



Berekening van een duurzame warmteprijs voor Vlaamse woningen

Ben De Pauw

Promotor: Prof. dr. ir. Ivan Verhaert

Masterproef voorgelegd met het oog op het
behalen van de graad van Master in de
Milieuwetenschap

Master in de Milieuwetenschap
Academiejaar 2021-2022

Disclaimer

The author allows to consult and copy parts of this work for personal use. Further reproduction or transmission in any form or by any means, without the prior permission of the author is strictly forbidden.

Voorwoord

De klimaatproblematiek oplossen is geen individuele opdracht, maar vergt een collectieve samenwerking. Desgelijks is deze thesis het resultaat van verschillende medewerkingen waarvoor enkele dankwoorden vereist zijn. Eerst en vooral wil ik het Instituut voor Milieu en Duurzame Ontwikkeling bedanken voor de opportuniteiten. Daarnaast wil ik mijn familie bedanken voor de bijstand en advies. Ten slotte een bedanking aan mijn promotor Ivan Verhaert voor de ondersteuning en begeleiding doorheen mijn thesis.

Ben De Pauw

Antwerpen, juni 2022

Samenvatting

Kan de opwarming van de aarde tegengegaan worden zonder kou te lijden? Om de wereldwijde temperatuurstijging onder 2°C te houden, dienen de broeikasgasemissies drastisch gereduceerd te worden. In 2019 telde de energieconsumptie van huishoudens in België mee voor 20% van het totaal energiegebruik. Van dit aandeel werd 73% besteed aan ruimteverwarming waarvan 85% werd opgewekt door fossiele brandstoffen. Het energiegebruik voor verwarming moet verduurzamen. Deze transitie dient hoe dan ook doorgevoerd te worden zonder warmte onbetaalbaar te maken of mensen in de kou te zetten. Hierdoor wordt vanuit een duurzaamheidsstandpunt de vraag gesteld wat dan juist de kostprijs voor warmte moet zijn. Deze thesis probeert een inzicht te bieden in dit complexe warmtevraagstuk.

Eerst werd een warmtemodel ontwikkeld die op basis van de woonoppervlakte en de isolatiegraad van een woning een theoretische warmtevraag voorspelt. Vervolgens kon op basis van het voorspelde energiegebruik een totale kostprijs berekend worden voor verwarmen met aardgas, stookolie, elektriciteit, een warmtepomp en een warmtenet. De totale kostprijs bestaat uit een aanschafkost, een verbruikskost en een uitstootkost. Ten slotte werd een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd waarin de warmtepreizen geanalyseerd werden. De energieprijzen, btw-tarieven en uitstootprijzen werden dieper onderzocht. Finaal werden de verschillende warmtepreizen en invloedsfactoren in kaart gebracht.

Deze thesis biedt een toonaangevend inzicht in het complexe vraagstuk rond duurzame warmtepreizen. Een eerste poging werd gedaan om vanuit een duurzaamheidsstandpunt de prijs voor warmte te berekenen. De impact van verschillende factoren die de prijs beïnvloeden, werden op een rij gezet. Het totaalbeeld biedt een basis waarop verder kan gebouwd worden richting de bepaling van de kostprijs voor warmte.

Abstract

Keywords: Sustainability, Residential, Heating, Cost, Price, Energy.

Can global warming be combatted without people suffering from the cold? To keep the global temperature rise below 2°C, greenhouse gas emissions must be drastically reduced. In 2019, the energy consumption of households in Belgium accounted for 20% of the total amount. Of this share, 73% was spent on space heating, 85% of which generated by fossil fuels. Energy usage for heating must be made more sustainable. This transition must be accomplished without making heat unaffordable or having people suffer from the cold. From a sustainability point of view, this raises the question of what the cost price of heat should be. This thesis tries to offer an insight into this complex heat issue.

First, a thermodynamical model was developed that predicts a theoretical heat demand based on the living area and insulation level of a house. Then, based on the predicted energy consumption, a total cost could be calculated for heating with natural gas, heating oil, electricity, a heat pump and a heat network. The total cost consists of a purchase cost, a consumption cost and an emission cost. Finally, a sensitivity analysis was carried out in which the heat prices were analysed. The energy prices, VAT rates and emission prices were examined in more detail. Lastly, the different heat prices and influencing factors were identified.

This thesis offers an insight into the complex subject of sustainable heat pricing. A first attempt was made to calculate heat prices from a sustainability point of view. The impact of different factors influencing the price were listed and displayed. The end result offers a basis on which to build towards determining the cost price for residential heating.

Inhoud

Voorwoord	ii
Samenvatting.....	iii
Abstract	iv
Lijst van figuren.....	viii
Lijst van tabellen	x
Symbolenlijst.....	xi
Lijst met afkortingen	xii
1 Introductie	1
1.1 <i>Inleiding</i>	1
1.2 <i>Probleemstelling</i>	2
1.3 <i>Structuur</i>	2
2 Literatuurstudie	3
2.1 <i>Inleiding</i>	3
2.2 <i>Energiemarkt</i>	3
2.3 <i>Verwarmingsmethoden</i>	7
2.3.1 <i>Condensatieketel op aardgas</i>	7
2.3.2 <i>Condensatieketel op stookolie</i>	8
2.3.3 <i>Elektrisch verwarmen</i>	8
2.3.4 <i>Warmtepomp</i>	9
2.3.5 <i>Warmtenet</i>	10
2.3.6 <i>Overzicht</i>	11
2.4 <i>Gebouwverwarming</i>	12
2.5 <i>Uitstoten verwarmingsmethoden</i>	13
2.6 <i>Sociale verhoudingen</i>	14
3 Methoden	15
3.1 <i>Model energiegebruik gebouw</i>	15
3.1.1 <i>Algemeen model</i>	16
3.1.2 <i>Integratie woonoppervlakte in energiebehoefte</i>	16
3.1.3 <i>Integratie isolatiegraad in energiebehoefte</i>	17
3.1.4 <i>Finaal model warmtevraag woning</i>	18
3.1.5 <i>Betrekking opwarmvermogen</i>	18
3.1.6 <i>Bepaling accuraatheid model</i>	19

3.2	<i>Kostprijs warmte</i>	20
3.2.1	Aanschafkost	20
3.2.2	Verbruikskost	21
3.2.3	Uitstootkost	22
4	Resultaten	23
4.1	<i>Model energiegebruik gebouw</i>	23
4.1.1	Accuraatheid model	23
4.1.2	Algemeen model	23
4.1.3	Toepassing model op verwarmingssystemen.....	24
4.2	<i>Kostprijs warmte</i>	25
4.2.1	Aanschafkost	25
4.2.2	Verbruikskost	25
4.2.3	Uitstootkost	26
4.2.4	Totale kost	27
4.3	<i>Sensitiviteitsanalyse</i>	29
4.3.1	Warmtemodel.....	29
4.3.2	Verbruikskost	30
4.3.3	Uitstootkost	32
5	Discussie	36
5.1	<i>Beoordeling warmtemodel</i>	36
5.1.1	Validiteit en betrouwbaarheid warmtemodel	36
5.1.2	Parameterevaluatie	36
5.1.3	Bewonersafhankelijke factoren	37
5.2	<i>Beoordeling kostprijs warmte</i>	37
5.2.1	Aanschafkost	37
5.2.2	Verbruikskost	38
5.2.3	Uitstootkost	38
5.3	<i>Duurzame warmte</i>	39
5.3.1	Algemeen.....	39
5.3.2	Invloed isolatie	40
5.3.3	Verbruikskost	41
5.3.4	Uitstootkost	41
6	Conclusie	43
7	Aanbevelingen	45

Referenties.....	46
Bijlagen	54
Bijlage A: Supplementaire waarden van de warmteberekeningen	A.1
Bijlage B: Supplementaire figuren van de warmteberekeningen.....	B.1

Lijst van figuren

Figuur 2.1: Verdeling primaire energieconsumptie België in 2019.	3
Figuur 2.2: Verdeling finale energieconsumptie België in 2019.....	4
Figuur 2.3: Sectorale verdeling van finale energieconsumptie België in 2019.....	4
Figuur 2.4: Energieconsumptie in huishoudens per type eindgebruik in België 2019.....	5
Figuur 2.5: Evolutie van de aardgas, stookolie en elektriciteitsprijs in België van januari 2017 t.e.m. mei 2022 uitgedrukt in €/kWh. De elektriciteitsprijs werd berekend voor een woning met een verbruik van 1.600 kWh dag en 1.900 kWh nacht, de gasprijs voor 23.260 kWh en de stookolie voor >2000 L	5
Figuur 2.6: Theoretische Coëfficiënt of Performance (COP) van een warmtepomp bij drie verschillende warmtebrontemperaturen (T_o) voor een afgiftetemperatuur van 30 t.e.m. 80°C.	9
Figuur 4.1: 3D-plot en heatmap van de warmtebelasting in kWh berekend met het warmtemodel voor een woonoppervlakte van 50 t.e.m. 400 m ² en een isolatiegraad van 0 t.e.m. 100%.	23
Figuur 4.2: 3D-plots van de warmtebelasting in kWh bij een laag temperatuursregime van 50/30 voor een condensatieketel, een elektrische verwarming, een warmtepomp en een warmtenet. De warmtebelasting wordt weergegeven voor een woonoppervlakte van 50 t.e.m. 400 m ² en de isolatiegraad van 0 t.e.m. 100%.	24
Figuur 4.3: 3D-plots van de warmtebelasting in kWh bij een hoog temperatuursregime van 80/60 voor een condensatieketel, een elektrische verwarming, een warmtepomp en een warmtenet. De warmtebelasting wordt weergegeven voor een woonoppervlakte van 50 t.e.m. 400 m ² en de isolatiegraad van 0 t.e.m. 100%.	24
Figuur 4.4: Verhoudingen van de totale kost bij een woning met 100% isolatiegraad (I) en 50 m ² woonoppervlakte (A) voor de vijf verwarmingstypen bij een laag en hoog temperatuursregime.	28
Figuur 4.5: Verhoudingen van de totale kost bij een woning met 0% isolatiegraad (I) en 400 m ² woonoppervlakte (A) voor de vijf verwarmingstypen bij een laag en hoog temperatuursregime	28
Figuur 4.6: 3D-plot van de warmtebelasting in kWh berekend met het warmtemodel voor een woonoppervlakte van 50 t.e.m. 400 m ² en een isolatiegraad van 0 t.e.m. 100% voor de verlaging, referentie en verhoging zoals beschreven in Tabel 4.7.	29
Figuur 4.7: Invloed van de fluctuerende energieprijzen. De totale kostprijs wordt weergegeven voor de vijf energiebronnen bij een isolatiegraad (I) van 0 of 100%, een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m ² en een laag of hoog temperatuursregime doorheen de periode van september 2021 t.e.m. april 2022.....	30
Figuur 4.8: Invloed van btw op de totale kostprijs. De totale kostprijs wordt weergegeven voor de vijf energiebronnen bij een isolatiegraad (I) van 100% en een woonoppervlakte (A) van 50 m ² bij een laag en hoog temperatuursregime voor een btw-tarief van 0, 6 en 21%.	31

Figuur 4.9: Invloed van btw op de totale kostprijs. De totale kostprijs wordt weergegeven voor de vijf energiebronnen bij een isolatiegraad (I) van 0% en een woonoppervlakte (A) van 400 m ² bij een laag en hoog temperatuursregime voor een btw-tarief van 0, 6 en 21%	31
Figuur 4.10: Invloed van de uitstootprijs op de totale kostprijs. De totale kostprijs wordt weergegeven voor de vijf energiebronnen bij een isolatiegraad (I) van 100% en een woonoppervlakte (A) van 50 m ² bij een laag en hoog temperatuursregime voor uitstootkost van € 0/kg CO ₂ eq, € 0,065/kg CO ₂ eq (referentie) en € 0,200/kg CO ₂ eq.	32
Figuur 4.11: Invloed van de uitstootprijs op de totale kostprijs. De totale kostprijs wordt weergegeven voor de vijf energiebronnen bij een isolatiegraad (I) van 0% en een woonoppervlakte (A) van 400 m ² bij een laag en hoog temperatuursregime voor uitstootkost van € 0/kg CO ₂ eq, € 0,065/kg CO ₂ eq (referentie) en € 0,200/kg CO ₂ eq.	32
Figuur 4.12: Minimale CO ₂ eq-prijs die nodig is om de duurzame verwarmingsmethode financieel voordeliger te maken dan de verwarmingsmethode met fossiele brandstof voor een woonbare oppervlakte (A_{woon}) van 50 tot 400 m ² en voor een laag of hoog temperatuursregime (TR) bij een isolatiegraad (I) van 0, 50 of 100%. De vergelijking wordt gemaakt voor aardgas met een warmtepomp (A) en een warmtenet (B) en voor stookolie met een warmtepomp (C) en een warmtenet (D). De emissiefactor van grijze stroom en het warmtetarief werden gebruikt.	33
Figuur 4.13: Minimale CO ₂ eq-prijs die nodig is om de duurzame verwarmingsmethode financieel voordeliger te maken dan de verwarmingsmethode met fossiele brandstof voor een woonbare oppervlakte (A_{woon}) van 50 tot 400 m ² en voor een laag of hoog temperatuursregime (TR) bij een isolatiegraad (I) van 0, 50 of 100%. De vergelijking wordt gemaakt voor aardgas met een warmtepomp (A) en een warmtenet (B) en voor stookolie met een warmtepomp (C) en een warmtenet (D). De emissiefactor van groene stroom voor de warmtepomp en het tarief van de fossiele brandstof voor het warmtenet werden gebruikt.	34
Figuur 4.14: Verhoudingen van de drie kosten bij een woning met 100% isolatiegraad (I) en 50 m ² woonoppervlakte (A) voor acht verwarmingstypen bij laag en hoog temperatuursregime. Voor elektrisch verwarmen en een warmtepomp wordt een het verschil tussen grijze en groene stroom getoond. Voor een warmtenet wordt het verschil voor restwarmte met en zonder bijstook getoond.	35
Figuur 4.15: Verhoudingen van de drie kosten bij een woning met 0% isolatiegraad (I) en 400 m ² woonoppervlakte (A) voor acht verwarmingstypen bij laag en hoog temperatuursregime. Voor elektrisch verwarmen en een warmtepomp wordt een het verschil tussen grijze en groene stroom getoond. Voor een warmtenet wordt het verschil voor restwarmte met en zonder bijstook getoond.	35

Lijst van tabellen

Tabel 2.1: Overzicht verdeling kosten energiebronnen in 2021	6
Tabel 2.2: Overzicht van de voor- en nadelen van de 4 besproken verwarmingssystemen..	11
Tabel 2.3: Overzicht CO ₂ eq-waarden voor enkele energiebronnen.....	13
Tabel 3.1: Waarden van de warmtedoorgangscoefficienten (U , W/m ² .K) van de buitenmuren (bm), ramen (r), vloer (v) en dak (d) ten opzichte van de isolatiegraad (I , %)	17
Tabel 3.2: Waarden van de opwarmfactoren ten opzichte van de isolatiegraad (I , %)	18
Tabel 3.3: EPB-referentiewaarden voor de bepaling van de accuraatheid van het warmtemodel.....	19
Tabel 3.4: Formules voor de berekening van de aanschafprijs van de verwarmingssystemen met hun gemiddelde levensduur.....	20
Tabel 3.5: Formules voor de eenheidsprijzen van de energiebronnen (ε , €/kWh) en de prijs (€/kWh) bij 14000 kWh (gemiddeld gasverbruik gezin).....	21
Tabel 3.6: Rendementen van de verwarmingssystemen bij een temperatuurregime van 80/60 en 50/30	21
Tabel 3.7: Uitstoten van de energiebronnen uitgedrukt in CO ₂ eq/kWh.....	22
Tabel 4.1: Jaarlijkse aanschafkosten van de vier verwarmingssystemen bij een minimale of maximale isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m ²	25
Tabel 4.2: Jaarlijkse verbruikskosten bij een laag temperatuursregime van vijf energiebronnen bij een min. of max. isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m ²	25
Tabel 4.3: Jaarlijkse verbruikskosten bij een hoog temperatuursregime van vijf energiebronnen bij een min. of max. isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m ²	26
Tabel 4.4: Jaarlijkse uitstootkosten bij laag en hoog temperatuursregime van 5 energiebronnen bij een min. of max. isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m ² ..	26
Tabel 4.5: Jaarlijkse totale kost bij een laag en hoog temperatuursregime van 5 energiebronnen bij een min. of max. isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m ² ..	27
Tabel 4.6: Kostprijs per kWh een bij laag en hoog temperatuursregime van vijf energiebronnen bij een min. of max. isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m ²	27
Tabel 4.7: Overzicht van de kleinste en grootste percentuele verandering van de energievraag bij een verlaging of verhoging van een van de parameters van het warmtemodel. De veranderingen werden bekeken binnen een woonoppervlakte van 50 t.e.m. 400 m ² en een isolatiegraad van 0 t.e.m. 100%	29
Tabel 4.8: Overzicht van de spreiding van de energieprijzen doorheen de periode van september 2021 t.e.m. april 2022	30
Tabel 4.9: Overzicht van de minimale CO ₂ eq-prijzen [€/kg CO ₂ eq] die nodig zijn om de duurzame verwarmingsmethode financieel voordeliger te maken dan de verwarmingsmethode met fossiele brandstof (FB) bij een laag en hoog temperatuursregime.	33

Symbolenlijst

$c_{p,lucht}$	Specifieke warmtecapaciteit lucht	[J/kg.K]
b	Breedte	[m]
f_{RH}	Opwarmfactor	[W/m ²]
h	Hoogte	[m]
l	Lengte	[m]
v_{lucht}	Ventilatievoud	[1/h]
x	Aantal verdiepingen	[-]
A	Oppervlakte	[m ²]
AK	Aanschafkost	[€/jaar]
GU	Graaduren	[h.K]
I	Isolatiegraad	[%]
L	Totale warmtedoorgangscoefficiënt	[W/K]
LBV	Lengte-breedteverhouding	[-]
M	Aantal zones waar warmteverlies plaatsvindt	[-]
Q	Warmtebelasting	[J]
TK	Totale kost	[€/jaar]
U	Algemene warmtedoorgangscoefficiënt	[W/m ² .K]
UK	Uitstootkost	[€/jaar]
V	Volume	[m ³]
VK	Verbruikskost	[€/jaar]
VU	Vollasturen	[h]
ε	Eenheidsprijs van de energiebron	[€/kWh]
η	Rendement verwarmingssysteem	[%]
ρ_{lucht}	Massadichtheid van lucht	[kg/m ³]
φ_{HL}	Nodig verwarmingsvermogen	[W]
φ_{RH}	Opwarmvermogen	[W]
φ_T	Warmteverliezen door transmissie	[W]
φ_V	Warmteverliezen door ventilatie	[W]
ω_r	Beglazingsoppervlaktepercentage	[%]

Lijst met afkortingen

Subscripts

bm	Buitenmuur
d	Dak
r	Raam
v	Vloer

Woorden

AK	Aanschafkost
COP	Coefficient of Performance
CREG	Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas
CV	Centrale verwarming
FB	Fossiele brandstof
FEPEG	Federatie van de Belgische Elektriciteits- en Gasbedrijven
EU	Europese Unie
NMDA	Niet Meer Dan Anders
OECD	Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance
TK	Totale kost
UK	Uitstootkost
VEKA	Vlaams Energie- en Klimaatagentschap
VEKP	Vlaams Energie- en Klimaatplan
VK	Verbruikskost
VMM	Vlaamse Milieumaatschappij
VREG	Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt
WKK	Warmtekrachtkoppeling

1 INTRODUCTIE

1.1 Inleiding

Kan de opwarming van de aarde tegengegaan worden zonder kou te lijden? Om de wereldwijde temperatuurstijging ruim onder de 2°C te houden zijn verschillende doelstellingen en maatregelen nodig. De Europese Unie (EU) heeft als doel om klimaatneutraal te zijn tegen 2050 en een economie te vormen met een netto nul-uitstoot (Europese Commissie, 2021). Deze doelstelling wordt vertaald in de volgende targets: een reductie van de broeikasgasemissies, een verhoging van het aandeel hernieuwbare energie, een beter en flexibel energiesysteem, en een verbetering van de energie-efficiëntie (Europese Commissie, 2021).

Verordening (EU) 2018/1999 vereist dat elke lidstaat een langetermijnstrategie indient bij de Europese Commissie (VEKA, 2021). Dit resulteerde tot de Vlaamse klimaatstrategie 2050 en het Vlaams Energie- en Klimaatplan (VEKP) 2021-2030. Een van de belangrijkste maatregelen uit het VEKP is de verduurzaming van het gebouwenpark. Wanneer naar de waarden van het energiegebruik van deze sector wordt gekeken, spreekt deze maatregel voor zich.

In 2019 bedroeg de finale energieconsumptie van huishoudens in de EU 26% van het totaal, de op een na grootste consumerende sector na transport (Eurostat, 2022) (Tsemekidi Tzeiranaki, et al., 2019). Van dit energiegebruik ging 64% naar het verwarmen van huizen (Eurostat, 2022). In hetzelfde jaar telde de energieconsumptie van huishoudens in België mee voor 20% van het totaal waarvan 73% ging naar ruimteverwarming (FOD Economie, 2021). De energie hiervoor was voornamelijk afkomstig van aardgas en aardolieproducten met een respectievelijke bijdrage van 48% en 37%.

Vanwege het grote aandeel energieconsumptie voor ruimteverwarming die grotendeels gegenereerd wordt uit fossiele brandstoffen, is het geen verrassing dat een van de belangrijkste maatregelen uit het VEKP van toepassing is op gebouwen. De verwarmingsinstallaties moeten verduurzamen en er moet van fossiele brandstoffen afgestapt worden (Het Vlaams Energie- en Klimaatagentschap, 2021).

1.2 Probleemstelling

Er moet afgestapt worden van de fossiele brandstoffen voor de energievoorziening van gebouwen. Desondanks dat aardgas en stookolie met een grote marge de meest gebruikte verwarmingsmethoden in Vlaanderen zijn (Departement Omgeving, 2020), bestaan voldoende alternatieven. De meest courante keuzemogelijkheden zijn elektrisch verwarmen, een warmtepomp, een zonneboiler, houtpellets, micro-WKK en/of een warmtenet.

Elk van de voorgenomen keuzemogelijkheden inclusief de fossiele brandstoffen, heeft hetzelfde doel: het voorzien van warmte voor huishoudens. Ondanks hetzelfde doel, zijn er grote verschillen tussen de verwarmingsopties, met name in kostprijs en uitstoot. De investeringskosten en eveneens de operationele kosten kennen een groot verschil tussen elkaar. Een voorbeeld hiervan is het verschil tussen gas- en elektriciteitsprijs dat nergens groter is dan in België (Delbeke, 2019). Ook de uitstoot van de verwarmingsmethoden kent grote verschillen die niet alleen afhankelijk zijn van de keuze van methode, maar ook nog andere parameters zoals woninggrootte en -isolatie. De rode draad in het verwarmingsverhaal is bijgevolg vaak onduidelijkheid.

De kostprijs van warmte, zowel financieel als voor het milieu, zijn de dag van vandaag niet transparant. Desgelijks treffen stijgende energieprijzen vaak de zwaksten die in slecht geïsoleerde woningen verblijven. Vanuit een duurzaamheidsstandpunt en een sociaal standpunt kan de vraag gesteld worden of de manier waarop warmte gemaakt wordt, moet meetellen in de prijs voor de bewoner of klant? Met andere woorden wat is een correcte prijs voor warmte?

1.3 Structuur

De thesis begint met een literatuurstudie in hoofdstuk 2 waar dieper wordt ingegaan op de energiemarkt. Vervolgens worden de verschillende verwarmingsmethoden besproken die aan bod zullen komen samen met de voordelen en nadelen. Daarna wordt gebouwenverwarming verder besproken om finaal de uitstoten die gekoppeld zijn aan de verwarmingsmethoden en gebouwenverwarming toe te lichten.

Hoofdstuk 3 beschrijft de volledige methodiek voor het opstellen van het model voor de bepaling van de warmtebehoefte op basis van de woonoppervlakte en isolatiegraad. Daaropvolgend wordt uiteengezet hoe de totale kostprijs voor warmte berekend aan de hand van de aanschafkost, de verbruikskost en de uitstootkost.

De resultaten van het onderzoek worden weergegeven in hoofdstuk 4 waar de verschillende kosten voor de vijf gekozen verwarmingsmethoden worden getoond. Daarnaast wordt dieper ingegaan op de verbruikskost en de uitstootkost.

Hoofdstuk 5 omvat de discussie waarin het warmtemodel en de kostprijsberekening worden beoordeeld. Vervolgens wordt de warmteprijs besproken, zowel algemeen als voor elk van de drie onderdelen. Hoofdstuk 6 en hoofdstuk 7 sluiten de thesis af met respectievelijk de conclusie en enkele aanbevelingen.

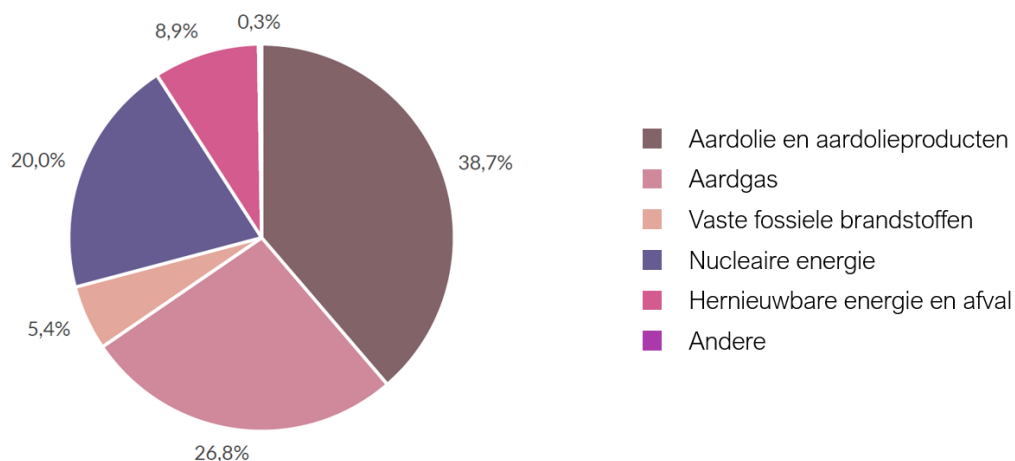
2 LITERATUURSTUDIE

2.1 Inleiding

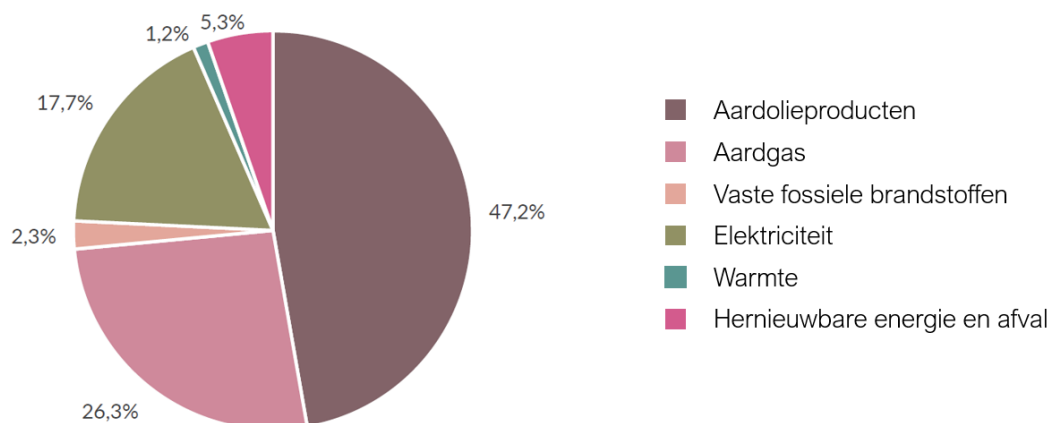
Het doel van deze thesis is het onderzoeken van een correcte prijs voor warmte voor verschillende verwarmingsmethoden op basis van de financiële en milieukostprijs. Het onderzoek wordt uitgewerkt aan de hand van een warmtemodel en een financiële berekening die de totale kost uitrekenet. Voor de opstelling en het gebruik van dit model is kennis over het energieverbruik en de verwarmingsmethoden nodig. Dit literatuuronderzoek gaat dieper in op de energiemarkt, gebouwenverwarming, de verwarmingsmethoden en hun uitstoten. Aangezien de thesis bij het antwoorden op het warmtevraagstuk het sociale luik niet wil wegcijferen, wordt finaal ook nog kort ingegaan op sociale verhoudingen.

2.2 Energiemarkt

In België blijven de populairste energiebronnen de fossiele brandstoffen. Deze maakten in 2019 maar liefst deel uit van 71% van de primaire energieconsumptie. Nucleaire en hernieuwbare energie hadden in datzelfde jaar respectievelijk een bijdrage van 20% en 9% (FOD Economie, 2021). De finale energieconsumptie verschilt niet veel met een aandeel van 76% voor fossiele brandstoffen en een aandeel van 18% voor elektriciteit (FOD Economie, 2021). Een overzicht wordt weergegeven in Figuur 2.1 en Figuur 2.2.

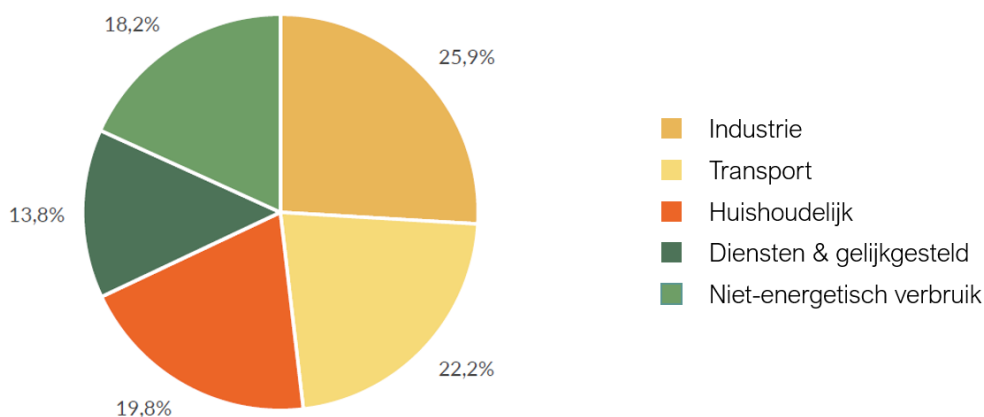


Figuur 2.1: Verdeling primaire energieconsumptie België in 2019 (FOD Economie, 2021).

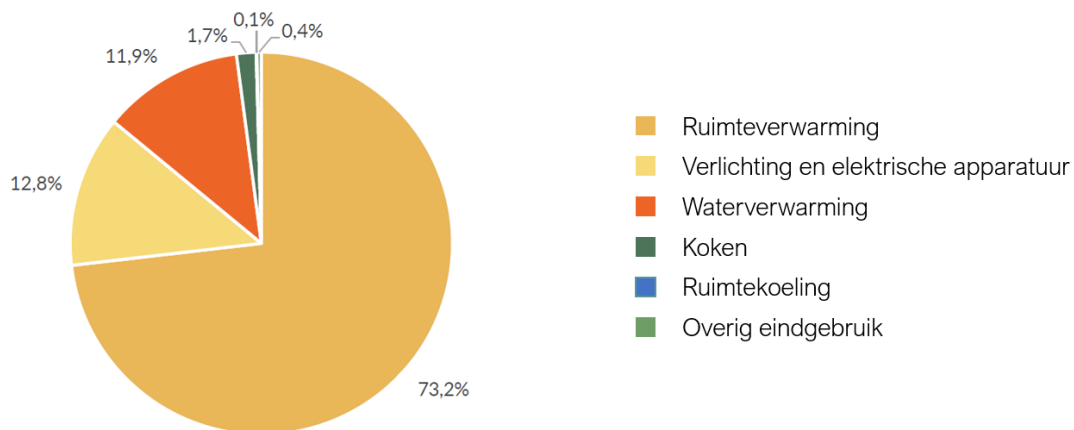


Figuur 2.2: Verdeling finale energieconsumptie België in 2019 (FOD Economie, 2021).

De industrie in België bleef in 2019 de sector met de hoogste energieconsumptie met een contributie van 26%. De op twee na meest consumerende sector, achter de transportsector met een aandeel van 22%, was de huishoudelijke sector die maar liefst 20% van de energieconsumptie betrof. Van deze 20% ging bijna driekwart naar ruimteverwarming waarvoor de voornaamste energiebronnen aardgas (48%) en aardolie (37%) waren. Een overzicht wordt weergegeven in Figuur 2.3 en Figuur 2.4. Slechts een klein deel van de mensen in België gebruikt elektriciteit als energiebron voor ruimteverwarming. Een mogelijke verklaring voor dit substantieel verschil kan gevonden worden in de vergelijking tussen de kostprijs van de verschillende energiebronnen (Karatasou, Laskari, & Santamouris, 2018).



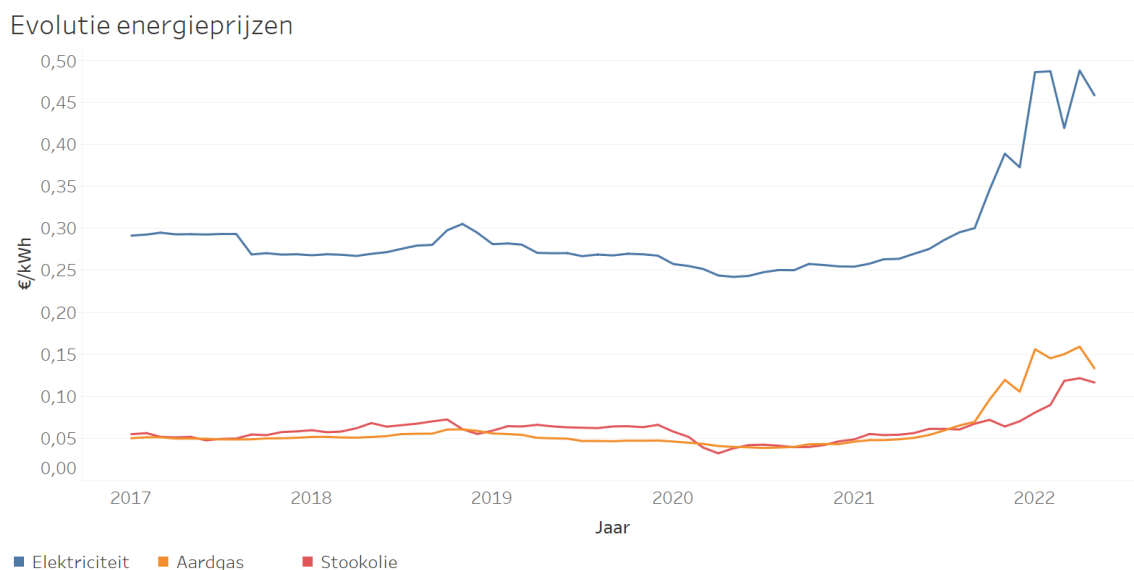
Figuur 2.3: Sectorale verdeling van finale energieconsumptie België in 2019 (FOD Economie, 2021).



Figuur 2.4: Energieconsumptie in huishoudens per type eindgebruik in België 2019 (FOD Economie, 2021).

Zoals reeds vermeld zijn er verschillende energiebronnen voor ruimteverwarming. In deze literatuurstudie wordt enkel gekeken naar aardgas, stookolie, elektriciteit en warmte voor warmtenetten. Hout en pellets worden hier buiten beschouwing gelaten aangezien slechts 4% van de Vlaamse gezinnen in 2019 hiermee verwarmden (Statistiek Vlaanderen, 2020) en de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) het gebruik hiervan afraadt (De Cooman & Pauwels, 2021; Vlaamse Milieumaatschappij, 2022).

Figuur 2.5 geeft een grafisch overzicht van de evolutie van de prijzen in €/kWh. Wanneer de kostprijzen van de energiebronnen met elkaar vergeleken worden kan gezien worden dat de prijs van aardgas en stookolie binnen dezelfde range blijft, terwijl de elektriciteitsprijs enkele klassen hoger ligt. De energieprijzen voor warmtenetten wordt hier niet op weergegeven aangezien de warmteprijzen hiervoor vaak gebaseerd worden op het 'Niet Meer Dan Anders' (NMDA)-principe (VREG, 2021). In dit geval betekent dit dat de energieprijzen hiervan niet hoger zal zijn dan de kost van aardgas, meer hierover in deel 2.3 Verwarmingsmethoden.



Figuur 2.5: Evolutie van de aardgas, stookolie en elektriciteitsprijs in België van januari 2017 t.e.m. mei 2022 uitgedrukt in €/kWh. De elektriciteitsprijs werd berekend voor een woning met een verbruik van 1.600 kWh dag en 1.900 kWh nacht, de gasprijs voor 23.260 kWh en de stookolie voor >2000 L (Energia, 2022; VREG, 2022).

Het verschil in energieprijzen is niet enkel te verwijten aan het verschil in energiekosten, maar aan het verschil in samenstelling tot de finale kostprijs. Naast de energiekosten worden er ook nog distributiekosten, transmissiekosten, heffingen en/of btw aangerekend aan de klant. Tabel 2.1 geeft een overzicht van de verdelingen van finale kostprijzen van de energiebronnen.

Tabel 2.1: Overzicht verdeling kosten energiebronnen in 2021 (Mazoutonline, 2016; VREG, 2022).

	Elektriciteit	Aardgas	Stookolie	Warmte
Energiekosten	53%	71%	58%	NVT
Heffingen	2%	2%	7%	NVT
Netkosten of bijdragen	28%	10%	18%	NVT
Btw	17%	17%	17%	17%

Een blindelinge vergelijking tussen de energieprijzen mag dus niet zomaar gemaakt worden. Bij een vergelijking van de kostprijs voor de klant tellen niet enkel de energiekosten mee, maar ook nog de aanvullende kosten die onderling verschillen. De energiekosten en eveneens de bijkomende kosten fluctueren zelf ook nog doorheen de tijd waardoor Tabel 2.1 slechts een momentopname is die louter een situatiebeeld schept. Een voorbeeld hiervan is de invoering van de nieuwe nettarieven waardoor de netkosten anders zullen doorwegen op de elektriciteitsfactuur (VREG, 2022). Een ander voorbeeld is de aanpassing van de btw-tarieven door de federale regering vanwege de stijgende energieprijzen. Het btw-tarief werd verlaagd van 21% naar 6% voor elektriciteit op 1 maart 2022 t.e.m. 30 september 2022. Voor aardgas en warmte van warmtenetten werd dezelfde verlaging ingevoerd op 1 april 2022 t.e.m. 30 september 2022 (FEBEG, 2022). Deze voorbeelden illustreren de complexiteit die de energiemarkt is.

De finale kostprijs is bovendien ook afhankelijk van het energiegebruik. Doorgaans betalen kleine gebruikers een hoger tarief dan grote gebruikers (Baert, Segers, & Belga, 2022). Het gemiddeld jaarlijks aardgasverbruik voor verwarming bedraagt 20.900 kWh voor een doorsnee gezin en 30.200 kWh voor een grote verbruiker (VREG, 2022). Voor stookolie is het jaarlijks verbruik voor een gemiddeld gezin gelijkaardig met een verbruik tussen de 20.000 en 30.000 kWh (Buldit BV, 2022). Het gemiddeld elektriciteitsverbruik voor een doorsnee gezin bedraagt 3.500 kWh en voor een relatief grote verbruiker 7.500 kWh. Dit getal is echter geen goede representatie voor het gemiddeld elektriciteitsverbruik van gezinnen die elektrisch verwarmen. Het gemiddeld verbruik hiervoor zal eerder boven de 20.000 kWh liggen (VREG, 2022).

Een eenduidige prijs op energie plaatsen is dus niet evident. Er kan geconcludeerd worden dat de prijzen zeer variabel zijn waarmee in deze thesis getracht wordt rekening te houden.

2.3 Verwarmingsmethoden

In deze thesis worden vijf verwarmingsmethoden behandeld: condensatieketels op gas en stookolie, elektrische verwarming, warmtepompen en warmtenetten. Pellets en biomassa worden buiten beschouwing gelaten, zoals reeds vermeld in deel 2.2 Energiemarkt, op basis van de emissies van fijn stof (Cespi, et al., 2014). Hybride verwarmingsssystemen bevatten te veel opties en variabelen om hier te bespreken waardoor ook deze buiten het bestek van deze thesis vallen. Zonneboilers worden niet overwogen vermits deze niet de volledige warmtevraag van een woning kunnen dekken (Jahangiri, Shamsabadi, & Saghaei, 2018). Warmtepompen op gas worden buiten beschouwing gelaten door het lage voorkomen bij residentiële verwarming t.o.v. elektrische warmtepompen. Ten slotte wordt ook de warmtekrachtkoppelingssketel niet verder besproken doordat deze optie momenteel vooral rendabel is voor woningen met een hoge energievraag (Pereira, Ribeiro, Mendes, Vaz, & André, 2018) en geen representatief aandeel heeft in België (FOD Economie, 2021). Dit deel bespreekt enkele relevante voordelen en nadelen van de verwarmingsmethoden. De uitstoten worden uitgebreider behandeld in deel 2.5 Uitstoten verwarmingsmethoden.

2.3.1 Condensatieketel op aardgas

Aardgas is al jaren de meest gebruikte energiebron voor ruimteverwarming van woningen in België (FOD Economie, 2021). Condensatieketels zijn de meest hedendaagse ketels voor de verbranding van aardgas en de zuinigste onder de gasketels (Johnson & Beausoleil-Morrison, 2016). Condensatieketels verbranden aardgas en geven warmte af zoals een conventionele ketel, maar dankzij een warmtewisselaar wordt de latente warmte van de eigen rookgassen gerecupereerd (Weber, Gebhardt, & Fahl, 2002). Bij een klassieke verwarmingsketel gaat deze warmte verloren terwijl deze hier gebruikt wordt om het verwarmingswater voor te verwarmen. Door de recuperatie van condensatiewarmte kunnen rendementen tot 98% behaald worden met betrekking tot de hogere verwarmingswaarde (Hinrichs, Felsmann, Schweitzer-De Bortoli, Tomczak, & Pitsch, 2018).

Vanwege het hoog haalbare rendement van condensatieketels hebben ze een lager verbruik en uitstoot t.o.v. andere ketels. Daarnaast hebben ze als voordeel dat ze compact zijn en premies bieden voor de plaatsing (VEKA, 2022). Als nadeel zijn condensatieketels de duurste van de verwarmingsketels, maar het verschil wordt door het rendement snel terugverdiend (Engie, 2020). Ten slotte komt het nadelige gebruik van een fossiele brandstof gepaard met een zekere uitstoot (Hinrichs, Felsmann, Schweitzer-De Bortoli, Tomczak, & Pitsch, 2018).

Andere ketels zoals de hoogrendementsketel of de verbeterde rendementsketel worden hier terzijde gelaten. De Europese Ecodesign-verordening van 2015 heeft gezorgd voor strengere minimumvereisten in 2018 waardoor nog weinig B1-ketels zullen voldoen aan de wetgeving (Vlaamse overheid, 2022). Condensatieketels voldoen daarentegen wel aan de minimumvereisten en zijn de nieuwe standaard op het gebied van verwarmingsketels (Pezzutto, et al., 2019).

2.3.2 Condensatieketel op stookolie

Stookolie is de op een na meest gebruikte energiebron voor ruimteverwarming in België en biedt een alternatief voor aardgas wanneer geen aansluiting mogelijk is (FOD Economie, 2021). De condensatieketel op stookolie werkt volgens hetzelfde principe als die op aardgas (Bălănescu & Homutescu, 2019) (zie 2.3.1 Condensatieketel op aardgas). Hierdoor worden net zoals bij aardgas hoge rendementen behaald (Martinopoulos, Papakostas, & Papadopoulos, 2018). Een voordeel van stookolie is dat het overal gebruikt kan worden. Daarnaast is er het voordeel dat stookolie meer vrijheid biedt gezien er zelf kan gekozen worden, hoeveel en waar er besteld wordt (Jiru, et al., 2010). De nadelen van stookolie zijn de onstabiele prijzen, de nood aan een brandstoftank en, net zoals aardgas, het gepaard gaan met een zekere uitstoot door gebruik van een fossiele brandstof (Johnson E. , 2012).

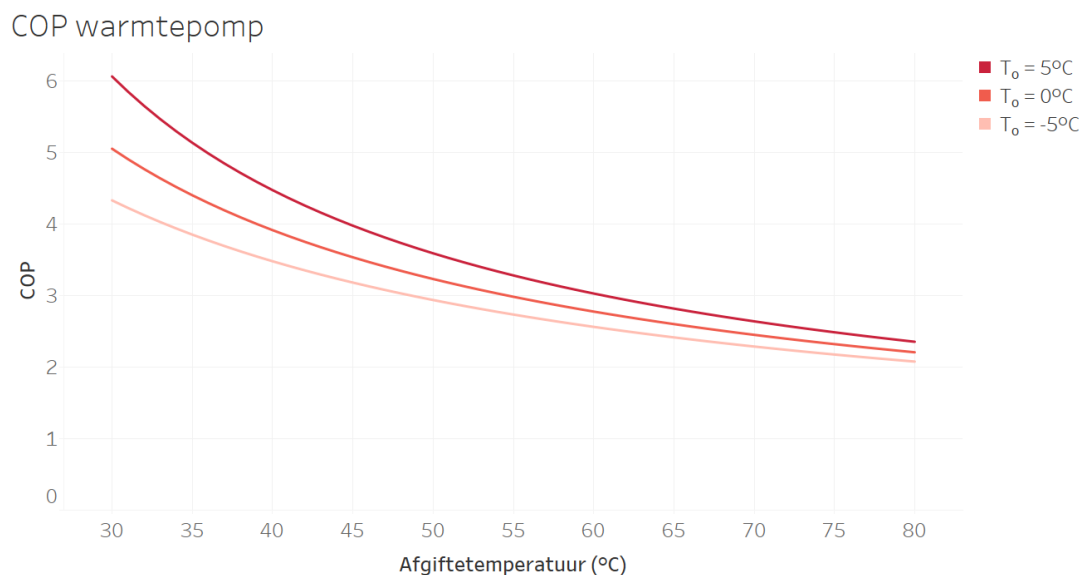
In bestaande gebouwen is het sinds 1 januari 2022 niet meer toegelaten om nog een stookolieketel te plaatsen indien een aansluiting op het aardgasnet mogelijk is. In nieuwbouwwoningen mogen sinds dezelfde datum geen stookolieketels meer geplaatst worden, zelfs indien een aansluiting op het aardgasnet niet mogelijk is (Vlaamse overheid, 2022). Desalniettemin wordt stookolie hier toch betrokken doordat dit het op een na grootste marktaandeel voor verwarmingsbronnen in België vertegenwoordigt (VEKA, 2019).

2.3.3 Elektrisch verwarmen

Elektrisch verwarmen was in 2019 de op twee na meest gebruikte verwarmingswijze in Vlaanderen, maar kende slechts een aandeel van 9%. Ondanks het relatief lage aandeel is het aantal elektrische verwarmingen met 29% gestegen sinds 2013 (VEKA, 2019). Er zijn twee mogelijkheden voor elektrisch verwarmen, namelijk direct en indirect. Bij directe elektrische verwarming wordt een element, bijvoorbeeld een radiator, direct verwarmd door elektriciteit. Indirecte elektrische verwarming verwarmt eerst een tussensysteem, bijvoorbeeld een waterboiler, om dit vervolgens rond te pompen ter verwarming van de radiatoren of vloerverwarming (Schill & Zerrahn, 2020). Elektrisch verwarmen heeft uiteraard een rendement tegen de 100% aangezien alle elektrische energie wordt omgezet in warmte (Çengel & Boles, 2014). Dit rendement houdt echter geen rekening met de manier waarop de elektriciteit werd opgewekt. Indien dit wel betrokken zou worden zou het rendement veel lager kunnen liggen. De voordelen van elektrisch verwarmen zijn de eenvoudige installatie, lage investeringskosten en geen nood tot aanschaffing van een onderhoudscontract zoals bij gas of stookolie. Het grote nadeel is het hoge elektriciteitsverbruik en bijgevolg hoge kostprijs die hierbij komt kijken (Schill & Zerrahn, 2020). Dit kan evenwel deels gereduceerd worden door accumulatieverwarming (Aminov, Yurin, & Murtazov, 2021). Aangezien de kostprijs van elektriciteit afhangt van het moment van gebruik en aansluiting of piekverbruik kan dit gereduceerd worden door het lokaal opslagen van de gegenereerde warmte. Dit laat toe om de elektriciteitsvraag en warmtebehoefte deels te ontkoppelen.

2.3.4 Warmtepomp

Verwarmen met een warmtepomp kan gezien worden als een vorm van indirect elektrisch verwarmen. Alle typen warmtepompen hebben dezelfde werking waarbij een lage temperatuur wordt omgezet in een hoge temperatuur door middel van gebruik van energie. Warmte wordt onttrokken van een (laagwaardige hernieuwbare) warmtebron zoals grondwater, de bodem of de buitenlucht. Voor elke eenheid energie, vaak elektriciteit, die aan de warmtepomp geleverd wordt, kunnen drie- tot zesmaal zoveel eenheden warmte worden onttrokken (Sayegh, et al., 2018). De verhouding van de opgeleverde warmte en het energiegebruik wordt de Coefficient of Performance (COP) genoemd. De COP van een warmtepomp is sterk afhankelijk van de werkomstandigheden, voornamelijk de gewenste temperatuur en het temperatuurverschil tussen de warmtebron en het systeem. Hoe hoger de gewenste temperatuur, hoe meer energie de warmtepomp zal nodig hebben om dit te bereiken. Idem zal de warmtepomp meer energie nodig hebben om grotere temperatuurverschillen te overbruggen (Wu, et al., 2020). Figuur 2.6 illustreert het verloop van de COP ten opzichte van de afgiftetemperatuur.



Figuur 2.6: Theoretische Coefficient of Performance (COP) van een warmtepomp bij drie verschillende warmtebrontemperaturen (T_o) voor een afgiftetemperatuur van 30 t.e.m. 80°C.

De COP van een warmtepomp kan dus veranderen bij verschillende omstandigheden. De COP van eenzelfde warmtepomp in een warm klimaat zal anders zijn in een koud klimaat. Om een vergelijking tussen warmtepompen te maken, dient de gemiddelde COP over een jaar gebruikt te worden waardoor de seizoenen worden meegewogen. Dit gemiddelde wordt de Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) genoemd (Kinab, Marchio, & Riviere, 2008).

Het grote voordeel van de warmtepomp is dat het een ecologische technologie is met een laag energiegebruik. Warmtepompen worden gezien als hernieuwbare energietechnologie door de EU. De twee grote nadelen van een warmtepomp zijn de hoge kosten en de nood aan een afgiftesysteem op lage temperatuur (Self, Reddy, & Rosen, 2013). De aankooprijds van een warmtepomp overtreft die van een aardgas- of stookolieketel met meer dan 50% (Kobus, Klaassen, & Slootweg, 2014). Hierbij komt ook nog de discrepantie in de energieprijzen waarbij elektriciteit duidelijk de duurste optie blijft. De verklaring voor de nood aan een goed geïsoleerde woning ligt in de daling van de COP bij een hogere aanvoertemperatuur. Ondanks de ecologische voordelen komt de warmtepomp dus met enkele fysieke en financiële limieten (Sayegh, et al., 2018; Self, Reddy, & Rosen, 2013).

2.3.5 Warmtenet

Een warmtenet is een systeem waarbij warmte wordt verdeeld via een netwerk van geïsoleerde leidingen voor residentiële en commerciële verwarming. De warmte wordt geleverd door een of meerdere energiebronnen zoals fossiele brandstoffen, restwarmte, geothermie of biomassa. Deze thermische energie wordt overgedragen via het leidingnetwerk aan het verwarmingssysteem van de gebouwen aangesloten op het net (Werner, 2017). Momenteel is de aanwezigheid van warmtenetten beperkt, met in 2021 een aantal van slechts 78 warmtenetten in Vlaanderen (VREG, 2022).

Warmtenetten worden beschouwd als een duurzame technologie, maar de duurzaamheid hangt voornamelijk af van drie factoren. Eerst en vooral de herkomst van de warmtebron (en eventuele hulpwarmtebronnen). Het gebruik van aardwarmte tegenover fossiele brandstoffen zal bijvoorbeeld een aanzienlijke impact hebben op de ecologische kost. Ten tweede speelt afkomst van de stroom voor alle elektrische pompen een rol in de duurzaamheid van een warmtenet. Finaal moet er ook rekening gehouden worden met de temperatuur in de leidingen daar minder energieverlies optreedt bij een lagere temperatuur (Sayegh, et al., 2017).

Net zoals de andere verwarmingswijzen hebben warmtenetten voordelen en nadelen. Het grootste voordeel is de reductie in CO₂-uitstoot tot wel 98% en de bijdrage tot de circulaire economie (Mateu-Royo, Sawalha, Mota-Babiloni, & Navarro-Esbrí, 2020). Daarnaast is een warmtenet een simpele oplossing voor nieuwbouwwoningen. Een van de nadelen werd reeds besproken waarbij de effectieve duurzaamheid sterk afhankelijk is van een aantal factoren en dus verschilt van net tot net. Een ander nadeel is de trage temperatuursverandering binnenshuis bij lage temperatuur warmtenetten (Best, 2018). Daarnaast komen er nog enkele nadelen bij het financieel kader. Warmtenetten worden vaak beheerd door één bedrijf die warmte levert waardoor keuze van leverancier vaak niet mogelijk is ter vorming van een monopolie (Stennikov & Penkovskii, 2020). Hierdoor is de prijs voor een warmtenet niet altijd even transparant. Er wordt gewerkt met een aansluitingskost, een vaste terugkerende kost en/of een variabele kost in functie van het verbruik. Voor de kostprijs wordt gewoonlijk gewerkt volgens het NMDA-principe waarbij de warmteprijs niet hoger zal zijn dan deze van een belangrijke concurrerende technologie (VREG, 2021). Dit principe is echter nog niet opgenomen in het Energiedecreet ondanks enkele adviezen (SERV, 2016).

Warmtenetten worden vaak als een duurdere optie beschouwd, maar bij de vergelijking van prijzen moet rekening gehouden worden met de totale kost. Bij een cv-gasketel worden de kosten van installatie en onderhoud apart verrekend, terwijl deze bij een warmtenet in de eindafrekening worden opgenomen. Een studie van Hansen en Gudmundsson (2018) toont aan dat in Denemarken een warmtenet in verschillende scenario's toch financieel voordeliger kan zijn dan individuele verwarming.

2.3.6 Overzicht

Tabel 2.2: Overzicht van de voor- en nadelen van de vier besproken verwarmingssystemen (Aminov, Yurin, & Murtazov, 2021; Best, 2018; Hinrichs, Felsmann, Schweitzer-De Bortoli, Tomczak, & Pitsch, 2018; Jiru, et al., 2010; Johnson E. , 2012; Johnson & Beausoleil-Morrison, 2016; Kobus, Klaassen, & Sloopweg, 2014; Martinopoulos, Papakostas, & Papadopoulos, 2018; Sayegh, et al., 2017; Schill & Zerrahn, 2020; VEKA, 2022).

	Voordelen	Nadelen
Condensatieketel	<ul style="list-style-type: none"> • Lager verbruik en uitstoot t.o.v. andere ketels • Compact • Premies • Relatief goedkope aanschafkost 	<ul style="list-style-type: none"> • Duurste type ketel • Fossiele energiebron • Uitstoot • Aanschaffing onderhoudscontract
Elektrisch verwarmen	<ul style="list-style-type: none"> • Hoog rendement • Eenvoudige installatie • Relatief goedkope aanschafkost • Geen onderhoudscontract • Kan duurzaam zijn 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoog elektriciteitsverbruik • Hoge kostprijs • Uitstoot (afhankelijk van opwekking)
Warmtepomp	<ul style="list-style-type: none"> • Hoge rendementen kunnen behaald worden • Hernieuwbare verwarming • Laag verbruik en uitstoot 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement sterk klimaatafhankelijk • Hoge kostprijs • Nood aan afgiftesysteem op lage temperatuur
Warmtenet	<ul style="list-style-type: none"> • Hernieuwbare verwarming • Lage uitstoot • Simpele optie voor nieuwbouwwoningen 	<ul style="list-style-type: none"> • Duurzaamheid factorafhankelijk • Trage opwarming • Onzekerheid prijs

2.4 Gebouwverwarming

Het grootste deel van het energiegebruik van woningen gaat naar ruimteverwarming. In 2019 bedroeg dit 73% van de totale energieconsumptie in België (FOD Economie, 2021). De toestandkoming van dit getal is afhankelijk van verschillende factoren die worden onderverdeeld in twee categorieën: de bewonersafhankelijke en de niet-bewonersafhankelijke (Santin, Itard, & Visscher, 2009). Onder bewonersafhankelijke factoren vallen het aantal, de leeftijd, de aanwezigheid, het inkomen en persoonlijke voorkeuren van de bewoners. Onder de niet-bewonersafhankelijke factoren vallen de bouwkenmerken zoals woonoppervlakte, bouwjaar, isolatie, verwarmingsmethode, maar ook de klimaatomstandigheden (Karatasou, Laskari, & Santamouris, 2018).

Studies wijzen uit dat gebruikersgedrag even belangrijk is als bouwparameters wanneer het aankomt op energiegebruik voor ruimteverwarming (do Carmo & Christensen, 2016). Grote verschillen in energiegebruik werden waargenomen bij woningen met gelijkaardige bouwparameters. Resultaten hebben aangetoond dat de variantie voor ruimteverwarming voor ongeveer 50% verklaard wordt door verschillen in bewonersafhankelijke factoren. De niet-bewonersafhankelijke factoren verklaren de andere 50% van de variantie (van den Brom, Hansen, Gram-Hanssen, Meijer, & Visscher, 2019). Andere studies tonen echter aan dat hoge energiegebruiken voor ruimteverwarming alleen gerelateerd zijn aan bouwkenmerken en de bewonersafhankelijke factoren hier geen beduidende rol spelen. (Karatasou, Laskari, & Santamouris, 2018). Het blijkt dat naarmate een gebouw beter geïsoleerd is, de bewonersafhankelijke factoren meer de consumptieprofielen beïnvloeden (de Meester, Marique, De Herde, & Reiter, 2013).

Uit onderzoek werd vastgesteld dat het onrealistisch is om een simulatiemodel te ontwikkelen dat nauwkeurig de verwarmingsvraag kan voorspellen voor individuele gevallen. Er is nood aan het monitoren van energiedata en regressieanalyse van historische data voor de ontwikkeling van een accuraat model (Majcen, Itard, & Visscher, 2015; van den Brom, Hansen, Gram-Hanssen, Meijer, & Visscher, 2019). Desalniettemin wordt vermeld dat het wel mogelijk is om consumptieprofielen op te stellen die een gemiddelde vertegenwoordigen van het energiegebruik voor ruimteverwarming (van den Brom, Hansen, Gram-Hanssen, Meijer, & Visscher, 2019).

Bewonersafhankelijke factoren zijn onvoorspelbaar en complex om op te nemen in een model voor warmteconsumptie (Majcen, Itard, & Visscher, 2015). Vermits deze thesis een verwarmingsbehoefte voor een theoretische woning tracht te bekomen onafhankelijk van het gebruikersgedrag, zal geen rekening worden gehouden met de bewonersafhankelijke factoren. Er zal enkel rekening worden gehouden met de belangrijkste niet-bewonersafhankelijke factoren zoals isolatiegraad, woonoppervlakte en buitentemperaturen. Deze methodiek loopt parallel aan de versimpelde Energieprestatie en Binnenklimaat (EPB) berekening van de Vlaamse Overheid (VEKA, 2022). De EPB-regelgeving werd ingevoerd door de EU met als doel de energiebehoefte van gebouwen te verminderen. Net zoals in deze thesis wordt een theoretische warmteconsumptie berekend met als groot verschil dat de EPB-methodiek dit voor een specifieke individuele situatie doet (Bracke, 2015).

2.5 Uitstoten verwarmingsmethoden

De uitstoot van ruimteverwarming wordt voornamelijk bepaald door de energiebron die gebruikt wordt en het verwarmingssysteem (Pylsy, Lylykangas, & Kurnitski, 2020). Elk verwarmingssysteem heeft een bepaald rendement dat de energieconsumptie bepaalt en op zijn beurt gekoppeld is aan de uitstoot ervan. Daarnaast heeft de verwarmingswijze ook een directe invloed op de uitstoot. De verbranding van fossiele brandstoffen zorgt bijvoorbeeld voor rookgassen met een uitstoot van methaan (CH₄), koolstofoxides (CO & CO₂), stikstofoxides (NO_x & N₂O), zwaveloxides (SO_x) en fijn stof (PM) (Johnson E. , 2012). Het gebruik van elektriciteit is gekoppeld aan de uitstoot van verschillende stoffen, waaronder voorgenoemde, en afhankelijk van de manier waarop de elektriciteit werd opgewekt (Rehfeldt, Worrell, Eichhammer, & Fleiter, 2020). Evenzeer is de uitstoot van warmtenetten enerzijds afhankelijk van de manier waarop de warmte werd opgewekt en anderzijds van de manier waarop deze gebruikt wordt (Neirotti, Noussan, & Simonetti, 2020).

Gezien de grote variabiliteit bij de uitstoot van de energiebronnen wordt in deze thesis gekozen om enkel verder te werken met de CO₂-equivalent (CO₂eq) waarden. Tabel 2.3 geeft enkele relevante waarden weer. De data hiervan is afkomstig van een initiatief van EnergieID en CO2logic (2021) dat als doel heeft een geactualiseerde lijst aan te bieden met eenduidige basiscijfers voor CO₂-instrumenten.

Tabel 2.3: Overzicht CO₂eq-waarden voor enkele energiebronnen (EnergieID & CO2logic, 2021).

	kg CO ₂ eq/kWh
Aardgas	0,202
Stookolie	0,330
Grijze elektriciteit	0,205
Groene stroom	0,024
Restwarmte met bijstook	0,078
Restwarmte zonder bijstook	0,032
Geothermie	0,090
Biomassa	0,093
Hout pellets	0,043

2.6 Sociale verhoudingen

Warmte is geen luxeproduct, maar een primair goed dat in de eerste levensbehoefte van de consument voorziet. Desondanks blijkt dat er steeds meer mensen in België de factuur nog nauwelijks kunnen betalen (De Wolf, 2022). Warmte moet betaalbaar blijven voor heel de bevolking waardoor het belangrijk is dat rekening wordt gehouden met alle klassen van de maatschappij.

Het minimum nettoloon in België in 2022 ligt rond de € 19.800 per jaar (Jobat, 2022). Een gascontract voor een gemiddeld gezin in januari 2022 bedroeg € 3.645, 48% meer dan in voorgaande maand (Vander Beken & Pauwels, 2022). Wanneer beide getallen vergeleken worden, bedraagt het gascontract van januari 2022 aldus 18% van het minimum nettoloon.

Door de impact van de energiefactuur op de koopkracht van mensen bestaan al verschillende regelingen om mensen te helpen waaronder het sociaal tarief voor elektriciteit en/of aardgas. Het sociaal tarief helpt mensen binnen een bepaalde categorie hun rekening betaalbaar te maken (FOD Economie, 2022). Ondertussen wordt gewerkt aan een sociaal tarief voor warmte, dat op 11 maart 2022 werd goedgekeurd door de ministerraad (FOD Kanselarij, 2022).

Dergelijke cijfers en initiatieven tonen de impact die de energiefactuur heeft op de inkomens van personen. Hierdoor is het belangrijk dat bij een voorstel tot aanpassing van de kostprijzen voor warmte de invloed op alle niveaus van de maatschappij niet vergeten wordt. De transitie richting duurzaamheid mag niet ten koste gaan van de maatschappij, maar moet deze juist versterken in alle onderdelen.

3 METHODEN

In dit deel wordt de methodiek beschreven voor het berekenen van de warmtevraag van een residentieel gebouw op basis van een model. Vervolgens wordt aan de hand van de voorspelde energieconsumptie de totale kostprijs voor warmte berekend bestaande uit een aanschafkost, een verbruikskost en een uitstootkost.

3.1 Model energiegebruik gebouw

Elke woning heeft nood aan verwarming doordat er een verlies aan warmte plaatsvindt. Warmteverliezen in gebouwen gebeuren door middel van transmissie en ventilatie. Afhankelijk van de weersfactoren kunnen de transmissieverliezen een aandeel hebben van meer dan 81% in het totale verlies aan warmte (Najjar, et al., 2019). Iedere woning heeft een eigen warmteverliespatroon dat afhankelijk is van meerdere factoren, dewelke reeds besproken in deel 2.4. Van de niet-bewonersafhankelijke factoren zijn de woonoppervlakte en de isolatiegraad de meest prominente van een woning (Uriarte, et al., 2019). Dit zullen de twee variabelen zijn waarmee verder gewerkt wordt in de berekening.

Het doel van dit model is om de warmtebehoefte te berekenen van een theoretisch gebouw op basis van de woonoppervlakte en isolatiegraad. Hiermee kunnen verschillende woningen met elkaar vergeleken worden en kan een inzicht in energiegebruiken aangeleverd worden. Aangezien de warmtebehoefte van verschillende gebouwen berekend wordt en dit significant verschilt ten opzichte van de berekening voor een individueel gebouw, moeten bepaalde aannames gemaakt worden. De bewonersafhankelijke factoren worden niet betrokken in het model door hun variabiliteit en onvoorspelbaarheid (Majcen, Itard, & Visscher, 2015). Daarnaast worden enkel de transmissie- en ventilatieverliezen in rekening gebracht. De warmtewinsten, waaronder de nuttige zonnwinst en interne winst door de warmteafgifte van onder meer apparaten, verlichting en de bewoners zelf, worden buiten beschouwing gelaten. De motivering hiervoor is dat deze winsten zeer locatie-, gebouw- en bewonersafhankelijk zijn en zowel voor een onder- als overschatting kunnen zorgen (Stamp, Altamirano-Medina, & Lowe, 2017). Met dit model wordt getracht om een schatting te maken van het energiegebruik in functie van de woonoppervlakte en isolatiegraad, maar door het grote aantal parameters moet gezegd worden dat het onmogelijk is om een correcte berekening voor elke individuele woning te maken. Desondanks de grote variabiliteit geeft dit model door de thermodynamische basis een goede indicatie voor de algemene warmtevraag. Het verschil met het werkelijk energiegebruik door onvoorspelbare factoren kan gecompenseerd worden d.m.v. deze woning te beschouwen als een woning met een andere isolatiegraad. Hierdoor wordt eenzelfde energiegebruik bekomen.

3.1.1 Algemeen model

Voor het opstellen van het model wordt gebruikt gemaakt van de methode van Kaynakli (2008). De jaarlijkse energiebehoefte voor ruimteverwarming of warmtebelasting kan berekend worden met vergelijking 3-1:

$$Q = L * GU * 3600 \quad (3-1)$$

Met L de totale warmtedoorgangscoefficiënt en GU het totaal aantal graduren.

De totale warmtedoorgangscoefficiënt (L) van een woning kan berekend worden met vergelijking 3-2:

$$L = \sum_{i=1}^M UA + v_{lucht}(\rho c_p)_{lucht}V/3600 \quad (3-2)$$

Met M de zones waar warmteverlies plaatsvindt, U de algemene warmtedoorgangscoefficiënt, A de oppervlakte, v_{lucht} het ventilatievoud, $(\rho c_p)_{lucht}$ de volumetrische warmtecapaciteit van lucht en V het volume van de woning.

Wanneer voor $(\rho c_p)_{lucht}$ 1200 J/m³.K gebruikt wordt, kan vergelijking 3-2 herschreven worden voor een woning tot vergelijking 3-3:

$$L = U_{bm}(A_{bm} - A_r) + U_r A_r + U_v A_v + U_d A_d + v_{lucht}V/3 \quad (3-3)$$

Met bm de buitenmuren, r de ramen, v de vloer en d het dak.

Aangezien de jaarlijkse energiebehoefte wordt berekend in functie van de woonoppervlakte A_{woon} en de isolatiegraad I moet vergelijking 3-1 nog omgevormd worden.

3.1.2 Integratie woonoppervlakte in energiebehoefte

De oppervlakte van de buitenmuren, ramen, vloer en dak moet uitgedrukt worden in functie van de woonoppervlakte. Hiervoor worden enkele aannames gemaakt. Voor de hoogte van een verdieping wordt gerekend met een vaste waarde. Voor de lengte en breedte wordt gewerkt met een vaste lengte-breedteverhouding (LBV). De beglazing vormt een bepaald percentage (ω_r) van de oppervlakte van de buitenmuren. De woning wordt gedimensioneerd als een balk waardoor het volume de vermenigvuldiging is van de lengte, breedte en hoogte. Het moet in rekening gebracht worden dat woningen niet enkel in lengte en breedte toenemen met stijgend woonoppervlakte, maar ook in hoogte. Om dit in het model te brengen, wordt gewerkt met de veronderstelling dat per 100 m² woonoppervlakte er een verdiep bijkomt met een maximum van 3 verdiepen. Hierdoor worden volgende vergelijkingen bekomen:

$$A_{woon} < 100 \text{ m}^2$$

$$100 \text{ m}^2 \leq A_{woon} < 200 \text{ m}^2$$

$$200 \text{ m}^2 \leq A_{woon}$$

$$h = h_{verdiep}$$

$$h = 2 * h_{verdiep}$$

$$h = 3 * h_{verdiep} \quad (3-4)$$

$$b = \sqrt{\frac{A_{woon}}{LBV}}$$

$$b = \sqrt{\frac{A_{woon}}{2 * LBV}}$$

$$b = \sqrt{\frac{A_{woon}}{3 * LBV}} \quad (3-5)$$

$$l = LBV * b$$

$$l = LBV * b$$

$$l = LBV * b \quad (3-6)$$

De formules voor de oppervlakten van de theoretische woning zijn vanzelfsprekend:

$$A_{bm} = 2 * l * h + 2 * b * h \quad (3-7)$$

$$A_r = \omega_r * A_{bm} \quad (3-8)$$

$$A_v = A_d = l * b \quad (3-9)$$

3.1.3 Integratie isolatiegraad in energiebehoefte

Er wordt gewerkt met vier warmtedoorgangscoefficienten, namelijk die van de buitenmuren (U_{bm}), ramen (U_r), vloer (U_v) en dak (U_d). Hierbij moet vermeld worden dat dit een versimpeling is ten opzichte van de realiteit en een individuele warmteberekening waarbij veel meer coëfficiënten aan bod komen. Vermits elke woning zijn eigen unieke warmtedoorgangscoefficienten heeft kunnen er theoretisch oneindig veel combinaties gemaakt worden. Eerst en vooral is dit onrealistisch gezien logischerwijs indien een van de coëfficiënten een lage warmtedoorgang heeft, de andere coëfficiënten in een overeenkomstige range zullen liggen. Daarnaast valt het betrekken van verschillende combinaties van warmtedoorgangscoefficienten buiten het bestek van deze thesis. Hier wordt voor de isolatiegraad I geopteerd voor het gebruik van een range voor elke warmtedoorgangscoefficient waarbij 100% overeenkomt met een ideaal geïsoleerde woning en 0% met een ongeïsoleerde woning met enkelglas. De warmtedoorgangscoefficienten worden weergegeven in Tabel 3.1.

Tabel 3.1: Waarden van de warmtedoorgangscoefficienten (U , $W/m^2.K$) van de buitenmuren (bm), ramen (r), vloer (v) en dak (d) ten opzichte van de isolatiegraad (I , %) (Anderson & Kosmina, 2019).

$[W/m^2.K]$	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
U_{bm}	0,15	0,34	0,52	0,71	0,89	1,08	1,26	1,45	1,63	1,82	2,00
U_r	1,20	1,58	1,96	2,34	2,72	3,10	3,48	3,86	4,24	4,62	5,00
U_v	0,12	0,21	0,30	0,38	0,47	0,56	0,65	0,74	0,82	0,91	1,00
U_d	0,12	0,21	0,30	0,38	0,47	0,56	0,65	0,74	0,82	0,91	1,00

De warmtedoorgangscoefficienten kunnen ergo als volgt geschreven worden:

$$U = U_{min} + (1 - I)(U_{max} - U_{min}) \quad (3-10)$$

3.1.4 Finaal model warmtevraag woning

Het model om de warmtebehoefte (Q) te berekenen van een theoretisch gebouw in functie van de woonoppervlakte A_{woon} en de isolatiegraad I kan aldus geformuleerd worden:

$$Q(A_{woon}, I) = \left((U_{bm,min} + (1 - I)(U_{bm,max} - U_{bm,min}))(1 - \omega_r) + (U_{r,min} + (1 - I)(U_{r,max} - U_{r,min}))\omega_r \right) * 2 * x * h_v \left(\sqrt{\frac{A_{woon} * LBV}{x}} + \sqrt{\frac{A_{woon}}{x * LBV}} \right) \quad (3-11)$$

$$+ ((U_{v,min} + (1 - I)(U_{v,max} - U_{v,min})) + (U_{d,min} + (1 - I)(U_{d,max} - U_{d,min})) + \left(\frac{v_{lucht} * x * h_v}{3} \right)) * \frac{A_{woon}}{x} * GU * 3600$$

Met x het aantal verdiepen. De U_{min} - en U_{max} -waarden kunnen geraadpleegd worden in Tabel 3.1. Voor het beglazingsoppervlaktepercentage (ω_r) wordt 30% gekozen gebaseerd op de norm rond daglicht in gebouwen (2021). Voor de hoogte van een verdieping ($h_{verdiep}$) wordt verder gewerkt met 2,5 m op basis van de gemiddelde plafondhoogte en het Nederlands Bouwbesluit (Rijksoverheid, 2022). Voor de lengte-breedteverhouding (LBV) wordt gekozen voor 1,5. Voor het ventilatievoud v_{lucht} wordt gekozen voor 1,0 luchtverversingen per uur¹. Voor het aantal graaduren wordt geopteerd voor 50.000 op basis van meetdata in België (Gas, 2022).

3.1.5 Betrekking opwarmvermogen

De totale warmteverliezen door transmissie (φ_T) en ventilatie (φ_V) kunnen berekend worden aan de hand van vergelijking 3-11. Hiermee kan het energiegebruik van een woning bepaald worden, maar voor het bepalen van het nodige verwarmingsvermogen (φ_{HL}) in de woning moet het opwarmvermogen (φ_{RH}) nog opgeteld worden bij de warmteverliezen.

$$\varphi_{HL} = \varphi_T + \varphi_V + \varphi_{RH} \quad (3-12)$$

Het opwarmvermogen is gelijk aan de vermenigvuldiging van de woonoppervlakte met de opwarmfactor (zie vergelijking 3-13). De opwarmfactoren in functie van de isolatiegraad worden weergegeven in Tabel 3.2.

$$\varphi_{RH} = A_{woon} * f_{RH} \quad (3-13)$$

Tabel 3.2: Waarden van de opwarmfactoren (f_{RH} , W/m²) ten opzichte van de isolatiegraad (I , %) (Constructiv, 2020).

[W/m ²]	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
f_{RH}	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40

¹ In de norm (NBN EN 12831-1 ANB:2020) wordt geen eenduidige waarde gedefinieerd voor de warmteverliesberekeningen en wordt er hier enige vrijheid geboden. Indien de waarde onbekend is, wordt algemeen voor het minimaal ventilatievoud gerekend met 0,5/h.

3.1.6 Bepaling accuraatheid model

Vooraleer naar de algemene resultaten van het model gekeken kan worden, moet eerst de accuraatheid bepaald worden. Dit wordt gedaan aan de hand van een referentie EPB-berekening. De parameterwaarden van de EPB-berekening worden in het model gebruikt om vervolgens het verschil tussen de twee methoden vast te stellen. Indien een verschil van kleiner dan 10% wordt berekend, zal dit binnen deze thesis als voldoende accuraat worden beschouwd. De EPB-parameterwaarden worden weergegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3: EPB-referentiewaarden voor de bepaling van de accuraatheid van het warmtemodel.

Parameter	EPB-referentie
A_{woon} [m ²]	281
U_{bm} [W/m ² .K]	0,20
U_r [W/m ² .K]	1,34
U_v [W/m ² .K]	0,42
U_d [W/m ² .K]	0,18
Q [kWh]	24 250

Hierbij moet echter wel opnieuw opgemerkt worden dat een EPB-berekening geen garantie is voor de bepaling van het werkelijk energiegebruik van een woning. Desalniettemin is dit de voorkeurskeuze gezien de EPB-berekening de Europese standaard is.

3.2 Kostprijs warmte

De kostprijs voor warmte omvat in deze thesis drie onderdelen: de aanschafkost (AK), de verbruikskost (VK) en de uitstootkost (UK). Alle kosten worden op jaarbasis uitgedrukt. Elk van de drie onderdelen zal bepaald worden voor verwarmen met aardgas, stookolie, elektriciteit, een warmtepomp en een warmtenet. De som van de drie onderdelen geeft de totale kostprijs (TK) voor warmte weer en maakt het mogelijk om vergelijkingen tussen de verschillende bronnen te maken.

$$TK = AK + VK + UK \quad (3-14)$$

3.2.1 Aanschafkost

De aanschafkost (AK) is de jaarlijkse kostprijs voor het verwarmingssysteem. Deze wordt bepaald op basis van het nodige verwarmingsvermogen (φ_{HL}), de aanschafprijs voor de verwarming en de gemiddelde levensduur van de installatie.

$$AK = \frac{\text{aanschafprijs}(\varphi_{HL})}{\text{gemiddelde levensduur}} \quad (3-15)$$

Het nodige verwarmingsvermogen kan als volgt berekend worden:

$$\varphi_{HL} = \frac{L * GU}{VU} + A_{woon} * f_{RH} \quad (3-16)$$

Met VU het aantal vollasturen dat hier gelijk wordt gesteld aan 1400 h gebaseerd op cijfers van SenterNovem (2007).

Voor de aanschafprijs wordt gewerkt met een lineaire formule onttrokken van commerciële prijzen voor de verwarmingssystemen. Hierbij moet gezegd worden dat hierdoor aangenomen wordt dat telkens een verwarming op maat gevonden kan worden. In de realiteit is dit echter niet het geval en zal het voorvallen dat een geïnstalleerd systeem een hoger vermogen heeft dan nodig is. Door de grote variabiliteit hierrond wordt desalniettemin gekozen voor simpliciteit met de lineaire methode. De aanschafprijzen voor de verwarmingssystemen worden weergegeven in Tabel 3.4 samen met de gemiddelde levensduur.

Tabel 3.4: Formules voor de berekening van de aanschafprijs van de verwarmingssystemen met hun gemiddelde levensduur (Accubel, 2017; Buderus, 2022; Electraboiler, 2022; Fluvius, 2021) r.

	Aanschafprijs [€/kW]	Gemiddelde levensduur [j]
Condensatieketel	$38,5x + 520$	15
Elektrische verwarming	$20,4x + 900$	15
Warmtepomp	$400x + 8000$	20
Warmtenet	$29,3x + 4500$	50

3.2.2 Verbruikskost

De verbruikskost (VK) is de jaarlijkse kostprijs die betaald wordt voor het verbruik van de warmtebron. Deze wordt bepaald op basis van de warmtebelasting, het rendement van het verwarmingssysteem en de eenheidsprijs van de energiebron:

$$VK = \frac{Q}{\eta} * \varepsilon \left(\frac{Q}{\eta} \right) \quad (3-17)$$

Met ε de eenheidsprijs van de energiebron en η het rendement van het verwarmingssysteem.

Voor de energieprijzen wordt gewerkt met formules die tot stand zijn gekomen uit de residentiële kostprijzen van september 2021. Hierbij moet vermeld worden dat deze prijzen zowel op de dag van het schrijven als lezen van deze thesis weinig tot zeer kunnen verschillen door lopende processen. De gekozen datum is het laatste moment waarop relatief stabiele energieprijzen werden gekend. Doordat niet duidelijk is of de huidige progressie van de prijzen een enkele gebeurtenis of een permanentie is, worden met de prijzen van september verder gerekend. Tabel 3.5 geeft de formules weer die tot stand kwamen uit de energieprijzen van september 2021.

Tabel 3.5: Formules voor de eenheidsprijzen van de energiebronnen (ε , €/kWh) (Fluvius, 2021; Informazout, 2022; VREG, 2022) en de prijs (€/kWh) bij 14000 kWh (gemiddeld gasverbruik gezin).

	Eenheidsprijs ε [€/kWh]	Prijs bij 14.000 kWh [€/kWh]
Aardgas	$-0,012\ln(x) + 0,195$	€ 0,08
Stookolie	$-1E-07x + 0,070$	€ 0,07
Elektriciteit	$1,05x^{-0,15}$	€ 0,25
Restwarmte	0,03	€ 0,03

Het rendement van het verwarmingssysteem (η) is afhankelijk van het gekozen temperatuursregime. Hoe hoger het regime, hoe lager het rendement zal zijn. Hier worden twee courante regimes behandeld: 80/60 en 50/30 waarbij het eerste getal de aanvoertemperatuur en het tweede de retourtemperatuur vertegenwoordigt. De rendementen worden weergegeven in Tabel 3.6.

Tabel 3.6: Rendementen van de verwarmingssystemen bij een temperatuurregime van 80/60 en 50/30 (Baldi, Quang, Holub, & Endel, 2017; Galindo Fernández, Roger-Lacan, Gähns, & Aumaitre, 2018; Pospíšil, Špiláček, & Charva, 2019).

	80/60	50/30
Condensatieketel	87%	97%
Elektrische verwarming	95%	99%
Warmtepomp	210%	400%
Warmtenet	95%	99%

3.2.3 Uitstootkost

De uitstootkost (UK) is de jaarlijkse kostprijs die betaald moet worden voor de maatschappelijke kosten van klimaatverandering. De kost wordt berekend aan de hand van het energiegebruik, de uitstoot van de energiebron en de kostprijs van deze uitstoot.

$$UK = \frac{Q}{\eta} * \text{uitstoot energiebron} * \text{kostprijs uitstoot} \quad (3-18)$$

Zoals reeds vermeld in deel 2.5 Uitstoten verwarmingsmethoden, is de uitstoot van een energiebron afhankelijk van verschillende factoren. Doordat het betrekken van alle uitstoten van de energiebronnen buiten de scope van deze thesis valt, wordt voor dit luik enkel rekening gehouden met de CO₂eq-waarden.

Tabel 3.7: Uitstoten van de energiebronnen uitgedrukt in CO₂eq/kWh (EnergieID & CO2logic, 2021).

	Uitstoot [kg CO ₂ eq/kWh]
Aardgas	0,202
Stookolie	0,330
Grijze elektriciteit	0,205
Groene stroom	0,024
Gemiddelde warmtenetten	0,078

Voor de kostprijs van de uitstoot wordt gewerkt met de piekprijs van het Europese Emissiehandelssysteem (EU ETS) in september 2021: € 65/ton CO₂ (Sandbag, 2022). Hierbij moet dezelfde opmerking gemaakt worden als bij de energieprijzen. De EU ETS-waarde is geen statische waarde, maar zeer volatiel en progressief van aard waardoor de dynamiek van deze waarde niet verwaarloosd mag worden. De waarde mag bijgevolg niet als vaste waarde beschouwd worden, maar als tijdelijke vertegenwoordiging van een gereguleerde uitstootprijs.

4 RESULTATEN

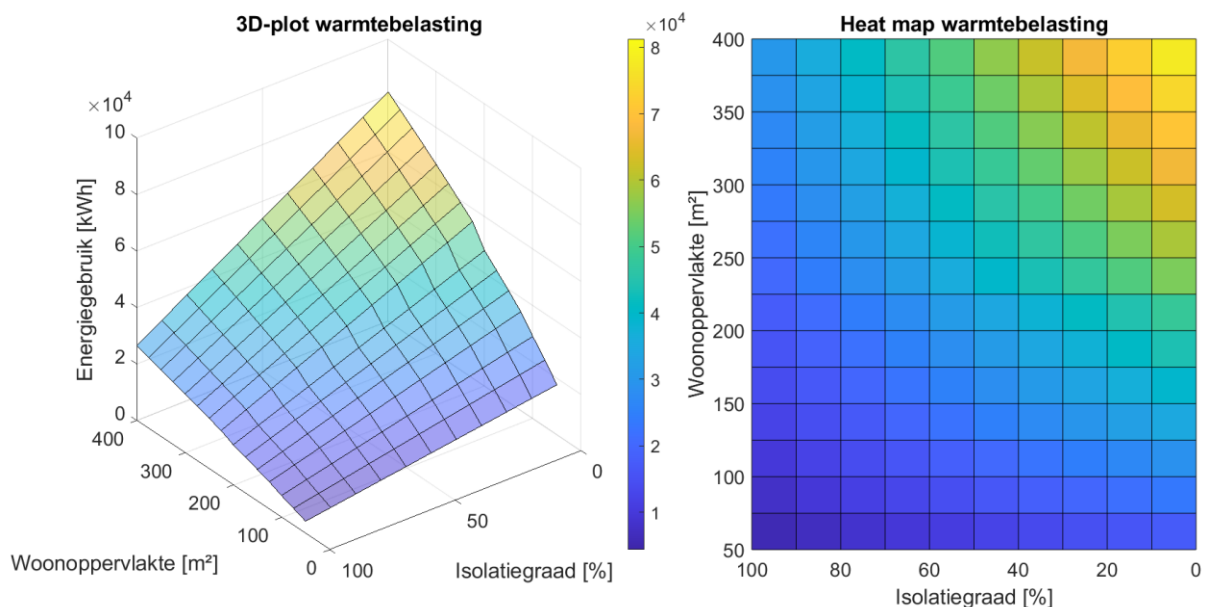
4.1 Model energiegebruik gebouw

4.1.1 Accuraatheid model

De EPB-referentie heeft een theoretische warmteconsumptie o.b.v. transmissie- en ventilatieverliezen van 24.250 kWh. Bij het ingeven van de EPB-referentieparameters in het warmtemodel wordt een theoretische energievraag van 25.633 kWh berekend. Het verschil tussen de referentie en het model is 5,7%. Dienvolgens wordt hieruit, zoals reeds vermeld in deel 3.1.6, besloten dat het model voldoende accuraat is om verder resultaten mee uit te rekenen en een volwaardige indicatie te geven.

4.1.2 Algemeen model

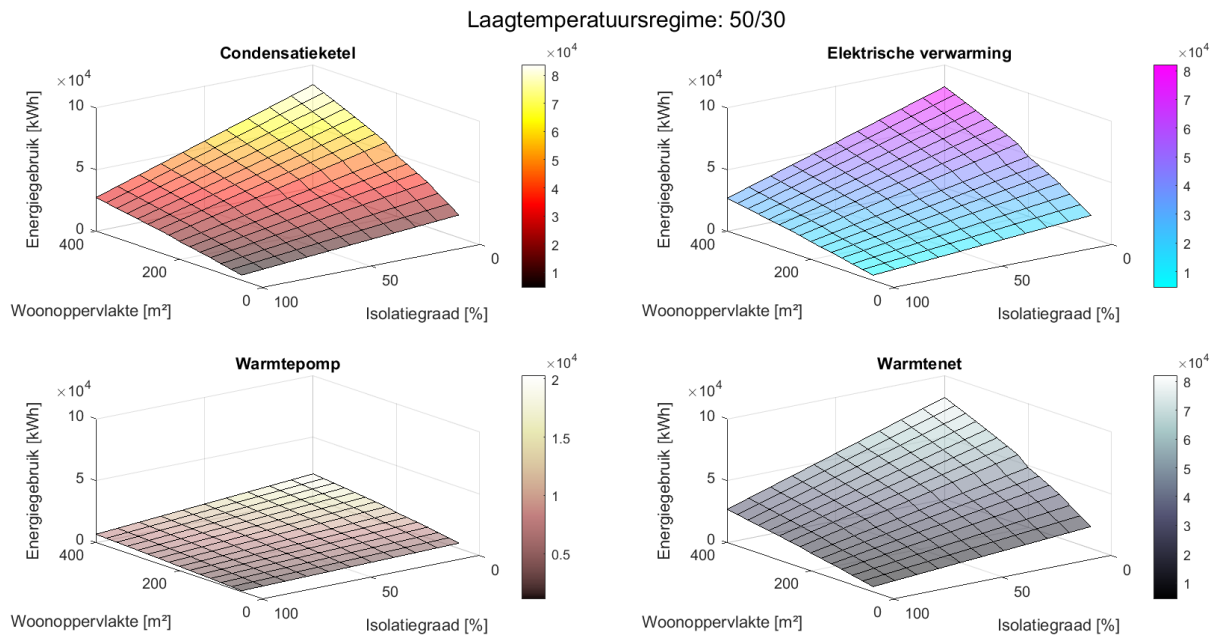
Figuur 4.1 geeft de invloed van de woonoppervlakte en isolatiegraad op de warmtebehoefte grafisch weer. De warmtebelasting stijgt bij een grotere woonoppervlakte en/of een lagere isolatiegraad. Er worden geen directe uitspraken gemaakt over de relatie tussen de woonoppervlakte en isolatiegraad gezien beide onafhankelijk van elkaar zijn. Wat wel gezegd kan worden is dat bij een isolatiegraad van 100% de warmtebelasting van 50 t.e.m. 400 m² toeneemt met ongeveer 63 kWh/m² en bij een isolatiegraad van 0% met ongeveer 182 kWh/m². Bij een woonoppervlakte van 50 m² neemt de warmtebelasting ongeveer toe met 132 kWh/%_i. Voor 400 m² loopt dit op tot ongeveer 548 kWh/%_i.



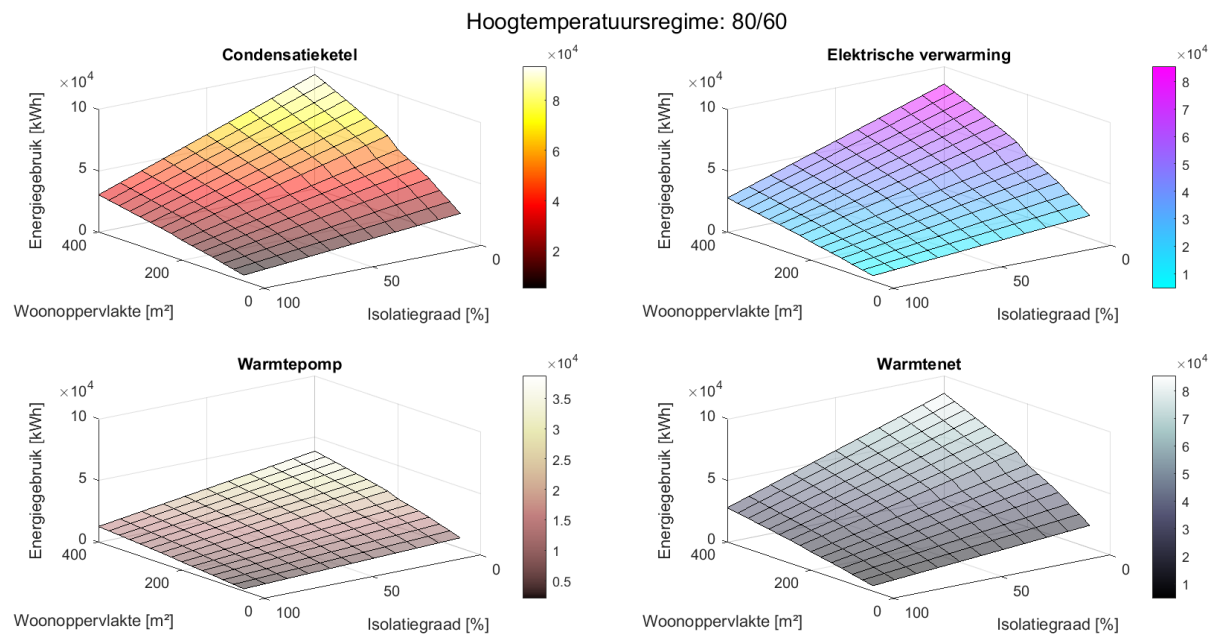
Figuur 4.1: 3D-plot en heatmap van de warmtebelasting in kWh berekend met het warmtemodel voor een woonoppervlakte van 50 t.e.m. 400 m² en een isolatiegraad van 0 t.e.m. 100%.

4.1.3 Toepassing model op verwarmingssystemen

Figuur 4.2 en Figuur 4.3 geven respectievelijk de warmtebelasting grafisch weer bij een laag en hoog temperatuursregime voor de vier verwarmingssystemen: een condensatieketel, een elektrische verwarming, een warmtepomp en een warmtenet.



Figuur 4.2: 3D-plots van de warmtebelasting in kWh bij een laag temperatuursregime van 50/30 voor een condensatieketel, een elektrische verwarming, een warmtepomp en een warmtenet. De warmtebelasting wordt weergegeven voor een woonoppervlakte van 50 t.e.m. 400 m² en de isolatiegraad van 0 t.e.m. 100%.



Figuur 4.3: 3D-plots van de warmtebelasting in kWh bij een hoog temperatuursregime van 80/60 voor een condensatieketel, een elektrische verwarming, een warmtepomp en een warmtenet. De warmtebelasting wordt weergegeven voor een woonoppervlakte van 50 t.e.m. 400 m² en de isolatiegraad van 0 t.e.m. 100%.

4.2 Kostprijs warmte

4.2.1 Aanschafkost

Tabel 4.1 geeft de aanschafkosten weer voor de vier verwarmingssystemen. De condensatieketel is het goedkoopste verwarmingssysteem voor aanschaffing, tot een zeker punt waarbij vanaf een bepaalde energiebehoefte een aansluiting op een warmtenet financieel voordeliger wordt. De warmtepomp is veruit het duurste systeem met een verschil van een factor vijf tot zelfs tien.

Tabel 4.1: Jaarlijkse aanschafkosten van de vier verwarmingssystemen bij een minimale of maximale isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m².

Verwarmingssysteem	I = 100% A = 50 m ²	I = 0% A = 50 m ²	I = 100% A = 400 m ²	I = 0% A = 400 m ²
Condensatieketel	€ 44	€ 72	€ 93	€ 225
Elektrische verwarming	€ 44	€ 72	€ 93	€ 225
Warmtepomp	€ 472	€ 691	€ 858	€ 1 881
Warmtenet	€ 92	€ 99	€ 103	€ 133

4.2.2 Verbruikskost

Tabel 4.2 en Tabel 4.3 geven de verbruikskosten voor respectievelijk een laag en een hoog temperatuursregime weer. Voor beide temperatuurregimes is het gebruik van een warmtenet de goedkoopste optie. Elektrisch verwarmen is in beide gevallen de duurste optie. Voor een laag temperatuursregime liggen de verbruikskosten van aardgas, stookolie en een warmtepomp niet ver van elkaar met stookolie de goedkoopste optie tot een zekere warmtevraag. Voor een hoog temperatuursregime is stookolie opnieuw de goedkoopste optie tot een zeker warmtevraag waar aardgas de goedkopere optie wordt. De verbruikskost van een warmtepomp ligt daarentegen een orde hoger.

Tabel 4.2: Jaarlijkse verbruikskosten bij een laag temperatuursregime van vijf energiebronnen bij een minimale of maximale isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m².

Verwarmingstype	I = 100% A = 50 m ²	I = 0% A = 50 m ²	I = 100% A = 400 m ²	I = 0% A = 400 m ²
Laag temperatuursregime: 50/30				
Aardgas	€ 423	€ 1 400	€ 1 978	€ 4 940
Stookolie	€ 313	€ 1 235	€ 1 840	€ 5 171
Elektriciteit	€ 1 314	€ 4 291	€ 6 089	€ 15 789
Warmtepomp	€ 401	€ 1 309	€ 1 858	€ 4 818
Warmtenet	€ 132	€ 532	€ 803	€ 2 463

Tabel 4.3: Jaarlijkse verbruikskosten bij een hoog temperatuursregime van vijf energiebronnen bij een minimale of maximale isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m².

Verwarmingstype	I = 100% A = 50 m ²	I = 0% A = 50 m ²	I = 100% A = 400 m ²	I = 0% A = 400 m ²
Hoog temperatuursregime: 80/60				
Aardgas	€ 465	€ 1 534	€ 2 165	€ 5 386
Stookolie	€ 349	€ 1 373	€ 2 041	€ 5 675
Elektriciteit	€ 1 361	€ 4 444	€ 6 306	€ 16 352
Warmtepomp	€ 693	€ 2 264	€ 3 213	€ 8 332
Warmtenet	€ 138	€ 554	€ 836	€ 2 566

4.2.3 Uitstootkost

De uitstootkosten worden weergegeven in Tabel 4.4. Voor beide regimes heeft een warmtepomp de laagste en stookolie de hoogste uitstootkost. Warmtenetten hebben de op een na laagste warmtekost. Elektrisch verwarmen en aardgas hebben zo goed als dezelfde uitstootkost.

Tabel 4.4: Jaarlijkse uitstootkosten bij laag en hoog temperatuursregime van vijf energiebronnen bij een minimale of maximale isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m².

Verwarmingstype	I = 100% A = 50 m ²	I = 0% A = 50 m ²	I = 100% A = 400 m ²	I = 0% A = 400 m ²
Laag temperatuursregime: 50/30				
Aardgas	€ 59	€ 238	€ 359	€ 1 100
Stookolie	€ 96	€ 388	€ 586	€ 1 797
Elektriciteit	€ 59	€ 236	€ 357	€ 1 094
Warmtepomp	€ 15	€ 58	€ 88	€ 271
Warmtenet	€ 22	€ 90	€ 136	€ 416
Hoog temperatuursregime: 80/60				
Aardgas	€ 66	€ 265	€ 400	€ 1 226
Stookolie	€ 108	€ 433	€ 653	€ 2 004
Elektriciteit	€ 61	€ 246	€ 372	€ 1 140
Warmtepomp	€ 28	€ 111	€ 168	€ 516
Warmtenet	€ 23	€ 94	€ 141	€ 434

4.2.4 Totale kost

Voor beide temperatuurregimes is de aansluiting op een warmtenet de goedkoopste optie en elektrisch verwarmen de duurste. Bij een hoog temperatuursregime is het gebruik van een warmtepomp de op een na duurste optie. Voor een laag temperatuursregime is dit hetzelfde geval tot een bepaalde warmtebehoefte waarbij stookolie de plaats inneemt. Voor lage gebruiken is stookolie de op een na goedkoopste optie, maar wordt vanaf een bepaalde warmtebehoefte vervangen door aardgas (zie Tabel 4.5). Tabel 4.6 toont de prijs per kWh.

Tabel 4.5: Jaarlijkse totale kost bij een laag en hoog temperatuursregime van vijf energiebronnen bij een minimale of maximale isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m².

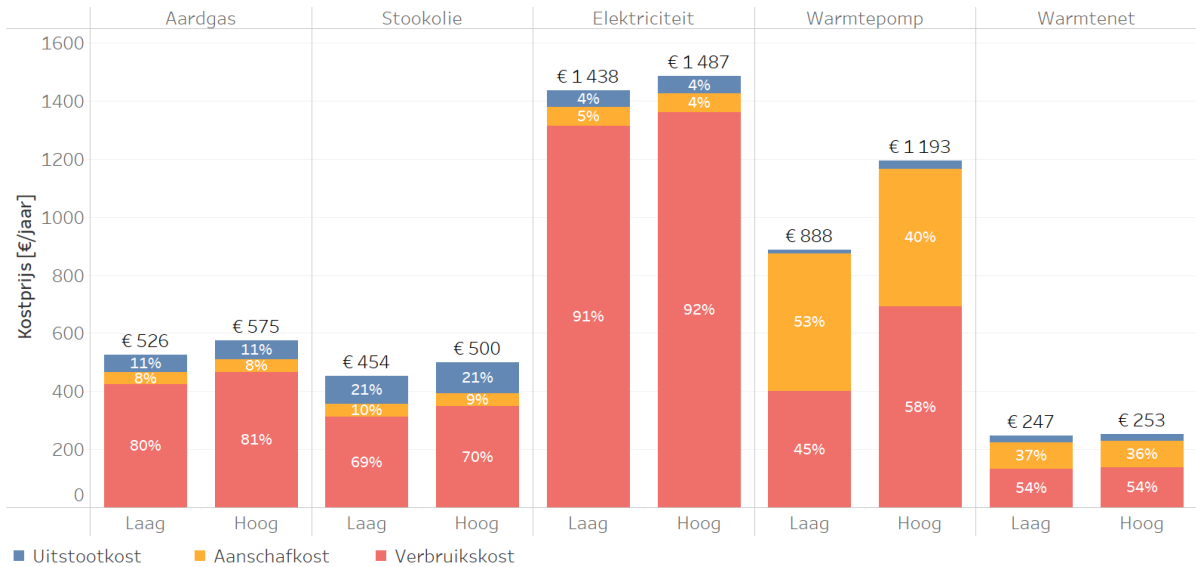
Verwarmingstype	I = 100% A = 50 m ²	I = 0% A = 50 m ²	I = 100% A = 400 m ²	I = 0% A = 400 m ²
Laag temperatuursregime: 50/30				
Aardgas	€ 526	€ 1 709	€ 2 430	€ 6 265
Stookolie	€ 454	€ 1 695	€ 2 519	€ 7 193
Elektriciteit	€ 1 438	€ 4 607	€ 6 536	€ 17 044
Warmtepomp	€ 888	€ 2 059	€ 2 805	€ 6 970
Warmtenet	€ 247	€ 720	€ 1 042	€ 3 012
Hoog temperatuursregime: 80/60				
Aardgas	€ 575	€ 1 871	€ 2 658	€ 6 837
Stookolie	€ 500	€ 1 878	€ 2 788	€ 7 904
Elektriciteit	€ 1 487	€ 4 770	€ 6 768	€ 17 653
Warmtepomp	€ 1 193	€ 3 066	€ 4 240	€ 10 729
Warmtenet	€ 253	€ 746	€ 1 081	€ 3 133

Tabel 4.6: Kostprijs per kWh een bij laag en hoog temperatuursregime van vijf energiebronnen bij een minimale of maximale isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m².

Verwarmingstype	I = 100% A = 50 m ²	I = 0% A = 50 m ²	I = 100% A = 400 m ²	I = 0% A = 400 m ²
Laag temperatuursregime: 50/30				
Aardgas	€ 0,12	€ 0,10	€ 0,09	€ 0,08
Stookolie	€ 0,10	€ 0,10	€ 0,10	€ 0,09
Elektriciteit	€ 0,33	€ 0,26	€ 0,25	€ 0,21
Warmtepomp	€ 0,20	€ 0,12	€ 0,11	€ 0,09
Warmtenet	€ 0,06	€ 0,04	€ 0,04	€ 0,04
Hoog temperatuursregime: 80/60				
Aardgas	€ 0,13	€ 0,11	€ 0,10	€ 0,08
Stookolie	€ 0,11	€ 0,11	€ 0,11	€ 0,10
Elektriciteit	€ 0,34	€ 0,27	€ 0,26	€ 0,22
Warmtepomp	€ 0,27	€ 0,17	€ 0,16	€ 0,13
Warmtenet	€ 0,06	€ 0,04	€ 0,04	€ 0,04

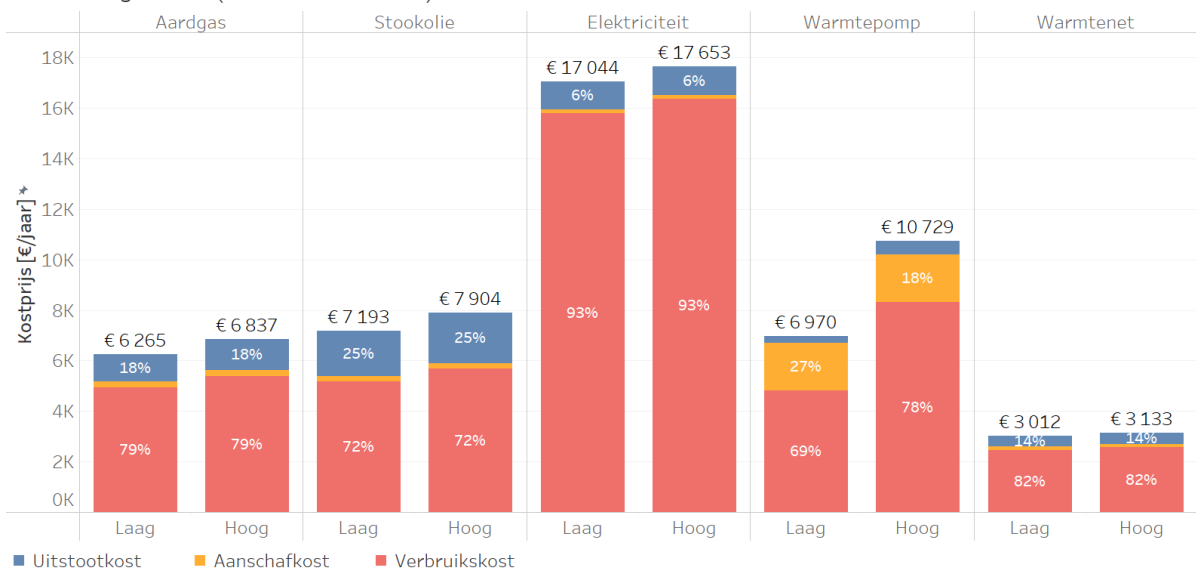
Figuur 4.4 en Figuur 4.5 geven visueel de verhoudingen van de kostprijzen weer ten opzichte van het totaal voor een laag en hoog temperatuursregime. Dit wordt voor elke energiebron gedaan voor de twee uiterste situaties. Links wordt de situatie bij een laag temperatuursregime geïllustreerd en rechts bij een hoog temperatuursregime

Verhouding kosten (I = 100% & A = 50 m²)



Figuur 4.4: Verhoudingen van de totale kost bij een woning met 100% isolatiegraad (I) en 50 m² woonoppervlakte (A) voor de vijf verwarmingstypen bij een laag en hoog temperatuursregime.

Verhouding kosten (I = 0% & A = 400 m²)



Figuur 4.5: Verhoudingen van de totale kost bij een woning met 0% isolatiegraad (I) en 400 m² woonoppervlakte (A) voor de vijf verwarmingstypen bij een laag en hoog temperatuursregime

4.3 Sensitiviteitsanalyse

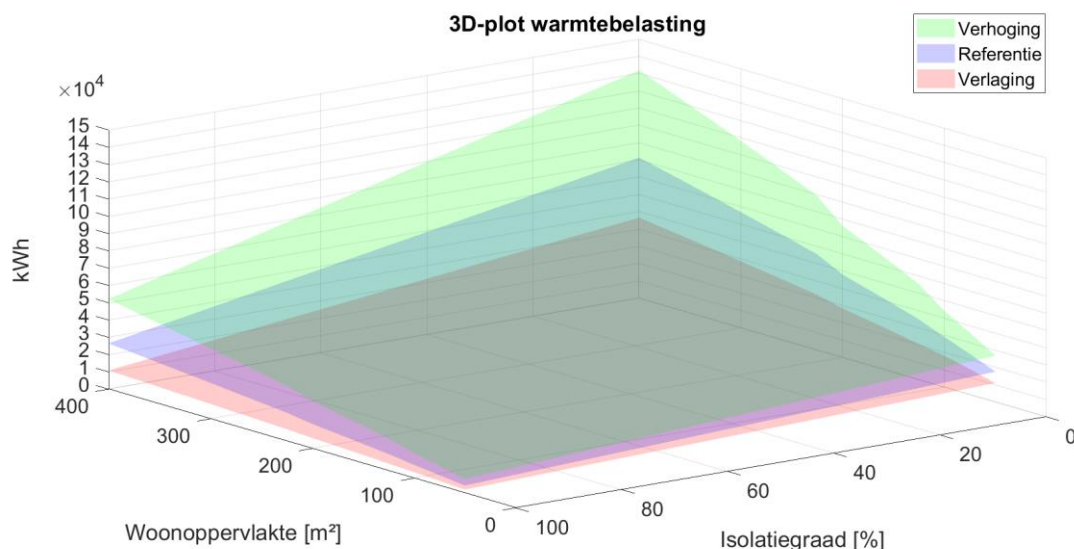
4.3.1 Warmtemodel

Bepaalde parameters van het warmtemodel zijn vast gekozen waarden die een zekere invloed hebben op de finale eindwaarde. De impact van de waarden worden voor enkele parameters weergegeven in Tabel 4.7. De tabel laat de percentuele stijging van de voorspelde warmtevraag ten opzichte van de referentieparameterwaarden zien voor enkele nieuwe waarden.

Tabel 4.7: Overzicht van de kleinste en grootste percentuele verandering van de energievraag bij een verlaging of verhoging van een van de parameters van het warmtemodel. De veranderingen werden bekeken binnen een woonoppervlakte van 50 t.e.m. 400 m² en een isolatiegraad van 0 t.e.m. 100%

	Referentie	Verlaging		Verhoging			
		Nieuwe waarde	% verschil min – max		Nieuwe waarde	% verschil min – max	
Hoogte [m]	2,5	2,0	-13%	-19%	3,0	+13%	+19%
ω_r [%]	30	20	-5%	-9%	40	+5%	+9%
I [1/h]	1	0,5	-6%	-31%	1,5	+6%	+31%
GU [h.K]	50 000	40 000	-20%	-20%	60 000	+20%	+20%
LBV [-]	1,5	2,0	-1%	-1%	1,0	+1	+3%

Tabel 4.7 toont aan dat de keuze van vaste parameterwaarden een kleine tot grote invloed kan hebben op de door het model voorspelde warmtevraag. Figuur 4.6 geeft de warmtebelasting grafisch weer voor het verlaging-, referentie- en verhogingsscenario.



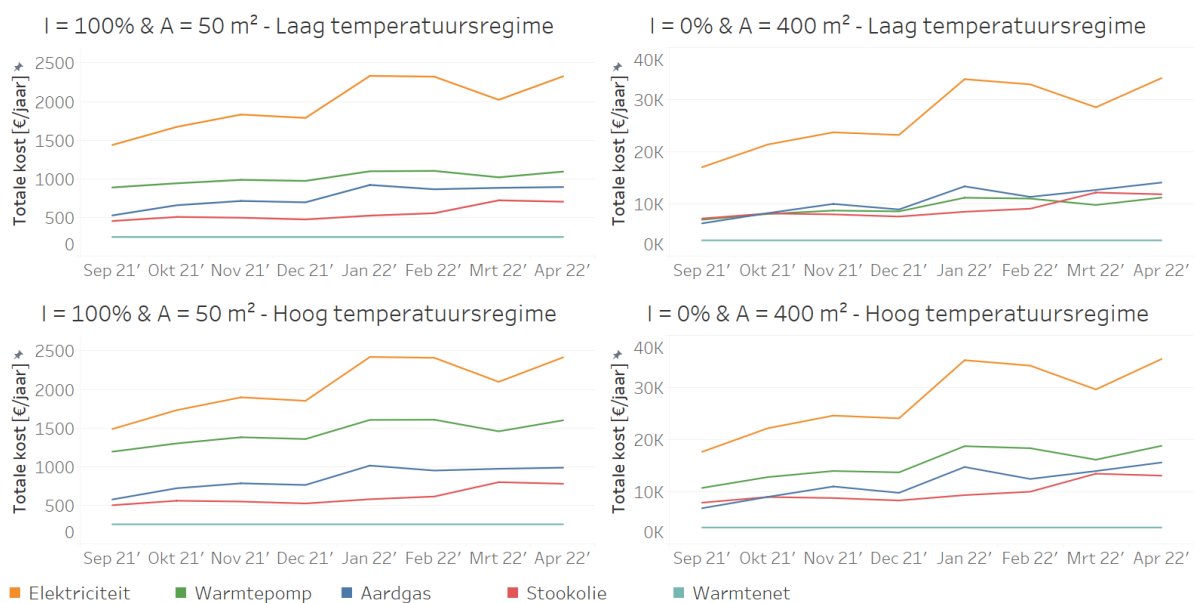
Figuur 4.6: 3D-plot van de warmtebelasting in kWh berekend met het warmtemodel voor een woonoppervlakte van 50 t.e.m. 400 m² en een isolatiegraad van 0 t.e.m. 100% voor de verlaging, referentie en verhoging zoals beschreven in Tabel 4.7.

4.3.2 Verbruikskost

De energieprijzen zijn een dynamisch geheel die continu evolueren doorheen de tijd. Tabel 4.8 geeft een overzicht van de reikwijdte van de energieprijzen binnen de periode van september 2021 t.e.m. april 2022. De prijzen van aardgas, stookolie en elektriciteit zijn in deze periode met 85% tot 200% toegenomen. De invloed van de energieprijzen doorheen deze periode wordt geïllustreerd in Figuur 4.7.

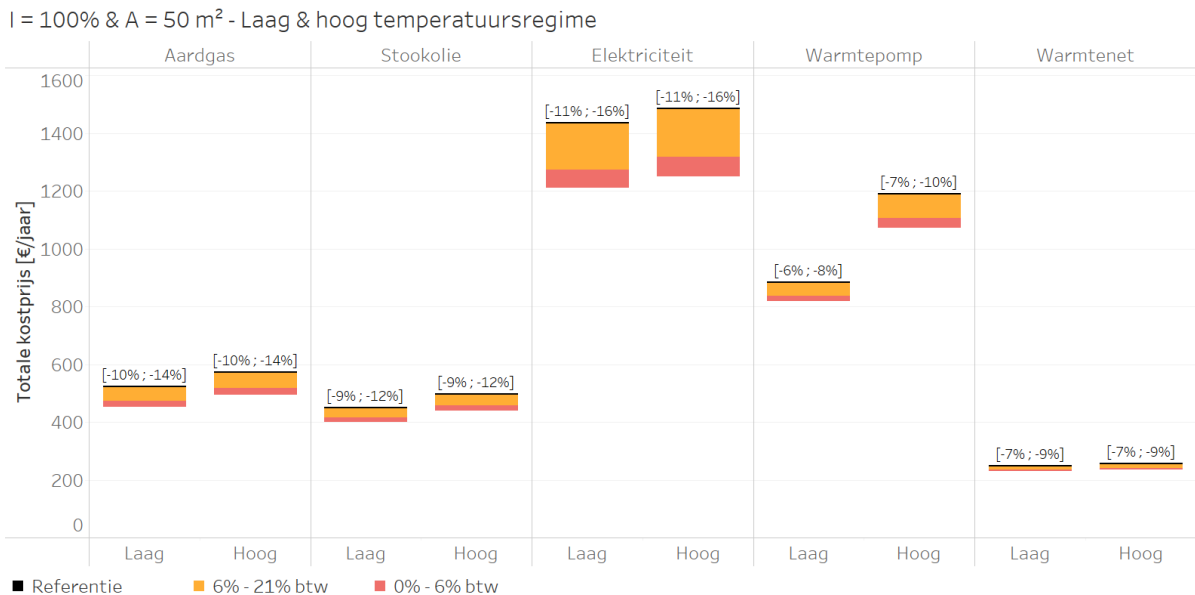
Tabel 4.8: Overzicht van de spreiding van de energieprijzen doorheen de periode van september 2021 t.e.m. april 2022 (Fluvious, 2021; Informazout, 2022; VREG, 2022).

Energiebron	Prijrange [€/kWh]
Aardgas	0,06 – 0,18
Stookolie	0,07 – 0,13
Elektriciteit	0,25 – 0,61
Restwarmte	0,03

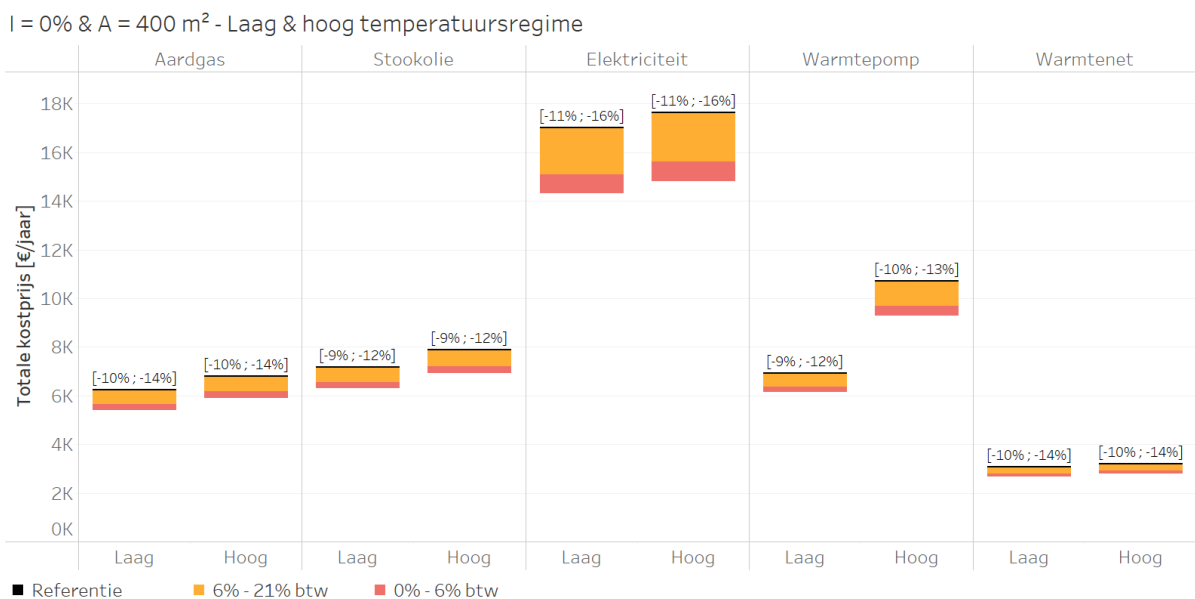


Figuur 4.7: Invloed van de fluctuerende energieprijzen. De totale kostprijs wordt weergegeven voor de vijf energiebronnen bij een isolatiegraad (I) van 0 of 100%, een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m² en een laag of hoog temperatuursregime doorheen de periode van september 2021 t.e.m. april 2022.

Naast de invloed van de energieprijzen op de totale kost, wordt ook gekeken naar de invloed van de btw op de energieprijzen. Figuur 4.8 en Figuur 4.9 illustreren voor de verschillende situaties het bedrag dat bij het totaal wordt bijgerekend voor een btw-tarief van 0, 6 en 21%. Het btw-tarief van 21% is de referentie gezien dit de tarieven zijn die werden toegepast op de energieprijzen van september 2021. De figuren tonen ergo het deel van de totale kostprijs dat geïnd wordt via btw op de energieprijzen.



Figuur 4.8: Invloed van btw op de totale kostprijs. De totale kostprijs wordt weergegeven voor de vijf energiebronnen bij een isolatiegraad (I) van 100% en een woonoppervlakte (A) van 50 m² bij een laag en hoog temperatuursregime voor een btw-tarief van 0, 6 en 21% (referentie).

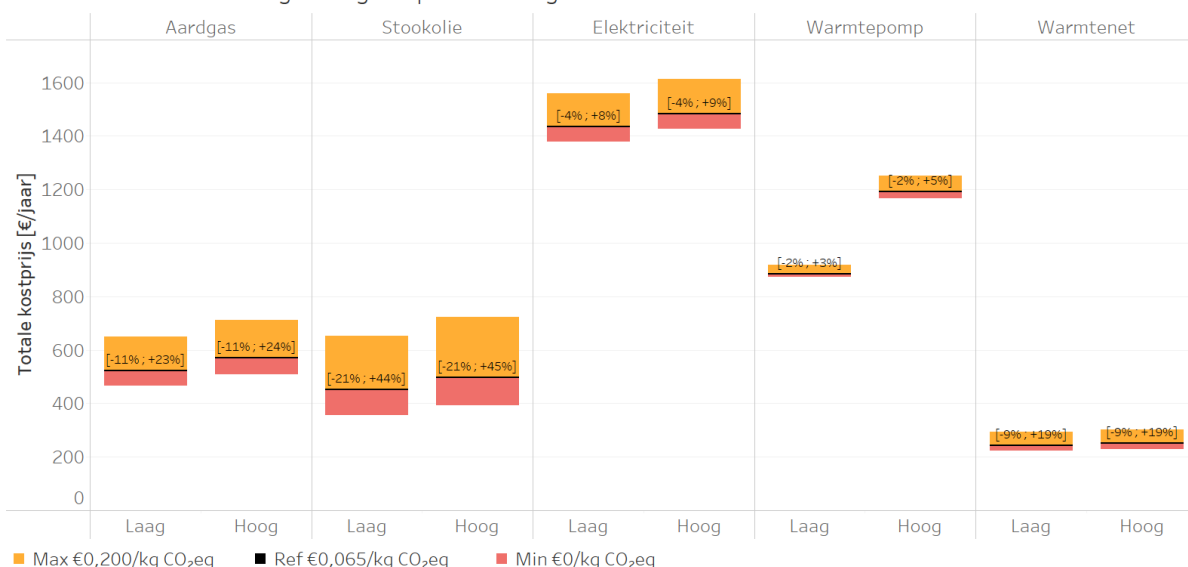


Figuur 4.9: Invloed van btw op de totale kostprijs. De totale kostprijs wordt weergegeven voor de vijf energiebronnen bij een isolatiegraad (I) van 0% en een woonoppervlakte (A) van 400 m² bij een laag en hoog temperatuursregime voor een btw-tarief van 0, 6 en 21% (referentie).

4.3.3 Uitstootkost

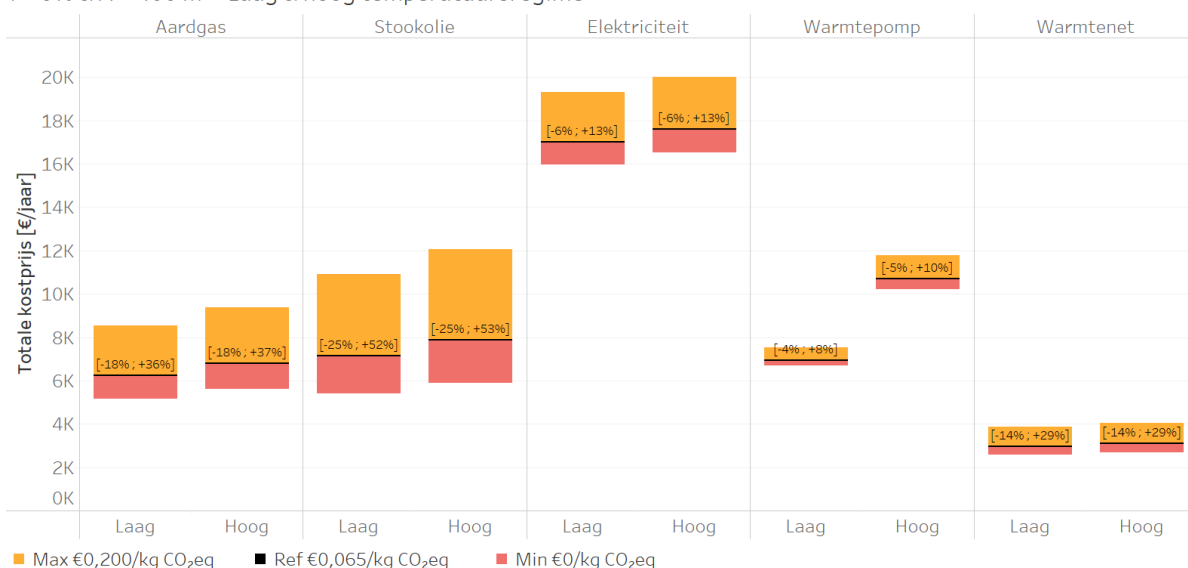
De emissiefactoren en de kostprijs voor de uitstoot hebben elk ook een invloed op het totale kostenplaatje. Eerst en vooral wordt er naar de impact van uitstootprijs gekeken. Hierbij wordt de jaarlijkse totale kostprijs weergegeven voor drie verschillende uitstootprijzen: een minimumsituatie (€ 0/kg CO₂eq), een referentiesituatie (€ 0,065/kg CO₂eq – EU ETS) en een maximumsituatie (€ 0,200 kg/CO₂eq). De maximumsituatie is gekozen op basis van de hoogste schatting van de maatschappelijke kosten voor het klimaat in 2022 van de Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OECD) (Watkiss & Downing, 2008).

I = 100% & A = 50 m² - Laag & hoog temperatuursregime



Figuur 4.10: Invloed van de uitstootprijs op de totale kostprijs. De totale kostprijs wordt weergegeven voor de vijf energiebronnen bij een isolatiegraad (I) van 100% en een woonoppervlakte (A) van 50 m² bij een laag en hoog temperatuursregime voor uitstootkost van € 0/kg CO₂eq, € 0,065/kg CO₂eq (referentie) en € 0,200/kg CO₂eq.

I = 0% & A = 400 m² - Laag & hoog temperatuursregime



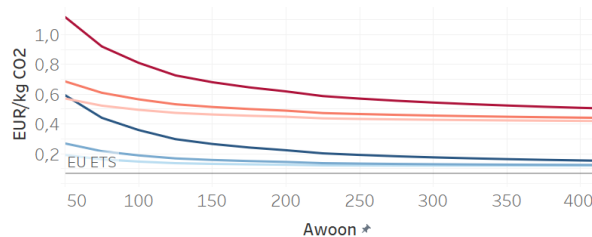
Figuur 4.11: Invloed van de uitstootprijs op de totale kostprijs. De totale kostprijs wordt weergegeven voor de vijf energiebronnen bij een isolatiegraad (I) van 0% en een woonoppervlakte (A) van 400 m² bij een laag en hoog temperatuursregime voor uitstootkost van € 0/kg CO₂eq, € 0,065/kg CO₂eq (referentie) en € 0,200/kg CO₂eq.

In het kader van een duurzame warmteprijs berekenen wordt gekeken welke uitstootprijs nodig is om een warmtepomp en warmtenet financieel voordeliger te maken t.o.v. fossiele brandstoffen. Tabel 4.9 geeft voor de twee situaties de kostprijzen voor de uitstoot van een kilo CO₂eq weer. Dit voor een warmtepomp die werkt op grijze stroom (0,205 kg CO₂eq/kWh), een warmtepomp die werkt op groene stroom (0,024 kg CO₂eq/kWh) en een warmtenet (0,078 kg CO₂eq/kWh). Voor het warmtenet wordt de berekening gedaan met het warmtenettarief en hetzelfde tarief als de fossiele brandstof (FB).

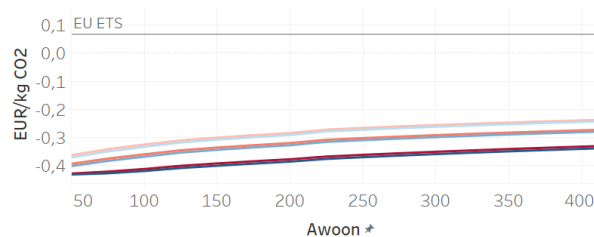
Tabel 4.9: Overzicht van de minimale CO₂eq-prijzen [€/kg CO₂eq] die nodig zijn om de duurzame verwarmingsmethode financieel voordeliger te maken dan de verwarmingsmethode met fossiele brandstof (FB) bij een laag en hoog temperatuursregime.

€/kg CO ₂ eq	Aardgas		Stookolie	
	I = 100%	I = 0%	I = 100%	I = 0%
	A = 50 m ²	A = 400 m ²	A = 50 m ²	A = 400 m ²
Laag temperatuursregime: 50/30				
Warmtepomp - grijze stroom	€ 0,59	€ 0,12	€ 0,41	€ 0,06
Warmtepomp - groene stroom	€ 0,46	€ 0,09	€ 0,35	€ 0,05
Warmtenet - standaardtarief	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
Warmtenet - tarief FB	€ 0,07	€ 0	€ 0,04	€ 0
Hoog temperatuursregime: 80/60				
Warmtepomp - grijze stroom	€ 1,12	€ 0,42	€ 0,63	€ 0,19
Warmtepomp - groene stroom	€ 0,68	€ 0,26	€ 0,48	€ 0,14
Warmtenet - standaardtarief	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
Warmtenet - tarief FB	€ 0,02	€ 0	€ 0,01	€ 0

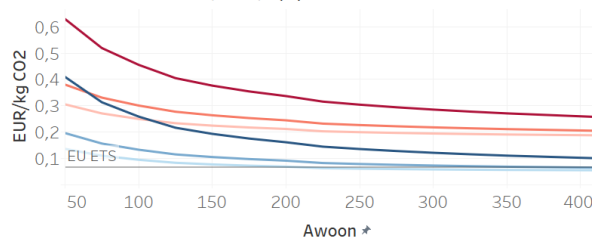
Aardgas - Warmtepomp (A)



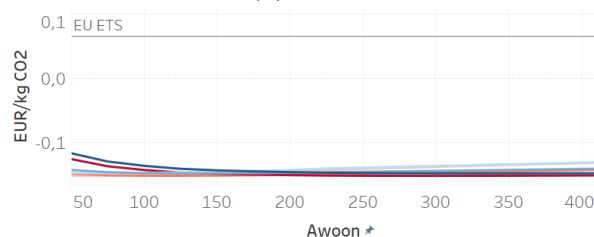
Aardgas - Warmtenet (B)



Stookolie - Warmtepomp (C)



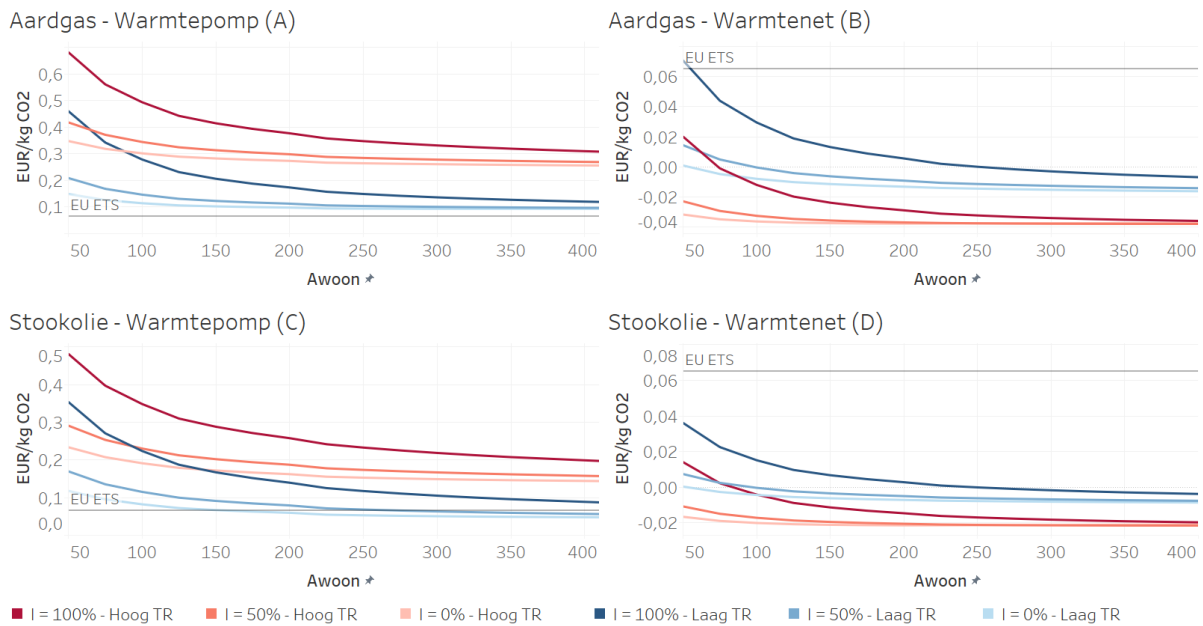
Stookolie - Warmtenet (D)



■ I = 100% - Hoog TR ■ I = 50% - Hoog TR ■ I = 0% - Hoog TR ■ I = 100% - Laag TR ■ I = 50% - Laag TR ■ I = 0% - Laag TR

Figuur 4.12: Minimale CO₂eq-prijs die nodig is om de duurzame verwarmingsmethode financieel voordeliger te maken dan de verwarmingsmethode met fossiele brandstof voor een woonbare oppervlakte (A_{woon}) van 50 tot 400 m² en voor een laag of hoog temperatuursregime (TR) bij een isolatiegraad (I) van 0, 50 of 100%. De vergelijking wordt gemaakt voor aardgas met een warmtepomp (A) en een warmtenet (B) en voor stookolie met een warmtepomp (C) en een warmtenet (D). De emissiefactor van grijze stroom en het warmtenettarief werden gebruikt.

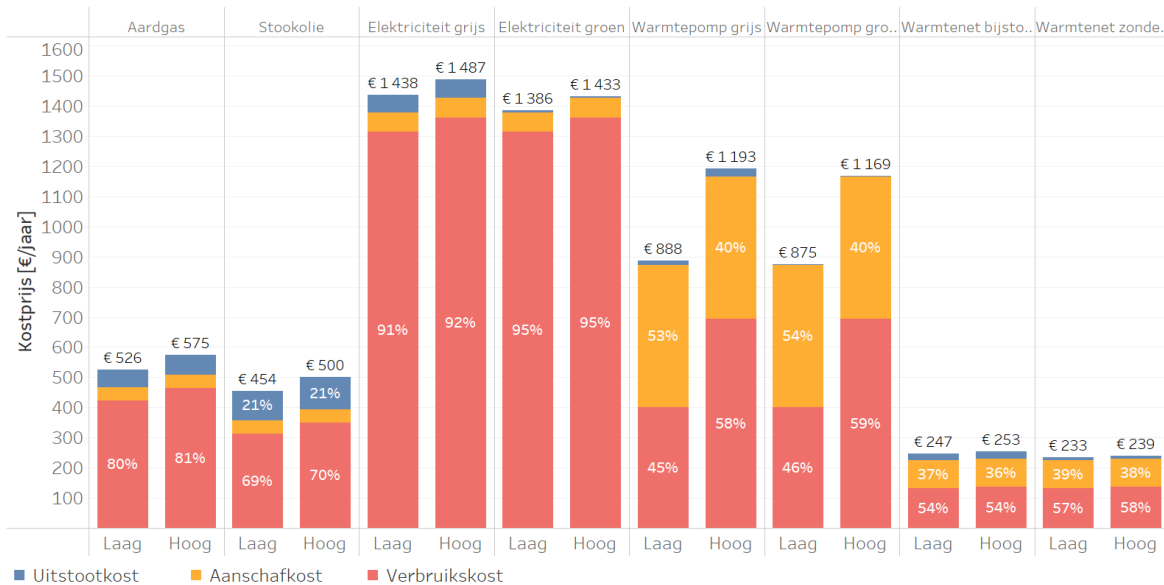
Figuur 4.12 toont het verloop van de minimale CO₂eq-prijs die nodig is om de duurzame verwarmingsmethode financieel voordeliger te maken t.o.v. aardgas of stookolie. Dit is gedaan met de emissiefactor van grijze stroom voor de warmtepomp en het warmtenettarief van Fluvius (€ 0,03/kWh) voor het warmtenet. Dezelfde berekening kan gemaakt worden met de emissiefactor voor groene stroom voor de warmtepomp en hetzelfde energietarief als de fossiele brandstof voor het warmtenet ter referentie van het NMDA-principe. Dit wordt weergegeven in Figuur 4.13.



Figuur 4.13: Minimale CO₂eq-prijs die nodig is om de duurzame verwarmingsmethode financieel voordeliger te maken dan de verwarmingsmethode met fossiele brandstof voor een woonbare oppervlakte (A_{woon}) van 50 tot 400 m² en voor een laag of hoog temperatuursregime (TR) bij een isolatiegraad (I) van 0, 50 of 100%. De vergelijking wordt gemaakt voor aardgas met een warmtepomp (A) en een warmtenet (B) en voor stookolie met een warmtepomp (C) en een warmtenet (D). De emissiefactor van groene stroom voor de warmtepomp en het tarief van de fossiele brandstof voor het warmtenet werden gebruikt.

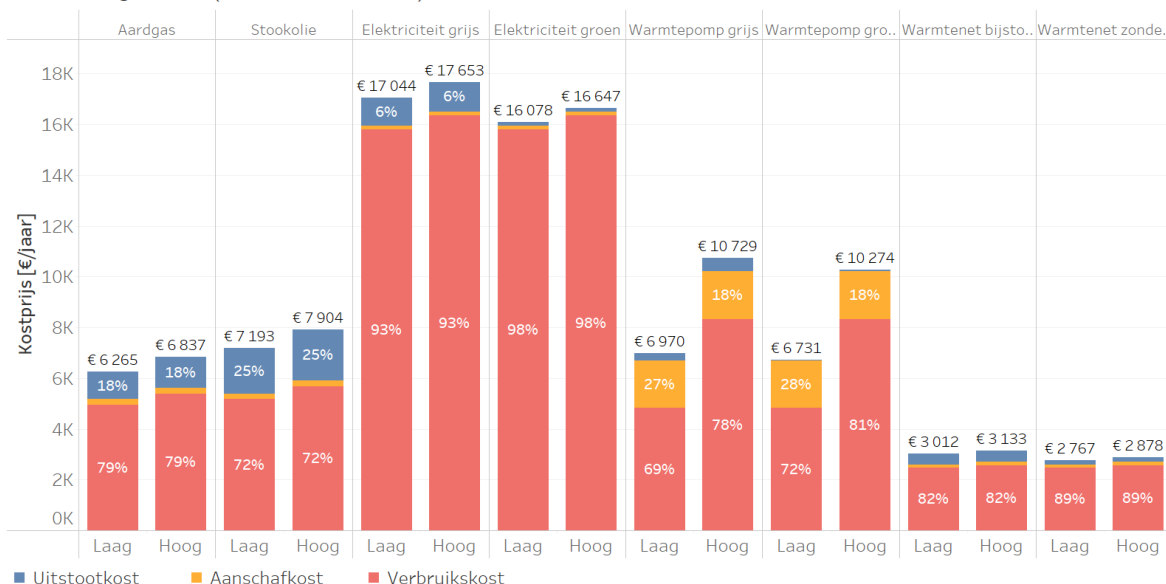
Finaal wordt ook gekeken naar de impact van het gebruik van groene stroom en restwarmte zonder bijstook op de totale kost. Figuur 4.14 en Figuur 4.15 geven de percentuele verhouding van de totale kostprijs weer voor de verschillende scenario's. Het verschil door het gebruik van duurzame energie uit zich in de uitstootkost. Ten opzichte van de tegenhanger wordt bij de duurzame energiebron tussen 4 tot 6% bespaard voor elektrisch verwarmen. Voor een warmtepomp ligt de besparing tussen 1 tot 4% en voor een warmtenet tussen 5 tot 8%.

Verhouding kosten (I = 100% & A = 50 m²)



Figuur 4.14: Verhoudingen van de drie kosten bij een woning met 100% isolatiegraad (I) en 50 m² woonoppervlakte (A) voor acht verwarmingstypen bij laag en hoog temperatuursregime. Voor elektrisch verwarmen en een warmtepomp wordt een het verschil tussen grijze en groene stroom getoond. Voor een warmtenet wordt het verschil voor restwarmte met en zonder bijstook getoond.

Verhouding kosten (I = 0% & A = 400 m²)



Figuur 4.15: Verhoudingen van de drie kosten bij een woning met 0% isolatiegraad (I) en 400 m² woonoppervlakte (A) voor acht verwarmingstypen bij laag en hoog temperatuursregime. Voor elektrisch verwarmen en een warmtepomp wordt een het verschil tussen grijze en groene stroom getoond. Voor een warmtenet wordt het verschil voor restwarmte met en zonder bijstook getoond.

5 DISCUSSIE

5.1 Beoordeling warmtemodel

5.1.1 Validiteit en betrouwbaarheid warmtemodel

De accuraatheid van het warmtemodel is bepaald ten opzichte van een EPB-referentiesituatie. De waarde van het model heeft een afwijking van 5,7% ten opzichte van de referentie. Doordat dit binnen de vooraf opgestelde acceptabele foutenmarge van 10% ligt, is gekozen om het model binnen deze thesis als voldoende accuraat te beschouwen.

Slechts één EPB-referentiesituatie werd vooraf bekomen waardoor enkel met deze waarde de vergelijking werd gemaakt. Voor een nauwkeurigere beoordeling zijn meerdere EPB-waarden bij verschillende situaties nodig. Pas dan kan de werkelijke accuraatheid ten aanzien van de EPB-methode bepaald worden. Daarnaast moet vermeld worden dat de EPB-methode ook geen onfeilbare methode is en een zekere fout tegenover de werkelijkheid vertoont. Dit onder andere door het niet in rekening brengen van persoonsafhankelijke factoren zoals comfortwensen, gebruik van de technologie en het bewustzijn, maar ook door het foutief inbrengen van niet-persoonsafhankelijke factoren (Economidou, et al., 2020).

Dit warmtemodel maakt gebruik van versimpelde thermodynamische formules om een schatting te maken van het energiegebruik van woningen in Vlaanderen. Om de validiteit en betrouwbaarheid van het model tegenover de realiteit beter in te kunnen schatten, moet ergo een vergelijking met reële data gemaakt worden.

Binnen deze thesis dient het model om een schatting te maken van het energiegebruik van een theoretische woning om op basis hiervan de kosten te kunnen berekenen. Het werkelijk gebruik van de woning fluctueert uitgaande van verschillende factoren (Santin, Itard, & Visscher, 2009). Het model heeft niet als doel om een accurate en precieze voorspelling voor elke individuele woning te maken. Het doel is om een relatief nauwkeurig energiegebruik te voorspellen van een theoretische woning met een zekere woonoppervlakte en isolatiegraad. Met het oog op dit doel en rekening houdende met de fluctuaties binnen deze afbakening ten opzichte van de realiteit, wordt het model als adequaat beschouwd voor dit onderzoek.

5.1.2 Parameterevaluatie

Het warmtemodel werkt met een aantal vast gekozen parameterwaarden. Tabel 4.7 toont dat de keuze van deze waarden een aanzienlijke invloed heeft op de voorspelling van het energiegebruik. De keuzes voor de waarden in het model zijn gebaseerd op gemiddelden en standaardwaarden (Anderson & Kosmina, 2019). Hierdoor zijn er woningen die een andere set waarden bezitten en bijgevolg ook een ander energiegebruik hebben voor eenzelfde woonoppervlakte en isolatiegraad. De impact van de parameterwaarden moet dus zeker in acht genomen worden bij het betrekken van de kostprijs voor warmte. Het rekening houden met elke individuele woning valt buiten het bestek van deze thesis. Hierdoor wordt de invloed van de parameters niet verder besproken, maar moet wel kort vermeld worden deze ook in de kostprijs zal doorwegen. Waar variaties in het energiegebruik door andere parameterwaarden mogelijk zijn, zullen eveneens variaties in de kostprijs tot meer dan 50% mogelijk zijn.

5.1.3 Bewonersafhankelijke factoren

Door de onvoorspelbaarheid en complexiteit van de bewonersafhankelijke factoren werden deze buiten het warmtemodel gehouden (Majcen, Itard, & Visscher, 2015). Het model bepaalt de theoretische warmtevraag van een woning. In werkelijkheid zal bewonersgedrag een inwerking hebben op het finale energiegebruik met een variantie tot zelf 26% (Wei, Jones, & de Wilde, 2014). Het is belangrijk te vermelden dat de berekende prijzen hierdoor zullen afwijken tegenover de realiteit en dat door aanpassing van het gebruikersgedrag ook bespaard kan worden op de warmtekost.

5.2 Beoordeling kostprijs warmte

De totale kostprijs voor warmte in deze thesis is opgebouwd uit een aanschafkost, een verbruikskost en een uitstootkost. Binnen deze kostprijs werden enkele zaken buiten beschouwing gelaten.

5.2.1 Aanschafkost

De aanschafkost wordt berekend met de aanschafprijs, met betrekking tot het nodige verwarmingsvermogen, en de gemiddelde levensduur. De aanschafprijs is opgesteld voor elk van de vijf verwarmingsmethoden aan de hand van commerciële data voor de laatst verkrijgbare systemen (zie Tabel 3.4). Enkel de aankoopprijs voor de systemen is hierin verrekend. Installatiekosten, die gepaard gaan met de aankoop van een verwarmingssysteem, werden hier niet in verrekend. Dit enerzijds door gebrek aan data en anderzijds de grote variabiliteit. Er werd verder gewerkt met de aanname dat de installatiekosten relatief gelijkaardig zijn voor eenzelfde woning, terwijl dit in de praktijk niet het geval is. Een concreet voorbeeld hiervan is de installatie van vloerverwarming die duurder is dan het plaatsen van radiatoren (Daikin, sd).

Verder werd gewerkt met de vergelijkingen in Tabel 3.4 die een kostprijs berekenen aan de hand van het verwarmingsvermogen. Deze methode gaat ervan uit dat telkens een systeem op maat kan geïnstalleerd worden, terwijl dit niet altijd het geval zal zijn en sommige systemen overgedimensioneerd worden. Dit heeft eveneens een impact op de aanschafkost.

Daarnaast wordt ook de aanname gemaakt dat elk type systeem overal geïnstalleerd kan worden. In werkelijkheid moet rekening gehouden worden met het aanbod en de technische mogelijkheden. Bijvoorbeeld lage temperatuurverwarming zal niet in een slecht geïsoleerde en grote woning geïnstalleerd kunnen worden door onvoldoende warmtelevering (Østergaard & Svendsen, 2016). Een ander voorbeeld is dat niet iedereen de mogelijkheid heeft om zich aan te sluiten op een warmtenet of een warmtepomp kan laten installeren (VREG, 2022).

Ten slotte wordt gewerkt met gemiddelde levensduren van de verwarmingssystemen. In werkelijkheid verschillen de levensduren tegenover de gemiddelden onder andere door gebruiksomstandigheden (Hummen & Desing, 2021). Dit zorgt ervoor dat de aanschafkosten bij eenzelfde verwarmingssysteem en woning kunnen verschillen met een aanzienlijk percentage (Mohammadpourkarbasi & Sharples, 2022). Voor een verwarmingssysteem met een levensduur van gemiddeld 15 jaar stijgt de aanschafkost met 7% bij een verminderde levensduur van 1 jaar en met 50% bij een vermindering van 5 jaar. Omgekeerd wordt 6% bespaard bij een verlengde levensduur van 1 jaar en 25% bij verlenging van 5 jaar.

5.2.2 Verbruikskost

Naast het voorspelde energiegebruik, wordt de verbruikskost berekend met het rendement van het verwarmingssysteem en de energieprijs. Net zoals de variabelen bij de aanschafkost, wordt voor de rendementen gewerkt met gemiddelden en algemene waarden. Ook hier kunnen deze waarden in werkelijkheid variëren naargelang het gehanteerde verwarmingssysteem (Martinopoulos, Papakostas, & Papadopoulos, 2018). Daarnaast verschillen de factoren die het rendement beïnvloeden tegenover de verschillende verwarmingssystemen. Het rendement van een warmtepomp is bijvoorbeeld sterk klimaatafhankelijk terwijl dit niet het geval is voor een condensatieketel (Choi, Oh, Hwang, & Lee, 2017). Het betrekken van alle variabelen voor de rendementen valt buiten het bestek van deze thesis.

Voor de energieprijzen is gewerkt met de vergelijkingen in Tabel 3.5 die werden opgesteld aan de hand van historische data van de gemiddelde prijzen. De effectieve energieprijs die mensen betalen hangt echter af van hun afgesloten contract waardoor ook hier discrepanties tussen berekeningen en de werkelijkheid zullen optreden (CREG, 2022). Figuur 4.7 toont de impact die het verschil van energieprijs op de totale kostprijs heeft.

Tot slot zijn de (jaarlijkse) onderhoudskosten ook niet verrekend in de kosten. Net zoals de installatiekosten is er enerzijds een tekort aan bruikbare data en te veel fluctuaties. De onderhoudskost is sterk verbonden aan het verwarmingssysteem en de leeftijd (Yücer & Hepbasli, 2014). Hier wordt aangenomen dat de onderhoudskosten voor alle systemen gelijkaardig zijn en verwaarloosd kunnen worden in de berekening van de finale kostprijs. In de realiteit zal dit echter niet het geval zijn. Vooral voor ketels zullen deze hoger zijn door wettelijke verplichtingen van onderhoud (Vlaanderen, sd).

5.2.3 Uitstootkost

Net zoals de verbruikskost wordt de uitstootkost berekend met de verwarmingsrendementen waarvoor dezelfde opmerkingen gelden. Daarnaast worden de uitstoot van de energiebron en de uitstootprijzen in rekening gebracht.

Voor de uitstootfactor van de energiebronnen is gekozen om te werken met de CO₂eq-waarden. Zoals reeds vermeld gaat de effectieve uitstoot verder dan alleen het CO₂eq. De werkelijke uitstoot is afhankelijk van zowel de energiebron als het verwarmingssysteem (Pylsy, Lylykangas, & Kurnitski, 2020). De laatste generatie condensatieketels heeft bijvoorbeeld een lagere uitstoot van emissies (Barma, et al., 2017). De uitstoot van grijze stroom is bijvoorbeeld afhankelijk van de energiemix en opwekkingsmethodes (CREG, 2020). Het betrekken van alle vervuilingen vereist een apart onderzoek. Voor uniformiteit werd hier enkel met de CO₂eq-waarden gewerkt.

De maatschappelijke kosten voor klimaatverandering bepalen blijft een moeilijke opgave en varieert naargelang het gehanteerde perspectief (Ricke, Drouet, Caldeira, & Tavoni, 2018). De kostprijs voor uitstoot is in de referentiesituatie gelijkgesteld aan de EU ETS-waarde. De vraag of dit een correcte waarde is kan beargumenteerd worden (Hintermann, Peterson, & Rickels, 2016). Dit onderzoek heeft de minimale uitstootprijs berekend voor duurzame financiële voordeligheid. Hierbij wordt getoond dat de EU ETS-waarde hiervoor te laag ligt. De vraag kan bijgevolg gesteld worden of dit wel een gepaste waarde is.

5.3 Duurzame warmte

5.3.1 Algemeen

De berekende jaarlijkse kostprijs voor warmte is zowel afhankelijk van het type verwarmingssysteem als het type woning. Zoals verwacht stijgt de kostprijs aanzienlijk voor alle verwarmingssystemen met toenemende woonoppervlakte en/of afnemende isolatiegraad. Een rechtstreeks verband tussen de twee kan niet beschreven worden. De exacte verandering van het energiegebruik bij een aanpassing van de isolatiegraad hangt af van de woonoppervlakte en vice versa.

Bij de berekening van de totale kostprijs is voor beide temperatuurregimes elektrisch verwarmen de duurste optie voor alle woningen. De reden hiervoor is dat elektriciteit de duurste energiedrager is en elektrisch verwarmen een gelijkaardig rendement heeft als de condensatieketel. Zelfs indien met groene elektriciteit zou verwarmd worden, blijft het de duurste optie. Daarentegen kan elektrisch verwarmen goedkoper worden mits gebruik van eigen zonnepanelen. Of gebruik van zonnepanelen ervoor kan zorgen dat elektrisch verwarmen niet de duurste optie is, valt buiten deze thesis. Wat wel gezegd kan worden is dat de zonne-energie enkel tijdens het stookseizoen gebruikt kan worden voor verwarming zonder opslag. Met een gemiddelde jaarlijkse opwekking van 3.000 kWh zal dit slechts een beperkte besparing opleveren, zeker wanneer de investeringskost hier wordt bijgerekend.

Voor beide temperatuurregimes is aansluiting op een warmtenet de goedkoopste optie. Het warmtenet is veruit de goedkoopste optie op basis van de berekening met de warmtenuettarieven van Fluvius (zie Tabel 3.5). Vermits de prijs per kWh lager ligt dan die van de andere energiebronnen en de verbruikskost het grootste deel van de kost uitmaakt, is het logisch dat de kostprijs lager ligt. Wanneer gewerkt wordt met hetzelfde tarief als voor aardgas, blijft het warmtenet goedkoper dan aardgas, maar duurder dan stookolie tot een verbruik van ongeveer 15.000 kWh. De verklaring hiervoor ligt enerzijds in de hoge aansluitkost en anderzijds de lagere uitstootkost voor een warmtenet. Het tarief voor warmtenuetten wordt momenteel nog niet gereguleerd waardoor vergelijkingen maken moeilijk is (VREG, 2021). Desondanks volgt hier wel uit dat indien het NMDA-principe gehanteerd wordt, de aansluiting op een warmtenet financieel voordeliger is in de berekening. Er moet hier wel bij gezegd worden dat er veel variaties van warmtenuetten zijn (VREG, 2022). Hetgeen hierboven vermeld wordt, zal dus niet altijd van toepassing zijn.

De op een na duurste verwarmingsoptie is logischerwijs de methode die ook gebruik maakt van de duurste energiebron. Ondanks een beter rendement dan elektrisch verwarmen blijft een warmtepomp in de meeste situaties de op een na duurste optie. Enkel bij een laag temperatuurregime en een energiegebruik hoger dan 65.000 kWh, wat zelden zal voorkomen, is een warmtepomp goedkoper dan stookolie. De omschakeling naar groene energie verandert de positie niet en heeft slechts een vermindering in kostprijs tussen 1 en 4%. Energieopwekking met eigen zonnepanelen zou mogelijks wel een invloed kunnen spelen in de positionering van financiële voordeligheid (Lazzarin, 2020). Het effect op de prijs tegenover elektrisch verwarmen is hier groter met een factor gelijk aan de sCOP. De verklaring voor de hoge kostprijs bij een warmtepomp komt door de energieprijzen aan de ene kant en door de hoge aanschafkost aan de andere kant. De aanschafkost heeft bij de warmtepomp het grootste aandeel op de totale kost van alle verwarmingssystemen.

Na een warmtenet zijn aardgas en stookolie de financieel voordeligste verwarmingsmethoden. Dit verklaart ook direct de populariteit van verwarmen met fossiele brandstoffen binnen België. De twee fossiele verwarmingsopties liggen relatief dicht bij elkaar waarbij voor lage energiegebruiken stookolie goedkoper is en bij hoge energiegebruiken aardgas goedkoper wordt. De stookolieprijs per kWh is voordeliger dan die van aardgas, maar de uitstoot van stookolie is 63% hoger dan die van aardgas. Figuur 4.4 en Figuur 4.5 illustreren dat, ten opzichte van elkaar, bij aardgas de verbruikskosten meer doortelt en bij stookolie de uitstootkosten.

De filosofie achter de invoering van de uitstootkosten heeft twee luiken. Enerzijds dient het om ervoor te zorgen dat er een tarief betaald wordt ter compensatie voor de maatschappelijke kosten van klimaatverandering. Anderzijds dient de invoering ervoor om duurzame verwarmingsmethoden financieel voordeliger te maken. Het eerste luik is gedekt, zij het argumentatief. Het tweede luik is enkel het geval voor het warmtenet, waarbij het zelfs zonder uitstootkosten voordelig blijft. Doordat een warmtepomp de op een na duurste optie blijft, toont dit dat de EU ETS-waarde onvoldoende blijkt te zijn voor financiële voordeligheid. De uitstootkosten zorgen voor een prijsstijging van 13 tot 21% voor aardgas en 27 tot 33% voor stookolie ten opzichte van maar 2 tot 4% voor een warmtepomp. Desalniettemin is dit ontoereikend om de financiële posities te veranderen. Zolang de aanschafkosten en energiekosten van een warmtepomp zo hoog blijven tegenover de andere opties is een hogere uitstootkosten vereist om financieel competitief te zijn.

5.3.2 Invloed isolatie

Tabel 4.5 toont de invloed van het isoleren van een woning op de totale warmtekostenprijs. Gaan van een isolatiegraad van 0% naar een isolatiegraad van 100% zorgt voor een warmteprijsreductie van 57% tot 73%. Zelfs een beperkte verbetering van de isolatiegraad met 10% zorgt al voor een warmteprijsreductie van 6% tot 30%. Percentueel wordt er meer bespaard naarmate de woonoppervlakte kleiner en de isolatiegraad hoger is.

Bij een goede isolering worden bepaalde verwarmingsopties zelfs voordeliger dan hun tegenhangers. Tabel 4.5 toont dat een warmtepomp in een goed geïsoleerde woning een goedkopere optie is dan stookolie of aardgas in een slecht geïsoleerde woning. In een perfect geïsoleerde woning is zelfs elektrisch verwarmen in nagenoeg alle situaties een financieel voordeligere optie dan aardgas en stookolie in een slecht geïsoleerde woning.

De resultaten van de totale kostenprijs tonen het belang en de impact van een goede isolering voor een woning. Het isoleren van woningen zorgt voor een reductie van de warmtepreisen. Eveneens illustreert dit ook het probleem van financiële ongelijkheid. Mensen die kunnen investeren in isolatie worden beloond met een lagere warmteprijs terwijl degene die dit niet kunnen, achterblijven met hoge warmtepreisen. Het betrekken van woningisolatie in de berekening van een duurzame warmteprijs moet bijgevolg zowel vanuit een financieel als sociaal perspectief gebeuren. Dit neemt echter niet het belang weg van het isoleren van woningen op de warmtepreisen.

5.3.3 Verbruikskost

Zoals reeds vermeld speelt de energiekost een belangrijke rol in de financiële voordeligheid van verwarmingssystemen. Figuur 4.7 illustreert de invloed van de energieprijzen op de totale kost. De positionering van goedkoopste tot duurste verwarmingsoptie varieert doorheen de tijd. De energieprijzen in maart en april 2022 zorgden ervoor dat een warmtepomp financieel voordeliger was voor grote energiegebruikers bij een laag temperatuursregime. De totale kostprijs steeg in de periode maximaal tot 24% in het laagste geval (warmtepomp en laag energiegebruik) tot zelfs 128% in het hoogste geval (aardgas en hoog energiegebruik). De impact van de energieprijzen mag bijgevolg niet verwaarloosd worden in de bepaling van een duurzame warmteprijs. De energieprijzen verschillen niet enkel van elkaar in kostprijs, maar ook in samenstelling, hetgeen reeds in deel 2.2 werd toegelicht. De energieprijs voor aardgas bestaat grotendeels uit de energiekost, terwijl dit voor elektriciteit en stookolie niet het geval is. De overheid kan zodoende de energieprijzen beïnvloeden richting een duurzamere energieprijs.

Een middel dat de energieprijzen beïnvloedt is het btw-percentage. Figuur 4.8 en Figuur 4.9 tonen de impact van de btw op de totale kostprijs. De totale kostprijs voor de duurzame verwarmingsmethoden kan gereduceerd worden met 7 tot 14% door het weghalen van de btw. Door middel van verhogingen en verlagingen van het btw-percentage kan zoals aangetoond de financiële kloof tussen de warmtepomp en fossiele brandstoffen deels of volledig gedicht worden. Voor hoge energiegebruikers bij een laag temperatuursregime is, bij 0% btw voor elektriciteit en 21% voor fossiele brandstoffen, een warmtepomp financieel voordeliger. Voor de andere situaties voldoet een btw-verlaging niet om de kloof volledig te dichten. Niettemin kan de regelgeving van de btw bijdragen tot een duurzamere energieprijs.

5.3.4 Uitstootkost

De uitstootkost kan een aanvullend antwoord bieden op de vraag van de kostprijs voor duurzame warmte. Het bepalen van de juiste uitstootkost is afhankelijk van verschillende factoren. Niet enkel de uitstootfactoren hebben een invloed op de uitstootkost en de totale prijs. Figuur 4.10 en Figuur 4.11 tonen dat ondanks een quasi identieke uitstootfactor voor elektriciteit en aardgas, dat een verhoging van de kostprijs voor uitstoot zwaarder doorweegt voor aardgas. De verhoging van de kostprijs voor uitstoot van € 0,065/kg CO₂eq naar € 0,20/kg CO₂eq zorgt voor een prijsstijging van 23 tot 37% voor aardgas en 44 tot 53% voor stookolie. Voor elektrisch verwarmen is dit slechts 8 tot 13% en voor een warmtepomp 3 tot 10%. Wanneer Figuur 4.4 en Figuur 4.5 hierbij betrokken worden, is duidelijk te zien dat dit voor elektriciteit komt door de hoge verbruikskost. Voor een warmtepomp komt dit gedeeltelijk door de hoge aanschafkost en gedeeltelijk door het rendement waardoor de impact minder doortelt. Louter blindelings een kostprijs voor uitstoot invoeren heeft bijgevolg geen zin zonder de andere kosten en hun invloed mee in rekening te brengen.

Ondanks het zwaarder doorwegen van de verhoging van de CO₂eq-prijs bij de fossiele brandstoffen, blijkt de maximale limiet van € 0,20/kg CO₂eq onvoldoende voor nagenoeg alle situaties. Voor aardgas is dit enkel voor een laag temperatuursregime en een hoog energiegebruik. Voor stookolie is dit bij beide temperatuurregimes, maar enkel bij hoge energiegebruiken. Tabel 4.9, Figuur 4.12 en Figuur 4.13 tonen de minimale CO₂eq-prijzen die nodig zijn om de duurzame verwarmingsmethoden financieel voordelig te maken.

De minimale uitstootprijs is sterk afhankelijk van de omstandigheden. Niet alleen daalt de minimale prijs met stijgende woonoppervlakte en/of dalende isolatiegraad door het stijgend energiegebruik. De uitstootprijs hangt ook af van de twee verwarmingsmethoden waarmee vergeleken wordt. Voor warmtenetten bij het tarief van Fluvius is de minimale uitstootprijs gelijk aan nul terwijl dit voor eenzelfde tarief als de fossiele brandstoffen bij lage verbruiken niet zo is. Voor een warmtepomp daalt de minimale prijs met 15 tot 39% wanneer groene stroom in plaats van grijze stroom gebruikt wordt. Het kiezen van een minimale kostprijs voor uitstoot zal dus afhangen van de benchmark waartegenover vergeleken wordt.

De minimale uitstootprijzen vertonen een exponentieel verloop. Dit komt doordat in het begin, voor de bepaling van de minimale uitstootprijs, zowel de aanschafkost als het verbruik de kostprijs bepalen. Naarmate de woonoppervlakte toeneemt, speelt de verbruikskost een grotere rol en dicteert deze de kostprijs. De minimale uitstootprijzen migreren naar een finale waarde die bepaald wordt door de rendementen, energieprijzen en uitstootfactoren.

Wat opvalt bij de berekende minimale uitstootprijzen is de discrepantie met de EU ETS-waarde. De prijzen voor het warmtenet liggen zo goed als allemaal onder de waarde. De prijzen voor de warmtepomp daarentegen liggen in zo goed als alle situaties boven de waarde tot zelfs 17 keer zo hoog in de meest extreme situatie. Enkel bij een laag temperatuursregime en hoog verbruik van stookolie komt de minimale kostprijs net onder de ETS-waarde te liggen. Dit toont aan dat afhankelijk van de factoren de financiële kloof bij een warmtepomp substantieel is.

6 CONCLUSIE

Het bepalen van een duurzame warmteprijs is geen eenduidige opgave en kan op verschillende manieren aangepakt worden. Onder een duurzame warmteprijs werd binnen dit onderzoek een kostprijs verstaan die enerzijds de maatschappelijke kosten van klimaatverandering dekt en anderzijds de transitie richting hernieuwbare warmte bevordert. Het doel van dit onderzoek was vanuit een duurzaam standpunt een inleidend antwoord bieden op de vraag wat de prijs voor warmte moet zijn en of de manier waarop warmte gemaakt wordt moet meetellen in de prijs. Dit werd beoogd in drie stappen: het opstellen van een warmtemodel, het bepalen van een totale kostprijs voor warmte en een sensitiviteitsanalyse.

Het warmtemodel werd opgesteld om op basis van de woonoppervlakte en isolatiegraad een theoretisch energiegebruik te voorspellen. De toename van het energiegebruik bij stijgende woonoppervlakte en dalende isolatiegraad werd in kaart gebracht. Het model maakt gebruik van versimpelde thermodynamische formules om de transmissie- en ventilatieverliezen te berekenen. Ten opzichte van een EPB-referentiewaarde bleek het model relatief accuraat te zijn. Desondanks dient een bijkomstig onderzoek met data van werkelijke energiegebruiken uitgevoerd te worden om de accuraatheid en precisie met de werkelijkheid te bepalen. Binnen het kader van dit onderzoek volstond het model om een adequate indicatie te geven.

Aan de hand van het voorspelde energiegebruik kon een totale kostprijs voor warmte berekend worden. De totale kostprijs bestaat uit een aanschafkost, een verbruikskost en een uitstootkost. Een aansluiting op een warmtenet bleek de goedkoopste verwarmingsmethode te zijn terwijl elektrisch verwarmen de duurste optie was. Aardgas en stookolie namen plaats twee en drie in, waarbij gebruik van stookolie goedkoper was bij lage energiegebruiken en aardgas bij hoge energiegebruiken. Het aanschaffen van een warmtepomp bleek de op een na duurste optie te zijn in nagenoeg alle situaties.

De verhouding van de drie kosten verschilde tussen de verwarmingsmethoden. De verbruikskost vormde in zo goed als alle gevallen de grootste kost, maar woog het zwaarste door waar de energieprijzen en/of het verbruik het hoogste waren. De aanschafkosten hadden een beperkte bijdrage in het totaal, buiten voor een warmtepomp en bij lage energiegebruiken voor een warmtenet, waar de investering zwaarder doortelt in het geheel. De uitstootkost woog het zwaarste door voor de verwarmingssystemen op fossiele brandstof die zorgde voor een prijsstijging van 13 tot 33%. Voor een warmtepomp bedroeg de prijsstijging door de uitstootkost daarentegen slechts 2 tot 4%.

Het belang van isolatie werd aangetoond bij de berekening van de warmteprijs. Gaan van een isolatiegraad van 0% naar een isolatiegraad van 100% zorgde voor een warmteprijsreductie van 57% tot 73%. Zelfs een verbetering van de isolatiegraad met 10% leverde een warmteprijsreductie van 6 tot 30% op. Daarbovenop bleek een warmtepomp financieel voordeliger te zijn bij een goede isolatie in vergelijking met de fossiele tegenhangers bij een slecht geïsoleerde woning. De isolatie van een woning is een belangrijke factor voor de bepaling van een duurzame warmteprijs. Zowel vanuit een financieel als vanuit een sociaal perspectief moet deze betrokken worden in de berekening.

De energieprijis was een van de factoren die een aanzienlijke impact op de totale kostprijs had. Bij het in rekening brengen van de energieprijzen van september 2021 t.e.m. april 2022 steeg de totale kostprijs in de meest extreme situatie tot zelfs 128% ten opzichte van de laagste prijs. De berekening demonstreerde dat het mogelijk is om via de energieprijis de financiële verhoudingen van de verwarmingsopties aan te passen.

De energieprijzen zijn niettemin afhankelijk van verschillende zaken waardoor deze niet zomaar willekeurig aangepast kunnen worden. Een middel en deel van de energieprijis dat echter wel vanuit de overheid kan aangepast worden, wat met de huidige stijgingen van de energieprijzen reeds werd uitgevoerd, is de btw. De resultaten wezen uit dat, afhankelijk van de andere factoren, aanpassingen van het btw-tarief de hernieuwbare verwarmingsmethoden financieel aantrekkelijker kunnen maken. Voor sommige gevallen kon via de btw een warmtepomp zelfs financieel voordeliger gemaakt worden dan aardgas en stookolie. Om een warmtepomp financieel voordeliger te maken voor alle situaties werd getoond dat dit niet enkel via btw-verlagingen kan behaald worden. Desondanks tonen de resultaten de potentiële kracht van btw-aanpassingen richting een duurzame maatschappij.

Het hanteren van de EU ETS-waarde als uitstootprijs bleek onvoldoende te zijn voor nagenoeg alle situaties om een warmtepomp financieel voordeliger te maken. Voor warmtenetten was dit wel het geval, vrijwel zelfs indien de berekening met dezelfde tariefprijzen als de fossiele brandstoffen werd gemaakt. Daarenboven was een maximaal geachte uitstootprijs van € 0,20/kg CO₂eq, die driemaal zo hoog als de EU ETS-waarde lag, nog altijd onvoldoende om een warmtepomp financieel voordeliger te maken in nagenoeg alle situaties. Voor een gemiddeld gezinsgebruik van 20.000 kWh is de maximale uitstootprijs enkel voldoende bij lage temperatuurregimes. Indien groene stroom gebruikt wordt bij een warmtepomp daalt de minimale benodigde uitstootprijs tussen 15 en 39%, maar blijft deze in verschillende gevallen hoger dan de maximaal geachte uitstootwaarde van € 0,20/kg CO₂eq.

De totale kostprijs voor warmte wees aan dat een aanpassing van een individuele factor een verschillend effect zal geven voor elke verwarmingsmethode. Doordat er geen rechtlijnig verband tussen de verwarmingssystemen is, werd het belang aangetoond van de aanpassing van een individuele factor op het geheel. Voor de bepaling van een duurzame warmteprijs kan dus niet naar slechts één factor gekeken worden.

Uit dit onderzoek kan geconcludeerd worden dat het bepalen van een correcte warmteprijs vanuit een duurzaam standpunt een multicriteria analyse inhoudt. Eerst en vooral moet een benchmark gesteld worden die het toekomstbeeld van duurzaam verwarmen bepaalt. Vervolgens kunnen vanuit verschillende invalshoeken, waaronder beleid, de benodigde invloedfactoren bepaald worden. De factorkeuzes zullen multidisciplinair moeten zijn en rekening houden met alle facetten die invloed op de kostprijs uitoefenen. Van zodra de factoren bepaald zijn kan een duurzame warmteprijs berekend worden. De prijs die voor warmte betaald moet worden, zal bijgevolg een afgewogen prijs zijn bestaande uit een aanschaf-, verbruiks- en uitstootkost die de transitie richting duurzaam verwarmen bevordert. De resultaten tonen aan dat mits de juiste selectie en afweging van alle factoren ons energiegebruik voor verwarming kan en zal verduurzamen.

7 AANBEVELINGEN

Bijkomend onderzoek dient uitgevoerd te worden om de accuraatheid en precisie van het warmtemodel tegenover de realiteit te achterhalen. Vergelijking met reële gebruiksdata en statistische analyse zijn nodig om verbeterpunten op te sporen. Het model kan als volgt uitgebreid worden om enerzijds de werkelijkheid beter te benaderen en anderzijds meer situaties te behandelen.

De berekening en analyse van de totale kostprijs voor warmte kan uitgebreid worden. Aan de ene kant kunnen meerdere verwarmingsmethoden toegevoegd worden zoals houtpellets of micro-WKK. Langs de andere kant kunnen meerdere kosten in het totaal binnengebracht worden zoals de onderhoudskosten en installatiekosten. Beide uitbreidingen maken een betere vergelijking mogelijk.

De prijs van warmte is een dynamische entiteit waardoor niet blind mag gestaard worden op eenmalig berekende kostprijzen zoals in dit onderzoek. Voldoende rekening dient gehouden te worden met de tijdsfactor en regelmatige herberekeningen zijn cruciaal. De impact van bepaalde beslissingen doorheen de tijd mag niet verwaarloosd worden waardoor het belangrijk is dat breed genoeg naar de resultaten gekeken wordt.

Bij prijsberekeningen en daaraan gekoppelde prijsveranderingen dient rekening gehouden te worden met alle klassen van de maatschappij. Warmte blijft een primair goed en de verduurzaming mag niet ten koste gaan van de levenskwaliteit van mensen. Prijsberekeningen dienen gepast rekening te houden met de maatschappij. De integratie van een sociale factor in de totstandkoming van prijzen mag niet verwaarloosd worden en is cruciaal.

Referenties

- Accubel. (2017, April). Price list. Eupen, België: Ochsner.
- Aminov, R., Yurin, V., & Murtazov, M. (2021). Efficiency and economic assessment of combining nuclear power plants with multifunctional heat accumulation systems. *Int J Energy Res*, 45(8), 12464-12473. doi:10.1002/er.6580
- Anderson, B., & Kosmina, L. (2019). *Conventions for U-value calculations* (3 ed.). Building Research Establishment.
- Baert, D., Segers, F., & Belga. (2022, Februari 2). *Wie weinig stroom verbruikt kan tot 100 euro meer betalen door capaciteitstarief*. Geraadpleegd op Mei 5, 2022, van VRT: <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2022/02/01/bijna-derde-huishoudens-zal-energiefactuur-licht-zien-stijgen/#:~:text=Kleine%20verbruikers&text=Afhankelijk%20van%20het%20soort%20meter,per%20jaar%2C%20aan%20het%20capaciteitstarief>.
- Bălănescu, D., & Homutescu, V. (2019). Study on condensing boiler technology potential accounting various fuels. *Procedia Manufacturing*, 32, 504-512.
- Baldi, S., Quang, T. L., Holub, O., & Endel, P. (2017). Real-time monitoring energy efficiency and performance degradation of condensing boilers. *Energy Conversion and Management*, 136, 329-339. doi:10.1016/j.enconman.2017.01.016
- Barma, M., Saidur, R., Rahman, S., Allouhi, A., Akash, B., & Sait, S. M. (2017). A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 970-983. doi:10.1016/j.rser.2017.05.187
- Best, I. (2018). Economic comparison of low-temperature and ultra-low-temperature district heating for new building developments with low heat demand densities in Germany. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 16, 45–60. doi:10.5278/ijsepm.2018.16.4
- Bracke, J. (2015, December 29). *Hoe wordt een E-peil eigenlijk berekend?* Geraadpleegd op Maart 26, 2022, van bouw-energie: <https://bouw-energie.be/nl-be/blog/post/e-peil-berekening>
- Buderus. (2022). *Prijslijsten*. Geraadpleegd op April 18, 2022, van Buderus: <https://www.buderus.com/be/nl/partners/installateurs/documentatie/prijslijsten/>
- Buldit BV. (2022, Januari). *Verwarmen op mazout*. Geraadpleegd op Mei 5, 2022, van Centraleverwarmingcv: <https://www.centraleverwarmingcv.be/mazout#:~:text=Een%20gemiddeld%20gezin%20verbruikt%20jaarlijks,2.012%2C70%20voor%203.000%20liter>
- Çengel, Y., & Boles, M. (2014). *Thermodynamics An Engineering Approach*. Boston: McGraw-Hill Education.
- Cespi, D., Passarini, F., Ciacci, L., Vassura, I., Castellani, V., Collina, E., & Morselli, L. (2014). Heating systems LCA: comparison of biomass-based appliances. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 89-99. doi:10.1007/s11367-013-0611-3

- Choi, S., Oh, J., Hwang, Y., & Lee, H. (2017). Life cycle climate performance evaluation (LCCP) on cooling and heating systems in South Korea. *Applied Thermal Engineering*, 120, 88-98. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.03.105
- Constructiv. (2020). *Warmtebelasting Berekenen Praktische Uitwerking*. Brussel: Constructiv.
- CREG. (2020, Januari 30). Nota over de opvallende evoluties op de Belgische groothandelsmarkten voor elektriciteit en aardgas in 2019. Brussel, België: CREG.
- CREG. (2022, April). *Hoe is de energieprijis opgebouwd?* Geraadpleegd op Mei 23, 2022, van CREG: <https://www.creg.be/nl/consumenten/prijzen-en-tarieven/hoe-de-energieprijis-opgebouwd>
- Daglicht in gebouwen (NBN EN 17037:2018+A1:2021) [Norm]. (2021, December 25). Brussel: Bureau voor Normalisatie. Geraadpleegd op April 26, 2022
- Daikin. (n.d.). *8 Misconceptions about Underfloor Heating*. Geraadpleegd op Mei 23, 2022, van Daikin: https://www.daikin.eu/en_us/daikin-blog/8-misconceptions-underfloor-heating.html
- De Cooman, L., & Pauwels, L. (2021, Oktober 4). *Hogere energieprijzen maken gezinnen warm voor hout- en pelletkachels: verkopers melden forse stijging in verkoop*. Geraadpleegd op Maart 7, 2022, van vrtnews: <https://www.vrt.be/vrtnews/nl/2021/10/03/vlaamse-milieumaatschappij-waarschuwt-houtkachels-zijn-zeer-ve/>
- de Meester, T., Marique, A., De Herde, A., & Reiter, S. (2013). Impacts of occupant behaviours on residential heating consumption for detached houses in a temperate climate in the northern part of Europe. *Energy and Buildings*, 57, 313-323. doi:10.1016/j.enbuild.2012.11.005
- De Wolf, L. (2022, Januari 12). *Mogelijke btw-verlaging op energie: oplossing voor energiearmoede of doekje voor het bloeden?* Geraadpleegd op Mei 5, 2022, van VRT: <https://www.vrt.be/vrtnews/nl/2022/01/12/mogelijke-btw-verlaging-op-energie-oplossing-voor-energiearmoede/>
- Delbeke, K. (2019, April 25). *Prijverschil tussen elektriciteit en gas nergens groter dan in België*. Geraadpleegd op Maart 6, 2022, van De Standaard: https://www.standaard.be/cnt/dmf20190424_04349211?adh_i=&imai=&articlehash=MKIz1mL6B%2Bi70WT%2Bs%2B5xWoEfrwRkJ2xM%2FPOzSfdoFOV7mfUjsRCXwgorVD525RVoedt0Odx9R2Gp%2BQxv3dchTDgStYHsPYbtQw5k3rg5m1bttIAaP0u2RSREteqg3qdTiHpgxzcgQyQ4j64MRii%2FKUaMBCD6vFrnpSoDoKUF
- Departement Omgeving. (2020, Juni). *Energiegebruik door huishoudens*. Geraadpleegd op Februari 24, 2022, van Milieurapport: <https://www.milieurapport.be/sectoren/huishoudens/brongebruik/energiegebruik>
- do Carmo, C. M., & Christensen, T. H. (2016). Cluster analysis of residential heat load profiles and the role of technical and household characteristics. *Energy and Buildings*, 125, 171-180. doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.079
- Economidou, M., Todeschi, V., Bertoldi, P., D'Agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2020). Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. *Energy and Buildings*, 225, 110322. doi:10.1016/j.enbuild.2020.110322

- Electraboiler. (2022). *Elektrische boilers en CV ketels | Zuinig en kwalitatief*. Geraadpleegd op April 18, 2022, van Electraboiler: <https://electraboiler.nl/>
- Energia. (2022). *Evolutie*. Geraadpleegd op Maart 8, 2022, van Energiafed: <https://www.energiafed.be/nl/maximumprijzen/evolutie>
- EnergieID & CO2logic. (2021, April 28). *Overzicht*. Geraadpleegd op April 27, 2022, van CO2Emissiefactoren: <https://www.co2emissiefactoren.be/factoren>
- Engie. (2020, Juni 12). *Hoeveel kost een nieuwe condensatieketel?* Geraadpleegd op Maart 15, 2022, van Engie: <https://www.engie.be/nl/blog/verwarming/een-nieuwe-cv-ketel-heb-je-snel-terugverdiend/>
- Europese Commissie. (2021). *2030 climate & energy framework*. Geraadpleegd op Februari 22, 2022, van Europese Commissie: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_nl
- Europese Commissie. (2021). *Langetermijnstrategie voor 2050*. Geraadpleegd op Februari 22, 2022, van Europese Commissie: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_nl#ecl-inpage-916
- Eurostat. (2022). *Energy consumption in households*. Geraadpleegd op Februari 22, 2022, van Eurostat: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households#Energy_products_used_in_the_residential_sector
- FEBEG. (2022, Maart 31). *Tijdelijke btw-verlaging tot 6% op gas en elektriciteit*. Geraadpleegd op Mei 17, 2022, van FEBEG: <https://www.febeg.be/nieuwsbericht/tijdelijke-btw-verlaging-tot-6-op-gas-en-elektriciteit#:~:text=6%25%20btw%20op%20het%20verbruik,en%20na%2030%20september%202022>
- Fluvius. (2021). *Aansluittarieven warmte*. Geraadpleegd op April 18, 2022, van Fluvius: <https://www.fluvius.be/nl/thema/aansluitingen/tarieven-warmte>
- FOD Economie. (2021). *Energy Key Data - Editie februari 2021*. Vooruitgangstraat 50, 1210 Brussel: FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie. Geraadpleegd op Februari 23, 2022
- FOD Economie. (2022, April 20). *Sociaal tarief voor elektriciteit en/of aardgas*. Geraadpleegd op Mei 6, 2022, van Economie: <https://economie.fgov.be/nl/themas/energie/energie-prijzen/sociaal-tarief-voor>
- FOD Kanselarij. (2022, Maart 11). *Sociaal tarief warmte*. Geraadpleegd op Mei 6, 2022, van news.belgium: <https://news.belgium.be/nl/sociaal-tarief-warmte>
- Galindo Fernández, M., Roger-Lacan, C., Gährs, U., & Aumaitre, V. (2018). Efficient district heating and cooling systems in the EU : case studies analysis, replicable key success factors and potential policy implications. *Publications Office*. doi:10.2760/371045
- Gas. (2022). *Graaddagen*. Geraadpleegd op April 25, 2022, van Gas: <https://www.gas.be/nl/graaddagen/>
- Hansen, C. H., & Gudmundsson, O. (2018). *The competitiveness of district heating compared to individual heating*. Green Energy Association.
- Het Vlaams Energie- en Klimaatagentschap. (2021). *Vlaams Energie- en Klimaatplan 2021-2030*. Geraadpleegd op Februari 24, 2022, van Energiesparen.

- Hinrichs, J., Felsmann, D., Schweitzer-De Bortoli, S., Tomczak, H., & Pitsch, H. (2018). Numerical and experimental investigation of pollutant formation and emissions in a full-scale cylindrical heating unit of a condensing gas boiler. *Applied Energy*, 229, 977-989.
- Hintermann, B., Peterson, S., & Rickels, W. (2016). Price and Market Behavior in Phase II of the EU ETS: A Review of the Literature. *Review of Environmental Economics and Policy*, 10, 108-128. doi:10.1093/reep/rev015
- Hummen, T., & Desing, H. (2021). When to replace products with which (circular) strategy? An optimization approach and lifespan indicator. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105704. doi:10.1016/j.resconrec.2021.105704
- Informazout. (2022, April). *De officiële mazoutprijen*. Geraadpleegd op April 18, 2022, van Informazout: <https://informazout.be/nl/mazout/prijen#:~:text=Actuele%20prijzen&text=%E2%82%AC%201.2599%2F1.,%E2%82%AC%201.228%2F1>.
- Jahangiri, M., Shamsabadi, A. A., & Saghaei, H. (2018). Comprehensive Evaluation of Using Solar Water Heater on a Household Scale in Canada. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 5, 35-42. doi:10.30501/jree.2018.88491
- Jiru, T. E., Kaufman, B. G., Ileleji, K. E., Ess, D. R., Gibson, H. G., & Maier, D. E. (2010). Testing the performance and compatibility of degummed soybean heating oil blends for use in residential furnaces. *Fuel*, 89, 105-113. doi:10.1016/j.fuel.2009.07.028
- Jobat. (2022, April 1). *Hoeveel bedraagt jouw minimumloon?* Geraadpleegd op Mei 6, 2022, van Jobat: <https://www.jobat.be/nl/art/heb-ik-recht-op-een-minimumloon>
- Johnson, E. (2012). Carbon footprints of heating oil and LPG heating systems. *Environmental Impact Assessment Review*, 35, 11–22. doi:10.1016/j.eiar.2012.01.004
- Johnson, G., & Beausoleil-Morrison, I. (2016). The calibration and validation of a model for predicting the performance of gas-fired tankless water heaters in domestic hot water applications. *Applied Energy*, 177, 740-750.
- Karatasou, S., Laskari, M., & Santamouris, M. (2018). Determinants of high electricity use and high energy consumption for space and water heating in European social housing. *Energy and Buildings*, 170, 107-114.
- Kaynakli, O. (2008). A study on residential heating energy requirement and optimum. *Renewable Energy*, 33, 1164–1172. doi:10.1016/j.renene.2007.07.001
- Kinab, E., Marchio, D., & Riviere, P. (2008). Seasonal coefficient of performance of heat pumps. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference* (p. 2312). Parijs: Ecole des Mines de Paris.
- Kobus, C. B., Klaassen, E. A., & Slootweg, J. G. (2014). Slimme warmtepomp let op energieprijen. *Energie+*, pp. 10-13.
- Lazzarin, R. (2020). Heat pumps and solar energy: A review with some insights in the future. *International Journal of Refrigeration*, 116, 146-160. doi:10.1016/j.ijrefrig.2020.03.031
- Majcen, D., Itard, L., & Visscher, H. (2015). Statistical model of the heating prediction gap in Dutch dwellings: Relative importance of building, household and behavioural characteristics. *Energy and Buildings*, 105, 43-59. doi:10.1016/j.enbuild.2015.07.009

- Martinopoulos, G., Papakostas, K. T., & Papadopoulos, A. M. (2018). A comparative review of heating systems in EU countries, based on efficiency and fuel cost. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 687-699.
- Mateu-Royo, C., Sawalha, S., Mota-Babiloni, A., & Navarro-Esbrí, J. (2020). High temperature heat pump integration into district heating network. *Energy Conversion and Management*, 210, 112719. doi:10.1016/j.enconman.2020.112719
- Mazoutonline. (2016). *Hoe wordt de officiële prijs voor mazout in België vastgelegd?* Geraadpleegd op Maart 9, 2022, van mazoutonline: <https://www.mazout-online.be/nl/mazoutprijs-in-belgie/bepaling-van-de-mazoutprijs/>
- Mohammadpourkarbasi, H., & Sharples, S. (2022). Appraising the life cycle costs of heating alternatives for an affordable low carbon retirement development. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101693. doi:10.1016/j.seta.2021.101693
- Najjar, M. K., Figueiredo, K., Hammad, A. W., Tam, V. W., Evangelista, A. C., & Haddad, A. (2019). A framework to estimate heat energy loss in building operation. *Journal of Cleaner Production*, 235, 789-800. doi:10.1016/j.jclepro.2019.07.026
- Neirotti, F., Noussan, M., & Simonetti, M. (2020). Evaluating the Emissions of the Heat Supplied by District Heating Networks through A Life Cycle Perspective. *Clean Technologies*, 2(4), 392-405. doi:10.3390/cleantechnol2040024
- Østergaard, D. S., & Svendsen, S. (2016). Theoretical overview of heating power and necessary heating supply temperatures in typical Danish single-family houses van the 1900s. *Energy and Buildings*, 126, 375-383. doi:10.1016/j.enbuild.2016.05.034
- Pereira, J. S., Ribeiro, J. B., Mendes, R., Vaz, G. C., & André, J. C. (2018). ORC based micro-cogeneration systems for residential application – A state of the art review and current challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 728-743. doi:10.1016/j.rser.2018.04.039
- Pezzutto, S., Croce, S., Zambotti, S., Kranzl, L., Novelli, A., & Zambelli, P. (2019). Assessment of the Space Heating and Domestic Hot Water Market in Europe—Open Data and Results. *Energies*, 12, 1760. doi:10.3390/en12091760
- Pospíšil, J., Špiláček, M., & Charvát, P. (2019). Seasonal COP of an Air-to-Water Heat Pump when Using Predictive Control Preferring Power Production van Renewable Sources in the Czech Republic. *Energies*, 12, 3236. doi:10.3390/en12173236
- Pylsy, P., Lylykangas, K., & Kurnitski, J. (2020). Buildings' energy efficiency measures effect on CO2 emissions in combined heating, cooling and electricity production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 1364-0321. doi:10.1016/j.rser.2020.110299
- Rehfeldt, M., Worrell, E., Eichhammer, W., & Fleiter, T. (2020). A review of the emission reduction potential of fuel switch towards biomass and electricity in European basic materials industry until 2030. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109672. doi:10.1016/j.rser.2019.109672
- Ricke, K., Drouet, L., Caldeira, K., & Tavoni, M. (2018). Country-level social cost of carbon. *Nature Climate Change*, 8, 895–900. doi:10.1038/s41558-018-0282-y
- Rijksoverheid. (2022, April 22). *Bouwbesluit 2012*. Geraadpleegd op April 26, 2022, van Rijksoverheid: <https://rijksoverheid.bouwbesluit.com/Inhoud/docs/wet/bb2012>

- Sandbag. (2022, April). *EUA Futures*. Geraadpleegd op April 29, 2022, van Sandbag: <https://sandbag.be/index.php/carbon-price-viewer/>
- Santin, O. G., Itard, L., & Visscher, H. (2009). The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy and Buildings*, 41(11), 1223-1232. doi:10.1016/j.enbuild.2009.07.002
- Sayegh, M., Danielewicz, J., Nannou, T., Miniewicz, M., Jadwiszczak, P., Piekarska, K., & Jouhara, H. (2017). Trends of European research and development in district heating technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(2), 1183-1192. doi:10.1016/j.rser.2016.02.023
- Sayegh, M., Jadwiszczak, P., Axcell, B., Niemierka, E., Bryś, K., & Jouhara, H. (2018). Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating. *Energy and Buildings*, 166, 122-144. doi:10.1016/j.enbuild.2018.02.006
- Schill, W.-P., & Zerrahn, A. (2020). Flexible electricity use for heating in markets with renewable energy. *Applied Energy*, 266, 114571.
- Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied energy*, 101, 341-348. doi:10.1016/j.apenergy.2012.01.048
- SenterNovem. (2007, April). Cijfers en tabellen 2007. VROM.
- SERV. (2016, Juni 20). Thermische netten. De betaalbare missing link tussen beschikbaarheid en behoefte van verwarming van en koeling. *Ontwerpadvies*. Brussel: SERV-Commissie Energie en Omgevingsbeleid.
- Stamp, S., Altamirano-Medina, H., & Lowe, R. (2017). Measuring and accounting for solar gains in steady state whole building heat loss measurements. *Energy and Buildings*, 153, 168-178. doi:10.1016/j.enbuild.2017.06.063
- Statistiek Vlaanderen. (2020, Januari 16). *Verwarmingswijze woning*. Geraadpleegd op Maart 7, 2022, van Statistiek Vlaanderen: <https://www.statistiekvlaanderen.be/nl/verwarmingswijze-woning>
- Stennikov, V., & Penkovskii, A. (2020). The pricing methods on the monopoly district heating market. *Energy Reports*, 6(2), 187-193. doi:10.1016/j.egy.2019.11.061
- Tsemekidi Tzeiranaki, S., Bertoldi, P., Diluiso, F., Castellazzi, L., Economidou, M., Labanca, N., & Zangheri, P. (2019). Analysis of the EU Residential Energy Consumption: Trends and Determinants. *Energies*, 12(6), 1065.
- Uriarte, I., Erkoreka, A., Giraldo-Soto, C., Martin, K., Uriarte, A., & Eguia, P. (2019). Mathematical development of an average method for estimating the reduction of the Heat Loss Coefficient of an energetically retrofitted occupied office building. *Energy and Buildings*, 192, 101-122. doi:10.1016/j.enbuild.2019.03.006
- van den Brom, P., Hansen, A. R., Gram-Hanssen, K., Meijer, A., & Visscher, H. (2019). Variances in residential heating consumption – Importance of building characteristics and occupants analysed by movers and stayers. *Applied Energy*, 250, 713-728. doi:10.1016/j.apenergy.2019.05.078

- Vander Beken, H., & Pauwels, L. (2022, Januari 12). *Energiefacturen blijven fors stijgen: contracten gemiddeld 36 procent duurder dan in december*. Geraadpleegd op Mei 6, 2022, van VRT: <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2022/01/11/energieprijzen-stijgen-40-procent/>
- VEKA. (2019). REG 2019. *Energiebewustzijn en -gedrag van Vlaamse huishoudens*. Geraadpleegd op Maart 15, 2022, van Statistiek Vlaanderen: <https://www.statistiekvlaanderen.be/nl/verwarmingswijze-woning#:~:text=16%25%20van%20de%20woningen%20werden%20verwarmd%20met%20stookolie.>
- VEKA. (2021). *Vlaamse Klimaatstrategie 2050*. Geraadpleegd op Februari 22, 2022, van Energiesparen: <https://energiesparen.be/vlaamse-klimaatstrategie-2050>
- VEKA. (2022). *EPB-eisen*. Geraadpleegd op Maart 26, 2022, van Vlaanderen: <https://www.vlaanderen.be/epb-eisen>
- VEKA. (2022, Januari). Infobrochure energieprijzen. *Energie sparen vanaf 2022? Vraag je premie aan!* Brussel, Vlaams-Brabant, België: Vlaams Energie- en Klimaatagentschap.
- Vlaamse Milieumaatschappij. (2022). *Stookadvies*. Geraadpleegd op Maart 7, 2022, van VMM: <https://www.vmm.be/lucht/evolutie-luchtkwaliteit/stookadvies>
- Vlaamse overheid. (2022). *Eisen voor nieuwe verwarmingstoestellen*. Geraadpleegd op Maart 3, 2022, van Vlaanderen: <https://www.vlaanderen.be/eisen-voor-nieuwe-verwarmings-toestellen>
- Vlaanderen. (n.d.). *Verplicht onderhoud van uw cv-installatie (centrale verwarming)*. Geraadpleegd op Mei 23, 2022, van Vlaanderen: <https://www.vlaanderen.be/verplicht-onderhoud-van-uw-cv-installatie-centrale-verwarming#ook-interessant>
- VREG. (2021, Oktober 5). Warmtenetrapport. 39. VREG.
- VREG. (2022, Maart). *Aardgasverbruik in Vlaanderen*. Geraadpleegd op Mei 5, 2022, van VREG: <https://www.vreg.be/nl/aardgasverbruik-vlaanderen>
- VREG. (2022). *Elektriciteitsverbruik in Vlaanderen*. Geraadpleegd op Mei 5, 2022, van VREG: <https://www.vreg.be/nl/elektriciteitsverbruik-vlaanderen>
- VREG. (2022). *Energiemarkt in cijfers*. Geraadpleegd op Maart 8, 2022, van VREG: <https://www.vreg.be/nl/energiemarkt-cijfers>
- VREG. (2022). *Nieuwe nettarieven*. Geraadpleegd op Maart 9, 2022, van VREG: <https://www.vreg.be/nl/nieuwe-nettarieven>
- VREG. (2022). *Warmtenetten in Vlaanderen*. Geraadpleegd op Mei 13, 2022, van VREG: <https://dashboard.vreg.be/report/Warmtenetkaart.html>
- Watkiss, P., & Downing, T. E. (2008). The social cost of carbon: Valuation estimates. *The Integrated Assessment Journal*, 8, 85-105.
- Weber, C., Gebhardt, B., & Fahl, U. (2002). Market transformation for energy efficient technologies — success factors and empirical evidence for gas condensing boilers. *Energy*, 27(3), 287-315.
- Wei, S., Jones, R., & de Wilde, P. (2014). Driving factors for occupant-controlled space heating in residential buildings. *Energy and Buildings*, 70, 36-44. doi:10.1016/j.enbuild.2013.11.001

- Werner, S. (2017). International review of district heating and cooling. *Energy*, 137, 617-631. doi:10.1016/j.energy.2017.04.045
- Wu, P., Wang, Z., Li, X., Xu, Z., Yang, Y., & Yang, Q. (2020). Energy-saving analysis of air source heat pump integrated with a water storage tank for heating applications. *Building and Environment*, 180, 107029. doi:10.1016/j.buildenv.2020.107029
- Yücer, C. T., & Hepbasli, A. (2014). Exergoeconomic and enviroeconomic analyses of a building heating system using SPECO and Lowex methods. *Energy and Buildings*, 73, 1-6. doi:10.1016/j.enbuild.2014.01.023

Bijlagen

Bijlage A Supplementaire waarden van de warmteberekeningen

Bijlage B Supplementaire figuren van de warmteberekeningen

Bijlage A SUPPLEMENTAIRE WAARDEN VAN DE WARMTEBEREKENINGEN

Tabel A.1: Berekende jaarlijkse warmtebelastingen in kWh via het warmtemodel.

A [m ²]	Q [kWh]								
	50	75	100	150	200	250	300	350	400
100%	4 361	6 080	7 740	11 260	14 279	17 915	20 819	23 673	26 487
90%	5 680	7 816	9 862	14 072	17 644	22 052	25 427	28 726	31 965
80%	6 999	9 552	11 985	16 885	21 010	26 188	30 034	33 779	37 442
70%	8 317	11 288	14 107	19 697	24 375	30 324	34 642	38 832	42 920
60%	9 636	13 025	16 230	22 509	27 740	34 461	39 250	43 885	48 398
I 50%	10 955	14 761	18 353	25 321	31 105	38 597	43 858	48 938	53 876
40%	12 273	16 497	20 475	28 134	34 470	42 733	48 466	53 992	59 354
30%	13 592	18 233	22 598	30 946	37 836	46 870	53 074	59 045	64 832
20%	14 910	19 969	24 720	33 758	41 201	51 006	57 681	64 098	70 310
10%	16 229	21 705	26 843	36 570	44 566	55 142	62 289	69 151	75 787
0%	17 548	23 441	28 966	39 383	47 931	59 279	66 897	74 204	81 265

Tabel A.2: Jaarlijkse minimale en maximale totale kost bij een laag en hoog temperatuursregime van vijf energiebronnen bij een minimale of maximale isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m². De kostprijzen omvatten de periode van september 2021 t.e.m. april 2022 met variërende energieprijzen.

	I = 100% A = 50 m ²		I = 0% A = 400 m ²	
	Min	Max	Min	Max
Laag temperatuursregime: 50/30				
Aardgas	€ 526	€ 920	€ 6 265	€ 14 094
Stookolie	€ 454	€ 721	€ 7 193	€ 12 178
Elektriciteit	€ 1 438	€ 2 333	€ 17 044	€ 34 129
Warmtepomp	€ 888	€ 1 102	€ 6 970	€ 11 199
Warmtenet	€ 247	€ 247	€ 3 012	€ 3 012
Hoog temperatuursregime: 80/60				
Aardgas	€ 575	€ 1 014	€ 6 837	€ 15 606
Stookolie	€ 500	€ 799	€ 7 904	€ 13 462
Elektriciteit	€ 1 487	€ 2 421	€ 17 653	€ 35 452
Warmtepomp	€ 1 193	€ 1 607	€ 10 729	€ 18 806
Warmtenet	€ 253	€ 253	€ 3 133	€ 3 133

Tabel A.3: Jaarlijkse totale kost bij een laag en hoog temperatuursregime van vijf energiebronnen bij een minimale of maximale isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m². De kostprijzen worden weergegeven voor een referentiesituatie (21% btw) en twee verlagingen (0% en 6% btw). Het percentuele verschil ten opzichte van de referentiesituatie wordt telkens meegegeven.

	I = 100% A = 50 m ²			I = 0% A = 400 m ²		
	0% btw	6% btw	21% btw	0% btw	6% btw	21% btw
Laag temperatuursregime: 50/30						
Aardgas	€ 453 (-14%)	€ 473 (-10%)	€ 526	€ 5 408 (-14%)	€ 5 653 (-10%)	€ 6 265
Stookolie	€ 399 (-12%)	€ 415 (-9%)	€ 454	€ 6 295 (-12%)	€ 6 552 (-9%)	€ 7 193
Elektriciteit	€ 1 210 (-16%)	€ 1 275 (-11%)	€ 1 438	€ 14 303 (-16%)	€ 15 086 (-11%)	€ 17 044
Warmtepomp	€ 818 (-8%)	€ 838 (-6%)	€ 888	€ 6 134 (-12%)	€ 6 373 (-9%)	€ 6 970
Warmtenet	€ 229 (-9%)	€ 236 (-7%)	€ 252	€ 2 684 (-14%)	€ 2 806 (-10%)	€ 3 111
Hoog temperatuursregime: 80/60						
Aardgas	€ 494 (-14%)	€ 517 (-10%)	€ 575	€ 5 903 (-14%)	€ 6 170 (-10%)	€ 6 837
Stookolie	€ 440 (-12%)	€ 457 (-9%)	€ 500	€ 6 919 (-12%)	€ 7 200 (-9%)	€ 7 904
Elektriciteit	€ 1 251 (-16%)	€ 1 318 (-11%)	€ 1 487	€ 14 815 (-16%)	€ 15 626 (-11%)	€ 17 653
Warmtepomp	€ 1 073 (-10%)	€ 1 107 (-7%)	€ 1 193	€ 9 283 (-13%)	€ 9 696 (-10%)	€ 10 729
Warmtenet	€ 235 (-9%)	€ 242 (-7%)	€ 259	€ 2 791 (-14%)	€ 2 919 (-10%)	€ 3 237

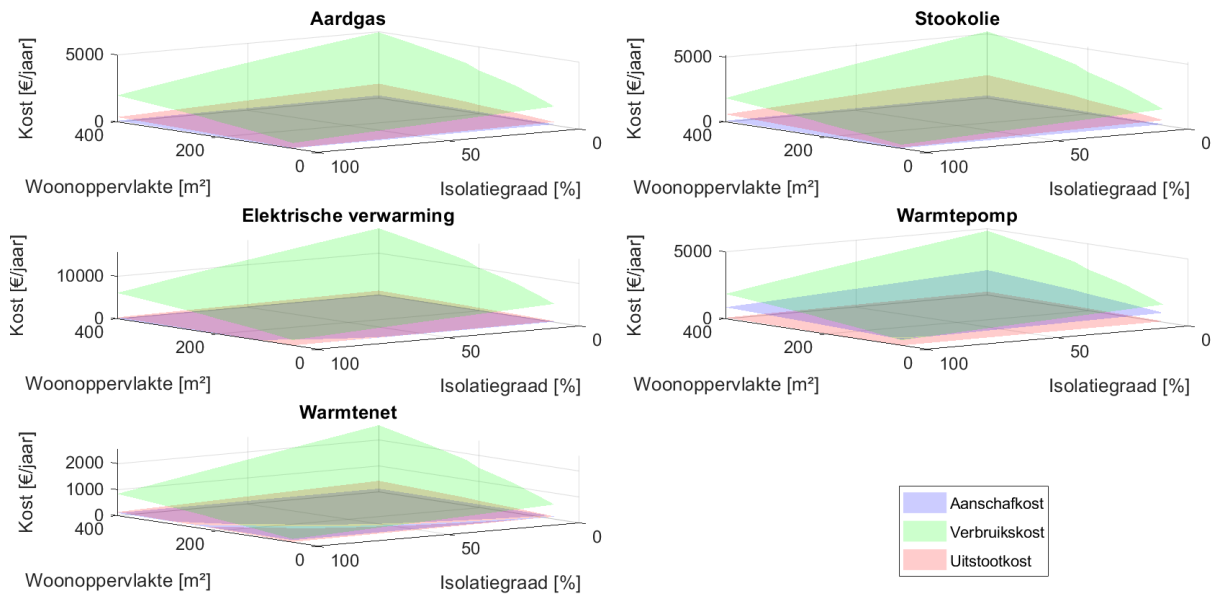
Tabel A.4: Jaarlijkse totale kost bij een laag en hoog temperatuursregime van vijf energiebronnen bij een minimale of maximale isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m². De kostprijzen worden weergegeven voor een referentiesituatie (€ 0,065 kg/CO₂eq), een minimum-situatie (€ 0 kg/CO₂eq) en een maximumsituatie (€ 0,200 kg/CO₂eq). Het percentuele verschil ten opzichte van de referentiesituatie wordt telkens meegegeven.

CO ₂ eq [€/kg CO ₂]	I = 100% A = 50 m ²			I = 0% A = 400 m ²		
	Ref (0,065)	Min (0)	Max (0,200)	Ref (0,065)	Min (0)	Max (0,200)
Laag temperatuursregime: 50/30						
Aardgas	€ 526	€ 467 (-11%)	€ 649 (+23%)	€ 6 265	€ 5 165 (-18%)	€ 8 550 (+36%)
Stookolie	€ 454	€ 357 (-21%)	€ 654 (+44%)	€ 7 193	€ 5 396 (-25%)	€ 10 925 (+52%)
Elektriciteit	€ 1 438	€ 1 379 (-4%)	€ 1 560 (+8%)	€ 17 044	€ 15 950 (-6%)	€ 19 315 (+13%)
Warmtepomp	€ 888	€ 873 (-2%)	€ 918 (+3%)	€ 6 970	€ 6 699 (-4%)	€ 7 532 (+8%)
Warmtenet	€ 247	€ 224 (-9%)	€ 293 (+19%)	€ 3 012	€ 2 596 (-14%)	€ 3 877 (+29%)
Hoog temperatuursregime: 80/60						
Aardgas	€ 575	€ 509 (-11%)	€ 711 (+24%)	€ 6 837	€ 5 611 (-18%)	€ 9 385 (+37%)
Stookolie	€ 500	€ 393 (-21%)	€ 724 (+45%)	€ 7 904	€ 5 900 (-25%)	€ 12 065 (+53%)
Elektriciteit	€ 1 487	€ 1 426 (-4%)	€ 1 614 (+9%)	€ 17 653	€ 16 513 (-6%)	€ 20 020 (+13%)
Warmtepomp	€ 1 193	€ 1 166 (-2%)	€ 1 251 (+5%)	€ 10 729	€ 10 213 (-5%)	€ 11 800 (+10%)
Warmtenet	€ 253	€ 230 (-9%)	€ 301 (+19%)	€ 3 133	€ 2 700 (-14%)	€ 4 034 (+29%)

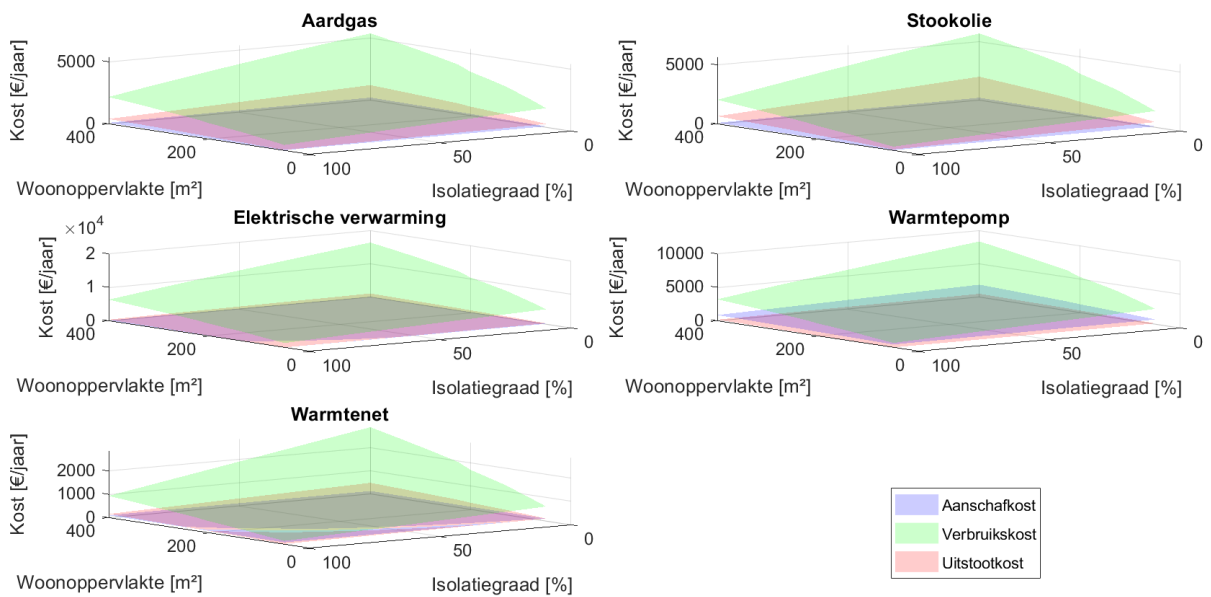
Tabel A.5: Jaarlijkse totale kost bij een laag en hoog temperatuursregime van vijf energiebronnen bij een minimale of maximale isolatiegraad (I) en een woonoppervlakte (A) van 50 of 400 m². Voor elektriciteit, warmtepomp en warmtenet wordt telkens gewerkt met een gemiddeld of grijze uitstootfactor en een groene uitstootfactor zoals beschreven in Tabel 2.3.

Verwarmingstype	I = 100% A = 50 m ²	I = 0% A = 50 m ²	I = 100% A = 400 m ²	I = 0% A = 400 m ²
Laag temperatuursregime: 50/30				
Aardgas	€ 526	€ 1 709	€ 2 430	€ 6 265
Stookolie	€ 454	€ 1 695	€ 2 519	€ 7 193
Elektriciteit - grijs	€ 1 438	€ 4 607	€ 6 536	€ 17 044
Elektriciteit - groen	€ 1 386	€ 4 398	€ 6 221	€ 16 078
Warmtepomp - grijs	€ 888	€ 2 059	€ 2 805	€ 6 970
Warmtepomp - groen	€ 875	€ 2 007	€ 2 727	€ 6 731
Warmtenet - bijstook	€ 247	€ 720	€ 1 042	€ 3 012
Warmtenet - geen bijstook	€ 233	€ 667	€ 962	€ 2 767
Hoog temperatuursregime: 80/60				
Aardgas	€ 575	€ 1 871	€ 2 658	€ 6 837
Stookolie	€ 500	€ 1 878	€ 2 788	€ 7 904
Elektriciteit - grijs	€ 1 487	€ 4 770	€ 6 768	€ 17 653
Elektriciteit - groen	€ 1 433	€ 4 552	€ 6 440	€ 16 647
Warmtepomp - grijs	€ 1 193	€ 3 066	€ 4 240	€ 10 729
Warmtepomp - groen	€ 1 169	€ 2 968	€ 4 091	€ 10 274
Warmtenet - bijstook	€ 253	€ 746	€ 1 081	€ 3 133
Warmtenet - geen bijstook	€ 239	€ 691	€ 998	€ 2 878

Bijlage B SUPPLEMENTAIRE FIGUREN VAN DE WARMTEBEREKENINGEN



Figuur B.1: 3D-plots van de verhouding van de aanschaf-, verbruiks- en uitstootkost voor de vijf energiesystemen bij een laag temperatuursregime (50/30).



Figuur B.2: 3D-plots van de verhouding van de aanschaf-, verbruiks- en uitstootkost voor de vijf energiesystemen bij een hoog temperatuursregime (80/60).

