gevolge van materialen (inclusief productie, onderhoud en afvalverwerking). De milieu-impact van de gebruiksfase van een gebouw (het gebouwgebonden energieverbruik), wordt op heel andere wijze bepaald en volgt ook andere regelgeving: de energieprestatie. Nederlandse nieuwbouwwoningen moeten voldoen aan de BENG-eisen, waarbij drie prestatie-indicatoren gehanteerd worden¹⁰:

- de maximale energiebehoefte (kWh/m²jr)
- het maximale primair fossiel energiegebruik (kWh/m²jr)
- het minimale aandeel hernieuwbare energie in procenten (%).

2.6 Combineren van materiaalprestatie en energieprestatie

De standaard rekenmethodieken voor materiaalprestatie en energieprestatie volgen dus verschillende regels en leiden tot verschillende (eenheden in) uitkomsten. Een directe vertaling van energieprestatie in dezelfde eenheid als materiaalprestatie (MKI) kan dus niet, maar er zijn wel andere manieren om de gezamenlijke milieu-impact te analyseren.

Wanneer niet de *energieprestatie* maar het energieverbruik (uitgedrukt in hoeveelheid gas en elektriciteit) van een woning wordt beschouwd, kan deze simpelweg omgerekend worden in milieu-impact aan de hand van milieudata voor gas en elektriciteit in de NMD. Vervolgens kan de milieu-impact van de materialen opgeteld of vergeleken worden met de milieu-impact van het energieverbruik over de levensduur van de materialen.

⁹ <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2021/03/11/milieuprestatie-voor-gebouwen-wordt-1-juli-2021-aangescherpt>.

¹⁰ <https://www.rvo.nl/onderwerpen/wetten-en-regels-gebouwen/beng#energieprestatie-indicatoren---beng>

Hierbij is het wel van belang om te realiseren dat er allerlei factoren van invloed zijn op het energieverbruik en dus op de milieu-impact, die in een enkel verbruiksgetal niet direct zichtbaar zijn: bijvoorbeeld mate van isolatie, woningtype, woningvorm, enzovoorts.

3 Milieu-impact van materialen van warmteopwekkingsystemen

In dit hoofdstuk besteden we aandacht aan de milieu-impact van (de materialen van) warmteopwekkingsystemen: cv-ketels, hybride systemen en warmtepompen. We bespreken hier de milieu-impact van de materialen over hun gehele levenscyclus, dus van de winning van de grondstoffen tot en met de verwerking van de materialen in de einde-levensfase en de emissies van koudemiddel die het gevolg zijn van lekkages. We beginnen met de cv-ketel, gevolgd door het hybride systeem en de all-electric warmtepomp. Daarna zullen we inzoomen op de belangrijkste factoren die de milieu-impact van een warmtepomp bepalen.

Voor de berekeningen van de milieu-impact is gebruikgemaakt van de data uit de NMD, in overleg met de betrokken partijen (sNMD en LBP Sight). Voor alle warmteopwekkingsystemen is uitgegaan van een standaard levensduur van 15 jaar, conform de data in de NMD.

3.1 Milieu-impact van materialen cv-ketel

Bij een cv-ketel wordt gas gebruikt om zowel het tapwater als het water voor ruimteverwarming op te warmen. Het tapwater wordt direct verwarmd vanuit de ketel zodra er vraag naar is; er wordt niet, zoals bij een warmtepomp, gebruik gemaakt van een warmwatervat.

Voor de cv-ketel is de milieu-impact bepaald op basis van de data van sNMD voor een gemiddelde cv-ketel zonder nadere specificaties (zie bijlage A), waarbij de broeikasgasemissies zijn ingeschat door TNO op basis van de verhouding tussen MKI en broeikasgasemissies in de overige materialen van een warmtepomp (zie Tabel 3). De milieu-impact en broeikasgasemissies van de materialen van een cv-ketel zijn als volgt (Tabel 1):

Tabel 1 Milieu-impact en broeikasgasemissies van de materialen van een cv-ketel.

	MKI (€)	Broeikasgasemissies (kg CO ₂ -eq)
Totaal	164	2243

3.2 Milieu-impact van materialen hybride systeem

Een hybride systeem is een combinatie van een cv-ketel en een kleine warmtepomp, waarbij het tapwater met gas verwarmd wordt net zoals dat ook in een cv-ketel gebeurt. Daardoor is er niet, zoals bij een warmtepomp, een warmwatervat nodig om het tapwater te verwarmen. Een hybride systeem bevat dus de materialen van beide systemen met uitzondering van het warmwatervat.

De milieu-impact van de materialen van het hybride systeem is berekend op basis van data van sNMD. In deze data ontbrak echter informatie over koudemiddel, daarom is dit nu door TNO toegevoegd aan de berekeningen (zie bijlage B). We nemen hierbij het worst-case uitgangspunt dat er dezelfde hoeveelheid koudemiddel nodig is als voor een all-electric warmtepomp. In praktijk zal de warmtepomp in een hybride opstelling meestal een kleiner vermogen hebben dan een all-electric systeem, en daarmee ook een 25 tot 50% kleiner volume koudemiddel nodig hebben. Dit is echter zo product- en toepassings specifiek dat we hier geen aanpassing van de originele data gedaan hebben, om zo het worst case scenario inzichtelijk te maken.

Tabel 2 Milieu-impact van de materialen van een hybride warmtepomp.

	MKI (€)	Broeikasgasemissies (kg CO ₂ -eq)
Materialen	257	753
Koudemiddel	309	6072
Totaal	566	6825

3.3 Milieu-impact van materialen all-electric warmtepomp

3.3.1 Overzichtsbeeld

Bij een all-electric warmtepomp wordt voor zowel voor tapwater- als voor ruimteverwarming elektriciteit in plaats van gas gebruikt. Warm tapwater wordt geproduceerd in een groot warmwatervat.

Voor het inschatten van de milieu-impact van materialen van de all-electric warmtepomp is gebruik gemaakt van de data aangeleverd door sNMD. Deze is te vinden in Bijlage C. TNO heeft vervolgens deze data ingevoerd in de standaard LCA-software SimaPro, waarna tevens enkele variaties (volgende paragrafen) doorgerekend zijn. Hierbij hebben we geen aanpassingen aan de data gedaan. Wel merken we op dat er een relatief grote warmtepomp als uitgangspunt is genomen, met 4,9 kg koudemiddel terwijl een gemiddelde warmtepomp voor de referentiewoning in dit onderzoek eerder in de orde-grootte van 2 tot 2,5 kg koudemiddel nodig heeft. Dat betekent dat het gebruik van deze data leidt tot een overschatting van de werkelijke milieu-impact, zowel voor de all-electric warmtepomp als voor het hybride systeem. Wat voor effect dit heeft op de conclusies, zullen we later bespreken.

In Tabel 3 zijn de zwaartepunten in milieu-impact weergegeven voor de huidige referentie-warmtepomp, met koudemiddel R-134a. De zwaartepunten in de milieu-impact van de materialen zijn: de productie van koudemiddel en emissies van het vrijkomen van het koudemiddel, de productie en afvalverwerking van koper (afkomstig van elektronica) en alle overige materialen en processen in de levenscyclus van de warmtepomp. De broeikasgasemissies worden volledig gedomineerd door de emissies bij het vrijkomen van het koudemiddel.

Tabel 3 Milieu-impact van de materialen van een all-electric warmtepomp.

	MKI (€)	Broeikasgasemissies (kg CO ₂ -eq)
Koper	151	58
Koudemiddel	309	6072
Overige materialen	36	489
Totaal	495	6620

Een kanttekening bij deze uitkomst, is dat hij enigszins (ruim 10%) hoger is dan de milieu-impact van warmtepompen zoals gerapporteerd door sNMD. Dit verschil kon op korte termijn niet verklaard worden. Hoewel het verschil substantieel is wanneer we de verschillende systemen vergelijken en de impact van verbeteropties analyseren, hebben we voor de verdere analyses de resultaten van TNO aangehouden en niet van sNMD, omdat hiermee op de meest duidelijke en consequente manier zwaartepunten en variaties inzichtelijk gemaakt konden worden. Bovendien is de milieu-impact van de door ons gemodelleerde all-electric warmtepomp hoger, waardoor de keuze voor deze berekening conservatief en in ieder geval geen overoptimistische weergave is.

3.3.2 Bandbreedte door type koudemiddel en hoeveelheid lekkage

Er zijn een aantal koudemiddelen die veel gebruikt worden in warmtepompen. In dit onderzoek hebben we op basis van expertervaring de meest voorkomende koudemiddelen qua marktaandeel geselecteerd, evenals de koudemiddelen die reeds op de markt zijn en bekend staan als duurzaam alternatief, maar nog geen groot marktaandeel hebben; zie hiervoor Tabel 3. Hierbij is onderscheid gemaakt in 4 verschillende generaties:

- De 1e generatie koudemiddelen zijn de natuurlijke koudemiddelen. Sommige natuurlijke koudemiddelen hebben nadelen in verband met brandbaarheid of toxiciteit, en in het geval van CO₂ zijn er mogelijk slechtere prestaties op het gebied van ruimteverwarming, de complexiteit van het systeem en de hoge drukvereisten. Tegenwoordig worden oplossingen ontwikkeld voor deze problemen en zijn ze kansrijk om in de toekomst ik meer gebruikt te worden voor warmtepompen.
- De 2e generatie koudemiddelen zijn de CFK's en de HCFK's. Deze zijn verboden of het gebruik ervan is sterk aan banden gelegd, in verband met het negatieve effect op de ozonlaag. Ze zijn daarom in de berekeningen niet meegenomen.
- De 3e generatie koudemiddelen zijn de HFK's, waarbij het chloor-molecuul vervangen werd door een fluor-molecuul. Deze koudemiddelen hebben over het algemeen een groot effect op de opwarming van het klimaat. Het koudemiddel R134a is gebruikt in de berekening van de referentie-warmtepomp van sNMD. Het is overigens niet het meest voorkomende koudemiddel in reguliere warmtepompen voor woningen; dat zijn R410a en R32 (beide ook 3^e generatie).

- De 4e generatie koudemiddelen zijn de HFO's en hebben niet de nadelen van de 2e en 3e generatie koudemiddelen: ze tasten de ozonlaag niet of nauwelijks aan en hebben geen of nauwelijks effect op de opwarming van het klimaat. HFO's worden op grote schaal gebruikt in airconditioning voor auto's, maar niet in huishoudelijke warmtepompen, afgezien van een beperkt gebruik in mengsels met HFK's.

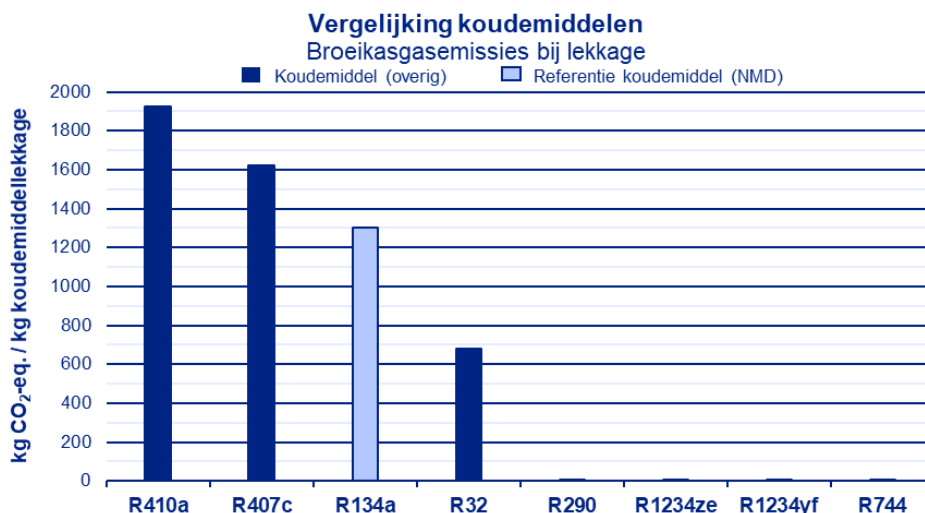
De meest voorkomende koudemiddelen in lucht-water warmtepompen in Nederland zijn op dit moment R410a en R32. De afgelopen 15–20 jaar was R410a lange tijd het enige meest voorkomende koudemiddel, maar sinds een jaar of vijf hebben R32 warmtepompen in grote en toenemende mate de Nederlandse markt betreden. Hierbij nemen ze de plaats in van R410a warmtepompen, en deze trend zal waarschijnlijk doorzetten. Daarnaast zijn er nu een aantal lucht-water warmtepomp buitenunits (meestal “monoblocks” genoemd) die propaan gebruiken. Deze warmtepompen zijn pas sinds kort op de markt, maar het wordt verwacht dat deze in toenemende mate toegepast gaan worden, waarschijnlijk in plaats van R410a en deels ook in plaats van R32.

Veranderingen in toepassing van bepaalde koudemiddelen worden zeer sterk beïnvloed door de Europese *F-gas regulations* die in 2023 herzien worden. Het is hoogstwaarschijnlijk dat F-gassen, oftewel 3e en 4e generatie koudemiddelen uit onderstaande tabel, dus onder andere de meest voorkomende gassen R32, R410a en R134a, versneld uitgefaseerd gaan worden door de quota in de Europese regelgeving. Het uitfaseren van deze koudemiddelen heeft ook gevolgen voor de milieupact van warmtepompen, zoals hierna is laten zien.

Tabel 4 Eigenschappen van veelgebruikte of opkomende koudemiddelen.

Koudemiddel	Scheikundige naam	Alternatieve naam	Generatie	Groep
R-410a	–	HFC-410a	3e	mengsel
R-407c	–	HFC-407c	3e	mengsel
R-134a	1,1,1,2-Tetrafluoroethaan	HFC-134a	3e	HFK (fluorkoolwaterstoffen)
R-32	Difluoromethaan	HFC-32	3e	HFK (fluorkoolwaterstoffen)
R-290	Propaan		1e	natuurlijk
R-1234ze	1,3,3,3-Tetrafluoropropeen	HFO-1234ze	4e	HFO (fluor waterstof olefines)
R-1234yf	2,3,3,3-Tetrafluoropropeen	HFO-1234yf	4e	HFO (fluor waterstof olefines)
R-744	CO ₂		1e	natuurlijk

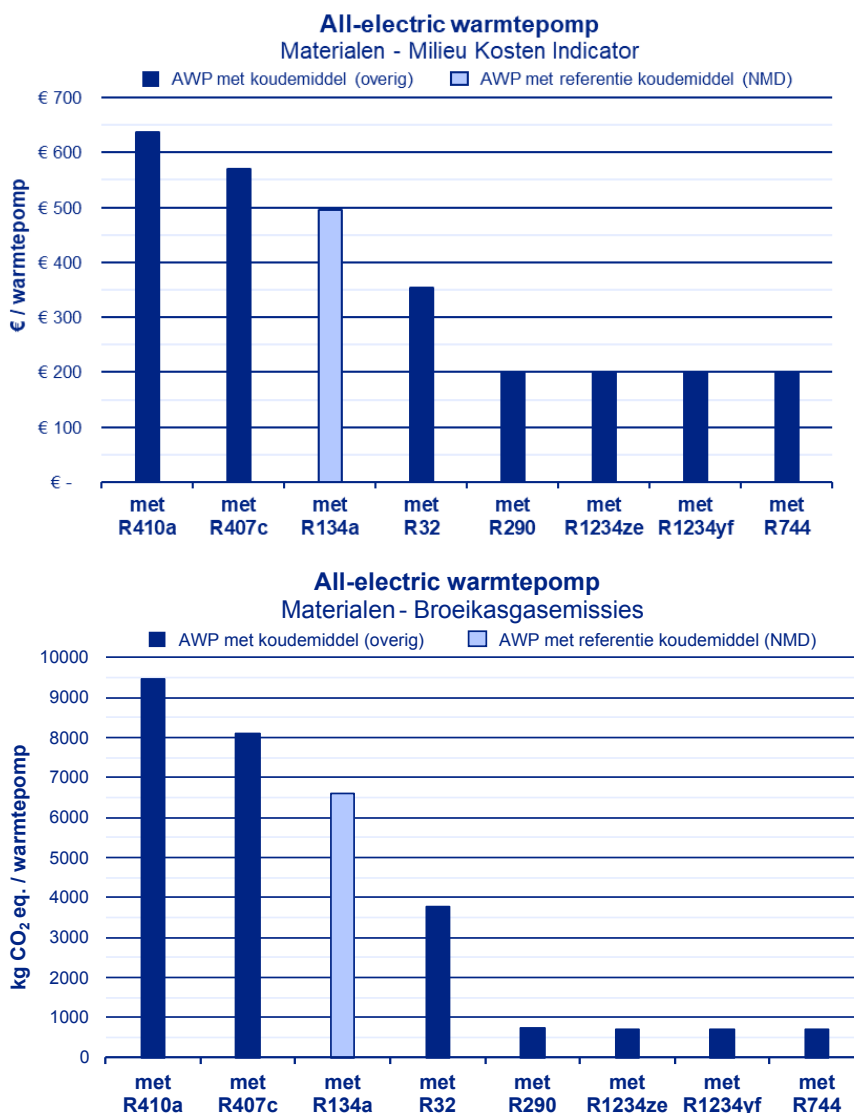
De broeikasgasemissies van deze koudemiddelen, oftewel het milieueffect wanneer er lekkage optreedt, varieert sterk; zie Figuur 1. Alhoewel R134a als referentie gehanteerd is in de data van sNMD, is het niet het meest voorkomende koudemiddel; dat zijn R410a en R32, waar het qua impact tussenin zit. Door R134a te gebruiken als referentie, komen we dus op een vergelijkbare impact uit als wanneer we een mix van R32 en R410a zou gebruiken; de keuze voor R134a levert daarmee dus toch een representatief beeld van de milieupact. Wanneer de ontwikkelingen in Europese regelgeving doorzetten en F-gassen uitgefaseerd worden, kan de impact van de koudemiddelen worden teruggebracht tot een veel lager niveau.



Figuur 1 Broeikasgasemissies (global warming potential) bij lekkage van verschillende koudemiddelen.

Wat betekent dit voor de totale impact van de warmtepomp? Wanneer we de variatie in koudemiddelen visualiseren ten opzichte van de gehele warmtepomp, ontstaat het volgende beeld (Figuur 2). Deze figuur laat zien dat de keuze voor een bepaald type koudemiddel relevante invloed heeft op zowel broeikasgasemissies als MKI.

Hierbij moet wel opgemerkt worden dat er in deze visualisatie geen rekening gehouden is met de milieu-impact van productie of afvalverwerking van de koudemiddelen, omdat deze klein is in vergelijking tot de milieu-impact ten gevolge van lekkage. Ook is er geen rekening gehouden met mogelijke variaties in hoeveelheid gebruikt koudemiddel, de hoeveelheid lekkage en/of verschillende varianten van warmtepompontwerpen. In de praktijk zal dit kleine variaties opleveren in de uitkomsten. De hier weergegeven variatie is dus enkel het gevolg van de variatie in type koudemiddel.



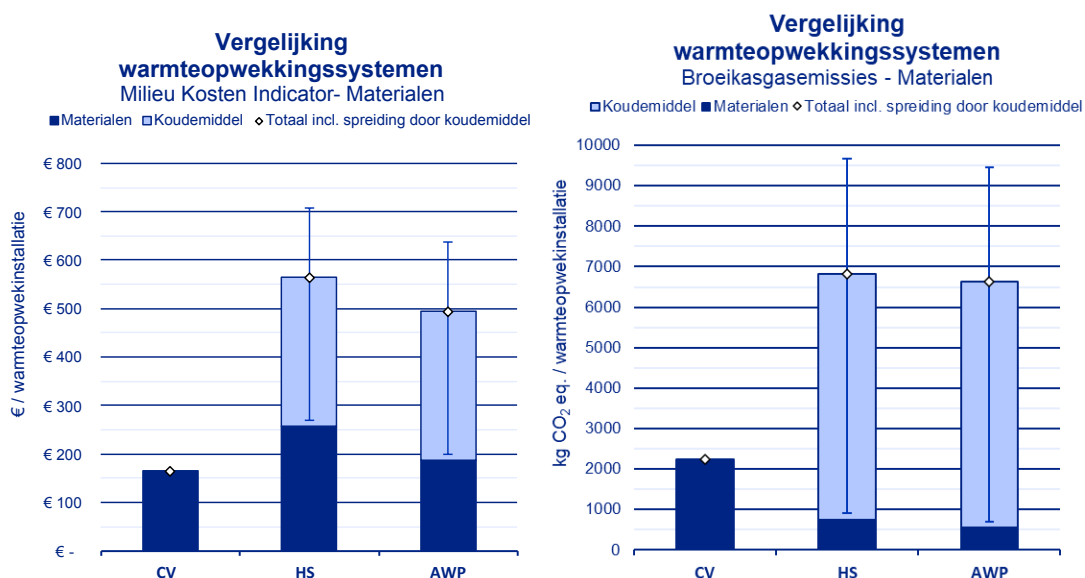
Figuur 2 Invloed van koudemiddelen op de milieu-impact en broeikasgasemissies van (de materialen van) een all-electric warmtepomp (AWP).

3.4 Vergelijking warmteopwekkingsystemen

Figuur 3 toont de milieu-impact en broeikasgasemissies van de (materialen van de) drie warmteopwekkingsystemen. De milieu-impact en broeikasgasemissies van de materialen van een hybride en all-electric warmtepompen zijn hierbij twee- tot driemaal hoger dan bij een cv-ketel. Zoals al vermeld in de voorgaande paragrafen, is daarnaast de impact van het hybride systeem en de all-electric warmtepomp waarschijnlijk een overschatting, en is het werkelijke verschil tussen cv-ketels en de beide warmtepompsystemen nog groter.

Daarnaast lijkt het in deze figuur alsof de milieu-impact van de materialen van een hybride systeem (iets) hoger is dan een all-electric warmtepomp, maar dat is op basis van de gegeven data niet zeker. Dit komt doordat er grote verschillen zitten in de manier waarop het hybride systeem en de all-electric warmtepomp zijn gemodelleerd en er te weinig inzicht is in de opbouw van deze modellen om conclusies te kunnen trekken.

Wel zien we dat er grote spreiding is in de resultaten door de variatie in koudemiddelen; de keuze voor het koudemiddel bepaalt is sterke mate de milieu-impact van het hybride systeem en de all-electric warmtepomp.



Figuur 3 Vergelijking van de milieu-impact en broeikasgasemissies van (de materialen van) verschillende warmteopwekkingssystemen. De foutbalk geeft de spreiding weer ten gevolge van variatie in koudemiddelen.

De volgende vraag is, wat de milieu-impact en broeikasgasemissies van de warmteopwekkingssystemen is gedurende de gebruiksfase, en hoe de materialen- en energieprestatie zich tot elkaar verhouden. Hier gaan we op in de volgende twee hoofdstukken.

4 Milieu-impact van energieverbruik

In dit hoofdstuk presenteren we de milieu-impact ten gevolge van energieverbruik door warmteopwekkingssystemen om woningen te verwarmen.

We gaan hierbij uit van gemiddelde situaties en gebruikelijk consumentengedrag. Voor de impactberekening gebruiken we bestaande energieverbruiksgegevens over bestaande woningen van CBS (zie bijlage D). Om inzicht te geven in de spreiding in energieverbruik binnen een bepaald woningtype, laten we per energie-installatie de milieu-impact zien voor drie energieverbruiksscenario's, op basis van een lage, midden en hoge warmtevraag in bestaande woningen.

We laten twee variabelen zien: één met een fossiele elektriciteitsmix ("grijs" in de NMD) en één met hernieuwbare energie ("groen" in de NMD, bestaand uit een combinatie van voornamelijk zonnestroom, windenergie en biomassa).

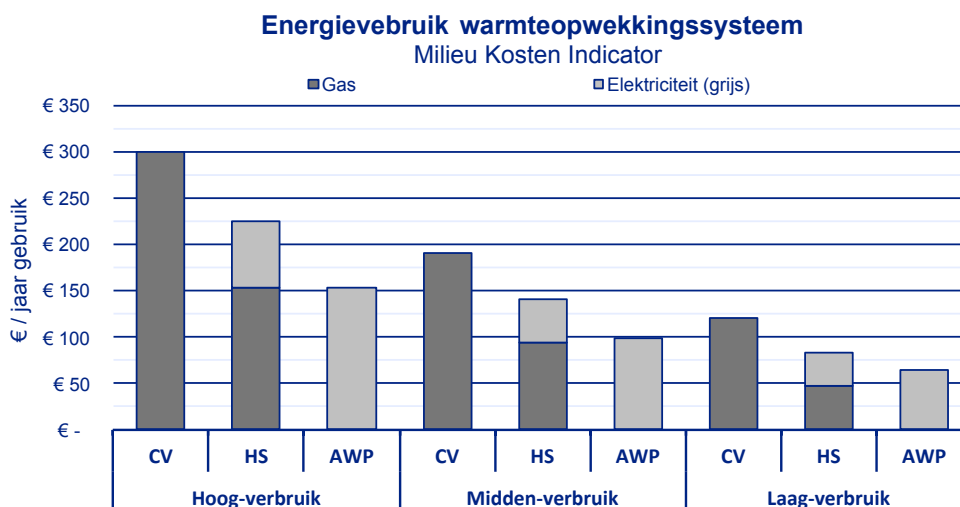
4.1 Milieu-impact van energieverbruik in verschillende warmteopwekkingssystemen (huidige elektriciteitsmix)

De milieu-impact en broeikasgasemissies van energieverbruik voor verschillende warmteopwekkingssystemen zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 4 en Figuur 5. Hierbij zijn we uitgegaan van de huidige elektriciteitsmix, die grotendeels uit fossiele bronnen bestaat (voor de variant met groene stroom, zie de volgende alinea).

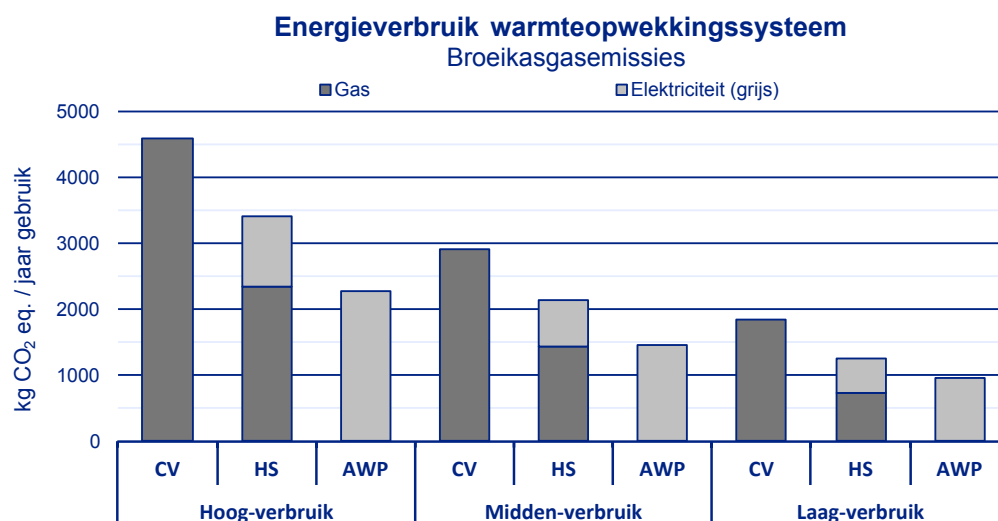
De uitgangspunten voor de berekeningen van het verbruik van aardgas en/of elektriciteit van de cv-ketel, het hybride systeem en de all-electric warmtepomp zijn afgeleid van het gemiddelde energieverbruik in bestaande woningen en toegelicht in bijlage D.

Uit de figuren wordt duidelijk dat zowel de milieu-impact als broeikasgasemissies van energieverbruik in cv-ketels hoger is dan voor systemen met een warmtepomp. Dit wordt veroorzaakt door de efficiëntie waarmee een warmtepomp elektriciteit omzet in warmte.

Het hybride systeem heeft in alle gevallen een hogere milieu-impact dan de all-electric warmtepomp. Dit wordt veroorzaakt door het gasverbruik voor tapwaterverwarming en een deel van de ruimteverwarming. Wel moet opgemerkt worden dat de milieu-impact bij een laag energieverbruik in een warmtepomp en een hybride systeem dicht bij elkaar ligt (slechts 20 MKI verschil, in vergelijking tot 110 MKI verschil bij een hoog energieverbruik). Dit verschil is, gegeven de onzekerheden in de data, niet zeker; nader onderzoek zou dit moeten uitwijzen.



Figuur 4 Milieu-impact van drie energieverbruiksscenario's (laag, midden en hoog verbruik) in de drie warmteopwakkingsystemen: cv-ketel (CV), hybride systeem (HS) en all-electric warmtepomp (AWP).

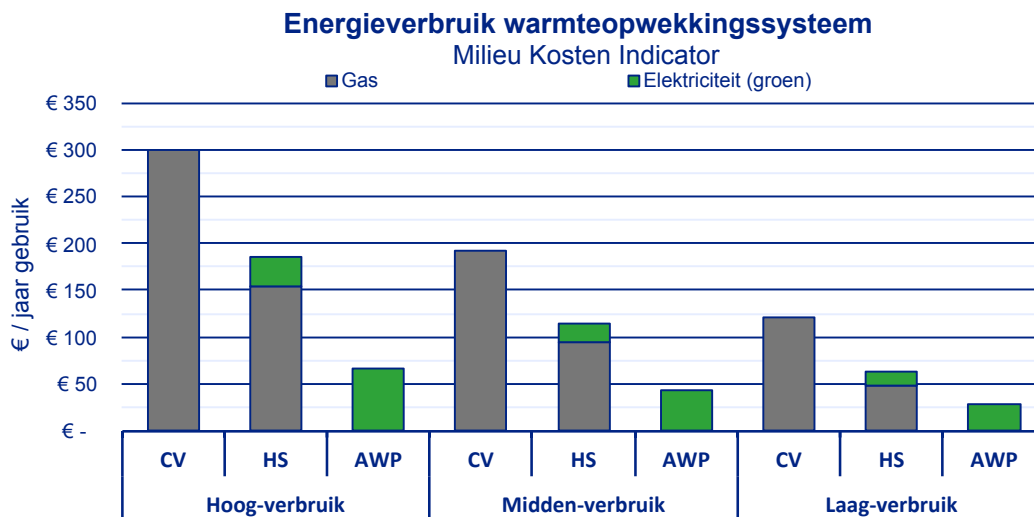


Figuur 5 Broeikasgasemissies van drie energieverbruiksscenario's (laag, midden en hoog verbruik) in de drie warmteopwakkingsystemen: cv-ketel (CV), hybride systeem (HS) en all-electric warmtepomp (AWP).

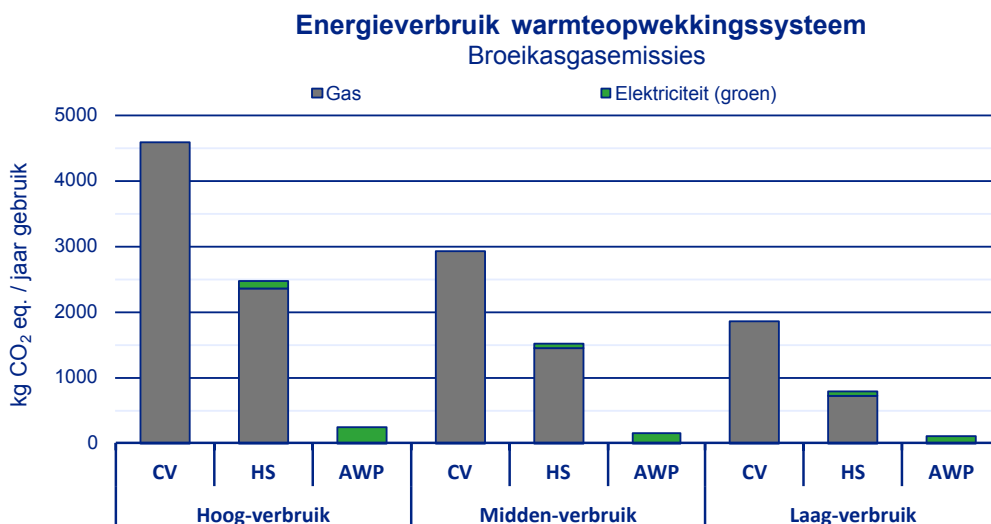
4.2 Milieu-impact van energieverbruik in verschillende warmteopwakkingsystemen (groene elektriciteit)

Warmtepompen worden vaak beschouwd samen met de verduurzaming van het elektriciteitssysteem. Daarom tonen we ook de milieu-impact en broeikasgasemissies van alle verbruiksscenario's uitgaande van een groene elektriciteitsmix uit de NMD (Figuur 6 en Figuur 7).

De conclusies blijven hetzelfde (cv-ketels hebben altijd de hoogste impact, all-electric warmtepompen het laagst) maar worden uitvergroot: het verschil tussen cv-ketel en all-electric warmtepompen verdubbelt ten opzichte van het scenario met een grijze elektriciteitsmix. Dit betekent dat het milieuvoordeel van met name all-electric warmtepompen fors vergroot kan worden wanneer ook de elektriciteitsmix verduurzaamt.



Figuur 6 Milieu-impact, bij gebruik van een groene elektriciteitsmix, van drie energieverbruiksscenario's (laag, midden en hoog verbruik) in de drie warmteopwekkingssystemen: cv-ketel (CV), hybride systeem (HS) en all-electric warmtepomp (AWP).



Figuur 7 Broeikasgasemissies, bij gebruik van een groene elektriciteitsmix, van drie energieverbruiksscenario's (laag, midden en hoog verbruik) in de drie warmteopwekkingssystemen: cv-ketel (CV), hybride systeem (HS) en all-electric warmtepomp (AWP).

5 Totaalbeeld: milieu-impact van materialen en energieverbruik tezamen

In dit hoofdstuk beschouwen we de gecombineerde milieu-impact, dus de productie en het gebruik, van verschillende warmteopwekkingssystemen.

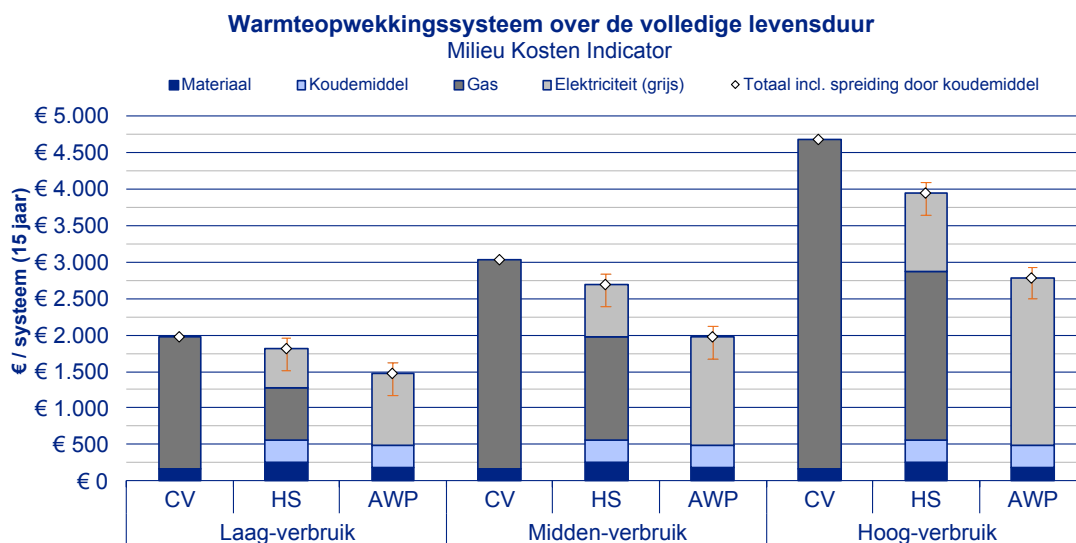
De milieu-impact van de warmteopwekkingssystemen en hun energieverbruik over de gehele levensduur (15 jaar) zijn weergegeven in Figuur 8 tot en met Figuur 11. De eerste twee figuren geven weer wat respectievelijk de milieu-impact en broeikasgasemissies over de gehele levenscyclus (dus materialen plus energieverbruik) van de energiesystemen zouden zijn, in het geval van een grijze elektriciteitsmix. De volgende twee figuren geven exact hetzelfde beeld, maar dan bij een groene elektriciteitsmix. Iedere figuur biedt inzicht in de drie energieverbruiksscenario's, bij een lage, midden en hoge warmtevraag van een bestaande woning en wat de belangrijkste factoren zijn die de milieu-impact en broeikasgasemissies in die scenario's bepalen.

Wat direct opvalt in alle figuren, is dat de impact van de meeste materialen relatief klein is ten opzichte van de gehele levenscyclus. De belangrijkste variabelen in de totale milieu-impact over de hele levenscyclus van de systemen zijn:

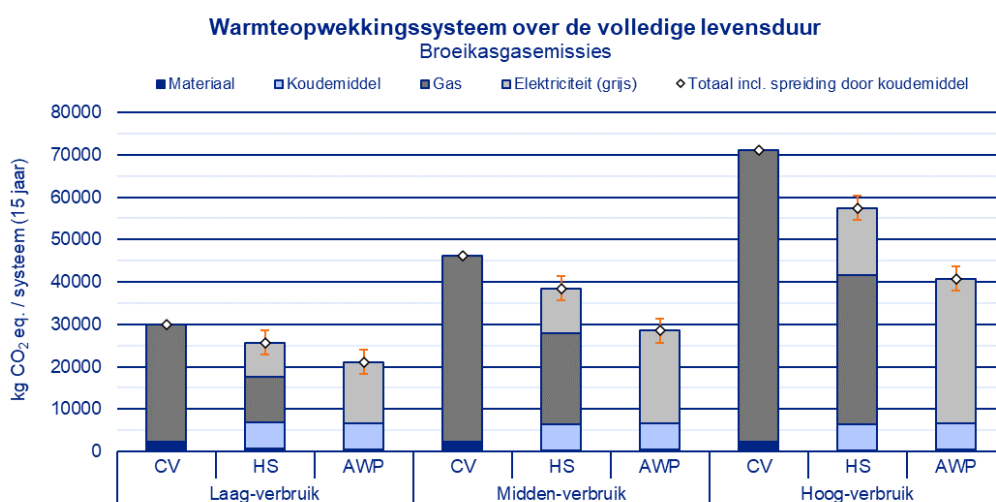
1. de efficiëntie van het verwarmingssysteem;
2. de elektriciteitsmix;
3. het type, de hoeveelheid en mate van lekkage van koudemiddel.

De efficiëntie van het verwarmingssysteem geeft hierbij de doorslag; wanneer we alle scenario's vergelijken over de gehele levenscyclus, valt op dat de milieu-impact en de broeikasgasemissies van all-electric warmtepompen in alle varianten (van koudemiddel) lager is dan die van hybride systemen. Cv-ketels hebben vervolgens de hoogste impact ongeacht de variaties in koudemiddel. In één scenario (bij een laag en grijs energieverbruik) ligt het verschil in milieu-impact van de cv-ketel en het hybride systeem met een koudemiddel met (boven)gemiddelde klimaatimpact dermate dicht bij elkaar, dat het verschil niet significant is (<10%). Echter, gezien de voorgenomen verduurzaming in de elektriciteitsmix (meer hierover in de discussie, paragraaf 6.2) en het feit dat de hoeveelheid van het koudemiddel waarschijnlijk overschat is (zie paragraaf 3.3.2), betekent dat dit waarschijnlijk niet of amper van toepassing is, en dat toepassing van het hybride systeem wel zal leiden tot een lagere milieu-impact dan bij een cv-ketel.

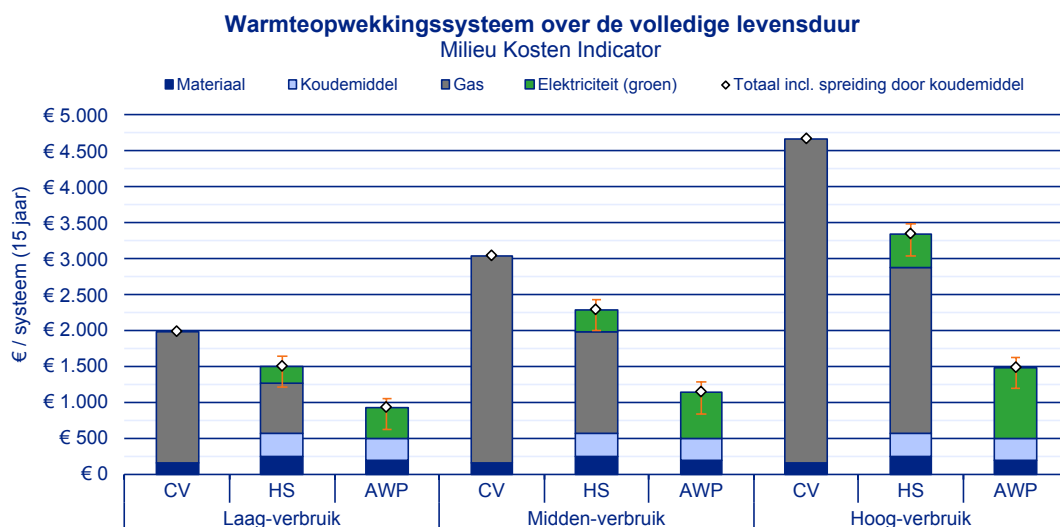
In het meest gunstige geval, waarbij een koudemiddel wordt toegepast met een lage milieu-impact en een groene elektriciteitsmix wordt gebruikt, kan de klimaatvoetafdruk van een warmtepomp 16x lager uitvallen dan een cv-ketel. In het meest ongunstige geval, waarbij er een laag energieverbruik is, een koudemiddel wordt toegepast met een hoge milieu-impact en een grijze elektriciteitsmix wordt gebruikt, ligt de milieu-impact van een all-electric warmtepomp nog altijd 26% lager dan een cv-ketel.



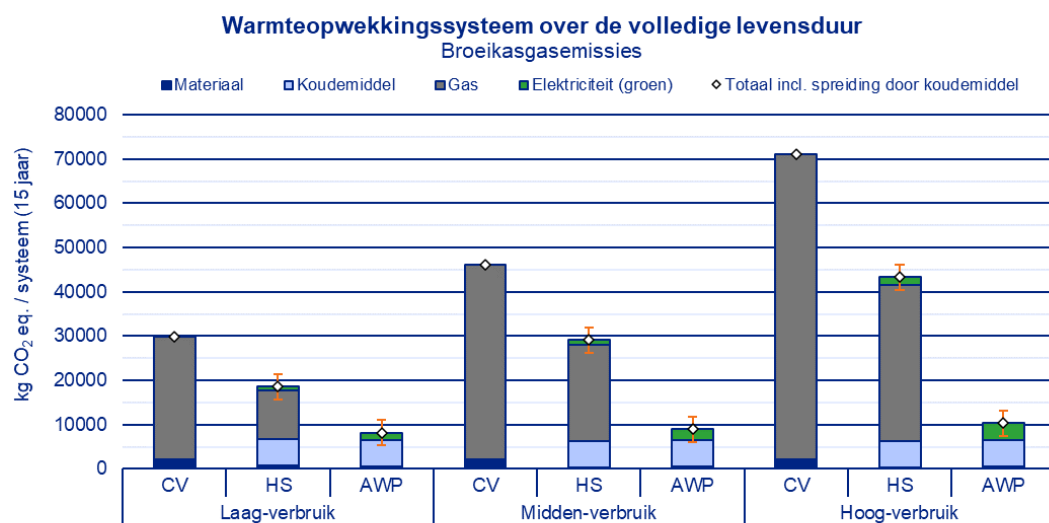
Figuur 8 Milieu-impact, bij gebruik van een grijze elektriciteitsmix, over de hele levensduur van de drie warmteopwekkingsystemen: cv-ketel (CV), hybride systeem (HS) en all-electric warmtepomp (AWP), met drie energieverbruiksscenario's (laag, midden en hoog verbruik). De foutbalk geeft de spreiding weer ten gevolge van variatie in koudemiddelen.



Figuur 9 Broeikasgasemissies, bij gebruik van een grijze elektriciteitsmix, over de hele levensduur van de drie warmteopwekkingsystemen: cv-ketel (CV), hybride systeem (HS) en all-electric warmtepomp (AWP), met drie energieverbruiksscenario's (laag, midden en hoog verbruik). De foutbalk geeft de spreiding weer ten gevolge van variatie in koudemiddelen.



Figuur 10 Milieu-impact, bij gebruik van een groene elektriciteitsmix, over de hele levensduur van de drie warmteopwekkingsystemen: cv-ketel (CV), hybride systeem (HS) en all-electric warmtepomp (AWP), met drie energieverbruiksscenario's (laag, midden en hoog verbruik). De foutbalk geeft de spreiding weer ten gevolge van variatie in koudemiddelen.



Figuur 11 Broeikasgasemissies, bij gebruik van een groene elektriciteitsmix, over de hele levensduur van de drie warmteopwekkingsystemen: cv-ketel (CV), hybride systeem (HS) en all-electric warmtepomp (AWP), met drie energieverbruiksscenario's (laag, midden en hoog verbruik). De foutbalk geeft de spreiding weer ten gevolge van variatie in koudemiddelen.

6 Conclusies & discussie

6.1 Conclusies

De duurzaamheid van warmtepompen staat in de aandacht vanwege recente nieuwsberichten over nieuwe inzichten in de milieu-impact van warmtepompen². TNO heeft de achterliggende data uit de berichtgeving geanalyseerd en van nadere duiding voorzien.

Bij het trekken van conclusies, moet worden benadrukt dat de analyse is uitgevoerd met een aantal beperkingen, zoals toegelicht in hoofdstuk 1: binnen een zeer kort tijdsbestek, met een bestaande dataset waarin inconsistenties zitten en alleen voor een beperkt aantal typen warmteopwekkingssystemen en energieverbruiksscenario's.

Ondanks de beperkingen, kunnen we de volgende algemene conclusies trekken:

- De dominante factor in de milieu-impact van warmteopwekkingssystemen is het energieverbruik. De efficiëntie van warmteproductie en de elektriciteitsmix spelen een grotere rol dan de productie, onderhoud en afvalverwerking van de materialen in de warmteopwekkingssystemen.
- De milieu-impact van de materialen van warmtepompen is weliswaar hoger dan die van cv-ketels, maar dit wordt gecompenseerd tijdens de gebruiksfase dankzij een efficiëntere warmteproductie. Dit geldt zowel voor toepassing bij een gemiddeld energieverbruik, maar ook bij een hoog en, op één scenario na, ook bij een laag energieverbruik.
- Het verschil in milieu-impact tussen de cv-ketel en het hybride systeem is in één scenario niet significant (<10%): wanneer er sprake is van een laag energieverbruik en het hybride systeem maakt gebruik van grijze stroom en een koudemiddel met een relatief hoge klimaatscore (R410a of R134a). Dit is echter een uitzonderlijk scenario, gezien de voorgenomen en geplande verduurzaming in de elektriciteitssector (zoals beschreven in paragraaf 6.2), de conservatieve schatting die is gedaan wat betreft koudemiddelen (zoals beschreven in paragraaf 3.3) en de verwachte afname in gebruik van deze specifieke koudemiddelen. Dit betekent dat warmtepompen in toenemende mate zullen leiden tot een verlaging van de milieu-impact in vergelijking tot cv-ketels.
- Voor alle warmtepompen (zowel hybride als all-electric) geldt dat de milieu-impact gedurende de gebruiksfase, met name wat betreft broeikasgasemissies, significant verder verlaagd kan worden wanneer de elektriciteitsmix duurzamer wordt dan de grijze elektriciteitsmix waarmee nu gerekend is.
- De belangrijkste impact bij all-electric warmtepompen, na elektriciteitsverbruik, wordt veroorzaakt door het lekken van koudemiddel. Het gebruik van alternatieve koudemiddelen, zoals propaan, kan zorgen voor een substantiële bijdrage aan de vermindering van de milieu-impact en broeikasgasemissies.
- De milieu-impact van de materialen die nodig zijn voor warmtepompen wordt grotendeels bepaald door de productie van koper. Deze impact zou verlaagd kunnen worden door anders te ontwerpen en meer te recyclen. Over het geheel van materiaal- en energieverbruik van de systemen tezamen, is de milieu-impact van dit koper van minder groot belang.

6.2 Discussiepunten

Bij het beschouwen van de resultaten en conclusies van dit onderzoek, is het van belang om een aantal aandachtspunten te erkennen, die echter geenszins de robuustheid van de conclusies beïnvloeden:

- Discrepancie in de databronnen: de achterliggende data van sNMD is onvoldoende consistent om een gedetailleerde vergelijking te maken van de drie warmteopwekkingssystemen, wat betekent dat er altijd een foutmarge beschouwd moet worden, en de hier gepresenteerde resultaten enkel een algemeen beeld schetsen en geen harde waarheid. Bijvoorbeeld: bij de all-electric warmtepomp is elektronica gemodelleerd als puur koper, bij het hybride systeem en de cv als “elektronische componenten” met een andere samenstelling. Daarnaast is recycling en de bijbehorende milieuwinst op verschillende wijzen meegerekend voor de drie systemen. Dit zou tientallen MKI’s (dus enkele procenten) uit kunnen maken op de milieu-impact van een energiesysteem. De conclusie op basis van de gecombineerde impact van materialen en energieverbruik, wijzigt hierdoor niet, omdat het energieverbruik hierin een grotere rol speelt.
- Extremen: deze studie schetst een beeld van de impactverhouding tussen materialen en energie, maar voor specifieke gevallen is nader onderzoek nodig: we gaan immers uit van een gemiddelde, bestaande (rij)woning met laag (5e percentiel), midden en hoog (95e percentiel) energieverbruik, maar daarmee kunnen we niet met zekerheid zeggen hoe dit doorwerkt voor alle types woningen en alle types verbruik (bijv. extreem zuinig gebruik door individueel gedrag). Wel kunnen we zeggen dat hoe hoger het energieverbruik is, hoe groter het verschil wordt tussen cv-ketel en warmtepomp.
- Energiemaatregelen: we zijn uitgegaan van tussenwoningen met energielabel B die geschikt zijn voor warmtepompen. Voor woningen met een zeer laag energielabel loont het qua milieu-impact waarschijnlijk meer om eerst andere maatregelen te treffen aan de woning, zoals betere isolatie, dan het vervangen van de cv-ketel door een all-electric warmtepomp of een hybride systeem.
- In de afbakening van het energieverbruik zijn we enkel uitgegaan van energieverbruik op basis van warmtevraag. Echter, warmtepompen kunnen gedeeltelijk¹¹ ook koelen, iets dat nu vaak gedaan wordt met airco’s. Koudevraag is geen onderdeel van de berekening, maar eigenlijk wel van belang voor de vergelijking. Ook in toekomstige scenario’s met eventueel meer extreme zomers, zou overwogen kunnen worden om in het scenario met de cv-ketel ook een koelsysteem (airconditioning) toe te voegen. Dit zal de conclusies overigens alleen maar versterken.
- In het huidige model zijn we uitgegaan van een energiemix van zowel grijze als groene stroom. De mix van grijze stroom zal in de toekomst steeds meer verschuiven naar een mix van groene stroom. Hier is geen rekening mee gehouden in de berekeningen. Het aandeel hernieuwbare bronnen in de elektriciteitsmix (“groene stroom”) zal naar verwachting toenemen van ruim 30% in 2021 naar 85% in 2030. Dat deze groei ook daadwerkelijk verwacht mag worden komt doordat deze groei grotendeels gebaseerd is op projecten die al ‘in de pijplijn’ zitten¹². Het is dus zeer reëel dat de milieu-impact van warmtepompen steeds verder opschuift van het “grijze scenario” (Figuur 8–Figuur 9) naar een groener scenario (Figuur 10–Figuur 11) en dat daarmee het verschil tussen cv-ketels en warmtepompsystemen steeds groter wordt.
- Bij de berekeningen zijn we uitgegaan van een hoge hoeveelheid koudemiddel dat nodig is voor de warmtepompen, namelijk 4,9 kg koudemiddel (bron hiervoor is de proceskaart zoals deze in

¹¹ Denk bij warmtepompen i.c.m. radiatoren vooral aan topkoeling. De hoeveelheid koeling is beperkt i.v.m. condensvorming op radiatoren en leidingen.

¹² Zie voor meer achtergrond en de onderbouwing hier van <https://www.pbl.nl/publicaties/klimaat-en-energieverkenning-2022>

de NMD is opgenomen). Een gemiddelde warmtepomp voor de referentiewoning in dit onderzoek heeft gewoonlijk 2 tot 2,5 kg koudemiddel nodig. Bovendien is er gerekend met een jaarlijks percentage van 6% lekkage, wat aan de hoge kant lijkt te zijn. 4%–5% lijkt realistischer te zijn. Deze uitgangspunten zijn in dat opzicht worst-case-scenario's voor de warmtepompen en betere data zullen dus voor de warmtepompen tot betere resultaten leiden.

7 Ondertekening

Utrecht, 4 april 2023

Gerard van der Laan
Head of Department

Mara Hauck
Reviewer

Arjan van Horssen
Project Leider

Bijlage A

Uitgangspunten berekening materialen cv-ketel

Voor berekening van de milieu-impact van de materialen van de cv-ketel is gebruik gemaakt van de berekening van sNMD, met de NMD invoermodule (Figuur 12). De MKI van de cv-ketel, exclusief de opslag, is € 164,-.

Uit de gegevens van de invoermodule is de MKI af te lezen, maar niet de broeikasgasemissies. Deze laatste is daarom berekend door dezelfde verhouding tussen MKI en broeikasgasemissies aan te houden als voor de materialen, die niet van koper zijn, van de all-electric warmtepomp. Dit is gedaan omdat het aandeel koper in een cv-ketel aanzienlijk lager is en de MKI van koper voor een veel groter deel bepaald wordt door de milieueffectcategorie humane toxiciteit dan de andere materialen. Daarmee komt de milieueffectcategorie klimaatverandering uit op 2243 kg CO₂-eq.

Bijlage B

Uitgangspunten berekening materialen hybride systeem

Voor berekening van de milieu-impact van de materialen van het hybride systeem is gebruik gemaakt van de berekening van sNMD, met de NMD invoermodule (Figuur 13). De MKI van het hybride systeem, exclusief de opslag, is € 257,-.

Bij de invoer van het hybride systeem is geen koelmiddel gemodelleerd. Daarom zijn hiervoor de gegevens gebruikt van de all-electric warmtepomp (MKI € 309,- en broeikasgasemissies 6072 kg CO₂-eq.)

Uit de gegevens van de invoermodule is de MKI af te lezen, maar niet de broeikasgasemissies. Deze laatste is daarom berekend door dezelfde verhouding tussen MKI en broeikasgasemissies aan te houden als voor de materialen, waarbij het uitgangspunt is geweest dat de verhouding tussen het koper en de overige materialen hetzelfde is tussen de twee systemen. Daarmee komen de broeikasgasemissies uit op 753 kg CO₂-eq. (dit is exclusief de 6072 kg CO₂-eq. van het koudemiddel).

NMD3.0 Categorie 3 Productkaart invoeren **Hybride** ingefuld: nmd3@milieubureau.nl, sak / M&O
 jan 2022

Productenlijst (klik op de veldnamen om de productinformatie te bekijken) **Productenlijst** (klik op de veldnamen om de productinformatie te bekijken)

Toelichting Eindgebruiker

Toepassing

Element (B&U) / Hoofdstuk (CWW)

Product Eenheden

Omrekenfactor ProductEenheid -> ElementEenheid

Levensduur product (jaar)

Transport Afstand (km)

v_waarde

CO2

IC_waarde

lambda

limn_cade

ProductCategorie

Is "Totaalproduct"?

Product MKI

333.818 (incl. Opslag: 256.782) broncode op: 28-09-2022 14:28:05

Toneelnummer van coördineren: Klik op een product in de lijst die verschijnt, om dit te laden 'ALL' (reels volledige lijst)

CLIAS	Code	ElementOnderdeel (*) = verpluist in MKI berekening	Eenheid	Product-onderdeel	Hoeveelheid	Levensduur	Basiprofiel	Verlies Perc (vwn AS)	Alvalscenario	TransportProfiel	Module D		
Constructie	56-24.rv5	Geïntegreerde regelringen (*)	stuk(s)	"Meefflar"	1	15	00						
	56-24.rv7	Dyhangconstructies (*)	stuk(s)	"Meefflar"	1	15	00						
	56-24.rv8	Bouwkundige voorzieningen (*)	- Kies een veld -				00						
Uitrusting	56-24.rv1	Bijzondere opwerkingsinstallaties (*)	stuk(s)	contactor	1	15	00	17.2 kg	0379-Sub: Aluminium	0001-Inv: Transport	Ki netto doorgevoeren	1.61 kg	0039-Mod: Module C
							AS		- Kies een basiprof				- Kies een vld of ca
							B1		- Kies een basiprof				- Kies een tab prof
							B2		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B3		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B4		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B5		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B6		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B7		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B8		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B9		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B10		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B11		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B12		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B13		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B14		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B15		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B16		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B17		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B18		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B19		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B20		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B21		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B22		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B23		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B24		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B25		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B26		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B27		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B28		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B29		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B30		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B31		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B32		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B33		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B34		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B35		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B36		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B37		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B38		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B39		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B40		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B41		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B42		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B43		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B44		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B45		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B46		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B47		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B48		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B49		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B50		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B51		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B52		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B53		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B54		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B55		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B56		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B57		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B58		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B59		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B60		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B61		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B62		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B63		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B64		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B65		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B66		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B67		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B68		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B69		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B70		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B71		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B72		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B73		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B74		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B75		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B76		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B77		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B78		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B79		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B80		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B81		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B82		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B83		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B84		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B85		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B86		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B87		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B88		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B89		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B90		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B91		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B92		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B93		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B94		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B95		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B96		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B97		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B98		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B99		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B100		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B101		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B102		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B103		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B104		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B105		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B106		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B107		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B108		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B109		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B110		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B111		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B112		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B113		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B114		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B115		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B116		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B117		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B118		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B119		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B120		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B121		- Kies een basiprof				- Kies een energieg
							B122		- Kies een basiprof				- Kies een

Bijlage C

Uitgangspunten berekening materialen all-electric warmtepomp

Voor berekening van de milieu-impact van de materialen van de all-electric warmtepompen is gebruik gemaakt van de berekening van sNMD, met de NMD invoermodule (Figuur 14). De MKI van de all-electric warmtepomp, exclusief de opslag, is volgens deze kaart € 441,-.

Er was behoefte om de bijdrage van het koudemiddel inzichtelijk te maken, zodat ook combinaties van all-electric warmtepompen en verschillende koudemiddelen berekend kunnen worden. In de invoermodule van de NMD is het niet mogelijk de bijdrage van het koudemiddel te bepalen. Daarom is voor de milieu-impact van de all-electric warmtepomp een Simapro-berekening gemaakt. De achterliggende gegevens van de berekening door sNMD in de NMD invoermodule is weergegeven in Tabel 5. Deze gegevens zijn door verwerkt in de standaard LCA-software SimaPro en heeft als resultaat een MKI van € 495,- en 6620 kg CO₂-eq. aan broeikasgasemissies.

Tabel 5 Achterliggende gegevens van de berekening van de materialen van all-electric warmtepompen door sNMD in de NMD invoermodule.

Levensfase	Onderdeel	Subdeel	Product			Eenheid	Profiel	Bron	Einde leven					
			Air-source heat pump	Ground-source heat pump	Water-source heat pump				Profiel	Laten zitten	Stort	AVI	Recycling	Hergebruik
A1-3	Evaporator and condenser	Low alloyed steel	32	20	20	kg	0214-fab&Staal, ongelegeerd (a.b.v. Staal, unalloyed [GLO]) market for Cut-off, U; 78,7% primair, 21,3% secundair	SBK NMD	Staal, licht	0%	1%	0%	8%	12%
A1-3	Housing and compressor	Reinforcing steel	120	75	75	kg	0167-fab&Staal, wapening, ongelegeerd (betonstaal, wapeningsnet, vezels, voorspanstaal) (a.b.v. 21,5% Staal, unalloyed, 78,5% Staal, low-alloyed & Hot rolling steel [GLO]) market for Cut-off, U; 17,8% primair, 82,2% secundair	SBK NMD	Staal, wapening	0%	5%	0%	95%	0%
A1-3	Wiring, piping and expansion valve	Copper	35,2	22	22	kg	0059-fab&Koper, kathode, voor draad [European mix for cathodes (a.b.v. 49% Copper [RER]) production, primary, 9% Copper [RER]] treatment of scrap by electrolytic refining & 42% Copper [GLO]) market for, 79% primair, 21% secundair	SBK NMD	Koper, gemengd	0%	10%	5%	85%	0%
A1-3	Pipework insulation	Elastomere	16	10	10	kg	0014-fab&EPDM, rubber, chloropreen, neopreen, styrene butadiene rubber- SBR (a.b.v. Synthetie rubber [GLO]) market for Cut-off, U)	SBK NMD	Rubber, via rastmateriaal	0%	0%	100%	0%	0%
A1-3	Wiring insulation	Polyvinylchloride	1,6	1	1	kg	0200-fab&PVC, folie (a.b.v. Polyvinylchloride, suspension polymerisat [GLO]) market for Cut-off, U + Extrusion, plastic film [GLO]) market for Cut-off, U)	SBK NMD	PVC, leidingen	0%	10%	20%	70%	0%
A1-3	Lubricating oil	Polyester oil	2,7	3,7	3,7	kg	0056-fab&Smearolie (a.b.v. Lubricating oil [RER]) market for lubricating oil Cut-off, U)	SBK NMD	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.
A1-3	Air fan	Copper	1,4	0	0	kg	0059-fab&Koper, kathode, voor draad [European mix for cathodes (a.b.v. 49% Copper [RER]) production, primary, 9% Copper [RER]] treatment of scrap by electrolytic refining & 42% Copper [GLO]) market for, 79% primair, 21% secundair	SBK NMD	Japen	0%	5%	0%	95%	0%
A1-3		HDPE	0,5	0	0	kg	0185-fab&Polyethaan, HDPE, geëxtrudeerd (a.b.v. Polyethyleen, high density, granulate [GLO]) market for Cut-off, U & Extrusion, plastic pipes [GLO]) market for Cut-off, U)	SBK NMD	Kunststoffen, overig	0%	0%	90%	10%	0%
A1-3		R-134a	4,9	3,09	3,09	kg	Refrigerant R134a [GLO]) market for Cut-off, U)	EI 3.6	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.
A1-3	Refrigerant	Manufacturing losses	3	3	3	%	Refrigerant R134a [GLO]) treatment of used refrigerant R134a, reclamation Cut-off, U)	EI 3.6	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.
B1		Operational losses	6	6	6	kg/yr	Refrigerant R134a [GLO]) treatment of used refrigerant R134a, reclamation Cut-off, U)	EI 3.6	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.
A1-3	Assembly of pump units	Medium voltage electricity (EU)	504	337	337	MJ	0124-pro&KWh, uit stopcontact (a.b.v. Electric, low voltage [NL]) market for Cut-off, U)	SBK NMD	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.
A1-3		Natural gas	1400	875	875	MJ	0113-pro&Aardgas, algemeen gebruik, per m3 (a.b.v. 31,7 MJ Heat, district or industrial, natural gas [RER]) market group for Cut-off, U)	SBK NMD	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.
A1-3	Heat collector pipework	HDPE (HHC)	0	301,2	301,2	kg	0185-fab&Polyethaan, HDPE, geëxtrudeerd (a.b.v. Polyethyleen, high density, granulate [GLO]) market for Cut-off, U & Extrusion, plastic pipes [GLO]) market for Cut-off, U)	SBK NMD	Drainage buizen, horizontale	80%	2%	18%	0%	0%
A1-3		HDPE (VHC)	0	183,1	183,1	kg	0185-fab&Polyethaan, HDPE, geëxtrudeerd (a.b.v. Polyethyleen, high density, granulate [GLO]) market for Cut-off, U & Extrusion, plastic pipes [GLO]) market for Cut-off, U)	SBK NMD	Drainage buizen, verticale	100%	0%	0%	0%	0%
A1-3	Heat collector pipework insulation	LDPE	0	4,7	4,7	kg	0012-fab&Polyethaan, LDPE, folie (a.b.v. Packaging film, low density polyethylene [GLO]) market for Cut-off, U)	SBK NMD	Drainage buizen, verticale	100%	0%	0%	0%	0%
A1-3	Heat carrier liquid	Ethylene glycol (HHC)	0	167	167	kg	Diethylene glycol [RER] ethylene glycol production Cut-off, U)	EI 3.6	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.
A1-3		Ethylene glycol (VHC)	0	106,2	106,2	kg	Diethylene glycol [RER] ethylene glycol production Cut-off, U)	EI 3.6	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.
A1-3	Weights	Cast iron (HHC)	0	0	34	kg	0220-fab&Gietijzer (a.b.v. Cast iron [GLO]) market for Cut-off, U; 81,3% primair, 18,7% secundair	SBK NMD	Metalen, overig	0%	5%	0%	95%	0%
A1-3		Cast iron (VHC)	0	0	3,5	kg	0220-fab&Gietijzer (a.b.v. Cast iron [GLO]) market for Cut-off, U; 81,3% primair, 18,7% secundair	SBK NMD	Metalen, overig	0%	5%	0%	95%	0%
A1-3	Manifold	Brass	0	6,6	6,6	kg	0058-fab&Messing (a.b.v. Brass [ROW]) production Cut-off, U)	SBK NMD	Metalen, overig	0%	5%	0%	95%	0%
A1-3	Back-fill	Cement (VHC only)	0	19,1	1,3	kg	0172-fab&Cement, CEM I (a.b.v. CEM I 52,5 R)	SBK NMD	Kalkzandsteen	0%	1%	0%	99%	0%
A1-3		Bentonite (VHC only)	0	3,8	0,3	kg	0182-fab&Klei (a.b.v. Clay [ROW]) market for clay Cut-off, U)	SBK NMD	Zand, grond	100%	0%	0%	0%	0%
A1-3	Scaffolding, rods, supports	Reinforcing steel	0	35	35	kg	0167-fab&Staal, wapening, ongelegeerd (betonstaal, wapeningsnet, vezels, voorspanstaal) (a.b.v. 21,5% Staal, unalloyed, 78,5% Staal, low-alloyed & Hot rolling steel [GLO]) market for Cut-off, U; 17,8% primair, 82,2% secundair	SBK NMD	Staal, wapening	0%	5%	0%	95%	0%
A5	Installation	Diesel (HHC)	0	22,6	15,1	kg	0095-pro&Diesel, gasolie, gebruik, iter (a.b.v. 35,8 MJ Diesel) burned in building machine [GLO]) processing Cut-off, U)	SBK NMD	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.
A5		Diesel (HHC)	0	271,5	0	kg	0095-pro&Diesel, gasolie, gebruik, iter (a.b.v. 35,8 MJ Diesel) burned in building machine [GLO]) processing Cut-off, U)	SBK NMD	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.
B2	Maintenance	Refrigerant	0,294	0,185	0,185	kg/yr	Refrigerant R134a [GLO]) market for Cut-off, U)	EI 3.6	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.

Uit: Greening & Azapagic, 2012, Domestic heat pumps - life cycle environmental impacts and potential implications for the UK

Bijlage D

Uitgangspunten energieverbruik woningen

D.1 Energieverbruik gehele woning

Voor de berekeningen zijn we uitgegaan van een veelvoorkomend woningtype uit de RVO referentiewoningen: een tussenwoning met een gebruiksoppervlakte van 110 m² en met een energielabelklasse B.

Er is onderscheid gemaakt tussen laag, midden en hoog verbruik. Het energieverbruik is afgeleid uit CBS data, beschouwingsjaar 2018¹³. Voor laag verbruik is gebruikt het 5^e percentiel, voor midden het 50^e percentiel en voor hoog van het 95^e percentiel gehanteerd.

Dat levert het volgende totale aardgasverbruik per verbruiksscenario:

Verbruik laag: 6,0 m ³ /m ²	≈ 660 m ³ per woning, per jaar
Verbruik midden: 9,5 m ³ /m ²	≈ 1045 m ³ per woning, per jaar
Verbruik hoog: 14,9 m ³ /m ² ≈	1639 m ³ per woning, per jaar

D.1.1 Energieverbruik voor tapwaterverwarming

Voor tapwaterverwarming is uitgegaan van een energieverbruik van 856 kWh. Dit is gebaseerd op de specifieke warmtebehoefte voor warm tapwater voor woonfunctie. Dit komt neer op een dagelijks gebruik van 40,29 L water van 60 graden Celsius per persoon¹⁴.

Voor het onderscheid van de verschillende verbruiksscenario's is een aanname gedaan voor het aantal personen tapwater gebruiken. Voor het scenario laag verbruik, is de aanname gedaan van een 0,5 personen, voor midden 2 en voor hoog 3,5.

Voor de berekening van het energieverbruik in kWh voor tapwater naar de hoeveelheid gas die hiervoor nodig is, is gebruik gemaakt van de omrekenfactor 0,03517 GJ/m³ (1 GJ/m³ = 1000/3,6 kWh/m³) voor de calorische bovenwaarde van aardgas¹⁵. Daarnaast is gerekend met combitoestel met Gaskeur HR en Gaskeur CW met cW:gen = 1, waarvan het rendement 67,5% is¹⁶.

Dat leidt tot de volgende uitgangspunten:

Verbruik laag (0,5 personen):	428 kWh	≈ 65 m ³ per woning, per jaar
Verbruik midden (2 personen):	1712 kWh	≈ 260 m ³ per woning, per jaar
Verbruik hoog (3,5 personen):	2996 kWh	≈ 454 m ³ per woning, per jaar

¹³ bron: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83878ned/table?ts=1678982081899>

¹⁴ bron: NTA8800 par. 13.2.3.1. <https://www.nen.nl/nta-8800-2023-nl-304951>

¹⁵ bron: R. Niessink & J. Gerdes; Primaire fossiele energiefactor elektriciteit op bovenwaarde (HHV) voor toepassing in de energieprestatienorm NTA8800 (TNO 2018 P10441)

¹⁶ bron: NTA 8800 tabel 13.25 <https://www.nen.nl/nta-8800-2023-nl-304951>

D.1.2 Energieverbruik voor ruimteverwarming

Om het energieverbruik voor ruimteverwarming te bepalen, is het gasverbruik voor het tapwater van het totale verbruik van aardgas afgetrokken.

Vervolgens is deze hoeveelheid aardgasverbruik omgerekend naar een hoeveelheid energie, waarbij weer is uitgegaan van 0,03517 GJ/m³ voor de calorische bovenwaarde van aardgas¹⁷ en een rendement van 95%, welke gebaseerd is op de forfaitaire waarde van een HR-107 ketel met HT-afgifte¹⁸.

Dat leidt tot de volgende uitgangspunten:

Verbruik laag: 595 m³ ≈ 5523 kWh_{th} per woning, per jaar
Verbruik midden: 785 m³ ≈ 7289 kWh_{th} per woning, per jaar
Verbruik hoog: 1185 m³ ≈ 10995 kWh_{th} per woning, per jaar

In de volgende paragrafen is toegelicht hoe deze gasverbruiksscenario's zijn vertaald naar energieverbruik in hybride systemen en all-electric warmtepompen.

D.2 Uitgangspunten berekening energieverbruik woningen met cv-ketel

Een cv-ketel verwarmd zowel tapwater als water voor ruimteverwarming op met gebruik van aardgas.

D.2.1 Tapwater in woningen met cv-ketel

Verbruik laag: 65 m³ aardgas
Verbruik midden: 260 m³ aardgas
Verbruik hoog: 454 m³ aardgas

D.2.2 Ruimteverwarming in woningen met cv-ketel

Verbruik laag: 595 m³ aardgas
Verbruik midden: 785 m³ aardgas
Verbruik hoog: 1185 m³ aardgas

D.3 Uitgangspunten berekening energieverbruik woningen met hybride systeem

Bij een hybride systeem wordt het tapwater verwarmd door het gebruik van aardgas. Voor de ruimteverwarming wordt het grootste deel verkregen door het gebruik van elektrische energie en een kleiner deel met behulp van aardgas. In de berekening van de ruimteverwarming is uitgegaan van 67% met behulp van elektriciteit, de rest met behulp van aardgas.

¹⁷ bron: R. Niessink & J. Gerdes; Primaire fossiele energiefactor elektriciteit op bovenwaarde (HHV) voor toepassing in de energieprestatienorm NTA8800 (TNO 2018 P10441)

¹⁸ bron: NTA8800 tabel 9.25 <https://www.nen.nl/nta-8800-2023-nl-304951>

De efficiëntie van een warmtepomp wordt uitgedrukt in SCOP. Dit staat voor Seasonal Coefficient of Performance. Dit is een maatstaf voor de efficiëntie van een warmtepomp tijdens het hele stookseizoen. De SCOP wordt berekend door het gemiddelde rendement van de warmtepomp over een heel jaar te nemen, waarbij rekening wordt gehouden met verschillende werkingssomstandigheden zoals de buitentemperatuur en de gewenste binnentemperatuur. Een hogere SCOP betekent dat de warmtepomp efficiënter is en meer warmte produceert per eenheid energie die wordt verbruikt.

Typische SCOP-waarden voor all-electric warmtepompen en hybride systemen werden bepaald op basis van waarden verkregen uit grootschalige monitoringprojecten en aangevuld met onze laboratoriumervaring¹⁹. Er is aanzienlijke variatie tussen individuele installaties en het type warmtepomp/ verwarmingssysteem, dus deze SCOP's zijn een brede gemiddelde voor hoog-niveau analyse doeleinden.

De SCOP voor de warmtepomp in een hybride systeem is in de berekeningen 3,575.

Dit betekent dat de warmtepomp tijdens het hele stookseizoen gemiddeld 3,575 kWh aan warmte kan produceren voor elke kilowattuur aan elektriciteit die wordt verbruikt.

D.3.1 Tapwater in woningen met hybride systeem

Verbruik laag: 65 m³ aardgas
Verbruik midden: 260 m³ aardgas
Verbruik hoog: 454 m³ aardgas

D.3.2 Ruimteverwarming in woningen met hybride systeem

Verbruik laag: 194 m³ aardgas en 1042 kWh elektriciteit
Verbruik midden: 256 m³ aardgas en 1375 kWh elektriciteit
Verbruik hoog: 386 m³ aardgas en 2074 kWh elektriciteit

D.4 Uitgangspunten berekening energieverbruik woningen met all-electric warmtepomp

Een all-electric warmtepomp verwarmt zowel het tapwater als het water voor ruimteverwarming volledig door middel van elektriciteit.

De SCOP voor de warmtepomp in een all-electric warmtepomp is in de berekeningen 3,133²⁰.

Dit betekent dat de warmtepomp gemiddeld 3,133 kWh aan warmte kan produceren voor elke kilowattuur aan elektriciteit die wordt verbruikt.

¹⁹ bronnen:

<https://www.installatiemonitor.nl/wp-content/uploads/2022/02/Eindrapportage-Installatiemonitor-v2.1.pdf>
<https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/wp-monitor.html>

Nog niet gepubliceerde studie TNO

²⁰ bronnen:

<https://www.installatiemonitor.nl/wp-content/uploads/2022/02/Eindrapportage-Installatiemonitor-v2.1.pdf>
<https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/wp-monitor.html>

Nog niet gepubliceerde studie TNO

D.4.1 Tapwater in woningen met all-electric warmtepomp

Verbruik laag: 137 kWh elektriciteit

Verbruik midden: 546 kWh elektriciteit

Verbruik hoog: 956 kWh elektriciteit

D.4.2 Ruimteverwarming in woningen met all-electric warmtepomp

Verbruik laag: 1763 kWh elektriciteit

Verbruik midden: 2326 kWh elektriciteit

Verbruik hoog: 3509 kWh elektriciteit

Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl

TNO innovation
for life