

Hernieuwbare productie van sanitair warm water in Vlaanderen: een energetische, economische en ecologische vergelijking

Thibaut Winters

Thesis voorgedragen tot het behalen
van de graad van Master of Science
in de ingenieurswetenschappen:
energie

Promotor:

Prof. dr. ir. Lieve Helsen

Assessoren:

Prof. dr. ir. Maria Rosaria Vetrano

Prof. dr. ir.-arch Dirk Saelens

Begeleiders:

Ir. Anke Uytterhoeven

Ir. Rutger Baeten

Dr. Marc Meuris

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor als de auteur is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot Faculteit Ingenieurswetenschappen, Kasteelpark Arenberg 1 bus 2200, B-3001 Heverlee, +32-16-321350.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

Voorwoord

Een thesis is niet iets wat van de ene op de andere dag tot stand komt. Daarom zou ik graag iedereen willen bedanken die mij heeft geholpen tijdens het proces dat uiteindelijk tot deze thesistekst heeft geleid.

Als eerste zou ik graag mijn promotor, professor Lieve Helsen, willen bedanken zowel om mijn redeneringen aan een kritische blik te onderwerpen als voor de vele suggesties die ze heeft gegeven. Bij uitbreiding geldt dit uiteraard ook voor de voltallige jury, die met hun constructieve feedback tijdens de tussentijdse thesispresentatie mij een nieuwe bron van inspiratie hebben gegeven voor het tweede semester.

Ik zou ook zeer graag mijn begeleider Anke willen bedanken. Niet alleen voor de vele interessante discussies die we hebben gehad tijdens onze wekelijkse thesismeetings, maar ook voor haar positivisme, enthousiasme en haar uitgebreide, constructieve manier van feedback geven.

Uiteraard verdienen ook mijn twee externe begeleiders, Rutger en Marc, veel dank. In de eerste plaats om mee dit onderwerp uit te schrijven, wat ervoor gezorgd heeft dat ik geen enkele dag met tegenzin heb gewerkt aan mijn thesis, maar ook om hun kennis over wat er werkelijk speelt in de energiesector met mij te delen. Verder hebben ook zij veel suggesties gegeven richting interessante aspecten die onderzocht konden worden en hebben zij mij ook data van onschatbare waarde aangeleverd, waarvoor ook dank aan hun organisaties (VITO en Imec).

Tot slot wil ik ook mijn familie bedanken zowel om mij te steunen tijdens het werken aan deze thesis als bij uitbreiding tijdens mijn volledige studieloopbaan.

Thibaut Winters

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	iv
Lijst van figuren	v
Lijst van tabellen	vii
Lijst van afkortingen en symbolen	xi
1 Inleiding	1
2 Literatuurstudie	5
2.1 Sanitair Warm Water	5
2.2 Technische componenten	7
2.3 Integratie van hernieuwbare energie in de productie van sanitair warm water	12
3 Methodologie	14
3.1 Onderzochte systemen	14
3.2 Gemaakte aannames	24
3.3 Input data	27
3.4 Gewenste resultaten	30
4 Resultaten	32
4.1 Invloed optimalisatievariabelen	32
4.2 Optimalisatie van de verschillende systemen	50
5 Sensitiviteitsanalyse	64
5.1 Gebruikersprofiel	64
5.2 Stralingsdata	67
5.3 Reglementair kader	69
5.4 Aannames	74
6 Besluit	76
6.1 Conclusie	76
6.2 Vervolgonderzoek	78
A Gebruikte inputdata	80
A.1 Kostprijzen	80
A.2 Waarde overschot elektriciteit bij een digitale meter	91
A.3 Verliezen opslagvat	91

B Berekeningen	95
B.1 Bepalen van het minimale temperatuurverschil tussen de aanstuurtemperaturen van een warmtepomp	95
B.2 Residentiële productieprijs van PV-elektriciteit	96
C Optimalisaties	97
C.1 Invloed gebruikersprofiel	97
C.2 Energietekort	102
Bibliografie	103

Samenvatting

Deze thesis onderzoekt in welke mate hernieuwbare technologieën integreerbaar zijn in het productieproces van sanitair warm water, specifiek gericht op Vlaanderen. De onderzoeksvraag is drieledig: hoeveel hernieuwbare energie is integreerbaar in dit proces, hoeveel bedraagt de kost van een dergelijk hernieuwbaar systeem en hoeveel CO_2 -uitstoot kan er bespaard worden door zo een systeem te implementeren?

In deze thesis wordt er daarom een model ontwikkeld dat vijf hernieuwbare systemen en één niet-hernieuwbaar referentiesysteem (een gasboiler) onderzoekt. In het ontwikkelde model heeft de dimensionering van elk systeem meerdere vrijheidsgraden, zoals de grootte en de aansturing van bepaalde componenten.

Een eerste fase onderzoekt de invloed van de dimensionering van elk systeem op het antwoord van de drie hierboven gestelde vragen, door elk van deze vrijheidsgraden te variëren. Hieruit blijkt dat de aansturing van zowel de warmtepomp als van de elektrische naverwarming bij de hernieuwbare systemen de grootste invloed heeft op de uiteindelijke karakteristieken.

Daarna onderzoekt een tweede fase hoe deze vrijheidsgraden tegelijk gekozen kunnen worden om zo de systemen te optimaliseren in een bepaalde richting. Door energetisch te optimaliseren volgt dat de combinatie van een warmtepomp en zonnepanelen tot 96% van de gevraagde energie hernieuwbaar kan aanleveren en een CO_2 -uitstoot heeft die 22 keer lager is dan een energetisch optimale gasboiler. Uit een economische optimalisatie volgt er dat alle hernieuwbare systemen duurder zijn dan een conventionele gasboiler, zonder de huidige subsidies te beschouwen.

In een laatste fase worden alle bekomen resultaten onderworpen aan een sensitiviteitsanalyse. Hieruit blijkt onder andere dat het gebruikte vraagprofiel van sanitair warm water een grote invloed heeft op zowel de dimensionering als op de keuze van het optimale systeem. Een systeem met enkel een warmtepomp is namelijk het goedkoopste voor grote gebruikersprofielen, terwijl een systeem met zonnepanelen het meest voordelig is voor kleine gebruikersprofielen. Ook blijkt dat de huidige subsidieregelingen in Vlaanderen geen aanleiding geven tot het energetisch of economisch optimale scenario. Tot slot is het voor het systeem dat een warmtepomp combineert met zonnepanelen mogelijk om goedkoper te zijn dan de gasboiler, dankzij het principe van een terugdraaiende teller.

Lijst van figuren

1.1	Evolutie van de CO_2 -emissies in België tussen 1995 en 2016 in verschillende sectoren	2
2.1	Werking van een vlakkeplaatcollector	9
2.2	Werking van een warmtepomp	9
3.1	Opsplitsing van het opslagvat	14
3.2	Alle onderzochte configuraties	16
3.3	Energiestromen naar en vanuit de tank	17
3.4	Visualisatie van de energiestromen (links) en de variabelen (rechts) in het PV-systeem	19
3.5	Visualisatie van het gebruikte gebruikers- en stralingsprofiel	28
4.1	De invloed van het buffervatvolume bij het PV-systeem	34
4.2	De invloed van de oppervlakte aan zonnepanelen bij het PV-systeem	34
4.3	De invloed van het tankvolume op de optimale dimensionering bij het PV-systeem	35
4.4	De invloed van het tankvolume op de systeemkarakteristieken bij het PV-systeem	36
4.5	De invloed van de aanstuurtemperatuur van het buffervat (T_3) bij het PV-systeem	36
4.6	De invloed van het debiet dat doorheen de zonnecollectoren stroomt	39
4.7	De invloed van het tankvolume bij het ZC-systeem	40
4.8	De invloed van het buffervatvolume (links) en het tankvolume (rechts) bij het WP-systeem	42
4.9	De invloed van de aanstuurtemperaturen van de warmtepomp (T_1 en T_2) bij het WP-systeem	43
4.10	De invloed van de aanstuurtemperatuur van het buffervat (T_3) bij het WP-systeem	43
4.11	De invloed van de tankgrootte en de aanstuurtemperaturen op enkele systeemkarakteristieken bij het WP2-systeem	45
4.12	De invloed van het tankvolume bij het WPPV-systeem	47
4.13	De invloed van de oppervlakte zonnepanelen op de energiestromen bij het WPPV-systeem	47

4.14	De invloed van de aanstuurtemperaturen op de systeemkarakteristieken bij het WPPV-systeem	47
4.15	De invloed van het tankvolume en de aanstuurtemperaturen op het energietekort bij het GB-systeem	48
4.16	Energiestromen bij extreme tankvolumes	52
4.17	Verklaring van het verschil in externe energieafname tussen de energetisch optimale situatie en de referentiesituatie	55
4.18	Verklaring van het verschil in kostprijs tussen de economisch optimale situatie en de referentiesituatie	58
4.19	Verloop van de elektriciteitsafname van het net gedurende het jaar voor verschillende systemen	59
5.1	Vergelijking tussen de vier onderzochte gebruikersprofielen: drie keer met enkel een douche (voor 1,2 en 4 personen) en één keer met een bad (4 personen)	65
5.2	Invloed van de CO_2 -emissiekost op de totale jaarlijkse kost voor SWW .	72
A.1	Detail van het opslagvat met isolatie en verliezen	93

Lijst van tabellen

3.1	Te optimaliseren variabelen per systeem	24
3.2	Benodigde inputgegevens per systeem	30
4.1	Referentiev variabelen per systeem	33
4.2	Basisparameters en systeemkarakteristieken van het PV-systeem bij gebruik van de verschillende onderzochte soorten zonnepanelen	37
4.3	Karakteristieken van het PV-systeem bij verschillende vermogens van de buffervatweerstand	37
4.4	Karakteristieken van het PV-systeem bij verschillende soorten opslagvaten	38
4.5	Karakteristieken van het ZC-systeem bij gebruik van beide soorten ZC .	41
4.6	Karakteristieken van het ZC-systeem bij verschillende soorten opslagvaten	41
4.7	Karakteristieken van het WP-systeem bij de verschillende soorten warmtepompen	44
4.8	Karakteristieken van het WP-systeem bij een buffervatweerstand van 2 en 4 kW	44
4.9	Karakteristieken van het GB-systeem bij verschillende soorten opslagvaten	48
4.10	Karakteristieken van het GB-systeem bij verschillende soorten gasboilers	49
4.11	Systeemkarakteristieken van de zes referentiesystemen	50
4.12	Dimensionering en de systeemkarakteristieken van de zes configuraties bij een energetische optimalisatie	53
4.13	Dimensionering en de systeemkarakteristieken van de zes configuraties bij een economische optimalisatie	56
4.14	Verschillende onderzochte scenario's voor de toevoeging van een warmtepomp aan het pragmatische PV-systeem	61
4.15	Verschillende onderzochte scenario's voor de toevoeging van zonnepanelen aan het pragmatische WP-systeem	62
4.16	Prijs per ton CO_2 -reductie t.o.v. de economisch optimale gasboiler . . .	63
5.1	De economisch optimale dimensionering en bijbehorende systeemkarakteristieken van de zes configuraties voor een gebruikersprofiel van vier personen met een bad	66
5.2	Kost in €/kWh SWW-vraag voor de bestudeerde systemen en gebruikersprofielen bij een economische optimalisatie	66

5.3	De economisch optimale dimensionering en systeemkarakteristieken van het PV-systeem en het WP-systeem voor verschillende gebruikersprofielen	67
5.4	Invloed van het gebruikte stralingsprofiel op de economisch kost en de optimale dimensionering	68
5.5	Invloed van de terugdraaiende teller (TDT) en digitale meter (DM) op de kost van de huidige economische optimalisatie	70
5.6	Vergelijking van de economisch optimale dimensionering en de bijbehorende systeemkarakteristieken van de situatie met een terugdraaiende teller (TDT), een digitale meter (DM) en de situatie uit hoofdstuk 4 (hs 4)	70
5.7	Grootte van de subsidies en invloed op de totale kost per systeem	73
5.8	Jaarlijkse kost en optimale comfortvat bij de drie onderzochte maximale energietekorten (ET)	74
5.9	Invloed van een variatie van enkele parameters op de jaarlijkse totale kost	75
A.1	Kost van een opslagvat in euro in functie van het volume van het vat	81
A.2	De gebruikte functies om de kost van een opslagvat met willekeurige grootte te bepalen	82
A.3	Kost in euro voor extra componenten per type opslagvat	82
A.4	Aantal benodigde extra componenten in het opslagvat per configuratie	82
A.5	Basisparameters en prijzen van de verschillende onderzochte warmtepompen	83
A.6	Basisparameters van de verschillende onderzochte soorten zonnepanelen	84
A.7	Gebruikte functies voor het bepalen van de PV convertorkost	84
A.8	Gebruikte functies voor het bepalen van de installatiekost per paneel	84
A.9	Opsplitsing van de kost voor de montagematerialen per paneel	85
A.10	Basiskarakteristieken van de verschillende onderzochte zonnecollectoren	85
A.11	Basiskarakteristieken van de verschillende onderzochte gasboilers	86
A.12	Benodigde componenten bij aankoop van een gasboiler met hun bijbehorende prijs in euro	86
A.13	Vergelijking van de VIESSMANN-catalogusprijzen met de marktprijzen	88
A.14	Verduidelijking "bron"-kolom uit tabel A.13	89
A.15	Algemene correctiefactor per type componenten	89
A.16	Levensduur van elke component	90
A.17	UA-factor van een opslagvat in functie van het volume en type van het vat, uitgedrukt in W/K	92
A.18	De gebruikte functies om de UA-waarde voor een willekeurig opslagvat te berekenen	92
C.1	Energetische optimalisering voor een gebruikersprofiel van vier personen waarbij er een bad aanwezig is	97
C.2	Economische optimalisering voor een gebruikersprofiel van één persoon	98
C.3	Energetische optimalisering voor een gebruikersprofiel van één persoon	99
C.4	Economische optimalisering voor een gebruikersprofiel voor twee personen	100
C.5	Energetische optimalisering voor een gebruikersprofiel voor twee personen	101

C.6	Economische optimalisering bij een maximaal energietekort van 0,1 kWh/jaar	102
C.7	Economische optimalisering bij een maximaal energietekort van 5,5 kWh/jaar	102

Lijst van afkortingen en symbolen

Afkortingen

4p	4 personen
BTW	Belastingen toegevoegde waarde
BV	Buffervat
CO ₂	Koolstofdioxide
COP	<i>Coefficient Of Performance</i> of warmtecijfer
DM	Digitale meter
ET	Energietekort
EU	Europese Unie
GB-systeem	Configuratie die gebruik maakt van een gasboiler voor het dekken van de vraag naar SWW
NHW	Netto huidige waarde
PV	Zonnepanelen
PV-elek	Elektriciteit geproduceerd door de zonnepanelen
PV-systeem	Configuratie die gebruik maakt van zonnepanelen als hernieuwbare energiebron
SWW	Sanitair Warm Water
TDT	Terugdraaiende teller
VREG	Vlaamse regulator voor de elektriciteits- en gasmarkt
Wp	De hoeveelheid Watt piek, ook wel het maximaal AC-vermogen dat geleverd kan worden
WP	Warmtepomp
WP-systeem	Configuratie die gebruik maakt van een warmtepomp als hernieuwbare energiebron
WP2-systeem	Configuratie die gebruik maakt van een warmtepomp als hernieuwbare energiebron maar geen buffervat heeft
WPPV-systeem	Configuratie die zowel gebruik maakt van een warmtepomp als van zonnepanelen voor het voorzien van hernieuwbare energie
ZC	Zonnecollector
ZC-systeem	Configuratie die gebruik maakt van zonnecollectoren als hernieuwbare energiebron

Symbolen

α	Absorptiecoëfficiënt van de absorptieplaat bij een zonnecollector
η_{PV}	Het rendement van de zonnepanelen
η_{ZC}	Het rendement van de zonnecollectoren
η_{DCAC}	Het rendement van de convertor van de zonnepanelen
η_0	Rendement van de zonnecollector indien er geen warmteverliezen zouden zijn
ρ_{water}	De dichtheid van water
τ	Transmissiecoëfficiënt dekglas zonnecollector
A_{PV}	Oppervlakte van de zonnepanelen
A_{PV}^{opt}	Optimale oppervlakte van de zonnepanelen
A_{ZC}	Oppervlakte van de zonnecollectoren
$C_{p,water}$	De soortelijke warmtecapaciteit van water
E_{PV}	De energie die de zonnepanelen toevoegen aan de tank
$E_{R,BV}$	De energie die de weerstand toevoegt aan het buffervat
$E_{thermisch,WP}$	Het thermische vermogen dat de warmtepomp levert
E_{vraag}	De energie van het gevraagde debiet aan SWW
f	De grootte van de circulatieverliezen, uitgedrukt als fractie ten opzichte van de totale jaarlijkse vraag naar SWW
i	Geëist rendement op de investering
h	Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt
H_{in}	Enthalpie van het instromende water
H_{uit}	Enthalpie van het uitgaande water
$H_{Tank,BV}$	De enthalpie van het water dat van de tank naar het buffervat stroomt
k_1	Collectorspecifieke parameter voor het bepalen van het rendement van de zonnecollector
k_2	Collectorspecifieke parameter voor het bepalen van het rendement van de zonnecollector
n	Levensduur
N_{paneel}	Het aantal te plaatsen zonnepanelen
$P_{therm,nom}$	Het thermisch vermogen dat de gasboiler produceert
$P_{WP,elek}$	Het elektrisch vermogen dat de warmtepomp verbruikt
$P_{WP,therm}$	Het thermische vermogen dat de warmtepomp levert
Q_{gas}	Warmte die de gasboiler toevoegt aan de tank
$Q_{verlies}$	Warmteverliezen naar de omgeving
Q_{vraag}	Het gevraagde debiet aan SWW
R_{BV}	Het vermogen van de weerstand in het buffervat
$R_{thermisch}$	Thermische weerstand

S	De invallende stralingsenergie
$S_{tot,30}$	Invallende stralingsenergie op een paneel onder een hoek van 30° ten opzichte van de horizontale as
T_1	Onderste aanstuurtemperatuur van de tank
T_2	Bovenste aanstuurtemperatuur van de tank
T_3	Onderste aanstuurtemperatuur van het buffervat
$T_{fluidum}$	De temperatuur van het fluidum in de collectorlus
T_{in}	De temperatuur van het water dat de tank binnenkomt
$T_{omgeving}$	De temperatuur van de omgeving waarin het opslagvat zich bevindt
T_{ref}	De gehanteerde referentietemperatuur
T_{vat}	De temperatuur van het opslagvat
T_{vat}^{max}	De maximaal toegelaten temperatuur van het opslagvat
T_{vraag}	De temperatuur van het uitgaande water
T_{uit}	De temperatuur van het water dat het buffervat verlaat
UA	Maat voor de thermische grootte van de warmtewisselaar
$V_{buffervat}$	Volume van het buffervat
$V_{comfort}^{opt}$	Optimale volume van het comfortvat
V_{tank}	Volume van de tank
V_{tank}^{opt}	Optimale volume van de tank

Hoofdstuk 1

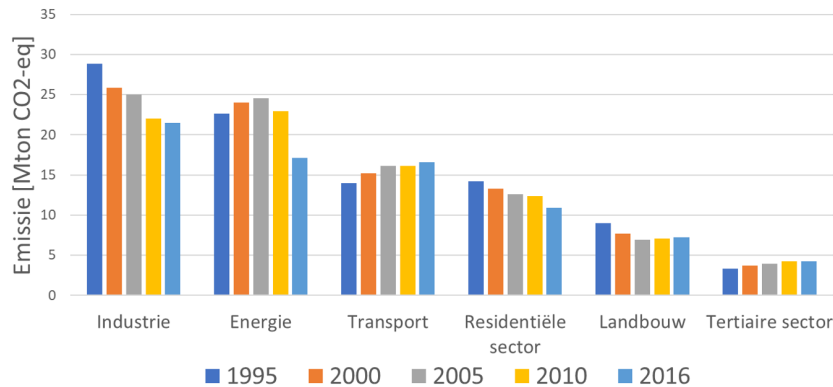
Inleiding

Onderzoek heeft de laatste jaren aangetoond dat de mens ontegensprekelijk verantwoordelijk is voor de ingrijpende klimaatsverandering die momenteel plaatsvindt. Om de impact van deze klimaatsverandering te beperken, is het noodzakelijk dat de wereldwijde equivalente uitstoot van CO_2 zo snel mogelijk daalt [1]. Omdat er geen globaal bindend beslissingsorgaan is dat de beperking qua uitstoot kan opleggen, nemen steeds meer landen zelf initiatief om, aangemoedigd door akkoorden zoals het Verdrag van Parijs, de CO_2 -uitstoot binnen hun grenzen te doen dalen. Zo heeft ook België de ambitie om zijn uitstoot van schadelijke gassen te doen dalen met het oog op de minimalisatie van de impact van de klimaatsverandering [2].

In de eerste plaats heeft België ingezet op emissiereducties in de sectoren die ook initieel de meeste emissies uitstootten, namelijk de industrie- en de energiesector. Dit is weergegeven in figuur 1.1, waar ook zichtbaar is dat deze sectoren de grootste reducties ondergingen de laatste 20 jaar [3]. Aangezien de emissiereductiedoelstellingen steeds ambitieuzer worden, is het noodzakelijk om ook te kijken naar sectoren die in absolute getallen minder uitstoot produceren, zoals de residentiële sector (de huishoudens). Deze sector heeft namelijk nog geen bindende bovengrens op de uitstoot (zoals het emissiehandelssysteem er is voor de zware industrie en de energiesector), waardoor verder onderzoek naar minder vervuilende technologieën voor deze sector zeker relevant is.

Zoals figuur 1.1 weergeeft, waren alle Belgische huishoudens samen in 2016 verantwoordelijk voor ongeveer 11 Mton CO_2 -equivalente uitstoot per jaar of 14% van de totale Belgische uitstoot [3]. Deze uitstoot van CO_2 is nauw verbonden met het residentiële energiegebruik, wat uit drie grote delen bestaat:

- Energie voor het verwarmen van huizen (60%)
- Energie voor het verwarmen van sanitair warm water (SWW) (15%)
- Energie nodig voor de elektrische apparaten en koken (25%)



Figuur 1.1: Evolutie van de CO_2 -emissies in België tussen 1995 en 2016 in verschillende sectoren

Het percentage achter elke categorie is het gemiddeld aandeel van het energiegebruik van een Belgisch gezin voor deze categorie [4].

In België is er een daling op te merken in dit jaarlijkse residentiële energiegebruik van ongeveer 2% per jaar [5]. Deze daling is bijna volledig het gevolg van de hogere normen voor de isolatie van huizen en het strenger toezien op de efficiëntie van de verwarmingsapparaten [6]. Verschillende zulke maatregelen zijn gecreëerd om de doelstellingen te halen die zijn opgelegd binnen de *effort sharing decision*-regulatie in het kader van de Europese 20-20-20 doelen [7], maar zijn nu ook deel van het Vlaamse energieplan voor 2030 [6]. Zo wordt de hoeveelheid energie nodig voor de eerste energiecategorie, het verwarmen van huizen, al verlaagd. Gezien stookolie ook steeds vaker wordt vervangen door aardgas als primaire energiebron in de residentiële sector, daalt de uitstoot van deze categorie zelfs nog sterker dan deze 2% gemiddelde energiedaling per jaar [8].

Voor de tweede categorie (SWW) zijn er ook oplossingen beschikbaar, maar deze energie-efficiëntere alternatieven worden momenteel nog minder courant toegepast. Zo zijn in België maar 2% van de geplaatste systemen voor SWW gebaseerd op zonnecollectoren of warmtepompen [8] en zijn er in 2017 ook maar 2300 nieuwe warmtepompboilers verkocht in Vlaanderen, wat minder dan 1% van alle nieuwe installaties is. [6]. Dit zijn tekenen dat deze categorie zich maar langzaam onafhankelijk maakt van fossiele brandstoffen.

Ook de derde categorie (elektrische apparaten en koken) heeft een energiegebruik dat ongeveer constant is [9]. Dit komt door een balans tussen een verdere elektrificatie gecompenseerd door een hogere energie-efficiëntie [10].

Omdat de energie nodig voor categorie 1 daalt en die voor categorie 2 en 3 constant blijft, zal het aandeel van het residentiële energiegebruik (en dus ook van de broeikasgasemissies) dat nodig is voor SWW-productie blijven stijgen. [11].

Om al de bovengenoemde redenen onderzoekt deze thesis als hoofdonderzoeksvraag in welke mate hernieuwbare technologieën integreerbaar zijn met de productie van sanitair warm water. Er worden hiertoe zes verschillende configuraties dieper onderzocht in deze thesis. Vijf van deze zes configuraties produceren sanitair warm water op een meer duurzame manier, met behulp van zonnepanelen, zonnecollectoren, een warmtepompboiler of een combinatie van deze technologieën. De zesde configuratie is momenteel de meest gebruikte technologie voor de productie van SWW, een gasboiler, en dient als referentiesysteem.

Om deze hoofdonderzoeksvraag te beantwoorden, behandelt deze thesis drie werkpakketten. In de eerste fase wordt er per configuratie gekeken hoe de dimensionering van bepaalde variabelen van elke configuratie invloed heeft op de verschillende uitgangswaarden (kost, uitstoot, ...) van de configuratie. Hierin staat het systeemintegratie-aspect dus cruciaal.

In de tweede fase worden alle variabelen van elke configuratie geoptimaliseerd op verschillende manieren, vertrekkend vanuit de kennis opgedaan in de eerste fase. Zo is er geoptimaliseerd naar minimaal extern energiegebruik, minimale totale kost en minimale operationele uitstoot van CO_2 . Hierna worden alle geoptimaliseerde systemen met elkaar vergeleken om zo twee vragen te kunnen beantwoorden: "*Wat is momenteel de globaal optimale hernieuwbare technologie voor de productie van sanitair warm water?*" en "*Hoe groot is het verschil nog tussen de hernieuwbare en de fossiele configuraties?*".

Om de vergelijking nog robuuster te maken, onderzoekt de derde fase de invloed van enkele externe parameters (zoals vraagprofiel, instraling, reglementaire kader,...) op de optimale configuraties en op de keuze van de optimale hernieuwbare technologie uit fase twee.

Het onderzoek binnen deze thesis bestudeert de verschillende systemen enkel op gebouwniveau en maakt dus abstractie van de invloed van de implementatie op het elektriciteitsnet. Het maakt tevens abstractie van de warmtevraag voor ruimteverwarming en focust dus enkel op de productie van sanitair warm water.

Deze tekst start in hoofdstuk 2 met een korte literatuurstudie die de nodige achtergrondinformatie voorziet voor het verdere verloop van deze thesis. Deze literatuurstudie behandelt eerst de specifieke eigenschappen van sanitair warm water. Hierna worden zowel de huidige stand van zaken van de verschillende gebruikte technologieën als belangrijk voorafgaand onderzoek gegeven.

Hoofdstuk 3 bespreekt de methodologie die deze thesis volgt. Het begint met de verschillende configuraties die vergeleken worden in deze thesis in meer detail uit te leggen, net als de aannames die gemaakt zijn tijdens het modelleren. Dit hoofdstuk bespreekt verder ook welke inputdata nodig zijn om de situatie te kunnen modelleren, net als de herkomst van deze gegevens. Tot slot geeft dit hoofdstuk een overzicht van welke uitgaande karakteristieken van het model relevant zijn.

Hoofdstuk 4 bestaat uit drie delen. Het eerste deel beschrijft de invloed van elke te optimaliseren variabele op de systeemkarakteristieken. Het tweede deel onderzoekt hoe deze verschillende variabelen tegelijk aangestuurd kunnen worden om zo een energetisch, economisch of ecologisch optimaal systeem te bekomen. Om dit hoofdstuk te beëindigen worden de verschillende systemen ook met elkaar vergeleken om zo te kunnen vaststellen welke hernieuwbare technologie het meest compleet is over deze drie domeinen en hoe dit meest complete hernieuwbare systeem zich verhoudt ten opzichte van de gasboilerconfiguratie.

Hierna onderwerpt hoofdstuk 5 de resultaten aan een sensitiviteitsanalyse. Op die manier wordt onderzocht welke parameters een cruciale invloed hebben op de relevante uitgaande karakteristieken van de verschillende systemen en of een variatie van deze parameters in staat is om de keuze van het optimale (hernieuwbare) systeem te veranderen. Alle bevindingen van deze thesis zijn ten slotte ook samengevat in het besluit.

Hoofdstuk 2

Literatuurstudie

Deze literatuurstudie behandelt drie aspecten. In het eerste deel worden de verschillende manieren om sanitair warm water te produceren overlopen, net als enkele specifieke eigenschappen. Daarna volgt een deel dat de gebruikte technische componenten bespreekt en er alle relevante informatie over geeft. Tot slot bespreekt deze literatuurstudie ook de bevindingen van enkele voorafgaande studies en beschrijft het wat er nieuw is aan het onderzoek van deze thesis.

2.1 Sanitair Warm Water

2.1.1 Definitie

De term sanitair warm water (SWW), omvat alle residentiële stromen van warm water die in direct contact staan met de gebruikers. Dit omvat onder andere het water nodig voor een bad/douche, om de afwas te doen en voor het wassen van de handen. Wat echter niet onder de term sanitair warm water valt is het water dat gebruikt wordt voor ruimteverwarming. Gezien dit water niet in direct contact staat met mensen, gelden er hiervoor andere veiligheidsvoorschriften dan voor SWW. Zo is de legionellabacterie minder van belang voor dit water (hierover later meer in 2.1.2).

Er zijn twee soorten primaire energiebronnen mogelijk voor de warmtevraag van SWW te dekken:

Fossiele brandstoffen: deze kunnen zowel een vaste stof (steenkool of hout), een vloeistof (stookolie) als een gas (aardgas) zijn. In Vlaanderen dekken dergelijke fossiele brandstoffen momenteel 88,4% van de residentiële warmtevraag op een directe manier, voornamelijk met aardgas (63,2%), maar ook nog met stookolie (25,2%) [9]. In meer agrarische culturen komt ook verwarming op basis van steenkool nog voor. Via elektriciteit kunnen deze grondstoffen ook indirect het water opwarmen.

Hernieuwbare energiebronnen: deze kunnen direct, bijvoorbeeld door de rechtstreekse omzetting van zonne-energie in warmte met behulp van zonnecollectoren of door de verbranding van biomassa, maar ook indirect, met

bijvoorbeeld zonnepanelen of windmolens, de nodige primaire energie voorzien.

Beide soorten primaire energiebronnen kunnen dus ook indirect de warmtevraag dekken met behulp van een conversie naar elektriciteit. Deze energiedrager wordt relatief vaak gebruikt voor de productie van SWW, omdat deze vraag vaak over relatief kleinere volumes gaat en een systeem met een lage investeringskost daarom voordelig is. Elektriciteit kan zowel gebruikt worden in combinatie met een gewone weerstand, wat momenteel het meeste voorkomt en waarbij 1 kWh aan elektriciteit omgezet wordt in 1 kWh warmte, als in combinatie met een warmtepomp, die met diezelfde kWh elektriciteit 3-4 kWh warmte kan produceren (zie 2.2.3).

De warmtevraag voor SWW heeft enkele interessante eigenschappen ten opzichte van andere soorten warmtevragen, zoals ruimteverwarming. Zo is de vraag naar SWW zo goed als constant over het jaar, daar waar de warmtevraag voor ruimteverwarming piekt in de winter en verdwijnt in de zomer. Dit maakt SWW veel meer geschikt voor systemen die zonne-energie benutten dan ruimteverwarming.

Verder is het ook belangrijk om te weten dat er bovenop de werkelijke warmtevraag voor SWW nog een extra warmteverlies komt als gevolg van circulatieverliezen in de leidingen. Deze verliezen ontstaan doordat er warm water achterblijft in de leidingen, wat terug koud is wanneer er een volgende keer vraag is naar SWW. Ze bedragen tussen de 30 en de 50% van de totale vraag aan SWW, waarbij deze percentages respectievelijk overeenkomen met de waardes voor nieuwe en oude huizen [12].

2.1.2 Legionella

Legionellose, ook wel legionella genoemd, is een verzamelnaam van infectieziekten die veroorzaakt worden door de legionella pneumophila-bacterie (ook wel de legionella bacterie genoemd). Deze kan voorkomen in slecht onderhouden watersystemen en kan daarna in de lucht terecht komen, doordat kleine aerosolen de bacterie meedragen. Een infectie is mogelijk na het inademen van de legionella-bacterie doordat deze zich gaat vestigen in de luchtwegen en longen. Er bestaan twee types legionella ziektes, namelijk de veteranenziekte (een longenontsteking die kan leiden tot chronische longaandoeningen of zelfs tot de dood) en de legionella-griep (een lichtere griepvariant die niet dodelijk is). Sinds de ontdekking van deze bacterie in 1976 zijn er daarom verscheidene maatregelen getroffen om de voorplanting van deze bacterie te voorkomen, zeker bij warmwatersystemen [13]. Ondanks deze maatregelen zijn er jammer genoeg nog sporadisch gevallen van legionellabesmetting in België, soms zelfs met dodelijke afloop, zoals begin mei dit jaar in de regio Gent-Evergem [14].

De belangrijkste manier om de voorplanting te vermijden is door de temperatuur van het watersysteem te controleren. Deze bepaalt immers in welke mate de bacterie zich kan voortplanten [15]:

- $T < 20^{\circ}\text{C}$: geen voorplanting mogelijk

- $20^{\circ}\text{C} < T < 45^{\circ}\text{C}$: voortplanting is mogelijk, met 37°C als optimale temperatuur voor de bacteriën
- $45^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$: in dit bereik neemt de groei sterk af en vanaf 48°C kan de bacterie enkel nog overleven, maar kan ze zich niet meer voortplanten.
- $T > 50^{\circ}\text{C}$: 90% van de bacteriën sterven binnen de twee uur.
- $T > 60^{\circ}\text{C}$: 90% van de bacteriën sterven binnen de twee minuten.
- $T > 70^{\circ}\text{C}$: alle bacteriën sterven ogenblikkelijk.

Er zijn in Vlaanderen daarom normen vastgelegd die gelden voor alle drinkwaterinstallaties in de tertiaire sector waarbij het water niet permanent een temperatuur boven de 60°C heeft. Deze normen zeggen dat al het water in deze systemen minstens één keer per week gedesinfecteerd moet worden. Dit is mogelijk door het water gedurende 20 minuten op te warmen tot een temperatuur boven de 60°C . In Nederland en Duitsland zijn er ook soortgelijke normen vastgelegd voor de residentiële sector, maar die zijn er in Vlaanderen (nog) niet [12, 16, 17].

2.2 Technische componenten

Er bestaan verschillende technologieën die het mogelijk maken om SWW duurzamer te produceren dan via een verbranding van fossiele brandstoffen. Deze thesis neemt er drie mee, namelijk zonnepanelen, zonnecollectoren en een warmtepomp. Deze sectie geeft meer toelichting over elk van deze drie technologieën, zowel over het werkingsprincipe als over de toestand van deze technologie in Vlaanderen. Dezelfde informatie wordt daarna ook gegeven over de gasboiler en tot slot wordt ook het nut van een opslagvat besproken.

2.2.1 Zonnepanelen

Werkingsprincipe

Met behulp van zonnepanelen kan de zonne-energie op een indirecte manier benut worden voor de opwarming van SWW, door de invallende straling eerst om te zetten in elektriciteit. Indien er een teveel aan elektriciteit is, kan dit gebruikt worden voor zelfconsumptie of op het elektriciteitsnet gezet worden.

Situatie in Vlaanderen

Als gevolg van de duurzame aard van zonnepanelen, zijn er in de loop van de tijd verschillende subsidieregelingen geweest om zonnepanelen economisch interessanter te maken:

Groenestroomcertificaten: dit is een vergoeding per hoeveelheid geproduceerde elektriciteit. Deze vergoeding is echter langzaam afgebouwd en sinds juni 2015

komen nieuwe installaties hier niet meer voor in aanmerking [18].

Terugdraaiende teller: in het huidige reglementaire kader in Vlaanderen wordt energie die terug op het net gezet wordt aan residentieel tarief vergoed (door de elektriciteitsmeter te laten terugdraaien). Deze regeling creëert echter geen eerlijke verdeling van de kosten van het elektriciteitsnet, waardoor het prosumentarief is ingevoerd. Dit is een vergoeding die kleine installaties moeten betalen om elektriciteit te mogen plaatsen op het distributienet. Deze vergoeding wordt bepaald per kW piek vermogen van de installatie. Zelfs met dit prosumentarief zijn de kosten van het distributienet nog niet eerlijk verdeeld, waardoor er in de toekomst een andere verloning zal komen. Dit zou technologisch mogelijk worden met behulp van een digitale meter, zodra deze geïntroduceerd wordt [19].

Energieleningen: tot eind 2018 was het voor iedereen mogelijk om een lening met geen of lage rentevoet af te sluiten indien deze voor duurzame doeleinden werd gebruikt (zoals zonnepanelen) [20].

Verlaagd BTW-tarief: om eigenaars van een woning die ouder dan 10 jaar is aan te zetten om te investeren in de duurzaamheid van de woning, is er een verlaagd BTW-tarief van 6% i.p.v. 21% bij de plaatsingen van zonnepanelen of zonnecollectoren of indien er geïnvesteerd wordt in een betere isolatie van de woning [21].

Door deze subsidies heeft België relatief veel zonne-energie in zijn elektriciteitsmix: in 2017 waren alle zonnepaneelinstallaties goed voor 3800 MW aan capaciteit en produceerden ze samen 3,6% van de elektriciteit in België [22]. Tegenwoordig zijn zonnepanelen al economisch interessant zonder subsidies, omdat de investeringskost voor zonnepanelen steeds lager wordt door technologische vooruitgang (hoger maximaal rendement, goedkopere productietechnieken) en schaalvoordelen uit massaproductie [23]. Dat is dan ook de reden dat de meeste van deze subsidieregelingen reeds gestopt zijn of langzaam afgebouwd worden [6].

2.2.2 Zonnecollectoren

Werkingsprincipe

Met behulp van zonnecollectoren is het mogelijk om de elektromagnetische energie uit de invallende zonnestraling rechtstreeks om te zetten in bruikbare warmte. Er bestaan verschillende soorten zonnecollectoren, zowel voor decentrale warmtegeneratie zoals vlakkeplaatcollectoren en vacuümbuiscollectoren, als voor centrale warmtegeneratie zoals zonnevijvers of geconcentreerde zonne-energiecentrales. Omdat deze thesis zich focust op de residentiële warmtevraag voor SWW, wordt enkel de eerste categorie verder besproken.

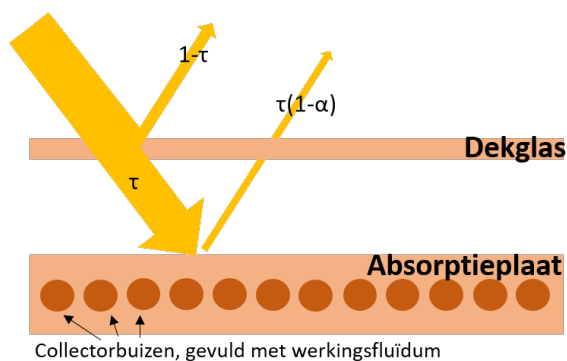
Binnen deze eerste categorie zijn vlakkeplaatcollectoren doorgaans goedkoper in aankoop, maar ze hebben een lager collectorrendement dan vacuümbuiscollectoren. De lagere investeringskost geeft uiteindelijk meestal de doorslag, waardoor vlakkeplaatcollectoren de meest geschikte optie zijn voor residentiële toepassingen,

behalve wanneer de beschikbare dakoppervlakte een limiterende factor is [12]. Wanneer zonnecollectoren verbonden zijn met een voorraadvat dat als bedoeling heeft om de residentiële warmtevraag te dekken, spreekt men van een zonneboiler. Bij een dergelijke zonneboiler is er in België altijd nog een systeem nodig dat de naverwarming verzorgt. Op die manier is er ook SWW beschikbaar als de zon niet schijnt. Deze naverwarming kan zowel een gasketel als een elektrische weerstand zijn [24].

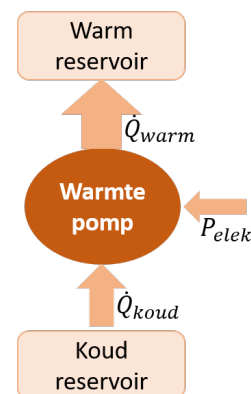
Figuur 2.1 geeft de werking van vlakkeplaatcollectoren weer. De straling van de zon valt eerst in op het dekglas, waarop een bepaald deel van de straling reflecteert ($1-\tau$). De resterende fractie τ valt daarna in op de absorptieplaat, die een fractie α absorbeert. Deze geabsorbeerde warmte warmt hierna een werkingsfluidum in de collectorbuizen op, dat uiteindelijk via een warmtewisselaar het voorraadvat met SWW opwarmt. Als werkingsfluidum wordt meestal een mengsel van water en glycol genomen, waar de glycol ervoor zorgt dat het mengsel niet bevriest bij negatieve temperaturen [25].

Situatie in Vlaanderen

In Vlaanderen worden er tegenwoordig steeds minder zonneboilers geïnstalleerd, wat vooral te wijten is aan de sterke competitie met de steeds goedkoper wordende zonnepanelen. Samengeteld leveren alle zonneboilers maar 1,3‰ van de residentiële warmtevraag in Vlaanderen. [26]. Toch is er in Vlaanderen nog steeds een subsidie voor huiseigenaars die in zonnecollectoren investeren van €550 per m^2 collectoroppervlakte, beperkt tot €2750 of 40% van het totaalbedrag [27].



Figuur 2.1: Werking van een vlakkeplaatcollector



Figuur 2.2: Werking van een warmtepomp

2.2.3 Warmtepomp

Werkingsprincipe

Een warmtepomp werkt als volgt: de warmtepomp neemt warmte uit een reservoir op lage temperatuur en waardeert deze energie op door ze te verplaatsen naar een reservoir op een hoge temperatuur. Voor deze opwaardering gebruikt de warmtepomp energie uit een hoogwaardige energiebron, wat meestal elektriciteit is. Voor sanitair warm water is het reservoir op lage temperatuur meestal de buitenlucht¹ en het reservoir op hoge temperatuur het SWW zelf. De verhouding tussen de hoeveelheid warmte die wordt toegevoegd aan het SWW en de hoeveelheid verbruikte elektriciteit is het warmtecijfer of de COP (coefficient of performance). De waarde van deze COP is zowel afhankelijk van de temperatuur van de buitenlucht (reservoir op lage temperatuur) als van de temperatuur van het SWW (reservoir op hoge temperatuur). Hoe groter het temperatuurverschil is, hoe meer elektriciteit de warmtepomp verbruikt om de warmte op te waarden naar het reservoir op de hogere temperatuur. Voor kleinschalige lucht-water warmtepompen² met een elektrisch vermogen rond de 1 à 2 kW, zoals verder gebruikt worden in deze thesis, ligt de COP ongeveer tussen 3 en 4. Een specifieke soort warmtepomp is de warmtepompboiler, die enkel bedoeld is voor de opwarming van SWW.

De keuze voor een specifieke warmtepomp wordt mee bepaald door de eigenschappen van de mogelijke warmtepompen [28]:

- Het minimale thermische vermogen van de warmtepomp, meestal 30-50 % van het nominale thermische vermogen.
- De maximale werkingstemperatuur van de warmtepomp, wat meestal rond de 60 °C ligt.
- De eventuele aanwezigheid van een interne weerstand, die het mogelijk maakt dat de warmtepomp ook buiten zijn werkingsgebied warmte kan leveren, weliswaar aan een COP van ongeveer 1.

Situatie in Vlaanderen

Momenteel is de verkoop van warmtepompen in Vlaanderen eerder beperkt. In 2017 was maar 1% van de verkochte installaties voor SWW gebaseerd op een warmtepomp. Dit percentage zal waarschijnlijk nog stijgen, mede dankzij het feit dat de Vlaamse overheid een subsidie tot €400 geeft bij de aankoop van een warmtepomp. Zo hopen ze de verkoop van warmtepompen de komende vijf jaar te verdubbelen [29].

¹Soms wordt ook de uitgaande ventilatielucht genomen als reservoir op lage temperatuur, gezien de temperatuur van deze lucht meestal warmer is dan de buitenlucht.

²Er bestaan nog andere soorten warmtepompen zoals water-water warmtepompen, grond-water warmtepompen of lucht-lucht warmtepompen. Deze worden echter zelden in combinatie met SWW gebruikt, waardoor deze verder niet besproken worden.

2.2.4 Gasboiler

Werkingsprincipe

Er bestaan twee soorten gasboilers: doorstroomgasboilers en buffervatgasboilers. Een doorstroomgasboiler begint pas de gevraagde warmte te produceren op het moment van de warmtevraag. Bij een buffervatgasboiler daarentegen moet het moment van de warmtevraag en van de aardgasverbranding niet noodzakelijk overeenkomen, gezien een buffervat de thermische opslag van de warmte mogelijk maakt. Het voordeel van een buffervatgasboiler is dat er ogenblikkelijk warm water kan geleverd worden, waar dit bij een doorstroomgasboiler 5-10 seconden kan duren en dat er op korte termijn grotere hoeveelheden SWW geleverd kunnen worden. Doorstroomgasboilers hebben dan weer het voordeel dat ze goedkoper zijn in aankoop (er is geen buffervat nodig) en dat ze nooit problemen hebben in verband met legionella. In deze thesis is er gekozen voor een buffervatgasboiler, omdat dit beter vergelijkbaar is met de hernieuwbare systemen.

Een speciaal soort gasketel is de condensatiegasketel, waarbij er meer warmte wordt gerecupereerd uit de rookgassen dan bij gewone gasketels, aangezien (een deel van) de stoom in deze rookgassen condenseert. Hierdoor kan er tot 11% meer energie uit eenzelfde hoeveelheid aardgas vrijkomen. Dit verschil in energie-inhoud van een brandstof wordt ook uitgedrukt door het verschil tussen de onderste en de bovenste verbrandingswaarde. Gezien het rendement van een gasketel meestal wordt uitgedrukt ten opzichte van de onderste verbrandingswaarde, zijn zo rendementen van meer dan 100% mogelijk [30].

Situatie in Vlaanderen

Zoals eerder gezegd dekt gas 63,2% van de residentiële warmtevraag in Vlaanderen. In het streven naar koolstofneutraliteit op middellange termijn stimuleert de Vlaamse overheid echter wel om het gebruik van aardgas (maar vooral stookolie) te verminderen. Zo zijn gasaansluitingen (en stookolieketels) verboden bij nieuwbouw/grondige renovaties en komt er zelfs een algemeen verbod op stookolieketels vanaf 2035 [6, 29].

2.2.5 Thermische opslagvaten

Een thermisch opslagvat zorgt ervoor dat een systeem kleiner kan gedimensioneerd worden dan de maximale piekwarmtevraag, door het opslaan van warmte mogelijk te maken. Op die manier worden overgedimensioneerde systemen vermeden, wat de investeringskost verlaagt. Een ander voordeel van het implementeren van een dergelijk voorraadvat, is dat het mogelijk is om de bekomen thermische flexibiliteit nuttig te gebruiken met behulp van actieve vraagsturing. Voor de technologieën die SWW opwarmen kunnen enkel de systemen die fossiele brandstoffen verbranden zonder buffervat, maar alle hernieuwbare systemen en de elektrische boilers vereisen een buffervat, omdat hun thermisch vermogen een grootteorde kleiner is dan de piekvraag naar warmte.

Er bestaan verschillende variaties binnen deze opslagvaten en de meeste systemen voor de opwarming van SWW vereisen ook een andere soort opslagvat. Zo hebben een zonneboiler en een warmtepompboiler beide een interne warmtewisselaar nodig in het opslagvat, daar waar dit bij een elektrische boiler niet het geval is. Sommige systemen vereisen de aanwezigheid van één of meerdere elektrische weerstanden in het opslagvat, waar dit bij andere systemen dan weer overbodig is. Een parameter die bij alle opslagvaten van belang is, is de graad waarin het vat geïsoleerd is. Meestal is de optimale isolatie een economische afweging: hoe dikker de isolatie, hoe lager de staande verliezen, maar hoe groter de investeringskost. Elk specifiek systeem heeft een optimale isolatiedikte, die kan variëren in functie van de dimensionering van het systeem. Een andere belangrijke parameter van het opslagvat is de maximale toegelaten temperatuur, gezien deze samen met de tankgrootte bepaalt hoeveel energie er in het opslagvat kan opgeslagen worden.

2.3 Integratie van hernieuwbare energie in de productie van sanitair warm water

Er zijn veel onderzoeken lopende over de integratie van hernieuwbare energie in het productieproces van sanitair warm water. De meeste studies nemen één specifieke hernieuwbare technologie en onderzoeken dan hoe geschikt deze technologie is in een bepaald land. Hieronder zijn enkele voorbeelden gegeven:

- A.D. Moore et al (2017) doen een levenscyclusanalyse voor zonneboilers, elektrische boilers en gasboilers in Australië en concluderen dat voor alle drie de systemen meer dan 90% van de totale uitstoot aan CO_2 gebeurt tijdens de operationele fase. Uit een vergelijking van de drie systemen blijkt dat zonneboilers de minste totale uitstoot hadden en elektrische boilers de meeste [31].
- Kumar et al (2018) zijn bezig aan een soortgelijke studie in Australië, maar dan voor warmtepompen. Hun resultaat betreffende de uitstoot van CO_2 is gelijkaardig (het systeem met de warmtepomp heeft de minste emissies over zijn volledige levensduur, de elektrische boiler de meeste). Hun onderzoek toont ook nog aan dat systemen die ogenblikkelijk de vraag aan SWW kunnen dekken economischer en ecologischer zijn dan systemen die een buffervat gebruiken [32].
- Ook in Brazilië [33], Tunesië [34] en China [35] gebeurt onderzoek over de economische mogelijkheden van een massale zonneboiler integratie. In alle drie de gevallen is er een positief economisch resultaat mogelijk door te wisselen van gasboilers naar zonneboilers als gevolg van de grote en relatief constante invallende irradiatie. De terugbetalingsperiode ligt daar tussen de 3 en 8 jaar.
- Dichter bij huis schreven B. Greening et al (2014) een paper om te zien of zonneboilers een optie zijn in landen met een relatief lage radiatie (zoals het Verenigd Koninkrijk (VK)). Deze paper concludeert dat zonneboilers op

2.3. Integratie van hernieuwbare energie in de productie van sanitair warm water

sommige vlakken beter zijn dan gasboilers (bv. qua klimaatimpact en onafhankelijkheid van fossiele brandstoffen), maar niet op allemaal (zoals waterkwaliteit als gevolg van de zware metalen uit de productiefase van zonneboilers). Ze concluderen ook dat de impact van zonneboilers op de totale CO_2 -emissies van het VK eerder beperkt is: wanneer 20% van de residentiële warmtevraag gedekt zou worden door zonneboilers, zouden de totale CO_2 -emissies over heel het VK maar dalen met 0,3% [36].

Er bestaan ook al, weliswaar in mindere mate, studies die meerdere hernieuwbare technologieën met elkaar vergelijken:

- P.J. Boait et al (2012) maken in hun onderzoek een vergelijking tussen een gasboiler, een micro CHP, een warmtepomp, een elektrische boiler en een zonneboiler. Hun onderzoek wijst uit dat de CO_2 -emissies van een doorstroomgasboiler lager zijn dan die van het warmtepompsysteem en gelijkaardig aan die van een zonneboiler. Dit resultaat is te verklaren door de lagere eisen voor de isolatie van thermische buffervaten in 2012. Ze onderzoeken ook de resultaten voor beter geïsoleerde vaten, met de normen uit 2019, en dan komt de warmtepomp beter uit de vergelijking dan de gasboiler [37].
- K. Martin-Escudero et al. (2019) doen een onderzoek naar de mogelijkheid om een warmtepomp en zonnepanelen te combineren. Dit is volgens hen een noodzakelijke stap in de evolutie naar CO_2 -neutrale huizen. Als gevolg van de vele zonne-instraling in Spanje kunnen de zonnepanelen gedurende grote delen van het jaar de warmtepomp aansturen en is er nog maar een minimale hoeveelheid externe energie nodig [38].

Wat echter in weinig studies aan bod komt is de optimalisatie van de verschillende systemen. Meestal poneren de auteurs namelijk gewoon een bepaalde grootte voor elke component. In deze thesis gaat hier wel op gefocust worden en worden de systemen zelfs op verschillende manieren optimaal gedimensioneerd. Deze thesis maakt verder ook de vergelijking tussen meerdere hernieuwbare componenten. Wat ten slotte ook nog eigen is aan deze thesis, is dat het onderzoek zich zuiver op Vlaanderen focust, iets wat voor dit soort studies nog zelden gebeurd is.

Hoofdstuk 3

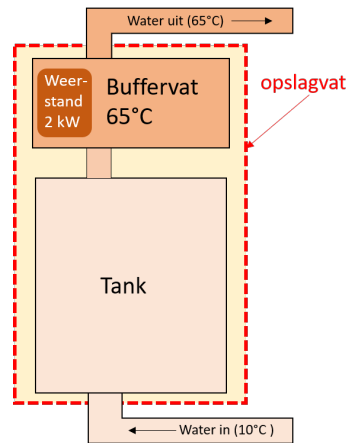
Methodologie

Dit hoofdstuk bespreekt de gevolgde methodologie binnen deze thesis. Hoofdstuk 3.1 begint met een bespreking van hoe het systeem rond elke hernieuwbare technologie eruit ziet. Deze bespreking bevat zowel een overzicht van welke componenten in elk systeem aanwezig zijn als welke variabelen optimaliseerbaar zijn. Er zijn echter ook veel aannames nodig, zowel om het resultaat eenduidig te bepalen als om de systemen te kunnen modelleren. Daarom bespreekt sectie 3.2 deze aannames. Tot slot bespreken sectie 3.3 en 3.4 respectievelijk nog de gebruikte inputdata en de gewenste outputdata.

3.1 Onderzochte systemen

3.1.1 Algemeen principe

Bij installaties die sanitair warm water produceren is de kwaliteit van het uitgaande water zeer belangrijk. Dit betekent dat er ten alle tijden aan twee voorwaarden moet voldaan worden: ten eerste moet de temperatuur van het uitgaande water hoog genoeg zijn en ten tweede moet dit water ook vrij zijn van legionellabacteriën. Om ervoor te zorgen dat er altijd aan beide voorwaarden voldaan wordt, is er gekozen om het opslagvat virtueel op te splitsen in twee delen: de *tank*, wat het onderste deel van het vat is en het *buffervat*, wat het bovenste deel van het opslagvat is, zoals weergegeven in figuur 3.1. Deze fictieve opsplitsing in twee delen zorgt ervoor dat het makkelijker is om fysisch inzicht te verkrijgen in de verschillende energiestromen die in de SWW-systemen vloeien. De tank dient voornamelijk voor het opslaan van warmte, afkomstig van hernieuwbare energie. Het buffervat heeft dan weer als voornaamste taak ervoor te zorgen dat er altijd SWW beschikbaar is dat aan beide eerder genoemde voorwaarden voldoet. Om altijd een voldoende hoge uitgaande temperatuur te hebben, is er in het buffervat een



Figuur 3.1: Opsplitsing van het opslagvat

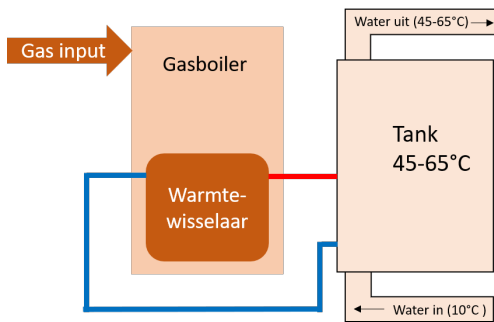
elektrische weerstand aanwezig, die kan zorgen voor de nodige bijverwarming, indien de temperatuur van het water in de tank niet voldoende hoog is. Er is gekozen om dezelfde legionellapreventiemaatregelen te nemen als de verplichte maatregelen voor de tertiaire sector. Dit betekent dat het buffervat meestal een temperatuur heeft van meer dan 60°C en minstens één keer per week tot boven de 65°C gaat (zoals besproken in sectie 2.1.2). Omdat de temperatuur van het buffervat dus slechts in een beperkte temperatuurbereik kan variëren, draagt het niet bij aan de opslagcapaciteit van hernieuwbare energie.

Binnen deze thesis worden er zes configuraties gesimuleerd waarmee SWW kan geproduceerd worden: vijf duurzame systemen en één referentiesysteem werkend op fossiele brandstoffen. Als referentiesysteem is ervoor gekozen om de gasboiler te onderzoeken, omdat dit momenteel de meest gebruikte technologie is voor het dekken van de residentiële warmtevraag in Vlaanderen. Dit systeem is weergegeven op figuur 3.2a.

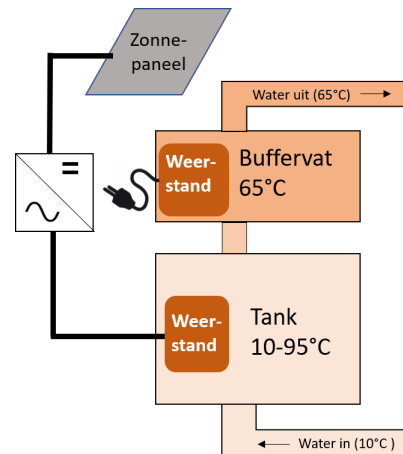
Elk van de vijf duurzame configuraties is gebaseerd op drie verschillende hernieuwbare technologieën, namelijk zonnepanelen, zonnecollectoren en warmtepompen of op een combinatie van deze drie technologieën. Hieronder worden deze vijf configuraties kort samengevat:

1. Het eerste systeem heeft zonnepanelen en gebruikt de geproduceerde elektriciteit rechtstreeks voor het opwarmen van het water in de tank met behulp van een elektrische weerstand. (figuur 3.2b).
2. Het tweede systeem is een zonneboiler, waarbij de tank wordt opgewarmd m.b.v. de warmte die de zonnecollectoren produceren (figuur 3.2c).
3. Het derde systeem is een warmtepompboiler die gevoed wordt door elektriciteit van het net en die de warmte uit de lucht gebruikt voor de opwarming van het water in de tank (figuur 3.2d).
4. Het vierde systeem is een warmtepompboiler zoals hierboven beschreven, maar zonder buffervat. Hierbij wordt de volledige tankinhoud minstens één keer per week tot een temperatuur van 65°C gebracht (figuur 3.2e).
5. Het laatste systeem is wederom een warmtepompboiler, maar nu gecombineerd met zonnepanelen (figuur 3.2f). De elektriciteit die deze zonnepanelen produceren kan zowel gebruikt worden om de warmtepomp aan te drijven als om de tank op te warmen m.b.v. een elektrische weerstand.

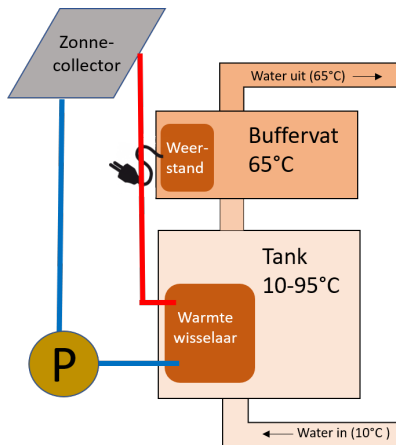
De komende subsecties geven de relevante informatie over elk van deze zes systemen, zoals hoe het systeem eruit ziet, welke invoerdata nodig zijn en welke aannames gemaakt worden.



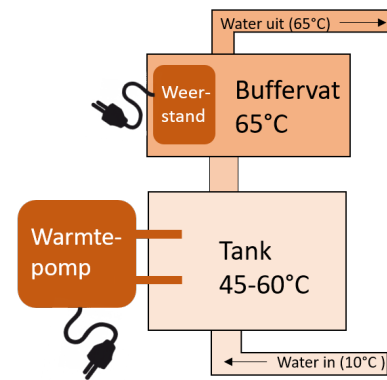
(a) Configuratie met een gasboiler (GB)



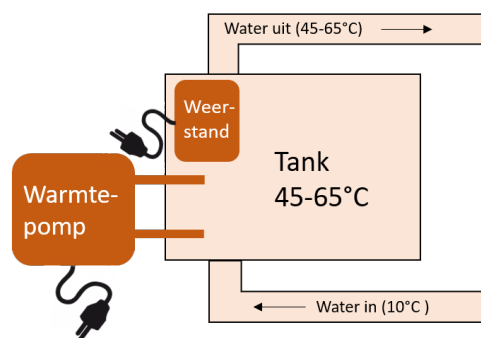
(b) Configuratie met zonnepanelen (PV)



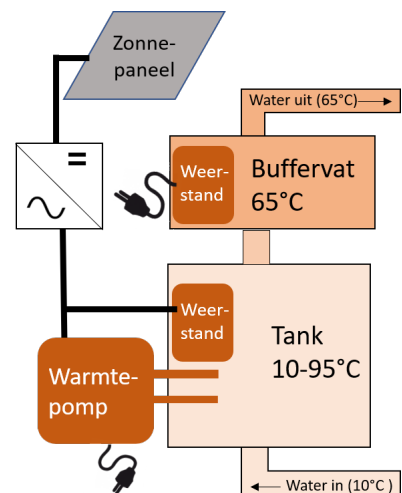
(c) Configuratie met zonnecollectoren (ZC)



(d) Configuratie met een warmtepomp (WP)



(e) Configuratie met een warmtepomp, maar zonder buffervat (WP2)



(f) Configuratie met een warmtepomp en zonnepanelen (WPPV)

Figuur 3.2: Alle onderzochte configuraties

3.1.2 Systeem 1: conventionele gasboiler (GB¹)

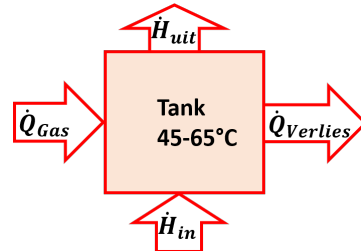
Werkingsprincipe

Het eerste systeem, het referentiesysteem, is een gasboiler die aardgas gebruikt als primaire energiebron voor het dekken van de warmtevraag voor SWW. Figuur 3.2a toont deze configuratie. Gezien er in dit systeem geen hernieuwbare energie is die opgeslagen moet worden, is er geen opsplitsing gemaakt tussen een tank en een buffervat. Om dit systeem beter te kunnen vergelijken met de andere systemen is er wel gekozen om een buffervatgasboiler te nemen en geen doorstroomgasboiler, omdat de onderzochte systemen dan zouden voldoen aan dezelfde randvoorwaarden.

Het systeem werkt als volgt: de tank heeft vier energiestromen die de energie-inhoud van de tank kunnen veranderen, twee ingaande energiestromen en twee uitgaande energiestromen:

1. De eerste ingaande energiestroom is de enthalpie van het water dat de tank binnenkomt.
2. De tweede ingaande energiestroom is de energie die de gasketel aanlevert.
3. De eerste uitgaande energiestroom is de warmtevraag voor SWW.
4. De tweede uitgaande energiestroom zijn de stand-by warmteverliezen van de tank. Deze zijn groter naarmate de gemiddelde temperatuur van de tank groter wordt of de isolatie dunner wordt.

De gasketel wordt hysteresis aangestuurd. Dit betekent dat de gasketel aanspringt wanneer de temperatuur van de tank, T_{tank} , lager is dan een gekozen temperatuur T_1 en dat de hij terug uitspringt zodra deze T_{tank} hoger is dan de temperatuur T_2 . Het verschil tussen T_1 en T_2 moet groot genoeg zijn zodat de periodes dat de gasketel aanstaat niet te kort zijn.



Figuur 3.3: Energiestromen naar en vanuit de tank

Variabelen

Dit systeem heeft verschillende vrijheidsgraden die allemaal worden meegenomen als variabele tijdens de zoektocht naar de optimale configuratie. Zo is de grootte van de tank een belangrijke parameter, net zoals de aanstuurtemperaturen T_1 en T_2 . Maar ook het type tank (isolatieniveau en maximale tanktemperatuur) en het type gasboiler (thermisch vermogen en rendement) zijn parameters die de uiteindelijke optimalisatie beïnvloeden. Tabel 3.1 geeft een overzicht van welke variabelen er geoptimaliseerd kunnen worden per systeem.

¹Voor duidelijkheid in tabellen en figuren wordt er soms met behulp van een afkorting gerefereerd naar elk systeem. De afkorting van deze configuratie is "GB".

3.1.3 Systeem 2: zonnepanelen die een elektrische weerstand voeden (PV)

Werkingsprincipe

De tweede configuratie die besproken wordt, maakt gebruik van zonnepanelen om zonne-energie om te zetten in elektriciteit. Deze elektriciteit verwarmt dan de tank met behulp van een elektrische weerstand. Zoals weergegeven in figuur 3.2b is er bij deze configuratie wel een onderscheid gemaakt tussen de tank en het buffervat, zoals uitgelegd in hoofdstuk 3.1.1. Zowel de tank als het buffervat hebben een elektrische weerstand: die van de tank wordt rechtstreeks gevoed door de elektriciteit van de zonnepanelen, die van het buffervat wordt gevoed door het elektriciteitsnet om te zorgen dat er ook in tijden van weinig zon warm water beschikbaar kan zijn. De tank heeft als doel om de energie van de zon op te slaan en te gepasten tijde af te geven aan het buffervat. Hoe meer energie door de zon geleverd wordt, hoe hoger de temperatuur van het water in de tank is, waardoor het water dat het buffervat binnenkomt warmer is en er zo voor zorgt dat de elektrische weerstand in het buffervat minder moet bijverwarmen. Gezien de elektrische weerstand in de tank werkt op CO_2 -vrije, gratis elektriciteit, wordt tijdens de optimalisatie van deze configuratie de nodige elektriciteit voor de weerstand in het buffervat geminimaliseerd.

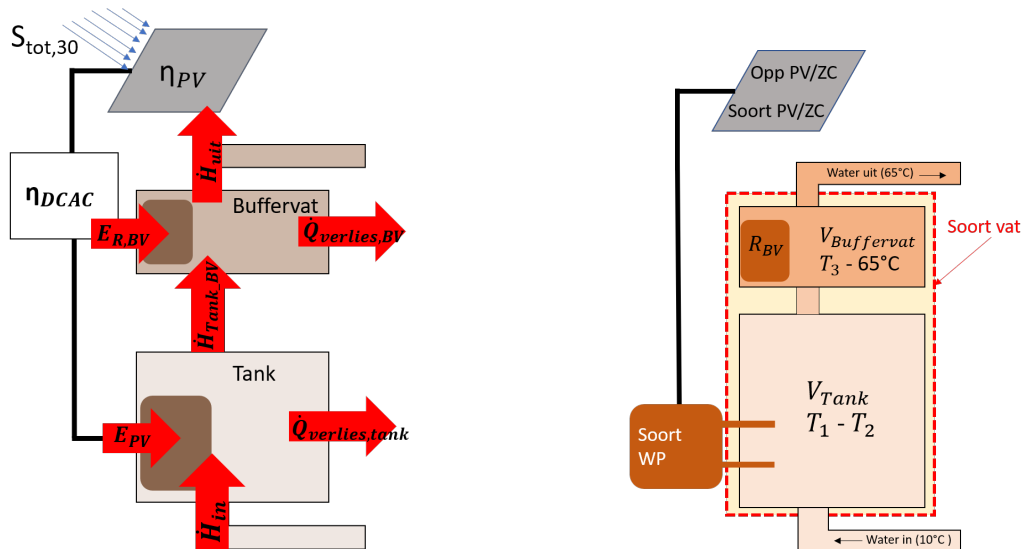
Deze configuratie heeft drie subsystemen waarvan de energiestromen apart gemodelleerd worden. Alle energiestromen staan ook weergegeven in figuur 3.4a.

De tank: net zoals de gasboiler, heeft de tank vier energiestromen, ook twee ingaande, namelijk de energie van het inkomende water en de energie van de door zonnepanelen gevoede elektrische weerstand en twee uitgaande energiestromen, namelijk de energie van het water dat naar het buffervat stroomt en de stand-by verliezen. De energie van de zon is niet stuurbaar en warmt de tank altijd op als er zonlicht beschikbaar is, behalve wanneer de tank een temperatuur bereikt die hoger is dan de maximale toegelaten temperatuur van de tank. Wat er met dit overschot aan elektriciteit gebeurt, wordt verder besproken in de sensitiviteitsanalyse (zie 5.3.1).

Het buffervat: ook dit subsysteem heeft vier energiestromen: de energie van het water dat doorstroomt vanuit de tank, de energie als gevolg van de bijverwarming van de door het net gevoede elektrische weerstand, de uitgaande energie voor het voorzien van de warmtevraag van SWW en opnieuw de stand-by verliezen, nu van het buffervat. Net zoals de gasketel wordt ook de weerstand van het buffervat hysteresis aangestuurd. Dit betekent dat de weerstand pas aangaat als de temperatuur van het buffervat lager is dan een vooraf bepaalde temperatuur T_3 . De weerstand warmt dan het buffervat op totdat de temperatuur terug boven de maximale buffervattemperatuur (65°C) is gestegen.

De zonnepanelen: het derde subsysteem zijn de zonnepanelen: hier wordt bepaald hoeveel elektriciteit de zonnepanelen opwekken door te kijken naar de grootte van de

invallende straling ($S_{tot,30}$) en dit achtereenvolgens te vermenigvuldigen met het rendement van de zonnepanelen (η_{PV}) en met dat van de convertor (η_{DCAC}). In realiteit is het rendement van zonnepanelen afhankelijk van de temperatuur van de panelen, maar deze temperatuur is moeilijk algemeen te modelleren, gezien deze zeer sterk afhankelijk is van de windsnelheid omwille van de geassocieerde convectieve warmteoverdracht. Omdat deze windsnelheid lokaal zeer sterk kan variëren, is er gekozen om te werken met het gewogen gemiddelde rendement over het jaar.



(a) Energiestromen in het PV-systeem

(b) Alle te optimaliseren variabelen

Figuur 3.4: Visualisatie van de energiestromen (links) en de variabelen (rechts) in het PV-systeem

Variabelen

Ook voor deze configuratie zijn er verschillende vrijheidsgraden die geoptimaliseerd kunnen worden tijdens de zoektocht naar de optimale dimensionering (ook visueel weergegeven in figuur 3.4b):

De grootte van de tank V_{tank} : hoe groter de tank is, hoe meer energie van de zonnepanelen kan opgeslagen worden. Een grotere tank heeft echter ook meer verliezen en is duurder in aankoop.

De grootte van het buffervat $V_{buffervat}$: er is een bepaalde grootte van buffervat noodzakelijk om te voldoen aan het gevraagde thermische comfort, maar hoe groter het buffervat wordt, hoe meer verliezen er zijn.

De grootte van de zonnepanelen A_{PV} : dit is een economische afweging tussen de extra investering in zonnepanelen tegen de vermindering in jaarlijkse kost aan

elektriciteit van het net. Gezien de tank slechts een eindige hoeveelheid energie kan opslaan, bestaat er een optimale oppervlakte aan zonnepanelen die varieert in functie van de tankgrootte.

De aanstuurtemperatuur van het buffervat T_3 : een hogere T_3 zorgt voor een kleiner benodigd buffervat, maar verlaagd ook de hoeveelheid opgenomen zonne-energie.

De grootte van de weerstand van het buffervat R_{BV} : een weerstand met een hoger elektrisch vermogen vermindert het vereiste volume van het buffervat maar de beschikbare elektrische capaciteit van residentiële woningen is wel beperkt.

Het type opslagvat: dit type is zowel van toepassing op de tank als op het buffervat, gezien de opsplitsing in de twee vaten eigenlijk zuiver fictief is. Een beter geïsoleerd opslagvat heeft lagere warmteverliezen, maar wel een hogere investeringskost.

Het type zonnepanelen: er bestaan verschillende soorten zonnepanelen, meestal gekarakteriseerd door het maximale uitgaande elektrische vermogen (uitgedrukt in W_p). De meest recent ontwikkelde zonnepanelen hebben een hoger maximaal vermogen en een hoger rendement, maar zijn duurder. Het gekozen type zonnepanelen is dus een afweging tussen energetische en economische aspecten.

De optimale waarde van elk van deze variabelen varieert naarmate het systeem economisch, ecologisch of energetisch geoptimaliseerd wordt.

3.1.4 Systeem 3: zonneboiler (ZC)

Werkingsprincipe

De derde configuratie die onderzocht wordt, is een systeem waarbij de zon opnieuw dient als primaire energiebron, maar waar nu zonnecollectoren het zonlicht direct omzetten in warmte. De collectorbuizen vervoeren deze warmte tot bij de tank, waar de warmte via een warmtewisselaar de tank opwarmt. Deze warmtewisselaar is noodzakelijk, gezien het collectorsysteem gebruik maakt van een water-glycol mengsel, wat om hygiënische redenen niet in contact mag komen met het sanitaire water. Het systeem is weergegeven in figuur 3.2c.

Het systeem bestaat opnieuw uit drie subsystemen, waarvan de eerste twee redelijk sterk overeenkomen met die van de vorige configuratie. Het buffervat heeft dezelfde vier energiestromen en bij de tank wordt enkel de energietoevoer van de elektrische weerstand vervangen door een energietoevoer via een warmtewisselaar. Het derde subsysteem is echter wel sterk verschillend: het rendement van de zonnecollectoren is namelijk niet langer constant, zoals dat van de zonnepanelen, maar is afhankelijk van de buitentemperatuur ($T_{omgeving}$), de temperatuur van het water-glycol mengsel in de collectorlus ($T_{fluidum}$) en van de invallende straling (S), zoals gedefinieerd in vergelijking 3.1. Hierin zijn k_1 , k_2 en η_0 parameters die vastliggen per type

zonnecollector.

$$\eta = \eta_0 - k_1 * \frac{T_{fluidum} - T_{omgeving}}{S} - k_2 * \frac{(T_{fluidum} - T_{omgeving})^2}{S} \quad (3.1)$$

Volgens deze definitie is het mogelijk dat het rendement van de zonnecollectoren kleiner wordt dan nul, wanneer de grootte van de invallende straling te klein is of wanneer het temperatuurverschil tussen de omgeving en het werkingsfluidum te groot is. Dit zou betekenen dat de collectorlus meer verliezen heeft dan dat er stralingsenergie wordt opgenomen en in deze gevallen, meestal in de winter, pompt de pomp van de collectorlus dan ook geen werkingsfluidum rond. Ook in het andere uiterste, wanneer de zonnecollectoren zeer veel warmte produceren en de tanktemperatuur zijn maximale waarde heeft bereikt, staat de pomp niet aan. Er zijn bijgevolg drie manieren waarop er invallende energie van de zon verloren kan gaan:

1. Een eerste deel van de stralingsenergie gaat verloren, omdat er op dat moment niet genoeg straling is om het rendement groter dan 0% te krijgen.
2. Een tweede deel van de stralingsenergie gaat verloren omdat het rendement, zoals gedefinieerd in formule 3.1 kleiner is 1.
3. Van alle energie die de zonnecollectoren uiteindelijk kunnen leveren, gaat er toch nog een derde deel energie verloren, omdat de tank reeds zijn maximale energie-inhoud bezit en er dus geen nut meer is voor de geproduceerde warmte.

Door al deze drie energieverliezen samen te nemen en dit te vergelijken met de totale energie van de invallende straling, is het mogelijk een rendement te definiëren dat de totale benutting van de beschikbare zonne-energie uitdrukt.

Variabelen

Het merendeel van de te optimaliseren variabelen van dit systeem komen overeen met die van het PV-systeem, namelijk de grootte van de tank, de grootte van het buffervat, de grootte van de panelen, de aanstuurtemperatuur van het buffervat, de grootte van de buffervatweerstand en het soort opslagvat. Er zijn echter nog twee extra te bepalen variabelen:

Het type zonnecollectoren: dit is een afweging tussen de initiële aankoopprijs en de operationele performantie.

Het debiet dat door de zonnecollectorlus loopt: deze parameter wordt meestal uitgedrukt in liter per eenheid collectoroppervlakte per uur. Hoe groter dit debiet, hoe kleiner de temperatuurstijging van het water gedurende één lus en hoe kleiner dus de thermische verliezen zijn. Een groter debiet induceert echter ook meer drukverliezen, waardoor de collectorpomp meer elektriciteit verbruikt.

3.1.5 Systeem 4: warmtepompboiler (WP)

Werkingsprincipe

De vierde configuratie is een warmtepompboiler, waar een warmtepomp zorgt voor de opwarming van het water in de tank. Dit systeem verschilt op enkele fundamentele vlakken met de vorige twee besproken hernieuwbare systemen. In de eerste plaats verbruikt de *hernieuwbare* technologie, de warmtepomp, hier elektriciteit van het elektriciteitsnet en heeft het dus wel een netto CO_2 -uitstoot. Een tweede fundamenteel verschil is dat de warmtepomp wel stuurbaar is, daar waar de werking van de vorige twee duurzame systemen volledig afhankelijk was van de niet-regelbare zon. De EU beschouwt een warmtepomp als een volwaardige hernieuwbare energiebron, omdat een warmtepomp meer warmte produceert dan het elektriciteit verbruikt [39]. Dit maakt van de warmtepomp een controleerbare bron van hernieuwbare energie.

Ook dit systeem, weergegeven in figuur 3.2d, valt opnieuw onder te verdelen in drie subsystemen: een buffervat en tank die zeer gelijkaardig zijn aan de vorige twee configuraties (figuren 3.2b en 3.2c), met het kleine verschil dat de hernieuwbare energiebron hier een warmtepomp is en de warmtepomp als derde subsysteem. Deze warmtepomp levert een hernieuwbare energiestroom aan de tank, waarvan formule 3.2 de grootte bepaalt:

$$E_{thermisch,WP} = COP_{WP}(T_{tank}, T_{buiten}) * P_{elek}(T_{tank}, T_{buiten}) \quad (3.2)$$

Hierbij zijn zowel de COP van de warmtepomp als het elektrisch vermogen dat de warmtepomp verbruikt een functie van zowel de temperatuur van het water dat opgewarmd moet worden (wat de T_{tank} is) en de temperatuur van de lucht waaruit de warmte wordt onttrokken (wat de buitentemperatuur is). Zoals eerder gezegd in 2.2.3, daalt de COP van een warmtepomp als het temperatuurverschil tussen beide media toeneemt en werkt de warmtepomp dus ideaal bij een zo laag mogelijke tanktemperatuur.

Ook bij de warmtepomp gebeurt er een hysteresisaansturing: de warmtepomp springt aan wanneer de tanktemperatuur daalt onder een zelf bepaalde temperatuur T_1 en stopt wanneer de tanktemperatuur groter is dan een eveneens zelf bepaalde temperatuur T_2 . Het temperatuurverschil tussen deze twee aanstuurtemperaturen mag niet te klein worden, want een warmtepomp verslijt sneller bij een hogere afschakelfrequentie.

Variabelen

Een groot deel van de te optimaliseren variabelen zijn gelijkaardig aan die van de vorige twee configuraties, namelijk V_{tank} , $V_{buffervat}$, T_3 , R_{BV} en het type opslagvat. Er zijn nu echter ook drie nieuwe variabelen, die hieronder kort besproken worden:

De aanstuurtemperaturen T_1 en T_2 : een goede afstelling van deze twee temperaturen is cruciaal voor een optimale werking van de warmtepomp, gezien ze

de gemiddelde tanktemperatuur bepalen. Een lagere gemiddelde T_{tank} betekent minder warmteverliezen en een hogere COP. Een hogere gemiddelde T_{tank} zorgt er echter voor dat de warmtepomp een relatief groter deel van de warmtevraag dekt ten nadele van de weerstand in het buffervat. Gezien een warmtepomp efficiënter werkt dan een weerstand, kan dit het totale elektriciteitsverbruik alsnog doen dalen.

Het soort warmtepomp: een warmtepomp met een hoger nominaal elektrisch vermogen, heeft een grotere gemiddelde COP, maar heeft ook een grotere initiële kost.

3.1.6 Systeem 5: warmtepompboiler zonder buffervat (WP2)

Werkingsprincipe

De vijfde configuratie (figuur 3.2e) lijkt sterk op de vierde (figuur 3.2d), gezien hier wederom gebruik gemaakt wordt van een warmtepomp als hernieuwbare technologie. Het grote verschil met het vorige systeem is dat er in dit systeem geen buffervat is, waardoor het SWW rechtstreeks uit de tank wordt geleverd. De tank moet dan beide functionaliteiten van het buffervat overnemen: het moet te allen tijde een temperatuur hoger dan de gevraagde temperatuur (42°C) hebben en moet ook periodisch tot een hogere temperatuur (65°C) gebracht worden om zo de voorplanting van de legionella-bacterie te vermijden. Het eerste is geen probleem, gezien de warmtepomp controleerbaar is, het tweede is wel wat moeilijker, omdat een warmtepomp een maximale temperatuur heeft, namelijk 60°C . De bijkomstige opwarming moet daarom geleverd worden door een weerstand, die intern is ingebouwd in de warmtepomp. Hierdoor verloopt deze extra opwarming wel minder efficiënt. Deze interne weerstand springt ook bij tijdens de piekvraagmomenten.

Variabelen

De parameters die geoptimaliseerd worden in deze configuratie zijn dezelfde als bij de vorige configuratie, op één uitzonderingen na: de grootte van het buffervat moet namelijk niet meer bepaald worden, gezien dat dit niet meer aanwezig is.

3.1.7 Systeem 6: warmtepompboiler in combinatie met zonnepanelen (WPPV)

Werkingsprincipe

De laatste configuratie die deze thesis bestudeert, is eigenlijk een combinatie van twee technologieën die reeds besproken zijn in secties 3.1.3 en 3.1.5. Dit systeem, weergegeven in figuur 3.2f, maakt zowel gebruik van zonnepanelen als van een warmtepomp. Hierbij voeden zonnepanelen de warmtepomp indien mogelijk en anders zorgt het net voor de nodige elektriciteit. Het is belangrijk om op te merken dat de warmtepomp een bepaald minimaal elektrisch vermogen nodig heeft vooraleer

deze kan aangedreven worden en dat het dus kan voorvallen dat de zonnepanelen wel elektriciteit produceren, maar aan een te laag vermogen om de warmtepomp aan te drijven. Om in deze gevallen geen elektriciteit te verliezen, is er ook een elektrische weerstand voorzien in de tank, die gevoed wordt door de zonnepanelen. De werking van het buffervat, de warmtepomp en de zonnepanelen is gelijkaardig aan wat hierboven reeds beschreven is.

Variabelen

Gezien dit systeem een soort combinatie is van systeem 2 en 4, worden ook alle variabelen van beide systemen, waarvan er sommige overlappen, hier onderzocht, zijnde V_{tank} , $V_{buffervat}$, A_{PV} , T_1 , T_2 , T_3 , R_{BV} het type opslagvat, het type warmtepomp en het type zonnepanelen

Parameter	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Volume buffervat	×	✓	✓	✓	×	✓
Volume Tank	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Oppervlakte panelen	×	✓	✓	×	×	✓
T_1	✓	×	×	✓	✓	✓
T_2	✓	×	×	✓	✓	✓
T_3	×	✓	✓	✓	✓	✓
Weerstand buffervat	×	✓	✓	✓	✓	✓
Soort opslagvat	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Soort warmtepomp	×	×	×	✓	✓	✓
Soort zonnecollectoren	×	×	✓	×	×	×
Soort zonnepanelen	×	✓	×	×	×	✓
Soort gasketel	✓	×	×	×	×	×

Tabel 3.1: Te optimaliseren variabelen per systeem

3.2 Gemaakte aannames

Om de gewenste resultaten te bekomen, zijn de hierboven beschreven configuraties omgezet naar een model. Hiervoor zijn er echter enkele aannames nodig die het mogelijk maken om de systemen te modelleren. De aannames zijn onderverdeeld in twee categorieën: de aannames die nodig zijn om de systemen uniek te definiëren en de aannames die het mogelijk maken om de systemen te modelleren. Beide soorten aannames gelden voor alle configuraties, om zo de vergelijking tussen de systemen correct te houden.

3.2.1 Systemmatige aannames

- De temperatuur van het water dat de tank binnenkomt is gedurende het hele jaar gelijk aan 10°C.

- De referentietemperatuur van water is tevens gelijk gesteld aan 10°C. Dit is gekozen, om de energie-inhoud van de tank een correcte fysische betekenis te geven.
- Er is gekozen dat het SWW aan de kraan geleverd wordt aan een temperatuur van 40°C. Omdat er echter nog temperatuurverliezen zijn over de leidingen, moet het water dat het systeem verlaat een temperatuur van minstens 42°C hebben, zodat er 40°C effectief geleverd wordt aan de kraan. Indien de temperatuur van de tank/buffervat hoger is dan 42°C, wordt er koud water van 10°C gemengd met dit te warme water totdat er een hoeveelheid water, gelijk aan het gevraagde debiet, overblijft dat een temperatuur van 42°C heeft. Het uitgaande debiet wordt dus met de volgende formule bepaald:

$$Q_{uit} = Q_{vraag} * \frac{T_{vraag} - T_{ref}}{T_{uit} - T_{ref}} \quad (3.3)$$

- De circulatieverliezen (zoals uitgelegd in sectie 2.1) bedragen 40%, omdat dit een gemiddelde waarde is tussen wat in nieuwe (30%) en oude (50%) huizen voorkomt.
- Om veiligheidsredenen is ervoor gekozen dat het vat waaruit het SWW wordt onttrokken (de tank van het systeem uit 3.1.2 en 3.1.6, het buffervat bij de rest) maximaal een temperatuur van 65°C mag hebben, omdat er anders in geval van een technische faling van een component te ernstige brandwonden zouden kunnen ontstaan bij contact met water [40,41]. Indien de tanktemperatuur hoger is dan 65°C, gebeurt er een menging met koud water (10°C), totdat de temperatuur van het water dat naar het buffervat gaat gelijk is aan 65°C.
- De temperatuur van de ruimte waarin het opslagvat zich bevindt is gelijk gesteld aan 20°C, gedurende het volledige jaar. Deze temperatuur is belangrijk om de warmteverliezen te bepalen van het opslagvat.
- De initiële temperaturen (de temperatuur aan het begin van de modellering) van elk vat dat hysteresis aangestuurd wordt, is gelijkgesteld aan het gemiddelde van de twee temperaturen waartussen dit vat wordt aangestuurd. Voor de tank van de systemen gebaseerd op zonnepanelen (3.1.3) en zonnecollectoren (3.1.4) wordt de gemiddelde tanktemperatuur van de winter genomen, wat 20°C is.
- Zowel de tank als het buffervat (indien aanwezig) worden verondersteld perfect gemengd te zijn op het einde van elke periode. Elk vat heeft dus op elk moment in de tijd maar één temperatuur. Op deze manier wordt de stratificatie vereenvoudigd tot twee lagen water met twee verschillende temperaturen.
- Om een extreme dimensionering van het opslagvat te vermijden, is ervoor gekozen dat er in totaal op jaarbasis een energietekort mag zijn van 1kWh. Dit komt overeen met 0,18‰ van het bestudeerde vraagprofiel.

3.2.2 Aannames voor het modelleren

- Zowel de dichtheid als de soortelijke warmtecapaciteit van water zijn constant genomen, gezien deze binnen de range $[10,65]^{\circ}\text{C}$, die voornamelijk gebruikt wordt in deze thesis, respectievelijk slechts 2% en 0,4% variëren. Deze constante waarden zijn respectievelijk 988 kg/m^3 en 4180 J/kgK .
- Om het systeem te kunnen modelleren, is het noodzakelijk om dit te discretiseren en te rekenen per tijdsperiode. Daarom wordt er een tijdschaal van 15 minuten gebruikt.
- Door deze discretisatie in de tijd kan het echter voorvallen dat het gevraagde debiet binnen één periode groter is dan het volume van de tank of het buffervat. Hierdoor kan het gevraagde debiet niet geleverd worden. Wanneer dit gebeurt, wordt er verder gerekend met het volume van dit vat als debiet en wordt het verschil in energie tussen het gevraagde debiet en het volume van het vat als energietekort beschouwd.
- De vraag naar SWW is relatief onafhankelijk van het moment in het jaar. De hoeveelheid zonne-energie is dat echter wel. Daarom is er gekozen om elk model te simuleren over een heel jaar, omdat dit de kleinst mogelijke representatieve periode is.
- De warmteverliezen worden bepaald aan de hand van de volgende formule:

$$Q_{\text{verlies}} = UA * (T_{\text{vat}} - T_{\text{omgeving}}) \quad (3.4)$$

Om de UA-factor van een vat met een willekeurige grootte te bepalen, is er per soort buffervat een correlatie gezocht tussen de UA-factoren van de bestaande opslagvaten in functie van de opslagvatgrootte. Omdat de tank en het buffervat een verschillende temperatuur hebben, moet formule 3.4 twee keer toegepast worden en dus moeten de UA-waardes van beide vaten apart bepaald worden. Aangezien beide vaten echter één zijde gemeenschappelijk hebben (beide vaten zijn in realiteit één vat en daarom bestaat zowel het bovenkant van de tank als de onderkant van het buffervat eigenlijk niet), gebeurt er een overschatting van het warmteverlies, wanneer het bepalen van de verliezen zonder aanpassingen op beide vaten apart gebeurt. De UA-waardes van de tank en het buffervat worden daarom beide verlaagd met een fractie die overeenkomt met het relatieve aandeel van het in realiteit niet bestaande oppervlak. Een meer gedetailleerde uitwerking van deze aanname is te vinden in appendix A.3.

- De COP-data zijn gegeven in tabelvorm in functie van de tanktemperatuur en de buitentemperatuur [28]. Gezien beide parameters een cruciale invloed hebben op de COP-waarde, vindt er bij elke COP-bepaling een dubbele interpolatie plaats tussen de vier meest nabijgelegen data-punten van de tabel. Hetzelfde principe wordt gebruikt om zowel het nominaal elektrisch vermogen als het minimale elektrische vermogen te bepalen als functie van beide

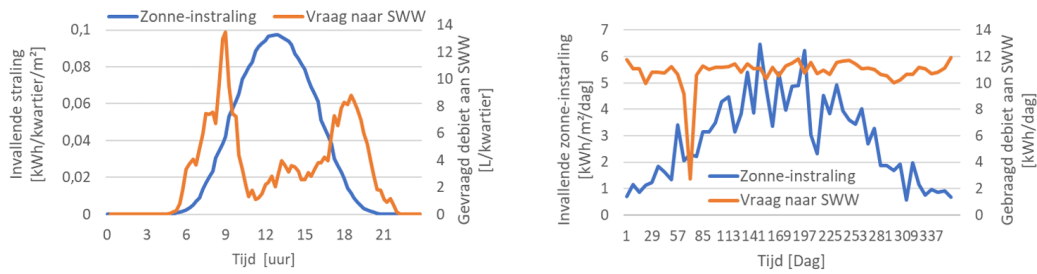
temperaturen. Er wordt aangenomen dat de warmtepomp enkel werkt bij een tanktemperatuur die zich binnen de waardes aangegeven in de tabel bevindt. Om de meest extreme weersomstandigheden aan te kunnen bij de COP-interpolatie, is er wel ingecalculereerd dat de buitentemperatuur buiten de getabelleerde waardes kan vallen: voor een lagere buitentemperatuur dan de minimaal getabelleerde temperatuur (-20°C) wordt er aangenomen dat de COP gelijk is aan 1, omdat de interne weerstand dan werkt. Bij een temperatuur hoger dan de maximaal getabelleerde buitentemperatuur (30°C) geldt: $\text{COP}(T_{\text{buiten}}) = \text{COP}(T_{\text{buiten,max}})$. Deze aanname is gelegitimeerd door het feit dat er in deze situatie een kleiner temperatuurverschil is dan in het maximale getabelleerde geval, wat een minstens even hoge COP zou betekenen. Verder is er aangenomen dat de interne weerstand van de warmtepomp werkt, wanneer de waarde van de COP onder de 1 zou zijn. Hierdoor is de COP alsnog gelijk aan 1.

3.3 Input data

Om de verschillende modellen te kunnen modelleren, moeten de nodige inputdata natuurlijk eerst in het model aanwezig zijn. Daarom bespreken de komende vier secties respectievelijk de gebruikte stralingsdata, het vraagprofiel naar SWW, de buitentemperatuur en de onderzochte componenten. De eerste drie datareeksen moeten op elk moment in de tijd gekend zijn, de vierde moet slechts eenmalig bepaald worden. Sectie 3.3.5 bespreekt daarna welk model welke data vereist.

3.3.1 Irradiatie

Om te weten hoeveel elektriciteit de zonnepanelen en hoeveel warmte de zonnecollectoren produceren, moet er op elk moment van het jaar geweten zijn hoe groot de zonne-instraling is. De hoeveelheid straling die invalt, is afhankelijk van de hoek waaronder het paneel staat en de richting waarin de panelen georiënteerd zijn. Er is gekozen dat deze hoek 30° is ten opzichte van de horizontale en dat de panelen richting het zuiden georiënteerd zijn. De gebruikte data zijn door Imec voorzien en houden rekening met de gemiddelde instraling van de afgelopen 20 jaar. Deze data geven per kwartier weer hoeveel kWh er invalt per m^2 . Om de grootte van de instraling te visualiseren, geven figuur 3.5a en 3.5b respectievelijk het verloop van de straling over een dag en over een jaar weer. Zoals verwacht piekt de instraling tegen de middag en in de zomer. De grootte van deze irradiatie is zeer belangrijk voor de economische rendabiliteit van sommige systemen, zoals ook vermeld in hoofdstuk 2.3.



(a) Gemiddeld verloop van de zonne-instraling en de vraag naar SWW over een dag

(b) Dagelijkse gemiddelde zonne-instraling en vraag naar SWW over het jaar

Figuur 3.5: Visualisatie van het gebruikte gebruikers- en stralingsprofiel

3.3.2 Vraagprofiel

Uiteraard is het ook noodzakelijk om te weten hoeveel warmte elke configuratie moet leveren op elk moment in de tijd. Daarom is er een gebruikersprofiel nodig, dat weergeeft hoeveel liter SWW er tijdens elke tijdsperiode gevraagd is. Dit debiet wordt dan omgerekend naar een hoeveelheid energie die het systeem moet leveren, door de volgende formule:

$$E_{vraag} = Q_{vraag} * C_{p,water} * \rho_{water} * (T_{vraag} - T_{ref}) * (1 + f) \quad (3.5)$$

Hierin zijn $C_{p,water}$, ρ_{water} , T_{vraag} , T_{ref} en f respectievelijk de soortelijke warmtecapaciteit van water (4180 J/kgK), de dichtheid van water (988 kg/m³), de gevraagde SWW-temperatuur (42°C), de referentietemperatuur (10°C) en de factor die de circulatieverliezen in rekening brengt (0.4 of 40%).

Om de vergelijking tussen de verschillende configuraties representatief te houden, gebruiken deze systemen in het begin allemaal hetzelfde gebruikersprofiel. Dit profiel is de vraag naar SWW voor een gezin met vier personen. Ze verbruiken gemiddeld 300L per dag of 75L per persoon per dag. Figuren 3.5a en 3.5b geven respectievelijk het gemiddelde verloop over een dag en het verloop over het jaar weer. In figuur 3.5a valt het op dat het profiel gemiddeld twee pieken per dag kent ('s ochtends en 's avonds), omdat mensen dan het vaakst douchen. In figuur 3.5b is dan weer duidelijk dat de vraag naar SWW relatief constant is over het jaar, behalve wanneer de inwoners op reis zijn (zoals nu het geval is rond de 80ste dag). In de sensitiviteitsanalyse worden er nog meer gebruikersprofielen getest worden, om zo de invloed van het gebruikersprofiel op zowel de optimalisatie als op het ideale systeem te tonen.

3.3.3 Buitentemperatuur

De buitentemperatuur is afkomstig vanuit dezelfde database als de invallende zonneinstraling. Het is dus ook de gemiddelde buitentemperatuur van de afgelopen 20 jaar en is compatibel met de eerder getoonde stralingswaarden.

3.3.4 Gebruikte technologie

Vooraleer de verschillende systemen gemodelleerd kunnen worden, is het ook belangrijk om te weten welke types componenten ze kunnen gebruiken. Om ervoor te zorgen dat de prijzen van alle componenten met elkaar vergelijkbaar zouden zijn, is er gekozen om alle componenten bij eenzelfde fabrikant te kiezen, namelijk VIESSMANN. Hieronder wordt een beknopt overzicht gegeven welke varianten er per technologie bestudeerd worden binnen deze thesis. De volledige informatie over de technische karakteristieken en de kostprijzen van alle mogelijke componenten is te vinden in appendix A.1.

Opslagvat: er worden drie reeksen opslagvaten bestudeerd. De 100E-reeks heeft geen interne warmtewisselaar en is daarom enkel geschikt voor het PV-systeem. De 100W-reeks is niet compatibel met een elektrische weerstand en is hierdoor enkel geschikt voor het GB-systeem. Deze reeks beschikt over twee varianten: een goed geïsoleerde (verder afgekort als 100W+) en minder goed geïsoleerde (100W). Voor de andere vier systemen is er de 100V-reeks. Deze bestaat uit vier varianten: 100V, 100V+, 300V en 300V+ (gesorteerd volgens toenemende graad van isolatie).

Warmtepomp: er worden zes soorten warmtepompen in beschouwing genomen, namelijk D04, D06, D08, D010, D013 en D016 (gesorteerd volgens toenemend thermisch vermogen). Een warmtepomp met een groter thermisch vermogen, heeft ook een hogere gemiddelde COP, maar bijgevolg ook een grotere kost.

Zonnecollectoren: er zijn twee soorten vlakkeplaat zonnecollectoren mogelijk bij VIESSMANN: de 100FM of de 200FM. De eerste variant heeft een lager gemiddeld rendement, maar heeft hierdoor ook een lagere prijs.

Gasboiler: er zijn vier types gasboilers bestudeerd, verschillend in prijs, thermisch vermogen en rendement, namelijk 50Wa, 100Wa, 50Wb en 100Wb (gesorteerd volgens toenemend thermisch vermogen).

Zonnepanelen: er worden vijf soorten zonnepanelen meegenomen in deze thesis, met elk een eigen maximaal AC-vermogen dat ze kunnen produceren. Voor de eenvoud is er gekozen deze vijf soorten te benoemen m.b.v. dit maximale vermogen, namelijk 270Wp, 285Wp, 300Wp, 305Wp en 320Wp. Ook het rendement van de panelen verschilt per soort.

3.3.5 Inputdata per model

Niet elk model vereist alle soorten gegevens om te kunnen werken. Zo is de invallende zonnestraling enkel relevant voor systemen met zonnepanelen of zonnecollectoren en zijn niet alle technische componenten nodig bij elk model. Tabel 3.2 geeft overzichtelijk weer welke gegevens elk systeem nodig heeft:

Soort data	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Invallende zonnestraling	×	✓	✓	×	×	✓
Gebruikersprofiel van SWW	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Buitentemperatuur	×	×	✓	✓	✓	✓
Opslagvat	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Warmtepomp	×	×	×	✓	✓	✓
Zonnecollector	×	×	✓	×	×	×
Gasboiler	✓	×	×	×	×	×
Zonnepaneel	×	✓	×	×	×	✓

Tabel 3.2: Benodigde inputgegevens per systeem

3.4 Gewenste resultaten

3.4.1 Energetische analyse

Er zijn enkele relevante energetische systeemkarakteristieken voor elk systeem. Zo is het interessant om een idee te hebben van hoeveel hernieuwbare energie elk systeem produceert. Voor een warmtepomp wordt het verschil tussen de geleverde warmte en de verbruikte elektriciteit als hernieuwbare energie geteld. Ook de hoeveelheid externe energieafname van elk systeem (zowel elektriciteit van het distributienet als aardgas) is relevant, om zo te kunnen oordelen hoe decentraal elk systeem is. Deze twee karakteristieken zijn combineerbaar door een soort *energetisch rendement* te definiëren. Dit is de fractie hernieuwbare energie ten opzichte van de totale hoeveelheid gebruikte energie. Tot slot is ook het totale energietekort een cruciale energetische parameter.

3.4.2 Economische analyse

In een economische analyse wordt er gekeken welk systeem het goedkoopste is, gegeven de huidige prijzen. Omdat de gebruikte componenten verschillende levensduren hebben, wordt er gekeken naar de geannualiseerde totale kost voor sanitair warm water. Om zowel de tijdswaarde van geld (inflatie) als de opportunitetskost van geld (het verwachte rendement) mee te nemen, is er gekozen om te werken met een interestvoet van 4%. Dit is volgens de EU een normale waarde voor lange termijn projecten in de residentiële sector [42]. De totale kost bestaat uit de volgende delen:

- De aankoopprijs van alle componenten: zowel het opslagvat met de bijbehorende extra's als de technologie die het water opwarmt.
- De kostprijs voor elektriciteit. Dit is 0,26 euro per kWh [43, 44].
- De kostprijs voor gas, die gelijk is aan 0,05 euro per kWh [44, 45].
- Prijs voor water

- Prijs voor plaats

Een meer uitgebreide beschrijving van elk van deze kostcomponenten is gegeven in Appendix A.1. Omdat er in de wetenschappelijke wereld geen consensus is over hoe groot de kost is om 1 ton CO_2 uit te stoten en om de reële situatie na te bootsen, wordt er momenteel nog geen kost aangerekend voor de uitstoot van CO_2 . Dit wordt in de sensitiviteitsanalyse verder onderzocht.

3.4.3 Ecologische analyse

Aangezien zijn CO_2 -uitstoot de grootste reden is dat de traditionele gasboiler nu onder vuur ligt, is het tot slot ook nog relevant om te kijken in welke mate de hernieuwbare systemen deze uitstoot kunnen verlagen. Door een levenscyclusanalyse uit te voeren zou het mogelijk zijn om de totale emissies per systemen te bepalen, door zowel de emissies van de productiefase als de operationele fase mee te rekenen. Er is echter nog veel discussie over de emissies tijdens de productiefase. In de eerste plaats is er veel onenigheid over de grootte van deze emissies. Deze is namelijk afhankelijk van het land waar de componenten geproduceerd worden. Als de zonnepanelen uit China komen is de vervuiling veel groter dan wanneer ze bijvoorbeeld uit Frankrijk komen. Dit komt niet alleen omdat de milieunormen veel lager liggen in China, maar ook omdat de productie van elektriciteit in Frankrijk veel minder CO_2 uitstoot.

Ten tweede kunnen de emissies tijdens de productiefase niet op éénzelfde manier behandeld worden als de operationele emissies, omdat de productiefase meestal niet in België plaatsvindt. Een daling van emissies in België is namelijk niet alleen voordelig om de klimaatdoelstellingen te behalen, maar veroorzaakt ook een verbetering van lucht- en levenskwaliteit in België.

Bovenop deze twee discussiepunten, komt er nog de conclusie van A.D. Moore die in zijn studie aantoonde dat meer dan 90% van de totale uitstoot in de operationele fase plaatsvindt [31]. Daarom is er gekozen om in deze thesis enkel de operationele emissies van CO_2 mee te nemen omdat een volledige levenscyclusanalyse niet alleen op te veel aannames zou berusten, maar ook omdat dit niet de essentie van deze thesis is. Dit houdt in dat er enkel gekeken wordt naar de hoeveelheid CO_2 -uitstoot per kWh voor elektriciteit van het distributienet (gemiddeld 0,2 kg CO_2 per kWh in België [46]) en voor gas (ook 0,2 kg CO_2 per kWh [47]).

Hoofdstuk 4

Resultaten

Dit hoofdstuk onderzoekt, met behulp van het model uit hoofdstuk 3, hoe de optimale dimensionering van elk systeem eruit ziet. Vooraleer deze optimale dimensionering echter kan gebeuren, is het belangrijk om te weten welke invloed elke individuele variabele heeft op de relevante karakteristieken van het systeem. Deze karakteristieken zijn zowel energetisch (hoeveelheid hernieuwbare energie, grootte van de externe energieafname, energetisch rendement,...) als economisch (jaarlijkse kost) als ecologisch (CO_2 -uitstoot). Deze analyse gebeurt voor elk van de zes configuraties in sectie 4.1.

Met behulp van deze kennis is het mogelijk om in 4.2 al deze variabelen tegelijk te variëren om zo elk systeem te optimaliseren in een bepaalde richting. Nadat het referentiesysteem is gedefinieerd en de optimalisatiealgoritmes uitgelegd zijn, worden de systemen in eerste instantie energetisch geoptimaliseerd om zo de hoeveelheid externe energieafname te minimaliseren (in 4.2.3). Hierna wordt ook nog gekeken in welke mate de totale jaarlijkse kost en de uitstoot van elk systeem minimaliseerbaar zijn (in respectievelijk 4.2.4 en 4.2.5). Dit hoofdstuk eindigt met een vergelijking tussen de zes systemen op basis van de geoptimaliseerde configuraties in 4.2.6.

In dit hoofdstuk wordt er altijd gebruik gemaakt van de huidige economische en technische situatie. Hier is één uitzondering op: er is gekozen om initieel te rekenen zonder de subsidies die momenteel verkrijgbaar zijn voor bepaalde technologieën. Dit betekent ook dat de eventuele BTW-verlaging voor zonnepanelen en zonnecollectoren en het principe van de terugdraaiende teller momenteel nog niet beschouwd worden. De sensitiviteitsanalyse bespreekt deze aspecten wel.

4.1 Invloed optimalisatievariabelen

Door telkens slechts één variabele te variëren en de rest gelijk te stellen aan een referentievariabelen (gegeven in tabel 4.1), wordt de invloed van deze variabele op de verschillende energiestromen, de economische kost, het rendement/COP en het thermisch (dis)comfort bestudeerd. Op die manier wordt onderzocht welke redeneringen en onderlinge invloeden in acht genomen moeten worden bij het bepalen van de optimale waarde voor elke variabele. De referentievariabelen zijn

gekozen om de manier waarop hernieuwbare systemen momenteel het vaakst gedimensioneerd en aangestuurd worden, zo goed mogelijk te benaderen. Ook voor de gebruikte componenten wordt de meest voorkomende variant gekozen. Omdat de invloed op de dimensionering groter is bij de hernieuwbare systemen, worden deze systemen eerst besproken.

Parameter	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Volume buffervat [L]	×	200	200	150	×	150
Volume tank [L]	100	300	300	150	300	150
Oppervlakte panelen [m^2]	×	30	10	×	×	16
T_1 [°C]	55	×	×	45	50	45
T_2 [°C]	65	×	×	55	60	55
T_3 [°C]	×	60	60	50	50	50
Weerstand buffervat [kW]	×	4	4	2	2	2
Soort opslagvat	100W+	100E	100V+	100V+	100V+	100V+
Soort warmtepomp	×	×	×	D06	D06	D06
Soort zonnecollectoren	×	×	100FM	×	×	×
Soort zonnepanelen	×	300Wp	×	×	×	300Wp
Soort gasketel	50Wa	×	×	×	×	×

Tabel 4.1: Referentievariabelen per systeem

4.1.1 Configuratie met zonnepanelen (PV)

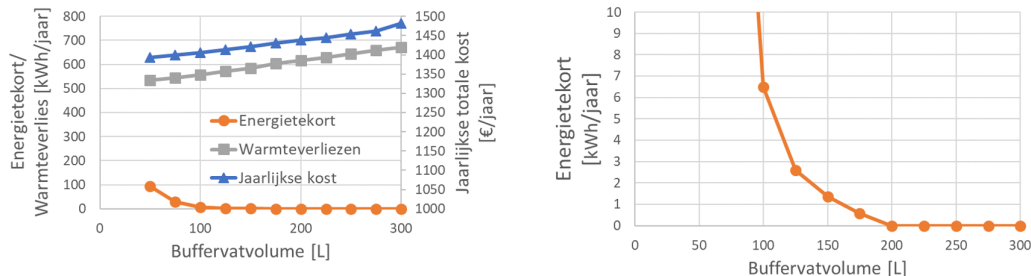
Deze sectie bespreekt de invloed van elke te optimaliseren variabele op de uiteindelijke karakteristieken van de configuratie met zonnepanelen (ook wel afgekort als het PV-systeem). De tweede kolom van tabel 4.1 geeft de referentievariabelen weer ten opzichte waarvan de variabelen gevarieerd worden. De variabelen worden overlopen in de volgorde zoals ze in deze tabel staan.

Volume van het buffervat

Zoals eerder gezegd, is het de taak van het buffervat om te zorgen dat er altijd voldoende warm water van minstens 42°C beschikbaar is. Daarom bepalen voornamelijk de pieken in de vraag en de periodes van weinig instraling de minimale grootte van het buffervat. Concreet wordt de grootte bepaald door te onderzoeken vanaf welk volume het totale energietekort (de hoeveelheid energie van de jaarlijkse SWW-warmtevraag die niet geleverd kan worden) onder een gekozen grens ligt. Deze grens is in sectie 3.2 op 1 kWh/jaar gelegd. Daarom is het zichtbaar op figuur 4.1a, maar nog beter op figuur 4.1b dat het buffervat minimaal 175L moet zijn.

Op figuur 4.1a is ook zichtbaar hoe het volume van het buffervat de warmteverliezen beïnvloedt. Een groter buffervatvolume betekent een groter contactoppervlak met de omgeving, waardoor er meer warmteverliezen zijn. Aangezien deze figuur eveneens toont dat de hoeveelheid opgenomen zonne-energie ongeveer constant blijft bij een variërend buffervatvolume, betekenen deze hogere warmteverliezen dat er meer elektriciteit van het net gebruikt wordt. Dit induceert een hogere kost,

waardoor het optimale buffervatvolume bijgevolg het kleinste volume is waarbij het energietekort aanvaardbaar is, namelijk 175L.

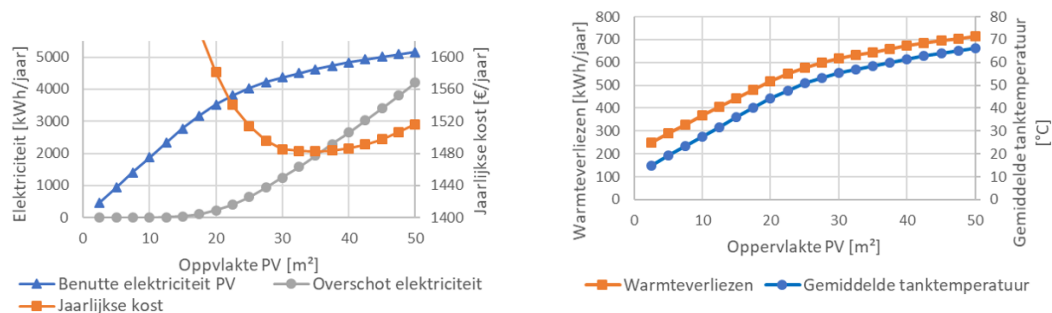


(a) Invloed op de warmteverliezen, het energietekort en de jaarlijkse kost (b) Detail van de invloed op het energietekort

Figuur 4.1: De invloed van het buffervatvolume bij het PV-systeem

Oppervlakte van de zonnepanelen

Dat een grotere oppervlakte zonnepanelen meer elektriciteit opwekt is logisch. Omdat de tank echter een maximale watertemperatuur heeft, kan er maar een bepaalde hoeveelheid warmte op één moment opgeslagen worden in de tank. Dit is zichtbaar op figuur 4.2a waar de curve die de hoeveelheid benutte elektriciteit weergeeft, afvlakt naarmate de oppervlakte toeneemt. Op deze figuur is tevens te zien hoe het overschot aan geproduceerde elektriciteit sterk toeneemt naarmate de hoeveelheid zonnepanelen stijgt en dat er een economisch optimale hoeveelheid zonnepanelen bestaat, die voor de referentievariabelen (met een tangrootte van 300L) 35 m² bedraagt. Ten slotte is het ook goed om op te merken dat de hoeveelheid zonnepanelen ook de grootte van de warmteverliezen sterk beïnvloedt: in figuur 4.2b is immers te zien dat de gemiddelde tanktemperatuur sterk toeneemt bij een toenemende oppervlakte zonnepanelen, waardoor de totale warmteverliezen ook sterk stijgen.



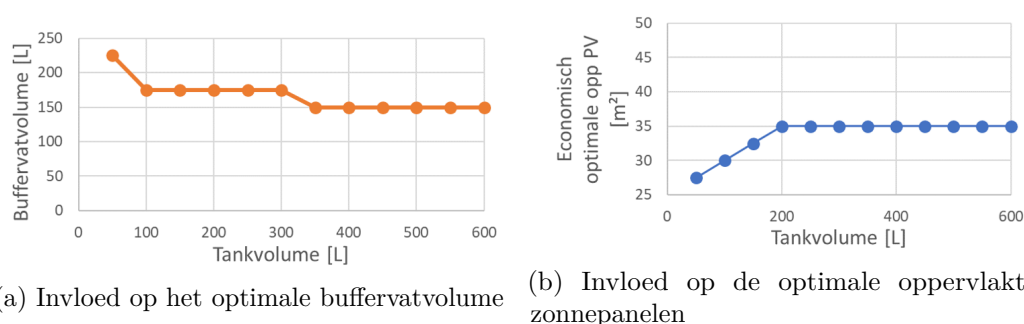
(a) Invloed op enkele karakteristieken (b) Invloed op de gemiddelde tanktemperatuur en warmteverliezen

Figuur 4.2: De invloed van de oppervlakte aan zonnepanelen bij het PV-systeem

Volume van de tank

Het volume van de tank is één van de meest cruciale variabelen bij de dimensionering van het PV-systeem, gezien deze variabele ook de optimale dimensionering van andere variabelen bepaald. In de eerste plaats bepaalt het tankvolume het optimale buffervatvolume: een grotere tank zorgt er namelijk voor dat de tank meer energie buffert. Hierdoor komt er warmer water binnen in het buffervat in de piekmomenten, waardoor de weerstand in het buffervat minder energie levert. Figuur 4.3a geeft deze minimale buffervatgrootte weer i.f.v de tankgrootte.

Ook de economisch optimale oppervlakte aan zonnepanelen wordt bepaald door het tankvolume: hoe groter de tank is, hoe meer energie er gebufferd kan worden tussen periodes met veel en weinig zon en hoe meer de zonnepanelen optimaal benut kunnen worden. Daarom toont figuur 4.3b de economisch optimale hoeveelheid zonnepanelen voor verschillende tankvolumes.



(a) Invloed op het optimale buffervatvolume

(b) Invloed op de optimale oppervlakte zonnepanelen

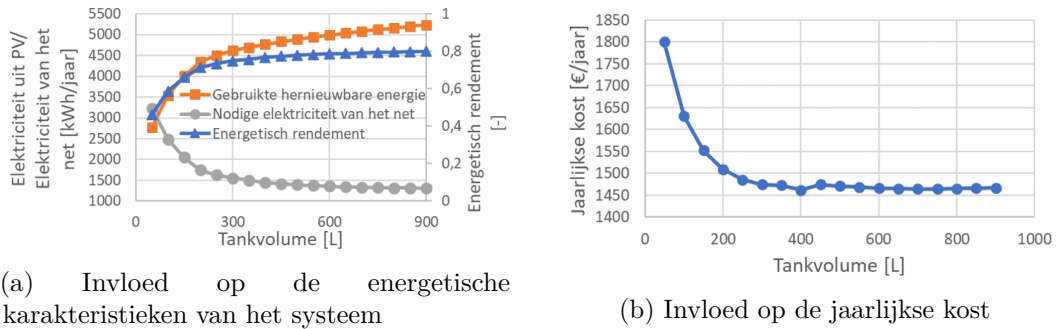
Figuur 4.3: De invloed van het tankvolume op de optimale dimensionering bij het PV-systeem

Indien voor elke tankgrootte de optimale buffervatgrootte en PV-oppervlakte gekozen worden, bepaalt de tankgrootte in grote mate de systeemkarakteristieken. Zo nemen de hoeveelheid gebruikte hernieuwbare energie en het energetisch rendement toe bij toenemende tankvolumes (zie figuur 4.4a), maar deze stijging stagneert vanaf een tankgrootte van ongeveer 400L.

De elektriciteit die de weerstand in het buffervat verbruikt (en dus de enige niet groene energie die gebruikt wordt) daalt sterk tot een tankgrootte van ongeveer 300L. Bij nog grotere tankvolumes compenseert de extra benutte PV-electriciteit ongeveer de toenemende warmteverliezen als gevolg van een grotere tank (ook zichtbaar op figuur 4.4a).

Aangezien de tankgrootte op alle bovenstaande dingen een invloed heeft, beïnvloedt de tankgrootte ook in sterke mate de jaarlijkse kost. In figuur 4.4b is het duidelijk dat de kost vanaf een tankvolume van 400L ongeveer constant blijft rond de 1420 €/jaar.

4.1. Invloed optimalisatievariabelen

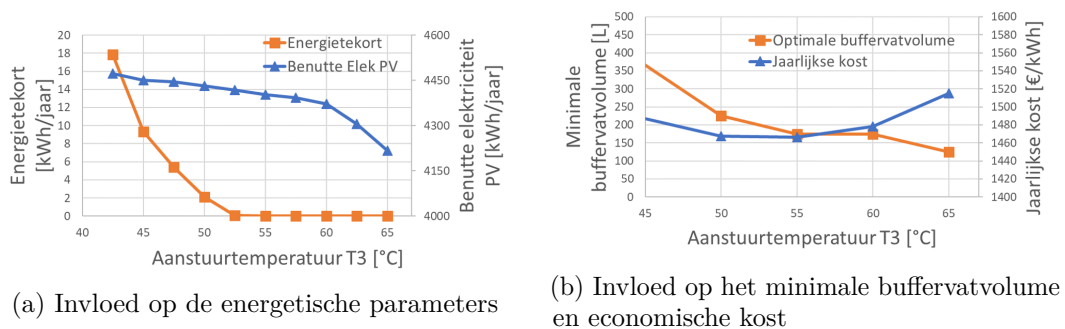


Figuur 4.4: De invloed van het tankvolume op de systeemkarakteristieken bij het PV-systeem

Aanstuurtemperatuur van het buffervat (T_3)

Zoals beschreven in sectie 3.1.3 wordt het buffervat hysteresis aangestuurd tussen de temperaturen T_3 en 65°C . Een lagere T_3 betekent een grotere kans op een energietekort, omdat er lagere temperaturen in het buffervat toegelaten worden. Dit is weergegeven in figuur 4.5a. Dit heeft echter ook een voordeel: als gevolg van de meer afwachtende houding bij het opwarmen van het buffervat, is de kans groter dat het doorstromende water vanuit de tank een deel van de opwarming levert, indien dit water een temperatuur in het interval $[T_3, 65]^\circ\text{C}$ heeft. Hierdoor levert dezelfde oppervlakte zonnepanelen meer warmte aan de tank, zoals weergegeven in figuur 4.5a.

Om het toenemende energietekort bij dalende T_3 weg te werken, moet er een groter buffervat zijn. Figuur 4.5b toont welk buffervatvolume optimaal is voor elke T_3 . Op deze figuur is zichtbaar dat er een economisch optimale T_3 bestaat, door de afweging tussen minder elektriciteitsverbruik door de weerstand in het buffervat t.o.v. de prijs van een groter buffervat. Deze optimale T_3 is in deze situatie 55°C



Figuur 4.5: De invloed van de aanstuurtemperatuur van het buffervat (T_3) bij het PV-systeem

Soort zonnepanelen

De keuze in type zonnepanelen bepaalt niet alleen hoeveel vermogen er maximaal kan opgewekt worden met een bepaalde oppervlakte aan zonnepanelen (vaak uitgedrukt in Watt piek (Wp) per paneel), het bepaalt ook welk rendement de zonnepanelen hebben. De meest recente zonnepanelen, genereren de hoogste vermogens en hebben het hoogste rendement, maar deze zijn logischerwijs ook het duurst. Tabel 4.2 toont de eigenschappen van de verschillende onderzochte soorten zonnepanelen en toont ook de karakteristieken van het systeem, wanneer dat soort zonnepanelen gebruikt wordt. Uiteraard zijn de 320Wp energetisch de beste keuze, terwijl de 285Wp-panelen economisch het beste zijn.

AC-capaciteit [Wp/paneel]	Rendement [%]	Prijs (excl BTW) [€/paneel]	Elek PV benut [kWh _{el} /jaar]	Nodige elek net [kWh _{el} /jaar]	Kost [€/jaar]
270	16,33	124	4187	1941	1512,1
285	17,5	125	4311	1831	1485,5
300	18,1	135	4373	1776	1485,2
305	18,7	155	4423	1733	1500
320	19,3	160	4474	1689	1496,4

Tabel 4.2: Basisparameters en systeemkarakteristieken van het PV-systeem bij gebruik van de verschillende onderzochte soorten zonnepanelen

Grootte van de buffervatweerstand

Het vermogen van de gebruikte weerstand in het buffervat kan discontinu variëren tussen 2, 4 en 6 kW. Een hoger vermogen zorgt ervoor dat het buffervat een groter deel van de vraag ogenblikkelijk kan leveren, wat de eisen voor thermische opslag en dus voor de grootte van het buffervat verlaagt. Hierdoor dalen zowel de warmteverliezen als de investeringskost. Tabel 4.3 toont de invloed van de grootte van de weerstand op deze karakteristieken. Omdat de netconnectie van de meeste huizen niet voorzien is op een 6kW-weerstand, wordt deze optie verder niet mee genomen. Voor de 4kW-weerstand moet de afweging gemaakt worden of de kost voor deze extra piekcapaciteit de lagere kost voor SWW waard is.

Weerstand [kW]	Minimaal Buffervatvolume [L]	Warmteverliezen [kWh/jaar]	Totale kost [€/jaar]
2	325	681	1532
4	175	604	1478
6	100	566	1459

Tabel 4.3: Karakteristieken van het PV-systeem bij verschillende vermogens van de buffervatweerstand

Soort opslagvat

Omdat de opwarming van de tank met een elektrische weerstand geen warmtewisselaar vereist, is het mogelijk om de goedkopere "100E-reeks te gebruiken als opslagvat ten opzichte van de "100V-reeks die wel een warmtewisselaar bezit. Tabel 4.4 toont aan hoe groot het verschil economisch is met de andere mogelijke opslagvaten. Daarom gebruikt het PV-systeem standaard het 100E-vat.

Vattype	UA-factor [W/°C]	Verliezen [kWh/jaar]	Totale kost [€/jaar]
100E	1,81	616	1485
100V	2,93	982	1610
100V+	1,75	596	1568
300V	1,26	434	1617

Tabel 4.4: Karakteristieken van het PV-systeem bij verschillende soorten opslagvaten

4.1.2 De zonneboiler (ZC)

In deze sectie wordt de invloed van de variatie van alle variabelen op het zonnecollectorsysteem (afgekort met ZC-systeem) gegeven. Een aantal van deze variabelen hebben een gelijkaardige invloed als bij het PV-systeem:

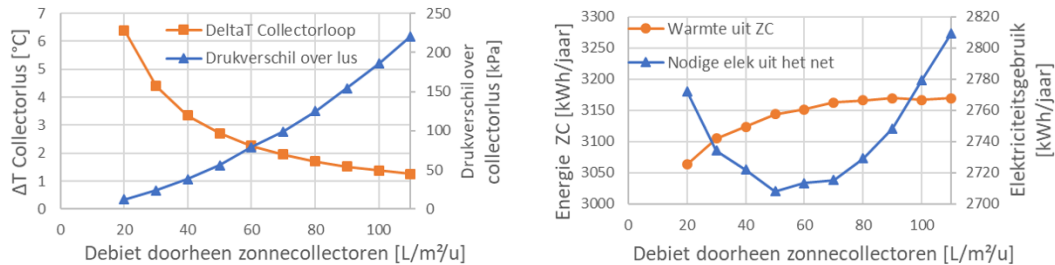
- **De dimensionering van het buffervat** verloopt bij het ZC-systeem zeer gelijkaardig als bij het PV-systeem. Opnieuw wordt er gekozen voor het volume dat net voldoet aan het thermisch comfort, gezien het energetisch en economisch nadelig is om een groter buffervat te hebben. Voor het ZC-systeem, gedimensioneerd met de referentieparameters uit tabel 4.1, is een buffervat van 125L daarom optimaal.
- Ook voor **het bepalen van de optimale oppervlakte zonnecollectoren** gelden dezelfde afwegingen als bij het PV-systeem: meer panelen leiden tot een groter aandeel hernieuwbare energie, maar omdat de tank maar een beperkte hoeveelheid energie kan opslaan, bestaat er een economisch optimale oppervlakte zonnecollectoren, die hier 9m².
- **Een lagere T_3** zorgt er opnieuw voor dat de hoeveelheid benutte hernieuwbare warmte stijgt, maar vergroot ook opnieuw het minimale buffervatvolume.
- **Een 4kW weerstand** laat wederom een kleiner buffervat toe, maar wederom moet de afweging gemaakt worden of dit voordeel een grotere piekbelasting op de capaciteit van de netaansluiting waard is.

Debiet doorheen de zonnecollector

Een eerste parameter die nieuw is ten opzichte van het PV-systeem, is het debiet dat doorheen de zonnecollectorlus loopt. Figuur 4.6a toont de invloed van deze

parameter: een groter debiet zorgt ervoor dat de gemiddelde temperatuurstijging over de zonnecollectorlus kleiner is, wat de warmteverliezen met de omgeving verkleint. Een groter debiet vergroot echter ook de drukverliezen, wat de vereiste elektriciteit voor de collectorpomp doet toenemen.

Het is mogelijk om de optimale waarde voor dit debiet te vinden door de afweging te maken tussen deze twee invloeden. Figuur 4.6b geeft deze invloed weer op zowel de warmte die de zonnecollectoren afgeven aan de tank als op het elektriciteitsgebruik. Deze laatste curve weerspiegelt ook de invloed op de uiteindelijke jaarlijkse kost van het systeem, gezien alle andere externe parameters hetzelfde blijven. Het is zichtbaar dat het elektriciteitsgebruik (en bijgevolg ook de kost) het laagst is bij een debiet van 50L per m² zonnecollectoroppervlakte per uur. De optimale waarde voor dit debiet bleek niet afhankelijk te zijn van de waardes van andere variabelen, waardoor er gekozen is dat deze waarde in het vervolg van deze thesis overal gehanteerd wordt.



(a) Invloed op de drukverliezen en de temperatuurstijging doorheen de collectorlus (b) Invloed op de energetische karakteristieken van het systeem

Figuur 4.6: De invloed van het debiet dat doorheen de zonnecollectoren stroomt

Volume van de tank

Net zoals bij het PV-systeem is de grootte van de tank ook cruciaal bij het ZC-systeem zowel voor de hoeveelheid zonne-energie die benut wordt als voor de jaarlijkse totale kost van het systeem. Dit is weergegeven in figuur 4.7a. Het is zichtbaar dat, gegeven de referentiewaarden uit tabel 4.1, een tank van 250L hier economisch ideaal is.

Het is echter ook interessant om de invloed van het tankvolume op de verhouding tussen de verschillende energiestromen te zien. Dit is weergegeven in figuur 4.7b:

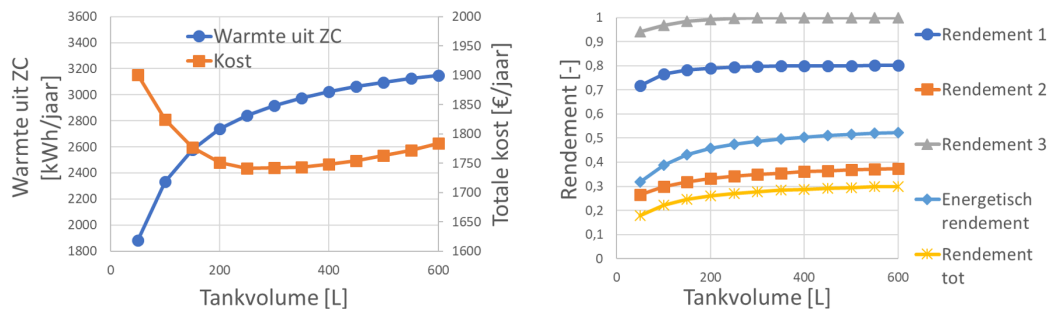
Rendement 1: dit komt overeen met het relatieve aandeel van de invallende straling die gebruikt kan worden omdat het rendement van de zonnecollectoren op dat moment groter is dan nul. Dit rendement, zoals gedefinieerd in formule 3.1, kan kleiner dan nul zijn voor zeer kleine stralingsgroottes. Een grotere tank zorgt voor een lagere gemiddelde tanktemperatuur, waardoor de verliezen in de collectorlus verkleinen en het rendement vaker groter dan nul is.

Rendement 2: deze curve toont het gemiddelde rendement van de zonnecollectoren. Ook dit rendement neemt toe bij toenemende tankvolumes, wederom doordat een lagere tanktemperatuur met een kleiner verlies gepaard gaat.

Rendement 3: doordat de tank een maximale watertemperatuur heeft, kan het voorvallen dat de tank energetisch volledig geladen is. Rendement 3 toont daarom de verhouding tussen de totale hoeveelheid warmte die de zonnecollectoren aan de tank zouden kunnen afgeven tot de hoeveelheid die effectief wordt afgegeven. Bij grote tankvolumes wordt deze verhouding bij benadering 1.

Rendement tot: dit is het product van de drie voorafgaande *rendementen* en kan gezien worden als een soort algemene benutting van de zonnecollectoren. Voor normale tankgroottes ligt dit *algemene rendement* tussen de 20 en de 30%.

Energetisch rendement: tot slot geeft het **energetisch rendement** de verhouding weer tussen de hoeveelheid energie uit zonnecollectoren tot de totale hoeveelheid gevraagde energie. Deze verhouding ligt rond de 50%.



(a) Invloed op de energetische en economische systeemkarakteristieken (b) Invloed op de verhoudingen tussen energiestromen

Figuur 4.7: De invloed van het tankvolume bij het ZC-systeem

Soort zonnecollectoren

Net zoals er de invloed van het type zonnepanelen onderzocht wordt in 4.1.1, wordt hier ook de invloed van het type zonnecollectoren bestudeerd. In Appendix A.1.1 worden de eigenschappen van beide panelen uitgebreid beschreven. Tabel 4.5 geeft enkele systeemkarakteristieken weer bij gebruik van beide soorten onderzochte collectoren. Hierin is te zien dat de “200FM” zonnecollectoren voor het referentiesysteem economisch en energetisch voordeliger zijn dan de “100FM”-variant.

Naam ZC	Gemiddeld rendement ZC [%]	Warmte uit ZC [kWh/jaar]	Totale kost panelen [€/m ²]	Systeemkost [€/jaar]
100FM	35	2918	367,2	1742
200FM	36,3	3030	392,8	1735

Tabel 4.5: Karakteristieken van het ZC-systeem bij gebruik van beide soorten ZC

Soort opslagvat

Gezien het water-glycol mengsel uit de collectorlus niet in contact mag komen met het SWW uit de tank, is er in dit model een warmtewisselaar nodig in het vat. Daarom kan de goedkopere "100E-reeks niet langer gebruikt worden. Tabel 4.6 maakt een vergelijking tussen de drie mogelijke vattypes uit de 100V-reeks. Hieruit blijkt dat het 100V+-vat het meest economisch is en het 300V-vat het meest energetisch.

Vattype	UA-factor [W/°C]	Warmteverliezen [kWh/jaar]	Nodig elektriciteitsverbruik [kWh_{el} /jaar]	Totale kost [€/jaar]
100V	2,93	732	3307	1778
100V+	2,75	442	3076	1742
300V	1,26	320	2978	1779

Tabel 4.6: Karakteristieken van het ZC-systeem bij verschillende soorten opslagvaten

4.1.3 De warmtepompboiler (WP)

Deze sectie bespreekt de invloed van de dimensionering voor de configuratie met een warmtepomp (ook wel afgekort tot WP-systeem). Gezien de werking van dit systeem grotendeels verschillend is van de vorige twee systemen, worden de meeste variabelen opnieuw besproken in deze sectie.

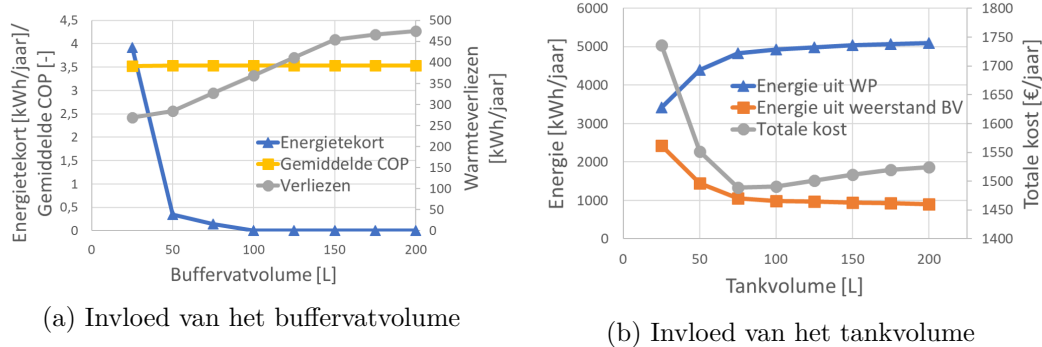
Volume van het buffervat

In tegenstelling tot de vorige twee hernieuwbare systemen is de warmtepomp wel stuurbaar. Dit betekent dat er minder nood is aan thermische buffering, waardoor het buffervat kleiner kan zijn. De dimensionering verloopt echter nog steeds volgens hetzelfde principe: *"neem de kleinste buffervatgrootte die voldoet aan het gevraagde thermische comfort"*, wat een buffervat van 50L inhoudt voor de referentiewaarden uit tabel 4.1. Dit is weergegeven in figuur 4.8a, waarop tevens te zien is dat de warmteverliezen ook hier sterk toenemen bij een toenemend buffervatvolume. Net zoals de grootte van het buffervat geen invloed had op de opgenomen hoeveelheid zonne-energie, heeft de grootte van het buffervat hier geen invloed op de grootte van de COP. Dit kan afgeleid worden uit het verloop van de gemiddelde COP in functie van het buffervatvolume zoals getoond in figuur 4.8a.

Volume van de tank

Net zoals bij de vorige twee configuraties zorgt een grotere tank voor een hogere benutting van de hernieuwbare energiebron (de warmtepomp). Dit is weergegeven in figuur 4.8b. Bijgevolg daalt het gebruik van de weerstand in het buffervat.

Voor de evolutie van de systeemkost wordt een afweging gemaakt tussen meer gebruik van de warmtepomp (efficiëntere warmteopwekking dan via een weerstand) met de extra verliezen/extra kost als gevolg van een grotere tank. Daarom vertoont deze curve een minimum rond 75L.



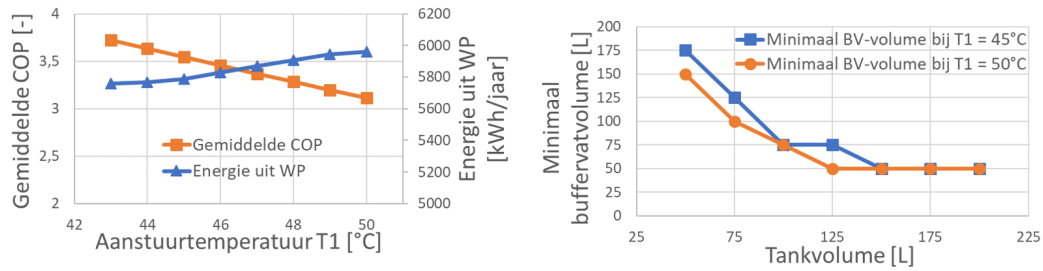
Figuur 4.8: De invloed van het buffervatvolume (links) en het tankvolume (rechts) bij het WP-systeem

Aanstuurtemperaturen van de tank (T_1 en T_2)

Zoals eerder gezegd in sectie 3.1.5 moet het verschil tussen beide aanstuurtemperaturen groot genoeg zijn. In appendix B.1 is aangetoond dat dit verschil best 10°C is.

De aanstuurtemperaturen van de warmtepomp bepalen indirect de gemiddelde temperatuur van de tank (ongeveer $\frac{T_1+T_2}{2}$). Een hogere T_1 en T_2 zorgen er dus voor dat de gemiddelde COP van de warmtepomp afneemt door een hogere gemiddelde tanktemperatuur (weergegeven op figuur 4.9a). Bij deze hogere temperaturen wordt er wel een relatief groter deel van de warmtevraag gedekt door de warmtepomp in plaats van door de weerstand, wat het totale elektriciteitsverbruik doet afnemen.

De keuze van de aanstuurtemperaturen beïnvloedt ook de optimale dimensionering van het buffervat. Dit is weergegeven in figuur 4.9b, waar de minimale buffervatgrootte wordt getoond in functie van de tankgrootte voor verschillende aanstuurtemperaturen. Een hogere aanstuurtemperatuur zorgt voor gemiddeld warmer water in het buffervat, wat ervoor zorgt dat het buffervat kleiner gedimensioneerd kan worden.

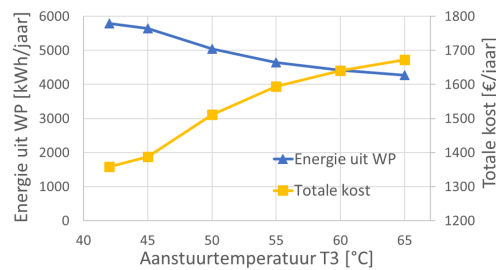


(a) Invloed op de energetische prestaties van de warmtepomp (b) Invloed op het minimaal buffervolume

Figuur 4.9: De invloed van de aanstuurtemperaturen van de warmtepomp (T_1 en T_2) bij het WP-systeem

Aanstuurtemperatuur van het buffervat T_3

Net zoals bij de vorige twee systemen, bepaalt T_3 vanaf welke temperatuur de weerstand in het buffervat begint te werken. Een lagere T_3 zorgt ervoor dat de weerstand pas later begint met de tank te verwarmen, wat de kans vergroot dat de warmtepomp indirect het buffervat opwarmt (via het doorstromend water van de tank). Dit is zichtbaar in figuur 4.10, wat niet alleen weergeeft dat de warmtepomp meer warmte levert bij een lagere T_3 , maar ook dat dit de jaarlijkse systeemkost aanzienlijk doet dalen.



Figuur 4.10: De invloed van de aanstuurtemperatuur van het buffervat (T_3) bij het WP-systeem

Type warmtepomp

Zoals vermeld in hoofdstuk 3.3.4 worden er binnen deze thesis zes soorten warmtepompen bestudeerd, verschillend in het thermisch vermogen dat ze kunnen leveren. Tabel 4.7 geeft de systeemkarakteristieken bij gebruik van deze verschillende soorten warmtepompen voor de referentievariabelen uit tabel 4.1. Hieruit volgt dat de warmtepomp met het hoogste elektrisch vermogen (D016) ook de hoogste gemiddelde COP heeft en dat een de D06-warmtepomp economisch de meest voordelige is.

Soort WP	$P_{WP,elek,gemiddeld}$ [kW]	Gemiddelde COP [-]	Energie uit WP [kWh/jaar]	Kost WP [€]	Totale kost [€/jaar]
D04	1,12	3,44	4962	3893	1527
D06	1,33	3,53	5041	3997	1511
D08	1,51	3,62	5102	4296	1513
D010	2,11	3,75	5223	5793	1586
D013	2,24	3,79	5252	6371	1621
D016	2,47	3,83	5293	6877	1647

Tabel 4.7: Karakteristieken van het WP-systeem bij de verschillende soorten warmtepompen

Grootte van de buffervatweerstand

Aangezien de warmtepomp een controleerbare bron van hernieuwbare energie is, geeft de tank niet alleen veel minder vaak water op lage temperatuur door aan het buffervat, ook kan de warmtepomp indirect bijspringen in de momenten van piekvraag. Daarom is er veel minder nood aan een 4kW weerstand dan bij de modellen die gebruik maken van zonne-energie. Het is zelfs economisch nadelig om er één te plaatsen. Hoe groter het elektrisch vermogen van deze weerstand is, hoe kleiner de kans namelijk is dat het doorstromend water uit de tank zorgt voor de opwarming in plaats van de weerstand. Gezien de opwekking van warmte in de tank efficiënter verloopt dan in het buffervat, is dit energetisch nadelig. Tabel 4.8 toont dit cijfermatig aan. Daarom wordt er verder altijd gewerkt met een buffervatweerstand van 2kW in systemen die een warmtepomp bezitten.

Vermogen weerstand [kW]	Energie WP [kWh/jaar]	Totaal elek verbruik [kWh _{el} /jaar]	Totale kost [€/jaar]
2	5041	2366	1511
4	5030	2375	1513

Tabel 4.8: Karakteristieken van het WP-systeem bij een buffervatweerstand van 2 en 4 kW

4.1.4 Configuratie met warmtepomp, maar zonder buffervat (WP2)

Volume van de tank en aanstuurtemperaturen

Bij de configuratie met een warmtepomp, maar zonder buffervat (het WP2-systeem), is de tank verantwoordelijk voor het verzekeren van het gevraagde thermisch comfort. Dit is ook zichtbaar op figuur 4.11a, waarop getoond wordt dat de grootte van de tank het energietekort bepaalt en dat er een redelijk groot tankvolume nodig is (350L voor de referentiewaarden) vooraleer het energietekort onder de gekozen grens van 1

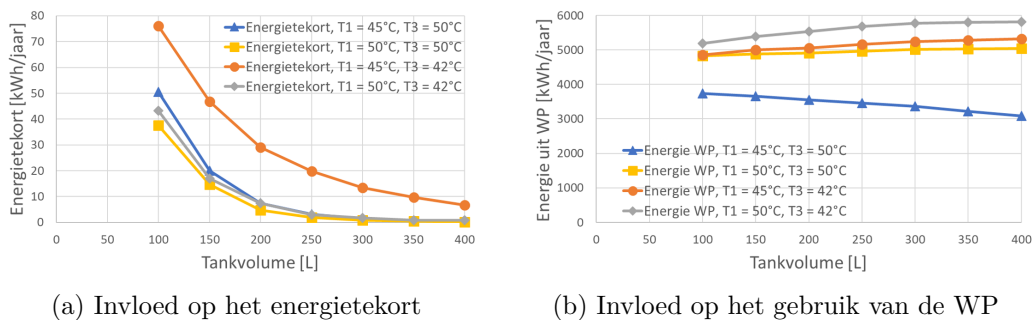
kWh/jaar blijft.

Figuur 4.11a toont tevens dat de aanstuurtemperaturen van de tank (T_1 en T_2) en van de weerstand in de tank (T_3) ook een cruciale invloed hebben op het energietekort. Wanneer T_1 (en bijgevolg ook T_2) of T_3 dalen, is een grotere tank nodig om eenzelfde energietekort te hebben.

Ook de hoeveelheid warmte die de warmtepomp per jaar levert, is afhankelijk van deze aanstuurtemperaturen en in mindere mate ook van de tankgrootte, zoals weergegeven in figuur 4.11b. Deze figuur toont dat over het algemeen een lagere T_3 of een hogere T_1/T_2 zorgt voor een hogere benutting van de warmtepomp, hoewel deze laatste voorwaarde wel de gemiddelde COP doet afnemen.

Het is ook zichtbaar in de onderste curve van figuur 4.11b dat wanneer de T_3 groter is dan T_1 , de weerstand eerder warmte aan de tank levert dan de warmtepomp. Dit zorgt voor een veel lagere benutting van de warmtepomp, wat uiteraard niet gewenst is. De dalende trend van deze curve is te wijten aan het feit dat het bij een grotere tank langer duurt vooraleer het water in de tank een temperatuur lager dan T_1 heeft. Hierdoor is de kans groter dat de warmtevraag (en dus ook de daling van T_{tank}) stopt op een moment dat de temperatuur wel lager is dan T_3 , maar nog niet lager is dan T_1 , waardoor de weerstand alle warmte levert in plaats van de warmtepomp.

Ten slotte heeft dit model ook twee andere variabelen, namelijk het type warmtepomp en het type opslagvat. Deze hebben beide een invloed gelijkaardig aan die besproken in respectievelijk sectie 4.1.3 en 4.1.2.



Figuur 4.11: De invloed van de tankgrootte en de aanstuurtemperaturen op enkele systeemkarakteristieken bij het WP2-systeem

4.1.5 Configuratie met zonnepanelen en een warmtepomp (WPPV)

De configuratie die zowel zonnepanelen als een warmtepomp bezit (afgekort tot WPPV-systeem), heeft het meeste variabelen die geoptimaliseerd kunnen worden (namelijk 10) en is tevens de meest interessante om te bestuderen. Dit komt omdat er hier zowel effecten van zonnepanelen als van warmtepompen de output gaan bepalen. Een aantal van deze tien variabelen hebben bijgevolg een gelijkaardige invloed als reeds hierboven besproken is bij één van de afzonderlijke systemen (zie 4.1.1 en 4.1.3):

- De **dimensionering van het buffervat** heeft dezelfde invloed als beide afzonderlijke systemen en de minimale grootte wordt opnieuw bepaald door de aanstuurtemperaturen T_1 , T_2 , T_3 en de tankgrootte.
- De invloed van **het type opslagvat** en **het type warmtepomp** is gelijkaardig aan die in respectievelijk secties 4.1.2 en 4.1.3.
- De keuze van het optimale **type zonnepanelen**, is gelijkaardig aan die bij het zonnepaneelsysteem.
- De **buffervatweerstand** wordt net als bij het WP-systeem altijd gelijkgesteld aan 2kW.

Volume van de tank

Het volume van de tank bepaalt opnieuw hoeveel hernieuwbare energie er gebruikt wordt. Het grote verschil bij deze configuratie is echter dat de werking van de zonnepanelen en de warmtepomp met elkaar interfereren. Uit figuur 4.8b zou er verwacht worden dat de hoeveelheid warmte geproduceerd door de warmtepomp blijft toenemen als het tankvolume toeneemt. Dit is echter niet het geval in dit systeem, aangezien een stijgende tank ook zorgt voor meer zonne-energie benutting. Gezien deze energie volledig *gratis* is, wordt deze eerder benut dan dat de warmtepomp extra warmte zou leveren. Dit is zichtbaar in figuur 4.12, waar de curve die de warmte uit de warmtepomp weergeeft al piekt bij volumes rond de 75L en daarna langzaam afneemt en waar de curve van zonne-energie blijft toenemen.

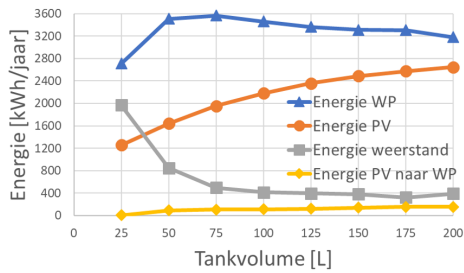
Op deze figuur is tevens zichtbaar dat de hoeveelheid elektriciteit die de weerstand in het buffervat verbruikt, systematisch daalt bij grotere tankvolumes.

Tot slot toont deze figuur ook dat de zonnepanelen slechts in beperkte mate de warmtepomp voorzien van elektriciteit. Dit fenomeen heeft twee redenen: ten eerste moet er, om de warmtepomp te laten werken, een bepaald minimaal vermogen geleverd worden, waartoe de zonnepanelen het grootste deel van de tijd niet in staat zijn. Ten tweede wordt er in de periodes waar de zon wel voldoende vermogen levert al snel een tanktemperatuur van meer dan 60°C bereikt, waardoor de warmtepomp niet meer bruikbaar is. Dit betekent dus dat een warmtepomp niet veel bijdraagt aan een hogere zelfconsumptie van de elektriciteit die de zonnepanelen produceren.

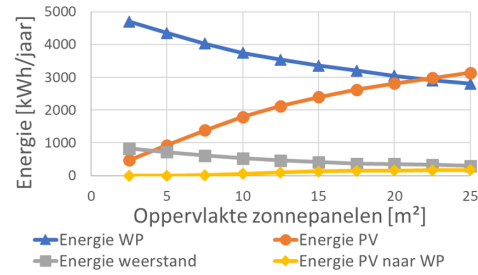
Oppervlakte van de zonnepanelen

Zoals verwacht zorgen meer zonnepanelen ook hier voor een hoger aandeel zonne-energie in de energiemix. De toename van deze energie (zichtbaar op figuur 4.13) verloopt echter wel minder steil door de aanwezigheid van de warmtepomp: door de aansturing van de warmtepomp tussen T_1 en T_2 (voor de figuur respectievelijk 45 en 55°C) kunnen de zonnepanelen minder energie extra toevoegen aan de tank vooraleer de maximale temperatuur (95°C) bereikt wordt, waardoor extra zonnepanelen minder meerwaarde hebben dan bij het PV-systeem. Ook het feit dat de tank bij deze configuratie doorgaans kleiner is dan bij de configuratie met enkel zonnepanelen

4.1. Invloed optimalisatievariabelen



Figuur 4.12: De invloed van het tankvolume bij het WPPV-systeem



Figuur 4.13: De invloed van de oppervlakte zonnepanelen op de energiestromen bij het WPPV-systeem

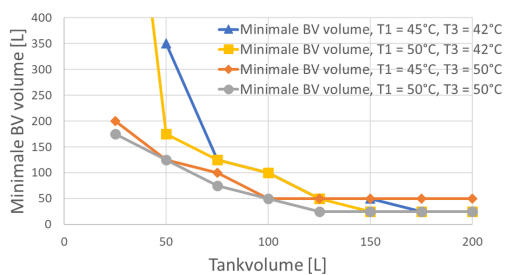
zorgt ervoor dat er minder zonne-energie kan benut worden.

Verder toont deze figuur ook de logische gevolgen van meer zonne-energiegebruik: er is minder energie afkomstig uit zowel de warmtepomp als uit de weerstand en de zonnepanelen leveren (een klein beetje) meer elektriciteit voor de warmtepomp.

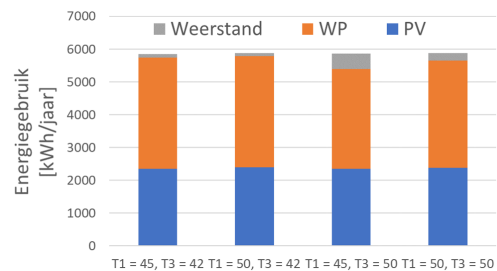
Aanstuurttemperaturen van tank en buffervat

Zoals eerder gezegd, bepalen de aansturing van de warmtepomp (T_1 en T_2) en die van de buffervatweerstand (T_3) het minimale volume van het buffervat. Figuur 4.14a toont dit voor verschillende tankgroottes: zowel een grotere T_1 als een grotere T_3 zorgen voor een kleiner benodigd buffervatvolume. Dit is dezelfde conclusie als bij zowel het PV-systeem als het WP-systeem.

Deze aanstuurttemperaturen hebben ook een invloed op de oorsprong van de geleverde energie. Zoals weergegeven in figuur 4.14b blijft de hoeveelheid energie die de zonnepanelen leveren ongeveer constant. Een aansturing van de warmtepomp in een hoger temperatuurbereik zorgt voor meer warmtepompgebruik ten nadele van de weerstand en een aansturing van de weerstand in een hoger temperatuurbereik heeft het omgekeerde effect.



(a) Invloed op het minimale buffervatvolume



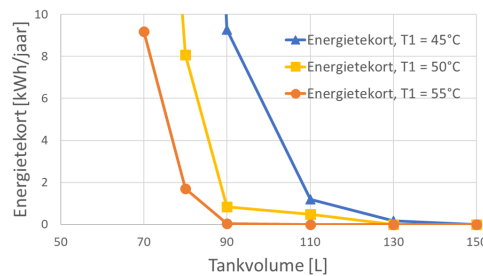
(b) Invloed op de energiestromen

Figuur 4.14: De invloed van de aanstuurttemperaturen op de systeemkarakteristieken bij het WPPV-systeem

4.1.6 De gasboiler (GB)

Volume van de tank

Het grote voordeel van een gasboiler ten opzichte van de hierboven besproken hernieuwbare systemen is zijn zeer hoge thermische vermogen ($>20\text{kW}$). Dit zorgt ervoor dat de tank redelijk klein kan zijn, zoals weergegeven in figuur 4.15, ondanks het feit dat de tank verantwoordelijk is voor het thermisch comfort van dit systeem. Deze figuur toont dat zowel een grotere tank als een hogere T_1 zorgen voor een kleiner energietekort.



Figuur 4.15: De invloed van het tankvolume en de aanstuurtemperaturen op het energietekort bij het GB-systeem

Soort opslagvat

Voor gasboilers zijn er andere (betere) soorten opslagvaten beschikbaar dan voor de hierboven beschreven systemen, namelijk de 100W-reeks van VIESSMANN. Wederom moet er een afweging gemaakt worden tussen vaten met een verschillende graad van isolatie, zoals weergegeven in tabel 4.9. In deze tabel staan ook de waarden voor het type 100V+ beschreven om aan te tonen dat de 100W-reeks effectief een betere keus is dan de 100V-reeks voor een gasboiler.

Vattype	UA-factor [W/°C]	Warmteverliezen [kWh/jaar]	Kost vat [€]	Totale kost [€/jaar]
100W	0,95	343	627	945
100W+	0,64	233	711	943
100V+	0,8	289	736	956

Tabel 4.9: Karakteristieken van het GB-systeem bij verschillende soorten opslagvaten

Soort gasboiler

De laatste variabele is de keuze van het type gasboiler. Er zijn verschillende soorten gasboilers op te markt, elk met een eigen thermisch vermogen. Het verschil tussen deze gasboilers is echter zo klein, dat zowel de optimale dimensionering als de

systeemkarakteristieken hetzelfde blijven (weergegeven in tabel 4.10). Daarom krijgt de goedkoopste gasboiler (model 50Wa) de voorkeur.

Vattype	$P_{therm,nom}$ [kW]	Kost gasboiler [€]	Minimale tankvolume [L]	Systeemkost [€/jaar]
50Wa	22,1	904	90	941
50Wb	30,3	1015	90	941
100Wb	23,8	1229	90	941
100Wc	32,1	1306	90	941

Tabel 4.10: Karakteristieken van het GB-systeem bij verschillende soorten gasboilers

4.2 Optimalisatie van de verschillende systemen

In de vorige sectie (4.1) is voor elk systeem nagegaan welke invloed elke variabele heeft op de systeemkarakteristieken. Omdat alle variabelen met elkaar interageren, onderzoekt deze sectie hoe al deze variabelen tegelijk gestuurd moeten worden om een optimaal systeem te verkrijgen. Er zijn echter wel meerdere systemen die als *optimaal* gezien kunnen worden. Zo is het, gegeven de huidige evolutie naar meer losstaande decentrale systemen, interessant om de **benodigde externe energieafname** (zowel van het elektriciteit- als van het gasnet) te minimaliseren. Dit wordt verder uitgewerkt in sectie 4.2.3. Gezien de onderzochte toepassing zich in de residentiële sector bevindt, moet de investering ook economisch voordelig zijn vooraleer mensen hierin gaan investeren. Daarom wordt er in sectie 4.2.4 ook geoptimaliseerd richting **minimale jaarlijkse kost**. Tot slot is het door de klimaatsverandering en de evolutie richting decarbonisatie ook interessant om na te gaan welk systeem het minste CO_2 **uitstoot**. Daarom bespreekt sectie 4.2.5 de ecologische optimalisatie van elk systeem. Om te kijken welke verbeteringen er behaald worden door het systeem te optimaliseren naar een bepaalde richting, worden deze geoptimaliseerde systemen telkens vergeleken met een meer pragmatisch, niet geoptimaliseerd scenario: het referentiescenario.

4.2.1 Referentiescenario

Het referentiescenario is gedimensioneerd volgens de referentievariabelen uit tabel 4.1. De bijbehorende systeemkarakteristieken zijn gegeven in tabel 4.11.

Parameter	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Hernieuwbare energie [kWh/jaar]	-	4373	2911	3622	3459	4813
Elektriciteit net [kWh_{el} /jaar]	19	1776	3061	2366	2500	1227
Energie gas [kWh/jaar]	5767	-	-	-	-	-
Energetisch rendement [%]	-	71,1	48,7	60,5	58	79,7
Energietekort [kWh/jaar]	0	0	0,124	0	0,9	0
Energietekort [aantal/jaar]	0	0	2	0	18	0
Kost [€/jaar]	943	1485	1742	1511	1560	1477
Uitstoot [kg CO_2 /jaar]	1181	355	617	473	707	245

Tabel 4.11: Systeemkarakteristieken van de zes referentiesystemen

4.2.2 Optimalisatiemethode

De moeilijkheid van de optimalisatie is dat de meeste variabelen impliciet aan elkaar gelinkt zijn. Daarom is de optimalisatie van elk systeem gebaseerd op één van de onderstaande drie hulpalgoritmes:

Algoritme 1: Dit algoritme bepaalt enkel de optimale tankgrootte door te itereren over de verschillende mogelijke tankgroottes en de meest voordelige grootte eruit te

kiezen (gebruikt bij het GB-systeem en WP2-systeem).

Algoritme 2: Dit algoritme bepaalt eerst voor elk tankvolume welk buffervatvolume optimaal is. Hierna itereert hij opnieuw over de verschillende mogelijke tankgroottes, waarbij bij elke tankgrootte de optimale buffervatgrootte wordt gebruikt. Zo wordt de optimale combinatie tank-/buffervatgrootte gevonden (gebruikt bij het WP-systeem).

Algoritme 3: Dit algoritme bepaalt net zoals het vorige de optimale buffervatgrootte per tankvolume. Hierna bepaalt het algoritme de optimale oppervlakte zonnepanelen/zonnecollectoren per tankvolume, gegeven deze optimale buffervatgrootte. Tot slot kiest het algoritme de optimale tankgrootte, rekening houdend met zowel de optimale buffervatgrootte als de optimale oppervlakte zonnepanelen per tankgrootte (gebruikt bij het PV-systeem, ZC-systeem en WPPV-systeem).

Met behulp van deze drie algoritmes is het nu mogelijk om de zes systemen te optimaliseren. Hieronder wordt per systeem kort uitgelegd hoe deze optimalisatie verloopt:

PV-systeem: eerst wordt de optimale T_3 bepaald door drie keer algoritme 3 toe te passen met respectievelijk een T_3 van 60, 55 en 50°C. Hierna wordt het optimale type zonnepanelen bepaald door de situatie uit te rekenen voor alle vijf de soorten zonnepanelen. Tot slot wordt alles herhaald met een weerstand van 2kW in plaats van 4kW.

ZC-systeem: de optimalisatie van dit model verloopt zeer gelijkaardig aan die van het PV-systeem, met als enige verschil dat hier ook nog het optimale opslagvat bepaald wordt na het bepalen van de optimale soort zonnecollectoren.

WP-systeem: deze optimalisatie begint met het bepalen van de optimale aanstuurtemperaturen (T_1 , T_2 en T_3) door enkele gevallen uit te rekenen: de combinatie T_1 - T_2 is gelijk aan 45-55°C of aan 50-60°C, gezien de warmtepomp maar tot 60°C kan opwarmen en het temperatuurverschil minstens gelijk moet zijn aan 10°C (zie appendix B.1). Tevens zou de combinatie 40-50°C een veel te groot buffervat vereisen, gezien het uitgaande water minstens 42°C moet zijn. Voor T_3 worden de volgende waarden onderzocht: 42, 45, 50, 55, 60°C. Op die manier worden 10 situaties bekomen waarop elk algoritme 2 wordt toegepast om de optimale tank- en buffervatgrootte te bepalen per $T_1/T_2/T_3$ -combinatie. Hierna wordt de beste van de 10 situaties gekozen en zo zijn zowel de aanstuurtemperaturen als de vatgroottes bepaald. Tot slot wordt ook nog het optimale type opslagvat en type warmtepomp bepaald door alle mogelijkheden uit te rekenen en de beste te kiezen. Indien de ideale warmtepomp/opslagvat niet dezelfde is dan die waarmee de tien scenario's bepaald zijn, worden de tien scenario's opnieuw berekend met deze nieuwe waarde om de invloed hiervan zeker mee te nemen.

WP2-systeem: deze optimalisatie gebeurt op dezelfde manier als die van het WP-systeem, maar dan met algoritme 1 in plaats van algoritme 2.

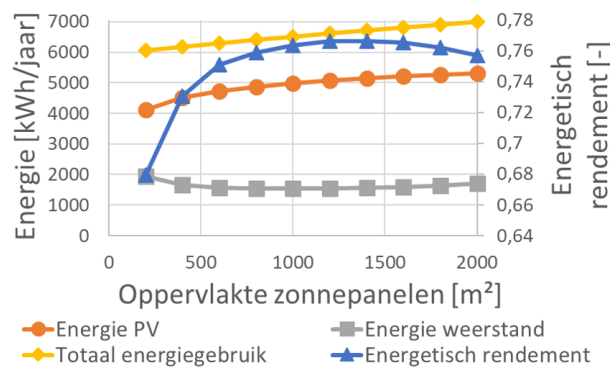
WPPV-systeem: het eerste deel van deze optimalisatie gebeurt gelijkaardig als bij de vorige twee modellen: dezelfde 10 scenario's worden uitgerekend, nu echter met algoritme 3, gezien de oppervlakte van de zonnepanelen ook mee geoptimaliseerd

moet worden. Hierna worden nog de optimale types van zonnepanelen, warmtepomp en opslagvat bepaald, inclusief eventuele iteratie indien een andere waarde wordt bekomen dan diegene waarvoor het eerste deel van de optimalisatie gebeurde.

GB-systeem: de gasboileroptimalisatie begint met het selecteren van de beste combinatie T_1 - T_2 door drie keer algoritme 1 toe te passen met 45-55°C, 50-60°C en 55-65°C als mogelijke waarden. Hogere waarden zijn niet toegelaten gezien de maximale temperatuur van de tank gelijk is aan 65°C (zie 3.2). Hierna wordt nog het optimale type vat en gasboiler bepaald.

4.2.3 Energetische dimensionering

Als eerste wordt er gedimensioneerd op energetisch niveau. Er is gekozen om de zes systemen zo te optimaliseren dat ze een **zo klein mogelijke externe energieafname** vereisen. Het is ook mogelijk om de hoeveelheid hernieuwbare energie te maximaliseren. Bij deze optimalisatieparameter is het echter mogelijk dat zowel de hoeveelheid hernieuwbare als niet hernieuwbare energie zouden stijgen, zodat de “optimale situatie” energetisch eigenlijk niet meer optimaal is. Een voorbeeld hiervan is wanneer de tankgrootte van het PV-systeem blijft toenemen, de hoeveelheid hernieuwbare energie mee stijgt, maar het elektriciteitsverbruik van het net ook. Hierdoor daalt het energetisch rendement. Dit effect is weergegeven op figuur 4.16. Ook het energetisch rendement als parameter zou verkeerde situaties kunnen opleveren, gezien een evenredige toename van hernieuwbare en niet-hernieuwbare energie dan toegelaten zou zijn. Dit is nochtans duidelijk energetisch niet voordelig, gezien er meer energie gebruikt wordt zonder meerwaarde. Voor de gasboilerconfiguratie betekent deze optimalisatieparameter dat het gasverbruik geminimaliseerd wordt.



Figuur 4.16: Energiestromen bij extreme tankvolumes

Tabel 4.12 geeft het resultaat weer van het toepassen van de optimalisatiemethodes uit hoofdstuk 4.2.2 met de grootte van de externe energieafname als optimalisatieparameter (vetgedrukt weergegeven in de tabel). Het bovenste deel van deze tabel beschrijft de energetisch optimale dimensionering, het onderste deel geeft

de bijbehorende systeemkarakteristieken weer. In de volgende twee subsecties worden deze twee aspecten afzonderlijk besproken.

Parameter	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Volume buffervat [L]	×	150	200	250	×	150
Volume tank [L]	120	800	1550	200	350	1000
Oppervlakte panelen [m^2]	×	40	20	×	×	40
T_1 [°C]	45	×	×	45	50	45
T_2 [°C]	55	×	×	55	60	55
T_3 [°C]	×	50	50	42	42	42
Weerstand buffervat [kW]	×	4	4	2	2	2
Soort opslagvat	100W+	100E	300V	300V	300V	300V
Soort warmtepomp	×	×	×	D016	D016	D08
Soort zonnecollectoren	×	×	200FM	×	×	×
Soort zonnepanelen	×	320Wp	×	×	×	320Wp
Soort gasketel	50Wa	×	×	×	×	×
Hernieuwbare energie [kWh/jaar]	-	5512	4724	4307	4058	6242
Elektriciteit net [kWh_{el} /jaar]	19	1003	1707	1546	1778	261
Energie gas [kWh/jaar]	5725	-	-	-	-	-
Energetisch rendement [%]	-	84,6	73,5	73,6	69,5	96,0
Energietekort [kWh/jaar]	0,82	0,64	0,01	0	0	0
Energietekort [aantal keer/jaar]	2	6	1	0	0	0
Kost [€/jaar]	944	1481	2275	1617	1642	1998
Uitstoot [kg CO_2 /jaar]	1172	201	341	309	356	52

Tabel 4.12: Dimensionering en de systeemkarakteristieken van de zes configuraties bij een energetische optimalisatie

Dimensionering

De energetisch optimale waarden voor elk van de variabelen kunnen allemaal verklaard worden met behulp van de principes die uitgelegd zijn in het eerste deel van dit hoofdstuk (zie 4.1):

- **Volume tank:** voor de zon-gebaseerde systemen is de optimale tankgrootte het volume waarbij de extra opgenomen zonne-energie nog net de extra verliezen compenseert (zie figuur 4.4a). Voor systemen met een warmtepomp gaat de afweging tussen minder verliezen en het maximaliseren van het gebruik van de warmtepomp ten opzichte van de buffervatweerstand .
- T_1 , T_2 & T_3 : bij de systemen met een warmtepomp zijn een lagere T_1 en T_2 energetisch voordeliger, gezien hierdoor de COP hoger is (zie figuur 4.9a). Normaal gezien zou dit betekenen dat de weerstand in het buffervat meer energie levert (ook zichtbaar op figuur 4.9a), maar door de T_3 zo laag mogelijk te houden (42°C) wordt dit effect tegengewerkt (figuur 4.11a). Bij de warmtepomp zonder buffervat is de combinatie 50-60°C echter toch optimaal, gezien het buffervat

anders zeer groot zou moeten zijn om toch te voldoen aan het gevraagde energietekort (figuur 4.11b). Voor de gasboiler wordt de afweging gemaakt tussen lagere T_1 en T_2 en een kleinere tank om warmteverliezen te minimaliseren, met als randvoorwaarde dat er wel een aanvaardbaar energietekort moet zijn (zie figuur 4.15). Ook voor de zon-gebaseerde systemen wordt een lagere T_3 gekozen, gezien dit de relatieve hoeveelheid zonne-energie verhoogt (zie figuur 4.5a). Omdat de hernieuwbare energiebron echter niet stuurbaar is, zou er bij een $T_3=42^\circ\text{C}$ een te groot buffervat moeten zijn voor een aanvaardbaar energietekort te hebben. Daarom is 50°C energetisch optimaal.

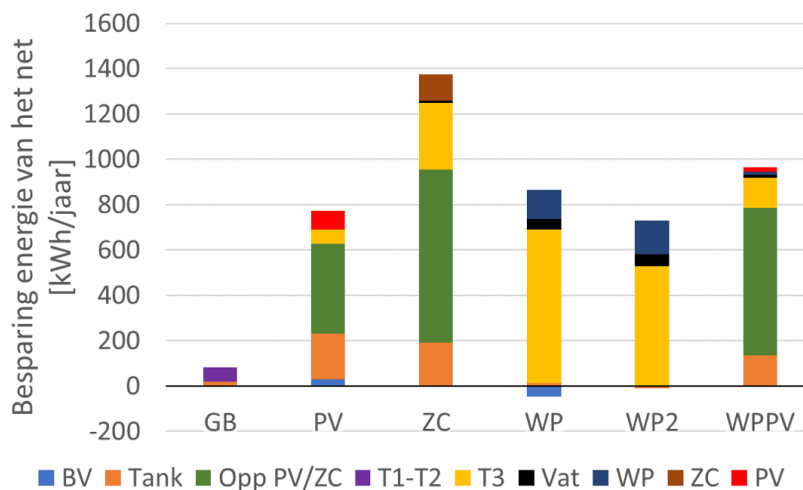
- **Volume buffervat:** gegeven de grote tankvolumes zou een kleiner buffervat mogelijk moeten zijn (zoals zichtbaar op figuur 4.3a), maar om de lagere aanstuurtemperaturen mogelijk te maken is er alsnog een groter buffervatvolume nodig (zoals zichtbaar op figuren 4.5b en 4.14a)
- **Oppervlakte PV/ZC:** indien er geen beperking zou zijn op deze variabele, dan is de optimale oppervlakte oneindig groot. Daarom is er gekozen om de maximale oppervlakte aan zonnepanelen gelijk te stellen aan 40m^2 , gezien de oppervlakte op een dak eindig is. Verder is de maximale zonnecollectoroppervlakte gelijk gesteld aan 20m^2 , omdat er doorgaans een veel kleinere oppervlakte zonnecollectoren gelegd wordt dan zonnepanelen.
- **Weerstand buffervat:** voor de hernieuwbare systemen zonder warmtepomp zorgt de 4kW weerstand voor een kleiner buffervat en dus ook voor kleinere warmteverliezen en bijgevolg kleiner energiegebruik (zie tabel 4.3). Voor de systemen met warmtepomp is deze invloed zo klein dat er gekozen is om toch de 2kW weerstand te nemen (zichtbaar in tabel 4.8).
- **Keuze technologieën:** er is steeds gekozen voor de meest energie-efficiënte mogelijkheid, ongeacht de kost. Dit betekent het best geïsoleerde vat (100E bij het PV-systeem, 100W+ bij het GB-systeem (zie tabel 4.9) en 300V bij de rest (zie tabel 4.6)), de warmtepomp met de hoogste COP (D016, zie tabel 4.7), de meest efficiënte zonnecollectoren (200FM, zie tabel 4.5) en de meest efficiënte zonnepanelen (320Wp, zie tabel 4.2). Er zijn twee uitzonderingen op deze regel: bij de gasboiler is de invloed van een hoger thermisch vermogen op de nodige tankgrootte zo klein dat het niet wordt opgemerkt door het optimalisatiealgoritme. Omdat een warmtepomp met een hoger thermisch vermogen ook een groter minimaal thermisch vermogen heeft, is tot slot de maximale warmtepomp-grootte niet de optimale bij het WPPV-systeem, omdat er dan minder elektriciteit van de zonnepanelen rechtstreeks benut kan worden voor de warmtepomp.

Systeemkarakteristieken

Zoals verwacht is het systeem dat de combinatie maakt tussen zonnepanelen en een warmtepomp het systeem dat enerzijds het meeste hernieuwbare energie gebruikt en

anderzijds het minste externe energie vereist. Wat wel indrukwekkend oogt, is dat nog maar 4% van de energie niet gegarandeerd van hernieuwbare aard is (indien er een groen contract is afgesloten met de leverancier is eigenlijk alle elektriciteit van het net ook hernieuwbaar, maar dit principe wordt verder niet meegenomen). Verder toont tabel 4.12 nog dat ook het systeem met zonnepanelen een redelijk hoog energetisch rendement kan halen (bijna 85%). Voor de andere drie modellen ligt het maximale rendement iets lager (rond de 70%).

Figuur 4.17 geeft een verklaring voor het verschil in externe energieafname tussen het referentiescenario en de energetische optimalisatie. De verschillende balken geven weer hoeveel externe energieafname er uitgespaard is door een bepaalde variabele te veranderen in zijn energetisch optimale waarde. Het is dus zichtbaar dat vooral de optimalisering van T_3 en van de oppervlakte aan panelen zorgt voor de grootste energiewinsten. Vooral de invloed van T_3 is interessant, gezien deze met minimale moeite kan variëren. Verder zijn er ook negatieve evoluties te zien. Dit komt omdat de tank- of buffervatgrootte soms moet stijgen om een daling van de aanstuurtemperatuur toe te laten om zo een globaal betere situatie te creëren.



Figuur 4.17: Verklaring van het verschil in externe energieafname tussen de energetisch optimale situatie en de referentiesituatie

Uit een vergelijking tussen tabel 4.11 en tabel 4.12 blijkt dat deze minimalisatie van het extern energiegebruik echter wel gepaard gaat met een grote economische meerkost voor alle systemen, behalve voor het PV-systeem. Omdat de prijs een cruciale factor blijft in residentiële investeringen minimaliseert de volgende sectie deze totale kost.

4.2.4 Economische dimensionering

De economisch optimale situatie wordt bekomen door opnieuw dezelfde optimalisatiemethodes toe te passen, maar wel na het aanpassen van de

optimalisatievariabele. De nieuwe optimalisatievariabele is de **jaarlijkse totale kost voor de productie van SWW**. Deze kost omvat zowel een annualisering van de initiële investeringskost als de operationele kosten (gas, elektriciteit, water) als ook een compensatie voor de plaats die de installatie inneemt (uitgebreid besproken in appendix A.1.4). De economisch optimale dimensionering is gegeven in het bovenste deel van tabel 4.13. Het onderste deel van deze tabel geeft de bijbehorende systeemkarakteristieken, met de totale kost (die geminimaliseerd is) vetgedrukt weergegeven.

Parameter	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Volume buffervat [L]	×	200	150	100	×	100
Volume tank [L]	90	750	300	150	350	100
Oppervlakte panelen [m^2]	×	35	10	×	×	9
T_1 [°C]	55	×	×	45	50	45
T_2 [°C]	65	×	×	55	60	55
T_3 [°C]	×	50	55	42	42	42
Weerstand buffervat [kW]	×	4	4	2	2	2
Soort opslagvat	100W+	100E	100V+	100V+	100V+	100V+
Soort warmtepomp	×	×	×	D08	D06	D06
Soort zonnecollectoren	×	×	200FM	×	×	×
Soort zonnepanelen	×	285Wp	×	×	×	285Wp
Soort gasketel	50Wa	×	×	×	×	×
Hernieuwbare energie [kWh/jaar]	-	5115	3095	4186	3987	4534
Elektriciteit net [kWh_{el} /jaar]	19	1308	2862	1686	1980	1132
Energie gas [kWh/jaar]	5756	-	-	-	-	-
Energetisch rendement [%]	-	79,6	52,0	71,3	66,8	77,8
Energietekort [kWh/jaar]	0,03	0,83	0,87	0,11	0,90	0,03
Energietekort [aantal keer/jaar]	1	6	22	9	16	1
Kost voor het opslagvat [€/jaar]	54	138	146	97	115	97
Kost warmtebron [€/jaar]	117	420	289	316	314	474
Kost voor plaats [€/jaar]	20,7	86,5	45,7	26,6	36,1	26,6
Kost elektriciteit [€/jaar]	5	340	744	438	515	294
Kost gas [€/jaar]	294	-	-	-	-	-
Kost water [€/jaar]	461,5	461,5	461,5	461,5	461,5	461,5
Totale Kost [€/jaar]	941	1446	1686	1339	1441	1365
Uitstoot [kg CO_2 /jaar]	1179	262	572	333	396	258

Tabel 4.13: Dimensionering en de systeemkarakteristieken van de zes configuraties bij een economische optimalisatie

Dimensionering

De principes uit hoofdstuk 4.1 zijn opnieuw de verklaring voor de bekomen economisch optimale waarden voor elke variabele:

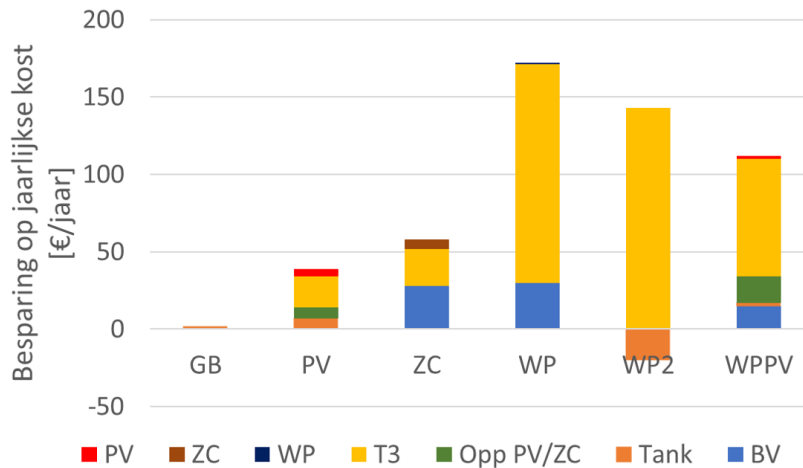
- **Volume buffervat:** wederom is het buffervat zo klein als toegelaten gekozen, gezien een overdimensionering economisch geen enkel voordeel heeft (meer investeringskost en meer warmteverliezen)

- **Volume tank:** de optimale tankvolumes zijn iets kleiner dan bij de energetische optimalisatie. Bij die optimalisatie moest er enkel gekeken worden wanneer de extra opgenomen zonne-energie de extra warmteverliezen niet meer compenseerden. Hier moet de meerkost van een grotere tank ook gecompenseerd worden. Het is zichtbaar dat de optimale tankgrootte van het ZC-systeem veel kleiner is dan die van het PV-systeem. Dit komt enerzijds omdat de tank van het ZC-systeem duurder is dan die van het PV-systeem en anderzijds omdat de economisch optimale oppervlakte aan panelen bij het ZC-systeem veel kleiner is. Voor het GB-systeem en WP2-systeem is de tank zo gedimensioneerd dat hij net geen energietekort toelaat, gezien er geen buffervat is. Voor de twee systemen met een warmtepomp wordt de tank gedimensioneerd opdat er zo vaak mogelijk zo warm mogelijk water uit de tank kan komen.
- T_1 , T_2 en T_3 : de aansturing is zeer gelijkaardig aan die van de energetische analyse, wederom omdat de COP daalt bij hogere T_1 en T_2 (figuur 4.9a) en een lagere T_3 een hogere benutting van de hernieuwbare technologie toelaat. Voor de gasboiler zijn de hogere aanstuurtemperaturen deze keer voordeliger, gezien deze een kleinere tank toelaten (90L t.o.v. 120L bij de energetische optimalisatie).
- **Keuze technologieën:** Hier maken de optimale technologieën juiste keuze tussen de economische en de energetische aspecten: zo is het “100V+”-opslagvat de ideale keuze, gezien hier extra isolatie aanwezig is, maar slechts in die mate dat het economisch geen grote meerkost heeft (zie tabel 4.6) en ook voor de warmtepompen wordt een tussenliggende grootte gekozen (D06 of D08). Voor de zonnepanelen, zonnecollectoren en gasketel worden wel de kleinste dimensioneringen gekozen, gezien de energetische verbeteringen niet opwegen tegen de economische meerkost (de 270Wp-zonnepanelen buiten beschouwing gelaten, gezien deze een zeer slechte prijs-kwaliteitsverhouding hebben).

Systeemkarakteristieken

In de eerste plaats is het interessant om de samenstelling van de totale kostprijs te vergelijken tussen de zes configuraties. Bij de prijs van het opslagvat valt het op dat het opslagvat voor het PV-systeem (100E) goedkoper is dan voor de andere modellen (100V+), gezien de andere systemen een hogere kost hebben voor hun opslagvat, maar het PV-systeem wel veruit het grootste vat heeft. De kosten voor plaatsgebruik zijn daarentegen wel evenredig met de vatgrootte. De kost voor de warmtebron is logischerwijs veruit het hoogst bij het WPPV-systeem, maar hierdoor is de kost voor het elektriciteitsgebruik van dit systeem wel het laagste. Wat tot slot ook opvalt is dat, hoewel de gasboiler veel meer kWh gas verbruikt dan elk ander systeem elektriciteit, de kost voor het gasgebruik van de gasboiler wel in dezelfde lijn ligt als de energieprijzen van de andere systemen. Dit is het gevolg van de extreem hoge elektriciteit-/gasprijs verhouding in België.

Figuur 4.18 geeft een verklaring waaraan de daling van de totale kostprijs vooral te danken is. Het is duidelijk dat de aanstuurtemperatuur van het buffervat T_3 wederom de grootste positieve invloed heeft. Deze parameter is dus zowel energetisch als economisch cruciaal voor goede systeemkarakteristieken. Verder toont deze figuur ook de invloed van de andere parameters, al zijn deze invloeden eerder beperkt.

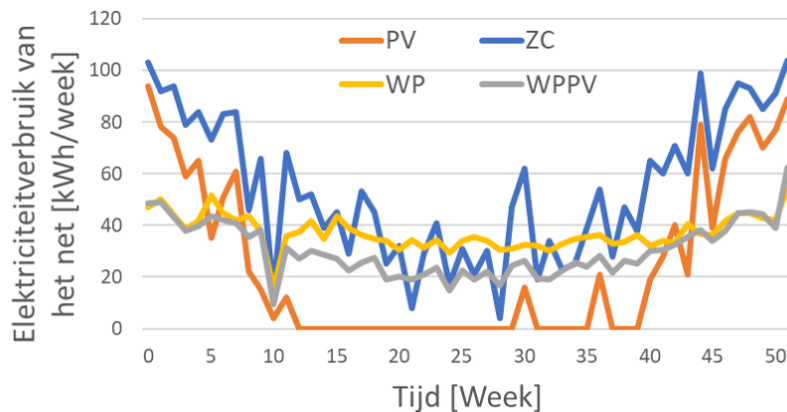


Figuur 4.18: Verklaring van het verschil in kostprijs tussen de economisch optimale situatie en de referentiesituatie

Door de totale kostprijzen van de vijf hernieuwbare systemen te vergelijken blijkt dat het WP-systeem het goedkoopste hernieuwbare systeem is, gevolgd door het WPPV-systeem. Hierbij moet echter gezegd worden dat de economische waarde van het overschot aan elektriciteit bij dit laatste systeem nog niet gevaloriseerd is. De invloed hiervan wordt verder besproken in hoofdstuk 5.3.1.

Het is tot slot ook interessant om te kijken naar de spreiding van het elektriciteitsverbruik van het net voor deze economische optimalisatie, weergegeven in figuur 4.19. Hierop is zichtbaar dat er gedurende de zomer nauwelijks een extern elektriciteitsverbruik is bij het PV-systeem. Ook bij het ZC-systeem is een daling op te merken in de zomer, maar er blijft echter nood aan externe elektriciteit. Door deze figuur te vergelijken met figuur 3.5b is het duidelijk dat de pieken in de externe elektriciteitsafname van deze figuur overeenkomen met de dalen in invallende straling op figuur 3.5b.

Verder is het ook interessant om op te merken dat het WPPV-systeem in de winter een gelijkaardig elektriciteitsverbruik heeft als het WP-systeem, maar dat er in de zomer een daling is op te merken, door de aanwezigheid van de zonnepanelen.



Figuur 4.19: Verloop van de elektriciteitsafname van het net gedurende het jaar voor verschillende systemen

4.2.5 Ecologische dimensionering

In sectie 3.4.3 is reeds uitgelegd dat enkel de operationele emissies van CO_2 meegenomen worden en dat zowel het verbranden van gas als de productie van elektriciteit momenteel 200g CO_2/kWh uitstoten in België. De ecologische optimalisatie bestaat er dus in om de externe energieafname te minimaliseren (zowel gas als elektriciteit), gezien dit de enige uitstoot is die wordt meegenomen. Dit betekent dat de ecologische optimalisatie volledig hetzelfde is als de energetische analyse uit sectie 4.2.3 en dat de uitstoot weergegeven in de laatste rij van tabel 4.12 reeds de geminimaliseerde uitstoot is van elk systeem. Elke manier om de extern energieafname te minimaliseren is dus ook een manier om de systemen ecologisch te optimaliseren.

Uit tabel 4.12 blijkt dat het WPPV-systeem de kleinste CO_2 uitstoot heeft. Deze is meer dan 22 keer kleiner dan die van de gasboiler (52kg t.o.v. 1172kg). Ook de andere hernieuwbare systemen hebben een CO_2 -uitstoot die 3-5 keer lager is dan een gasboiler. Aangezien de CO_2 -uitstoot van elektriciteit in België (en bij uitbreiding Europa) in een dalende tendens zit als gevolg van de toenemende integratie van hernieuwbare systemen, zal het verschil tussen de gasboiler en de hernieuwbare systemen qua uitstoot waarschijnlijk enkel nog toenemen in de toekomst.

De interactie met een toenemende graad van hernieuwbare energie in het productieproces van elektriciteit werkt zelfs tweezijdig: niet alleen zorgt de integratie van meer hernieuwbare energie ervoor dat de CO_2 -uitstoot van de vijf onderzochte hernieuwbare systemen nog verder daalt, ook zouden deze systemen actief kunnen meewerken aan deze integratie door hun elektriciteitsgebruik open te stellen voor actieve vraagsturing.

4.2.6 Bespreking/Vergelijking

Nadat alle resultaten besproken zijn, is het tot slot zinvol om de meest interessante systemen met elkaar te vergelijken op alle niveaus. Eerst vergelijkt deze sectie enkele configuraties paarsgewijs, waarna de beste hernieuwbare configuratie gezocht wordt. Tot slot wordt deze beste configuratie vergeleken met de gasboiler.

Zonnepanelen versus zonnecollectoren

De keuze tussen zonnepanelen en zonnecollectoren is een reële investeringsbeslissing, gezien de beschikbare oppervlakte op een dak meestal beperkt is. Wanneer de pragmatische waarden (gegeven in tabel 4.1) echter bekeken worden, lijkt dit geen moeilijke beslissing te zijn: zonnepanelen zijn namelijk economisch, energetisch en ecologisch voordeliger dan zonnecollectoren (tabel 4.11). Ook bij een energetische (tabel 4.12) of economische (tabel 4.13) optimalisatie komen de zonnepanelen voordeliger uit de vergelijking, al wordt het verschil wel iets kleiner. De situatie zou echter nog frappanter kunnen worden indien het overschot aan elektriciteit wel gevaloriseerd zou worden bij het PV-systeem, iets wat verder besproken wordt in hoofdstuk 5.3.1.

Tot dusver werden subsidies niet meegenomen in de totale kostberekening (de analyse van deze subsidies gebeurt pas in hoofdstuk 5.3.3). Uit hoofdstuk 2.2.1 en 2.2.2 bleek wel al dat er momenteel meer subsidies zijn voor zonnecollectoren dan voor zonnepanelen. Dit valt echter moeilijk te verklaren, gegeven dat zonnepanelen de duidelijke winnaar waren in de vergelijking hierboven. Voor zonnepanelen is er momenteel wel nog het voordeel van de terugdraaiende teller, maar dit wordt binnenkort afgeschaft en werd bovendien ook nog niet meegenomen tot dusver. Er kan dus gezegd worden dat de subsidies niet rationeel verdeeld zijn voor deze twee technologieën.

Zonnepanelen versus zonnepanelen met warmtepomp

De vergelijking tussen een systeem voor SWW bestaande uit alleen zonnepanelen of uit zonnepanelen en een warmtepomp kan op drie manieren gebeuren. De eerste vergelijkt beide referentiesystemen en is in het voordeel van het WPPV-systeem: uit tabel 4.11 volgt namelijk dat dit systeem zowel economisch als energetisch voordeliger is.

De tweede manier vergelijkt beide economisch en energetisch geoptimaliseerde systemen en ook hier is het WPPV-systeem twee maal voordeliger (een maximaal energetisch rendement van 96% vs 84.6% en een minimale jaarlijkse kost van €1379 vs €1446). Hierbij kan echter wederom dezelfde opmerking gemaakt worden over economische (en zelfs energetische) valorisatie van de overschotten aan elektriciteit, die groter zijn bij het PV-systeem.

De derde manier simuleert de keuze waarvoor eigenaars van zonnepanelen op dit moment reeds voor staan: *"Is een investering voor een warmtepomp economisch interessant, gegeven het feit dat ik al zonnepanelen heb?"*. Tabel 4.14 toont de resultaten voor deze vergelijking vertrekkend vanaf het pragmatische PV-systeem,

waaraan een warmtepomp is toegevoegd. Belangrijke noot hierbij is dat er nog altijd enkel de effecten van SWW worden meegenomen. Gezien deze vergelijking vertrekt vanuit het feit dat de PV-installatie reeds bestaande is, kan er niks worden aangepast aan de dimensionering van deze installatie. De aanstuurtemperaturen en de keuze van warmtepomp zijn echter wel nog vrij te kiezen.

Het is duidelijk dat het energetisch voordelig is om een extra warmtepomp te plaatsen, maar niet economisch. De reden hiervoor is dat de plaatsing van een warmtepomp ervoor zorgt dat reeds geplaatste hoeveelheid zonnepanelen eigenlijk te groot is.

Systeem	Soort WP [-]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	Hernieuwbare energie [kWh/jaar]	Totale kost [€/jaar]
PV	-	-	-	60	4373	1481
WPPV	D06	45	55	60	5220	1652
WPPV	D06	45	55	50	5478	1577
WPPV	D06	45	55	42	5622	1535
WPPV	D04	45	55	42	5601	1530

Tabel 4.14: Verschillende onderzochte scenario's voor de toevoeging van een warmtepomp aan het pragmatische PV-systeem

Warmtepomp met buffervat versus warmtepomp zonder buffervat

Door de vergelijking te maken tussen de configuratie waarbij de warmtepomp een buffervat heeft en diegene zonder buffervat, is het mogelijk om de impact in te schatten van de aanname dat er bij de meeste systemen een buffervat aanwezig is. Deze aanname veronderstelt immers een perfecte tweeledige stratificatie zonder onderlinge warmtewisseling. De aanwezigheid van een buffervat zou dus een voordelige impact moeten hebben. Deze positieve impact blijkt ook effectief aanwezig te zijn bij vergelijking van beide pragmatische en geoptimaliseerde systemen op zowel energetisch als economisch vlak. De werkelijke situatie bevindt zich ergens tussen beide systemen.

Warmtepompboiler versus warmtepompboiler met zonnepanelen

Net zoals het interessant was om te kijken of de toevoeging van een warmtepomp aan de PV-configuratie voordelig is, is de omgekeerde situatie ook interessant om te bestuderen. Opnieuw worden er drie vergelijkingen gemaakt.

Door de pragmatische systemen uit tabel 4.11 te vergelijken, volgt dat het WPPV-systeem zowel energetisch als economisch interessanter is.

Wanneer beide systemen echter economisch en energetisch geoptimaliseerd worden, blijkt dat de WPPV-configuratie enkel bij een energetische optimalisatie optimaal is (261 kWh/jaar vs 1546 kWh/jaar). Bij een economische optimalisatie is het WP-systeem namelijk nipt voordeliger (€1339 vs €1365).

Het is ook nu mogelijk om een reëel dilemma te simuleren: *"Is het voordelig om*

te investeren in zonnepanelen voor de productie van SWW, gegeven dat er al een warmtepomp aanwezig is?". Wederom ligt de dimensionering vast, maar zijn de aanstuurtemperaturen en de keuze in oppervlakte en soort zonnepanelen wel vrij te kiezen. Het antwoord op deze vraag is gegeven in tabel 4.15, waarin de kost en hoeveelheid hernieuwbare energie voor verschillende keuzes van de nog vrije variabelen weergegeven zijn. Uit deze tabel volgt dat het mogelijk is om mits aanpassing van de aanstuurtemperaturen een economisch en energetisch voordeligere situatie te bekomen dan het pragmatische scenario. Uit de laatste lijn volgt echter wel dat het grootste deel van dit voordeel afkomstig is uit de verlaging van T_3 ten opzichte van het referentiescenario, waardoor het correcter is dat de resultaten met deze laatste lijn vergeleken worden. Gebeurt dit, dan volgt de verwachte conclusie: uiteraard is het energetisch voordelig om er zonnepanelen bij te installeren, maar deze investering betaalt zichzelf niet terug.

Systeem	Soort PV [-]	Opp PV [m ²]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	Hernieuwbare energie [kWh/jaar]	Totale kost [€/jaar]
WP	-	-	45	55	50	3622	1511
WPPV	285Wp	5	45	55	42	4464	1400
WPPV	285Wp	10	45	55	42	4738	1401
WPPV	285Wp	15	45	55	42	4980	1404
WP	-	-	45	55	42	4162	1358

Tabel 4.15: Verschillende onderzochte scenario's voor de toevoeging van zonnepanelen aan het pragmatische WP-systeem

Beste hernieuwbare systeem

Uit een vergelijking van de vijf hernieuwbare referentiesystemen volgt dat de WPPV-configuratie de beste keuzes is. Deze is heeft zowel het hoogste hernieuwbare rendement als de laagste kost

Ook wanneer de systemen energetisch geoptimaliseerd worden is het WPPV-systeem veruit de beste. Dit systeem verbruikt bijna vier keer minder elektriciteit dan het tweede beste systeem (het PV-systeem). In vergelijking bij deze optimalisatie zijn het ZC-systeem en het WP2-systeem de verliezers.

Uit de economische optimalisatie komt dan weer de WP-configuratie als winnaar, €26 goedkoper zijnde dan de tweede plaats (de WPPV-configuratie). In ruil voor deze €26 heeft het WPPV-systeem wel jaarlijks acht keer minder een energietekort. Ook in deze optimalisatie presteert de ZC-configuratie het slechtst.

Omdat de warmtepomp economisch voordeliger is, maar de WPPV-configuratie energetisch sterker is, is het moeilijk om de beste te selecteren. Daarom wordt er gekeken naar een karakteristiek die beide vlakken combineert: de prijs die betaald wordt voor de reductie van CO_2 ten opzichte van de economisch optimale gasboiler. Deze prijzen zijn opgesomd in tabel 4.16. Hieruit blijkt dat de CO_2 -reductie bij het WPPV-systeem net iets goedkoper is. Gezien dit model ook nog een overschot aan PV-electriciteit heeft dat nog niet gevaloriseerd is, is dit systeem het beste

hernieuwbare systeem.

Het is duidelijk dat zonnecollectoren niet voordelig zijn, noch energetisch, noch economisch. Hoewel zonnepanelen meer bedoeld zijn om elektrische apparaten te voorzien van elektriciteit en een warmtepomp eerder geschikt is voor ruimteverwarming, is het momenteel toch zowel economisch als energetisch voordeliger om of één van deze twee (of beide) technologieën aan te kopen voor de productie van SWW, dan te investeren in zonnecollectoren.

Parameter	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Meerkost per jaar t.o.v. GB [€]	505	745	398	500	424
CO_2 -reductie t.o.v. GB [ton]	0,917	0,607	0,846	0,783	0,921
Kost per ton CO_2 -reductie	551	1227	470	639	460

Tabel 4.16: Prijs per ton CO_2 -reductie t.o.v. de economisch optimale gasboiler

Beste hernieuwbare systeem versus gasboiler

Tot slot is het ook interessant om te onderzoeken hoe groot het verschil nog is tussen de beste hernieuwbare technologie (WPPV-configuratie) en de gasboiler. De economisch optimale WPPV-configuratie is per jaar €424 of 44% duurder dan de gasboilerconfiguratie. Dit is een niet te onderschatten verschil en is de hoofdreden waarom hernieuwbare systemen nog niet massaal zijn doorgebroken voor de productie van SWW. Hierbij moet wel de noot gemaakt worden dat het er in realiteit iets beter uitziet voor de hernieuwbare systemen, gezien zij meer schaalvoordeel kunnen halen uit het feit dat SWW gecombineerd kan worden met ruimteverwarming. Ook het feit dat de overschotten van geproduceerde elektriciteit zelf kunnen gebruikt worden of terug op het net gezet kunnen worden, geeft deze technologie een economisch voordeel.

In tabel 4.16 is zichtbaar welke CO_2 -emissiereductie mogelijk is door de economisch geoptimaliseerde WPPV-configuratie te implementeren in plaats van de economisch optimale gasboiler. Deze bedraagt 924 kg per jaar wat ongeveer overeenkomt met de uitstoot van 350L diesel of 7000 km autorijden [48]. Dit betekent tevens een prijs van 460 euro per ton bespaarde CO_2 -uitstoot, wat beduidend hoger is dan de huidige tarieven in het emissiehandelssysteem [49]. Dit is een sterke indicatie dat er op dit moment goedkopere manieren zijn om de CO_2 -uitstoot te verminderen dan door te investeren in hernieuwbare energie voor de productie van SWW.

Hoofdstuk 5

Sensitiviteitsanalyse

Dit hoofdstuk onderzoekt de gevoeligheid van de bekomen resultaten voor variaties in de inputgegevens. Eerst wordt er onderzocht welke invloed de gebruikte data hebben: sectie 5.1 en 5.2 bestuderen respectievelijk de invloed van het gebruikte vraagprofiel naar SWW en de gebruikte stralingsdata.

Hierna wordt de invloed van het reglementaire kader bekeken. Dit houdt zowel de waarde van de overschotten aan PV-elektriciteit in als de toegelaten subsidies en de eventuele prijs op CO_2 -uitstoot die geïntroduceerd zou kunnen worden.

Tot slot onderzoekt 5.4 welke invloed de gekozen waarden voor bepaalde parameters hebben.

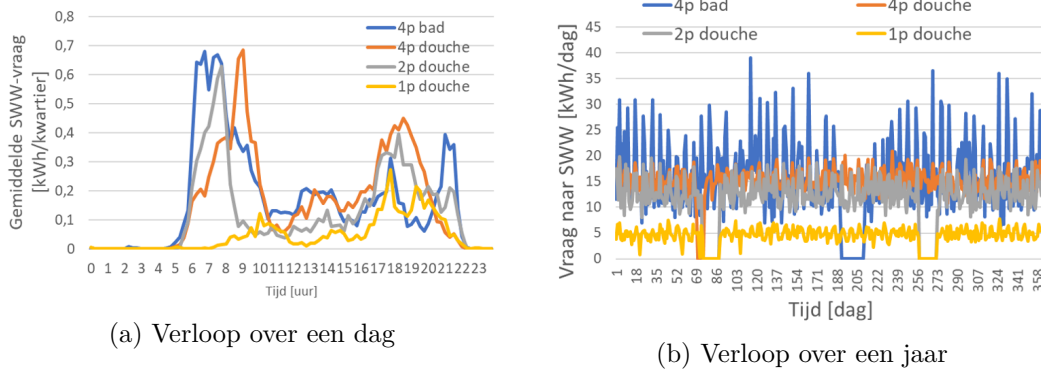
5.1 Gebruikersprofiel

Deze sectie onderzoekt de invloed van het gebruikersprofiel op zowel de optimale dimensionering als op de systeemkarakteristieken. Dit gebeurt in twee stappen. Eerst wordt de invloed van de aanwezigheid van een bad onderzocht, daarna de invloed van het aantal personen.

Om deze invloeden te onderzoeken, worden er drie nieuwe gebruikersprofielen geïntroduceerd: twee profielen met enkel een douche met een respectievelijke jaarlijkse SWW-vraag van 1637 kWh/jaar (1p) en van 4348 kWh/jaar (2p) en één profiel met zowel een bad als een douche (5746 kWh/jaar, 4p). Deze gebruikersprofielen zijn ook visueel weergegeven in figuren 5.1a en 5.1b. Figuur 5.1a toont hoe de verschillende gebruikersprofielen een zeer verschillend gemiddeld verloop over een dag hebben. Op figuur 5.1b is dan weer duidelijk de invloed van het bad weergegeven: het profiel met een bad vertoont veel grotere variaties tussen de verschillende dagen dan de drie profielen met enkel een douche.

5.1.1 Bad vs douche

De aanwezigheid van een bad zorgt voor een gebruikersprofiel met grotere piekvragen. Daarom onderzoekt deze sectie hoe groot de invloed van het bad is op de optimale dimensionering (zowel economisch als energetisch). Er wordt eerst gekeken naar de



Figuur 5.1: Vergelijking tussen de vier onderzochte gebruikersprofielen: drie keer met enkel een douche (voor 1,2 en 4 personen) en één keer met een bad (4 personen)

invloed van het nieuwe profiel op de economische optimalisatie (gegeven in tabel 5.1). Door deze tabel te vergelijken met tabel 4.13, zijn er enkele algemene conclusies mogelijk:

- De aanwezigheid van een bad heeft een beperkte invloed op de **keuze van de economisch optimale componenten**.
- Het bad heeft wel een grote invloed op het **economische optimale opslagvatvolume**. Bij elk van de zes systemen vergroot het benodigde opslagvat. Meestal uit zich dat in een groter buffervat, maar soms ook in een grotere tank. Het is ook zichtbaar dat de invloed groter is bij deze systemen zonder controleerbare hernieuwbare warmtebron (PV en ZC), gezien deze systemen een kleiner ogenblikkelijk vermogen kunnen leveren tijdens de piekvraag.
- Tot slot is het ook zichtbaar dat de **optimale hoeveelheid PV/ZC** iets groter wordt bij het WPPV-systeem en het ZC-systeem. Dit is niet het gevolg van de aanwezigheid van het bad, maar wel omdat de jaarlijkse vraag groter is (5780 kWh/jaar vs 5533 kWh/jaar).

Ook bij een vergelijking van de systeemkarakteristieken van deze economische optimalisaties zijn enkele tendensen opmerkelijk:

- Aangezien de grootte van de warmtevraag van beide gebruikersprofielen verschilt, moet de kostprijs per gevraagde kWh bepaald worden om de invloed op de **kostprijs** te bestuderen. De bovenste twee rijen van tabel 5.2 tonen dat gemiddelde kost per kWh stijgt door de aanwezigheid van een bad en dat deze stijging groter is bij de systemen zonder warmtepomp.
- Het **energetische rendement** daalt meestal door de introductie van het bad. De uitzondering hierop is het ZC-systeem, maar dit komt omdat de extra vraag van dit gebruikerprofiel de optimale hoeveelheid zonnepanelen heeft verhoogd.

Indien dit nieuwe gebruikersprofiel ook energetisch geoptimaliseerd wordt, gelden dezelfde conclusies. De tabel met de energetisch optimale dimensionering en de bijbehorende systeemkarakteristieken is te vinden in appendix C.1.1.

Parameter	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Volume buffervat [L]	×	400	250	100	×	50
Volume tank [L]	140	700	450	250	550	300
Oppervlakte panelen [m^2]	×	37	12	×	×	15
T_1-T_2 [°C]	55-65	×	×	45-55	50-60	45-55
T_3 [°C]	×	50	55	42	45	42
Weerstand buffervat [kW]	×	4	4	2	2	2
Soort opslagvat	100W+	100E	100V+	100V+	100V+	100V+
Soort warmtepomp	×	×	×	D06	D06	D06
Soort PV/ZC	×	285Wp	200FM	×	×	285Wp
Soort gasketel	50Wa	×	×	×	×	×
Hernieuwbare energie [kWh/jaar]	-	5125	3348	4206	4004	5150
Elektriciteit net [kWh_{el} /jaar]	20	1588	2957	1983	1920	1150
Energie gas [kWh/jaar]	6160	-	-	-	-	-
Energetisch rendement [%]	-	76,3	53,3	68	64	81,7
Totale Kost [€/jaar]	981	1564	1818	1447	1600	1481
Uitstoot [kg CO_2 /jaar]	1236	317	591	397	451	231

Tabel 5.1: De economisch optimale dimensionering en bijbehorende systeemkarakteristieken van de zes configuraties voor een gebruikersprofiel van vier personen met een bad

Gebruikersprofiel	Vraag [kWh/jaar]	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
4p met bad	5746	0,170	0,283	0,329	0,250	0,277	0,268
4p zonder bad	5533	0,170	0,261	0,304	0,242	0,268	0,247
2p zonder bad	4348	0,180	0,285	0,311	0,264	0,281	0,277
1p zonder bad	1637	0,258	0,373	0,382	0,423	0,447	0,447

Tabel 5.2: Kost in €/kWh SWW-vraag voor de bestudeerde systemen en gebruikersprofielen bij een economische optimalisatie

5.1.2 Variatie in aantal personen

Het aantal inwonende personen is uiteraard ook van belang bij het dimensioneren van een systeem voor SWW. Een grotere vraag naar SWW zorgt immers voor een groter gedimensioneerd systeem. Om de invloed van het aantal personen op de dimensionering te bestuderen, zijn alle systemen opnieuw geoptimaliseerd, zowel economisch als energetisch (= ecologisch). Tabel 5.2 toont de geminimaliseerde kost per kWh voor elk van de zes systemen voor de drie gebruikersprofielen (1p, 2p en 4p). Het valt op dat de kost per kWh toeneemt als het jaarlijkse verbruik afneemt, wat verklaarbaar is door de aanwezigheid van vaste kosten (zoals een warmtepomp). Daarom is het verschil dan ook groter bij systemen met een warmtepomp dan bij zonnepanelen en zonnecollectoren die per paneel schaalbaar zijn.

De invloed op het meest economische hernieuwbare systeem varieert voor beide nieuwe profielen. Voor het huishouden bestaande uit twee personen blijft de conclusie hetzelfde: het WP-systeem blijft het meest economisch, gevolgd door het WPPV-systeem. Voor het huishouden bestaande uit slechts één persoon verandert deze conclusie echter volledig: nu is het PV-systeem het goedkoopste hernieuwbare systeem, nipt gevolgd door het ZC-systeem. Dit komt omdat deze systemen zich beter kunnen aanpassen aan de kleinere vraag naar SWW.

Tot slot vergelijkt tabel 5.3 de economisch optimale dimensionering van het PV-systeem en het WP-systeem voor een gebruikersprofielen van 1, 2 en 4 personen. Hierin is zichtbaar dat bij het PV-systeem een grotere vraag naar SWW een grotere dimensionering veroorzaakt: zowel de oppervlakte van zonnepanelen als het volume van het opslagvat nemen toe. Bij het WP-systeem blijft de economische dimensionering echter hetzelfde voor de drie vraagprofielen. Dit betekent dat een correcte inschatting van het vraagprofiel minder van belang is bij de dimensionering van het WP-systeem, dan bij het PV-systeem. Alle optimalisaties (zowel energetisch als economisch, voor beide profielen) zijn te vinden in appendix C.1.2.

Aantal personen	1	2	4	1	2	4
Systeem	PV	PV	PV	WP	WP	WP
Volume buffervat [L]	100	150	200	50	50	100
Volume tank [L]	200	300	650	150	150	150
Oppervlakte panelen [m^2]	13	32	37.5	×	×	×
T_1-T_2 [$^{\circ}C$]	×	×	×	45-55	45-55	45-55
T_3 [$^{\circ}C$]	55	50	50	42	42	42
Weerstand buffervat [kW]	2	4	4	2	2	2
Soort opslagvat	100E	100E	100E	100V+	100V+	100V+
Soort PV/WP	285Wp	285Wp	285Wp	D06	D06	D08
Hernieuwbare energie [kWh/jaar]	1705	3759	5148	1868	3145	4186
Elektriciteit net [kWh_{el} /jaar]	402	1208	1235	546	1446	1686
Energetisch rendement [%]	78,5	75,7	80,7	71	68,2	71,3
Totale vraag	1637	4348	5533	1637	4348	5533
Totale Kost [€/jaar]	611	1240	1393	693	1148	1339
Uitstoot [kg CO_2 /jaar]	93,5	242	247	109	293	333

Tabel 5.3: De economisch optimale dimensionering en systeemkarakteristieken van het PV-systeem en het WP-systeem voor verschillende gebruikersprofielen

5.2 Stralingsdata

De hoeveelheid invallende straling is zowel voor de optimale dimensionering als voor de totale kostprijs belangrijk voor de drie systemen die berusten op zonne-energie (PV/ZC/WPPV). Aangezien het onmogelijk is om de grootte van de straling van de toekomst op voorhand perfect te voorspellen, moet de dimensionering van deze drie systemen gebeuren zonder accurate stralingsdata. Het is daarom interessant om na te gaan hoe groot de invloed van de invallende straling is.

Om dit te onderzoeken, zijn drie nieuwe stralingsprofielen geïntroduceerd (uit 2001, 2007 en 2015). Deze profielen zijn verkregen onder een andere hoek ten opzichte van de horizontale as (24° i.p.v. 30°).

Met deze drie profielen is er nagegaan hoeveel de jaarlijkse kost bedraagt, gegeven de huidige economisch optimale dimensionering (*huidige situatie*). Dit is weergegeven in tabel 5.4 (*Kost huidige data*). Het is zichtbaar dat deze kostprijs zowel bij het ZC-systeem als bij het PV-systeem hoger ligt dan de kost bij de huidige stralingsdata. Dit komt doordat het huidig gebruikte stralingsprofiel een 20-jarig gemiddelde waardoor alle pieken en dalen uitgemiddeld zijn. Dit vermijdt zowel de nadelen van de grote periodes zonder straling als de nadelen van de pieken in straling (overschot aan elektriciteit). Bij het WPPV-systeem zorgen deze pieken echter wel voor een voordelige situatie, omdat de zonnepanelen zo vaker in staat zijn om de warmtepomp rechtstreeks aan te drijven. Een andere verklaring is het feit dat de onderzochte dimensionering geoptimaliseerd is voor de huidige stralingsdata.

Om deze tweede reden te vermijden, worden de systemen opnieuw geoptimaliseerd, deze keer met de nieuwe stralingsdataprotielen. Ook deze nieuwe optimalisering en de bijbehorende totale kost (*Kost nieuwe situatie*) zijn weergegeven in tabel 5.4. Het is zichtbaar dat de dimensionering niet al te veel varieert bij andere stralingsprofielen.

Systeem	Karakteristiek	Huidige data	2001	2007	2015
-	Hoeveelheid straling [kWh/jaar/ m^2]	1047	1004	1015	1089
ZC	Kost huidige situatie [€/jaar]	1686	1843	1829	1800
ZC	A_{ZC}^{opt} [m^2]	10	9	9	9
ZC	V_{Tank}^{opt} [L]	300	250	250	250
ZC	Kost nieuwe situatie [€/jaar]	-	1835	1822	1795
PV	Kost huidige situatie [€/jaar]	1446	1488	1488	1460
PV	A_{PV}^{opt} [m^2]	35	38	35	35
PV	V_{Tank}^{opt} [L]	750	450	700	450
PV	Kost nieuwe situatie [€/jaar]	-	1469	1486	1450
WPPV	Kost huidige situatie [€/jaar]	1366	1363	1361	1351
WPPV	A_{PV}^{opt} [m^2]	9	9	11	11
WPPV	V_{Tank}^{opt} [L]	100	100	100	100
WPPV	Kost nieuwe situatie [€/jaar]	-	1363	1359	1348

Tabel 5.4: Invloed van het gebruikte stralingsprofiel op de economisch kost en de optimale dimensionering

Er valt dus te concluderen dat het verloop van de invallende straling wel degelijk een invloed heeft op zowel de jaarlijkse kost als op de optimale dimensionering, maar dat deze invloed toch eerder beperkt is. Dit komt goed uit, gegeven het feit dat de onzekerheid over het stralingsverloop van de toekomst altijd aanwezig zal blijven.

5.3 Reglementair kader

5.3.1 Valorisatie van het overschot aan elektriciteit

Tot nu toe werd er geen waarde toegekend aan alle PV-electriciteit die over was. Dit is in realiteit natuurlijk niet het geval, aangezien deze elektriciteit op het distributienet kan worden gezet. Er worden daarom twee nieuwe scenario's onderzocht:

Terugdraaiende teller: in het huidige reglementaire kader wordt het overschot aan elektriciteit vergoed aan volledig residentieel tarief met behulp van een terugdraaiende teller (€0,26/kWh binnen deze thesis). Als compensatie voor dit voordeel moeten de eigenaars van zonnepanelen wel een prosumententariaf betaald worden. Dit tarief is afhankelijk van de lokale distributienetbeheerder en bedraagt tussen de €90 en de €110 per kW piekvermogen van de PV-installatie [50]. Binnen deze thesis wordt er verder gerekend met €100.

Digitale meter: door de introductie van de digitale meters is het mogelijk om de ingaande en uitgaande elektriciteitsstromen te onderscheiden. Zo is het mogelijk om een andere (lagere) verloning te geven voor elektriciteit die op het distributienet gezet wordt dan de waarde van elektriciteit die van het net gehaald wordt. Door de introductie van deze *eerlijkere* verloning, kan het prosumententariaf verdwijnen. In de huidige voorstellen van Fluvius zou deze verloning gelijk zijn aan de energiecomponent van de elektriciteitsfactuur verhoogd met de verschillende bijdragen, waardoor de vergoeding voor elektriciteit op het net te zetten overeenkomt met €0,11/kWh ¹.

De impact van beide valorisatiemethoden op zowel de dimensionering als op de jaarlijkse kost wordt in de volgende twee secties besproken.

Terugdraaiende teller

De impact van de terugdraaiende teller wordt onderzocht op twee manieren. In eerste instantie wordt er gekeken hoe groot de economische impact is op het economisch optimale PV-systeem en WPPV-systeem. Dit is weergegeven in tabel 5.5. Het is zichtbaar dat de invoering van de terugdraaiende teller op een systeem dat daar niet op voorzien is een negatieve impact heeft als gevolg van het hoge prosumententariaf. Dit is logisch gezien bij de geoptimaliseerde systemen de overschotten aan PV-electriciteit indirect geminimaliseerd zijn.

Het is ook mogelijk om de systemen opnieuw economisch te optimaliseren, om te onderzoeken of het al dan niet mogelijk is om winst te maken uit het bestaan van de combinatie terugdraaiende teller/prosumententariaf. Gezien het qua kost niet uitmaakt of de elektriciteit van de zonnepanelen of van het net komt, kan het systeem namelijk heel anders gedimensioneerd worden (weergegeven in tabel 5.6). Zo is thermische buffering van de zonne-energie niet langer nodig, waardoor de

¹Een uitgebreide berekening van deze waarde is gegeven in appendix A.2

tankgrootte kan afnemen. Ook wordt de hoeveelheid zonne-energie gemaximaliseerd door de maximale oppervlakte ($40m^2$) en de meest efficiënte zonnepanelen (320Wp) te kiezen. Hierbij moet wel vermeld worden dat er wordt aangenomen dat het elektriciteitsverbruik van het beschouwde huishouden groot genoeg is, zodat de teller nooit onder nul terugdraait.

Voor het PV-systeem is de economische winst zeer klein (€6). Voor het WPPV-systeem is dit een ander verhaal: omdat het net kan dienen als een soort gratis batterij, wordt de weerstand in de tank, waarmee normaal gezien de energie van de zonnepanelen benut wordt, niet meer gebruikt. In plaats hiervan worden de overschotten aan elektriciteit op het net gezet en terug benut door de warmtepomp wanneer nodig. Op die manier wordt er enkel nog warmte geproduceerd op een economisch voordelige manier. Zo wordt de kost voor SWW plots nog maar €652 per jaar en is dit systeem dus zelfs goedkoper dan de gasboilerconfiguratie (€941/jaar). Dit betekent dat volgens de huidige regels er wel degelijk een hernieuwbaar systeem is met een lagere kostprijs dan de gasboiler!

Systeem	PV_{TDT}	$WPPV_{TDT}$	PV_{DM}	PV_{TDT}
Kost zonder valorisatie [€/jaar]	1446	1365	1446	1365
Overschot PV-elek [kWh_{el} /jaar]	1220	111	1220	111
Waarde overschot PV-elek [€/jaar]	317	29	137	12
Prosumententarief [€/jaar]	623	160	0	0
Kost met valorisatie [€/jaar]	1752	1497	1309	1353
Opbrengt a.g.v. valorisatie[€/jaar]	-306	-132	137	12

Tabel 5.5: Invloed van de terugdraaiende teller (TDT) en digitale meter (DM) op de kost van de huidige economische optimalisatie

Systeem	PV_{hs4}	PV_{TDT}	PV_{DM}	$WPPV_{hs4}$	$WPPV_{TDT}$	$WPPV_{DM}$
Volume buffervat [L]	200	200	200	100	150	100
Volume tank [L]	750	100	350	100	100	100
Oppervlakte panelen [m^2]	35	40	40	9	40	40
$T_1 - T_2$ [°C]	×	×	×	45-55	45-55	45-55
T_3 [°C]	50	60	50	42	42	42
Weerstand buffervat [kW]	4	4	4	2	2	2
Soort opslagvat	100E	100E	100E	100V+	100V+	100V+
Soort warmtepomp	×	×	×	D06	D06	D06
Soort zonnepanelen	285Wp	320Wp	320Wp	285Wp	320Wp	320Wp
Energetisch rendement [%]	79,6	65,4	81,5	77,8	80,2	88,1
Overschot PV-elek [kWh_{el} /jaar]	1220	4022	2914	390	7384	4538
Energie uit PV [kWh/jaar]	5115	3963	5071	1513	600	3446
Energie uit WP [kWh/jaar]	-	-	-	4232	5722	2514
Totale Kost [€/jaar]	1446	1440	1157	1365	652	1118

Tabel 5.6: Vergelijking van de economisch optimale dimensionering en de bijbehorende systeemkarakteristieken van de situatie met een terugdraaiende teller (TDT), een digitale meter (DM) en de situatie uit hoofdstuk 4 (hs 4)

Digitale meter

De invloed van de valorisatiemethode via de digitale meter wordt op dezelfde twee manieren onderzocht als voor de terugdraaiende teller. In tabel 5.5 is opnieuw de impact op de kost van de huidige economische optimalisatie weergegeven. Het is zichtbaar dat de digitale meter hier wel een positieve impact heeft op de jaarlijkse kost, in tegenstelling tot de terugdraaiende teller.

Ook nu worden beide systemen opnieuw economische geoptimaliseerd, maar nu met de aanwezigheid van een digitale meter (weergegeven in tabel 5.6). Het is zichtbaar dat de hoeveelheid zonnepanelen wederom gemaximaliseerd is ($40m^2$), maar dat er, in tegenstelling tot bij de terugdraaiende teller, wel getracht wordt de hoeveelheid benutte PV-elektriciteit te maximaliseren, alleen minder extreem dan zonder de digitale meter. Het is ook duidelijk dat het invoeren van deze digitale meter een grote positieve impact heeft op jaarlijkse kost t.o.v. de situatie zonder valorisatie.

Bespreking

Door de karakteristieken van de verschillende economische optimalisaties in tabel 5.6 te vergelijken, is het duidelijk dat het huidige vergoedingssysteem, de terugdraaiende teller, vanuit een maatschappelijk standpunt niet ideaal is. De eigenaars van zonnepanelen krijgen namelijk geen enkele stimulans om hun eigen opgewekte elektriciteit zelf te gebruiken en kunnen het elektriciteitsnet als onbeperkte batterij gebruiken. Dit zorgt ervoor dat deze situatie veruit de laagste energetische rendementen haalt. Voor de situatie met digitale meter geldt het omgekeerde, gezien deze extra vergoeding het evenwicht verschuift richting meer hernieuwbare energieproductie (grotere oppervlakte zonnepanelen). Dit is ook de reden waarom de VREG een grote voorstander was van een vervroegde verplichte overgang naar de digitale meter, maar dit werd door de regering tegengehouden. [51].

Economisch gezien zorgt de terugdraaiende teller voor een voordeel. Bij het WPPV-systeem komt dit voordeel bovenop de werking van de warmtepomp, waardoor er grote economische winsten mogelijk zijn. Bij het PV-systeem is het vertrekpunt (een elektroboiler) echter veel minder voordelig voor een groot gebruikersprofiel, waardoor de economische winst van dit systeem beperkt is.

Ook de digitale meter zorgt economisch twee keer voor een economisch voordeligere situatie. Dit is logisch gezien de verloning voor overschotten aan elektriciteit ($\approx \text{€}0.11/\text{kWh}$) groter is dan de residentiële productieprijs van PV-elektriciteit ($\approx \text{€}0.074/\text{kWh}$, gegeven de aannames binnen deze thesis)².

Door de valorisatie van de overschotten aan PV-elektriciteit is er een verschuiving in de volgorde van economische rendabiliteit van de zes systemen: bij een digitale meter worden het WPPV-systeem en het PV-systeem beide voordeliger dan de WP-configuratie en bij een terugdraaiende teller wordt het WPPV-systeem zelfs goedkoper dan een gasboiler.

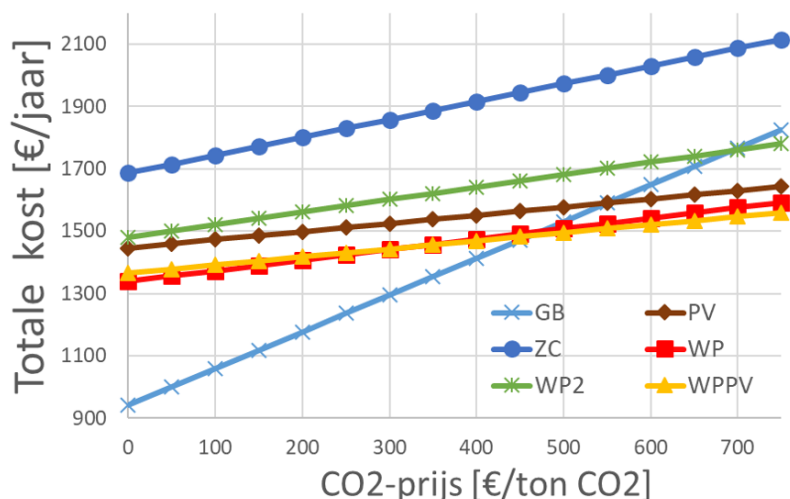
²Appendix B.2 bespreekt de berekening van deze productieprijs in meer detail

5.3.2 Prijs voor CO_2 -uitstoot

Er zijn drie visies weerhouden over de kostprijs van residentiële CO_2 -emissies:

- €0: in de residentiële sector is de uitstoot van CO_2 nog altijd niet belast.
- \approx €25: in de energie-intensieve industrie en de elektriciteitsproductiesector zorgt het emissiehandelssysteem voor een kost-efficiënte vermindering van de CO_2 -uitstoot over heel Europa door deze uitstoot te belasten met een variabele taks. Deze taks bedraagt momenteel ongeveer €25 [49].
- \approx €100: de kost om CO_2 terug uit de lucht te halen bedraagt momenteel minimaal €100 [52].

Hierdoor is het moeilijk om de maatschappelijke kost van CO_2 -uitstoot te bepalen. Figuur 5.2 toont daarom de invloed van de gekozen kost voor de CO_2 -uitstoot op de totale jaarlijkse kost voor de productie van SWW.



Figuur 5.2: Invloed van de CO_2 -emissiekost op de totale jaarlijkse kost voor SWW

Deze figuur toont dat er twee interessante kostprijzen zijn voor CO_2 : vanaf een prijs van €350/ton is het WPPV-systeem economisch het meest voordelige hernieuwbare systeem en vanaf een kostprijs van €465/ton is het WPPV-systeem economisch voordeliger dan het GB-systeem.

Het is dus duidelijk dat er zeer hoge CO_2 -kostprijzen nodig zijn vooraleer de kostprijs de economische rangschikking gaat veranderen. Dit is opnieuw een indicatie dat de productie van SWW geen kost-efficiënte manier is voor CO_2 -emissiereducties.

5.3.3 Subsidies

Er zijn momenteel drie soorten subsidies voor de onderzochte technologieën:

Een BTW-verlaging: om energie-efficiënte toepassingen te promoten, geeft de Vlaamse overheid momenteel een BTW-verlaging van 21% naar 6%. Deze regeling is geldig voor zowel zonnepanelen als zonneboilers (panelen en opslagvat) [21, 53].

Premies: ook de distributienetbeheerder geeft premies om energie-efficiëntie te bevorderen: bij de aankoop van een warmtepompboiler hoort een premie van €400 en bij een zonneboiler gaat deze premie zelfs tot €2750 (beperkt tot max 40% van de totale investering of max €550/m²) [54].

Terugdraaiende teller: dit is ook een verborgen subsidie, maar omdat de invloed hiervan reeds besproken is in 5.3.1, wordt dit hier verder niet behandeld.

Tabel 5.7 geeft weer hoeveel deze subsidies (vetgedrukt in de tabel) in totaal bedragen voor elk van de systemen (voor een economisch optimale dimensionering).

Systeem	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Jaarlijkse kost [€/jaar]	941	1446	1686	1339	1441	1365
BTW-verlaging [€/jaar]	-	57	59	-	-	21
Premies [€/jaar]	-	-	190	29	29	29
Totale subsidies [€/jaar]	0	57	249	29	29	50
Kost inclusief subsidies [€/jaar]	941	1389	1438	1310	1412	1315
Invloed optimale dimensionering	-	+2m ² PV	+2m ² ZC	geen	geen	geen

Tabel 5.7: Grootte van de subsidies en invloed op de totale kost per systeem

In deze tabel is het duidelijk zichtbaar dat zonnecollectoren momenteel de meeste subsidies krijgen. Gegeven de vergelijkingen in hoofdstuk 4.2.6 is dit echter moeilijk te verantwoorden. Zonnecollectoren komen namelijk zowel energetisch/ecologisch als economisch het slechtste uit de vergelijking. Het huidige subsidiestelsel bevoordeelt dus een kost-inefficiënte oplossing voor de verduurzaming van de productie van SWW. Op de onderste lijn van tabel 5.7 is tevens zichtbaar dat de aanwezigheid van de subsidies een eerder beperkte invloed heeft op de economisch optimale dimensionering van de systemen.

Tot slot is het ook zichtbaar dat zonnepanelen nog een aanzienlijke subsidie krijgen, naast het voordeel van de terugdraaiende teller. Gegeven het feit dat zonnepanelen hierbovenop reeds economisch rendabel zijn zonder subsidies (een productieprijs van €0,0734/kWh t.o.v. een residentieel tarief van €0,26/kWh, gecombineerd met een terugdraaiende teller), blijft het vreemd dat niet iedereen in zonnepanelen investeert.

5.4 Aannames

5.4.1 Energietekort

In hoofdstuk 3.2 is aangenomen dat het jaarlijkse discomfort mag oplopen tot 1 kWh/jaar. Deze grens was redelijk arbitrair gekozen. Daarom is het interessant om de invloed van deze keuze op de optimale dimensionering van elk systeem te bestuderen. Er worden twee alternatieve scenario's onderzocht: een tien keer kleiner totaal energietekort (0,1 kWh/jaar) en een totaal energietekort van 1‰ van de totale vraag (5,5 kWh/jaar).

Het bovenste deel van tabel 5.8 geeft de totale jaarlijkse kost weer in functie van het toegelaten jaarlijkse energietekort. Het is zichtbaar dat een versoepeling van deze grens veel geld kan besparen. Het is dus voor elk huishouden mogelijk om zelf te beslissen hoeveel geld hun thermisch comfort waard is.

Het onderste deel van deze tabel toont de invloed van het maximale toegelaten energietekort op de dimensionering van het comfortvat (het vat dat instaat voor het thermisch comfort (de tank bij WP2 en GB, het buffervat bij de andere systemen)). Een hogere grens zorgt voor een kleiner minimaal comfortvat, wat ook de verklaring is voor het grootste deel van de verschillen in jaarlijkse kost. Voor de volledigheid zijn de volledige economische optimalisaties gegeven in appendix C.2.

Systeem	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Kost bij ET = 0.1 kWh/jaar [€/jaar]	941	1454	1727	1356	1492	1392
Kost bij ET = 1 kWh/jaar [€/jaar]	941	1446	1686	1339	1441	1365
Kost bij ET = 5.5 kWh/jaar [€/jaar]	939	1439	1673	1329	1402	1365
$V_{Comfort}^{opt}$ bij ET = 0.1 kWh/jaar [L]	90	250	250	100	450	100
$V_{Comfort}^{opt}$ bij ET = 1 kWh/jaar [L]	90	200	150	100	450	100
$V_{Comfort}^{opt}$ bij ET = 5.5 kWh/jaar [L]	80	150	100	50	250	80

Tabel 5.8: Jaarlijkse kost en optimale comfortvat bij de drie onderzochte maximale energietekorten (ET)

5.4.2 Gekozen parameters

Tot slot onderzoekt deze sectie de invloed van enkele relevante parameters op de jaarlijkse totale kost door ze te laten variëren en te kijken hoe groot de relatieve invloed is op deze kost. Dit is weergegeven in tabel 5.9. Als vertrekpunt wordt de economische optimalisatie van elk systeem genomen uit hoofdstuk 4.2.4. Zowel de variatie van de parameter als de resulterende variatie in kost worden meestal weergegeven als percentage ten opzichte van respectievelijk de oorspronkelijke waarde van de parameter en de oorspronkelijke totale kost. De interessantste parameters zijn hieronder besproken:

- Zowel de elektriciteitsprijs als de gasprijs hebben een grote invloed op de totale kost van elk systeem. De verhouding tussen beide parameters bepaalt of de hernieuwbare systemen economisch voordeliger zijn dan de gasboiler: bij constante elektriciteitsprijs is de gasboiler voordelig tot een gasprijs van

11,8 cent/kWh en bij een elektriciteitsprijs van 15 cent/kWh is de gasboiler voordelig t.e.m. een gasprijs van 8,5 cent/kWh.

- Ook de aangenomen gevraagde temperatuur (42°C) en circulatieverliezen (40%) hebben een grote invloed, gezien ze de grootte van de warmtevraag bepalen.
- De impact van een foute inschatting van de levensduur van een component is relatief beperkt, al is het wel duidelijk dat een overschatting van de levensduur een grotere invloed heeft dan een onderschatting.
- De laatste twee blokken onderzoeken de invloed van enkele mogelijke toekomstige trends: zo zal het rendement/COP van de componenten waarschijnlijk nog stijgen in de toekomst en de prijs dalen. Het is zichtbaar dat deze evoluties de totale prijs van de systemen wel zouden verlagen, maar gegeven het feit dat het GB-systeem 30% goedkoper is dan het goedkoopste hernieuwbare systeem, zijn er relatief grote veranderingen nodig in deze kosten, vooraleer de hernieuwbare systemen economisch voordeliger zullen zijn.

Parameter	Variatie	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Elektriciteitsprijs	±20%	±0,1%	±4,7%	±8,8%	±6,9%	±7,7%	±4,3%
Gasprijs	±20%	±6,3%	-	-	-	-	-
T_{Vat}^{max}	+ 10°C (105°C)	0	-0,35%	0	0	0	-0,22%
	-10°C (85°C)	0	+1%	+0,4%	0	0	+0,6%
T_{Vraag}	+2°C (44°C)	+1,2%	+3%	+3,8%	+2,4%	+2,2%	+2,9%
	-2°C (40°C)	-1,9%	-2,6%	-3,6%	-2,6%	-6,9%	-1,6%
Circulatieverliezen	+25% (50%)	+5,5	+5,6%	+6,2%	+5,2%	+4,7%	+5,4%
	-25% (30%)	-5,5%	-5,3%	-6%	-5,2%	-4,6%	-4,2%
Interestvoet	+25% (5%)	+2%	+5,4 %	+3%	+3,2 %	+3,3%	+5%
	-25% (3%)	-1,8%	-5,1%	-3%	-3 %	-3%	-3,8%
Levensduur PV	+5j (30j)	-	-1%	-	-	-	-1%
	-5j (20j)	-	+1,5%	-	-	-	+2,7%
Levensduur ZC	+5j (25j)	-	-	-2,2%	-	-	-
	-5j (15j)	-	-	+3,9%	-	-	-
Levensduur WP	+5j (25j)	-	-	-	-2,8%	-2,8%	- 3,8 %
	-5j (15j)	-	-	-	+4,9%	+4,9%	+ 3,8 %
Levensduur vat	-5j (25j)	+0,7%	+3,7%	+1,2%	+1%	+1%	+1,3%
	+5j (35j)	-0,5%	-2,5%	-0,8%	-0,6%	-0,8%	-0,6%
Levensduur GB	+5j (25j)	-1,6%	-	-	-	-	-
	-5j (15j)	+2,8%	-	-	-	-	-
η_{PV}	+20%	-	-4%	-	-	-	-1,6%
η_{ZC}	+20%	-	-	-4,8%	-	-	-
COP_{WP}	+20%	-	-	-	-6,1%	-5,4%	-3,6%
Kost PV	-20%	-	-4,8%	-	-	-	-2,5%
Kost ZC	-20%	-	-	-2,8%	-	-	-
Kost WP	-20%	-	-	-	-3,7%	-3,7%	-3,6 %
Kost plaats	+20%	+0,5%	+1,1%	+0,5%	+0,4%	+0,5%	+0,4%

Tabel 5.9: Invloed van een variatie van enkele parameters op de jaarlijkse totale kost

Hoofdstuk 6

Besluit

6.1 Conclusie

Het is al lang geweten dat de wereldwijde CO_2 -uitstoot moet dalen om een niet-omkeerbare klimaatsverandering te vermijden. Daarom onderzoekt deze thesis in welke mate hernieuwbare technologieën integreerbaar zijn in het productieproces van sanitair warm water om zo de residentiële CO_2 -uitstoot te verkleinen. Deze integreerbaarheid steunt op drie peilers: de mate waarin de hernieuwbare technologieën de externe energieafname van het elektriciteits-/gasnet verkleinen, de economische competitiviteit van deze hernieuwbare systemen in vergelijking met de systemen op basis van fossiele brandstoffen en de mogelijke CO_2 -emissiereductie.

Om deze vraag te kunnen beantwoorden, onderzoekt deze thesis zes systemen. Als referentiesysteem wordt de gasboiler onderzocht gezien dit momenteel de meest gebruikte technologie is voor de productie van sanitair warm water in Vlaanderen. Daarnaast worden ook vijf andere systemen onderzocht, gebaseerd op hernieuwbare technologieën, namelijk zonnepanelen die een elektroboiler aandrijven, zonnecollectoren, twee varianten van warmtepompboilers en een combinatie van een warmtepompboiler met zonnepanelen. Elk van deze systemen, op één van de twee warmtepompboilervarianten na, maakt gebruik van een elektrische naverwarming om te allen tijde het gevraagde thermische comfort te kunnen leveren.

Het onderzoek bestaat uit drie fases: in de eerste fase wordt er onderzocht welke vrijheidsgraden de dimensionering van elk systeem heeft en wat de invloed is van een variatie van deze vrijheidsgraden op de belangrijkste systeemkarakteristieken, zijnde de hoeveelheid hernieuwbare energie, de jaarlijkse kost en de CO_2 -uitstoot. Hieruit blijkt dat de dimensionering van het opslagvat voor sanitair warm water een grote invloed heeft op zowel de jaarlijkse kost als op de herkomst van de gebruikte energie. Een overgedimensioneerd opslagvat zorgt namelijk voor een grote stijging van de jaarlijkse kost, maar een te klein gedimensioneerd opslagvat zorgt er voor dat het gevraagde thermisch comfort niet gehaald kan worden en dat de hernieuwbare technologie niet optimaal benut wordt.

Ook de temperaturen waartussen zowel de warmtepomp als de elektrische naverwarming worden aangestuurd hebben een zeer grote invloed op de hoeveelheid hernieuwbare energie die benut wordt. Indien de aanstuurtemperaturen van de warmtepomp stijgen of de onderste aanstuurtemperatuur van de elektrische naverwarming daalt, stijgt de hoeveelheid benutte hernieuwbare energie en daalt de hoeveelheid elektriciteit die van het elektriciteitsnet gehaald moet worden. Dit heeft bijgevolg een positieve impact op zowel de CO_2 -uitstoot als op de jaarlijkse totale kost van elk systeem. Deze aanstuurtemperaturen bepalen tevens de minimale grootte van het opslagvat om het gevraagde thermische comfort te kunnen leveren.

In de tweede fase worden de verschillende systemen geoptimaliseerd in een bepaalde richting, door verder te bouwen op de kennis uit de eerste fase. Eerst worden de onderzochte systemen energetisch geoptimaliseerd om de externe energieafname te minimaliseren en bijgevolg de hoeveelheid benutte hernieuwbare energie te maximaliseren. Hieruit blijkt dat het voor alle hernieuwbare systemen mogelijk is dat minstens 70% van hun gebruikte energie van hernieuwbare aard is. Voor het systeem dat een warmtepomp combineert met zonnepanelen is het zelfs mogelijk om maar 4% van de warmtevraag voor sanitair warm water te moeten dekken met niet-hernieuwbare energie.

Hierna worden de verschillende systemen geoptimaliseerd richting minimale equivalente jaarlijkse kost. Deze kost omvat een annualisering van de eenmalige investeringen, de operationele kosten (zoals water-, elektriciteit- en gasverbruik) alsook de externe kost voor de plaats die de installatie inneemt. Met een jaarlijkse kost van €1339 is de warmtepompboiler met elektrische naverwarming het goedkoopste hernieuwbare systeem, nipt gevolgd door de combinatie zonnepanelen-warmtepomp met een jaarlijkse kost van €1365. Het duurste systeem is het systeem met zonnecollectoren, met een minimale kost van €1686/jaar. Het verschil met de conventionele gasboiler is echter voor alle hernieuwbare systemen nog zeer groot, gezien de gasboiler een jaarlijkse kost heeft van €941.

Tot slot wordt er ook onderzocht hoe de systemen geoptimaliseerd moeten worden opdat ze een minimale CO_2 -uitstoot zouden hebben. Omdat er enkel operationele emissies van CO_2 worden meegenomen, komt deze optimalisatie volledig overeen met de energetische optimalisatie. Dit betekent dat het systeem met zonnepanelen én warmtepomp de laagste uitstoot van CO_2 heeft, die tot 22 keer lager kan zijn dan de minimale uitstoot van een gasboiler. Indien er zuiver naar CO_2 -emissiereducties gekeken wordt, komt het introduceren van deze hernieuwbare systemen overeen met een CO_2 -emissiereductiekost van minimaal €460/ton CO_2 . Dit is een indicatie dat CO_2 -emissiereducties in het productieproces van sanitair warm water in Vlaanderen momenteel niet kostenefficiënt is.

In de derde fase onderzoekt een sensitiviteitsanalyse de invloed van enkele externe factoren op de bekomen resultaten. Als eerste wordt de invloed van het gebruikersprofiel op de optimale dimensionering en op de volgorde in economische rendabiliteit bestudeerd. Uit een nieuwe economische optimalisatie volgt dat de aanwezigheid van een bad in plaats van enkel een douche ervoor zorgt dat er een

groter opslagvat vereist is en dat bij kleinere gebruikersprofielen de systemen met zonnepanelen economisch optimaal zijn (en niet langer de systemen met een warmtepomp), gezien deze beter schaalbaar zijn naar een kleinere vraag.

Hierna wordt ook de invloed van het reglementaire kader onderzocht, met in de eerste plaats de invloed van een terugdraaiende teller en een digitale meter op de economische rendabiliteit van de systemen die zonnepanelen gebruiken. Dit gebeurt door de minimale economische kost te vergelijken met die uit fase twee, waarin de overschotten aan door de zonnepanelen geproduceerde elektriciteit nog niet gevaloriseerd werden. Hieruit blijkt dat, wanneer enkel sanitair warm water beschouwd wordt, een digitale meter een situatie creëert waarin er zowel meer hernieuwbare energie gebruikt wordt als waarin beide systemen met zonnepanelen economisch voordeliger zijn. Bij een terugdraaiende teller, gepaard gaand met het bijbehorende prosumentarief, blijkt enkel nog de combinatie warmtepomp-zonnepanelen er economisch op vooruit te gaan ten opzichte van fase twee. De jaarlijkse kost van dit systeem kan zelfs dalen tot €652, wat betekent dat de terugdraaiende teller er momenteel voor zorgt dat in het huidige reglementaire kader een hernieuwbaar systeem zelfs goedkoper kan uitvallen dan een gasboiler. De situatie met de terugdraaiende teller is echter verre van optimaal uit systeemstandpunt, gezien deze situatie geen eerlijke verdeling van de kosten van het elektriciteitsnet genereert.

Binnen ditzelfde reglementaire kader blijkt ook dat zonnecollectoren momenteel veruit de meeste subsidies krijgen, maar dat zelfs inclusief deze subsidies dit systeem nog altijd economisch het minst voordelig is. Gezien dit systeem ook het minst gebruik maakt van hernieuwbare energie als gevolg van het Belgische klimaat, kan er geconcludeerd worden dat de huidige subsidies voor sanitair warm water producerende technologieën niet optimaal verdeeld zijn.

Tot slot worden ook nog enkele aangenomen parameters gevarieerd om de invloed van deze aannames te controleren. Hieruit volgt onder andere dat de verhouding tussen de gas- en elektriciteitsprijs cruciaal is voor de economische rendabiliteit van de hernieuwbare systemen.

6.2 Vervolgonderzoek

Deze thesis focust louter op de productie van sanitair warm water. De interactie met zowel ruimteverwarming als met het overige elektriciteitsverbruik wordt bewust vermeden. Daarom is het dan ook een logische volgende stap om deze twee aspecten ook mee te nemen en zo te onderzoeken wat de optimale manier is om het volledige residentiële energiegebruik te integreren met hernieuwbare technologieën, vertrekkend vanuit de inzichten die in deze thesis toegelicht worden.

Deze thesis focust ook enkel op de keuze en de dimensionering van het optimale systeem. Een eventueel vervolg onderzoek zou kunnen gaan over de optimale controle van deze systemen, eventueel in combinatie met actieve vraagsturing.

Tot slot onderzoekt deze thesis de optimale situatie voor één huis. In realiteit is elk huis echter deel van een groter geheel, waardoor het meer optimaal zou kunnen zijn om op systeemniveau te kijken naar de optimale integratie van hernieuwbare energie.

Bijlagen

Bijlage A

Gebruikte inputdata

A.1 Kostprijzen

A.1.1 Technische componenten

Deze sectie geeft een overzicht van de verschillende technische componenten die gebruikt zijn en hun prijzen. Om ervoor te zorgen dat de verschillende systemen met elkaar vergelijkbaar zijn, is er gekozen om alle componenten aan te kopen bij éénzelfde fabrikant, namelijk VIESSMANN. De meeste prijzen die hieronder getoond worden, zijn afkomstig uit een prijslijst van VIESSMANN van eind 2018 [55]. Het grote voordeel van het gebruik van een dergelijke catalogus voor prijzen is dat het zeer makkelijk is om prijzen relatief met elkaar te vergelijken, omdat éénzelfde bedrijf in éénzelfde catalogus vaak relatief gelijkende prijsmarges hanteert. Het nadeel van deze specifieke catalogus is echter dat de prijzen hoger liggen dan de werkelijke prijzen. Daarom worden alle prijzen achteraf gecorrigeerd worden in sectie A.1.2 met een specifieke correctiefactor per technologie die dit verschil probeert te compenseren.

Opslagvat

Deze thesis onderzoekt enkele types opslagvaten van VIESSMANN :

- De 100V-reeks: dit type vat bevat intern een warmtewisselaar en is dan ook geschikt voor alle configuraties die dit vereisen (alles in combinatie met zonnecollectoren, een warmtepomp of een gasboiler). Er zijn verschillende soorten van dit type, elk met een eigen dikte aan isolatie. Volgens toenemende isolatie wordt de volgende volgorde bekomen: $CVA(A) < CVAA-A/CVWA < EVIA -A < EVIA-A+$. Welk type opslagvat gekozen wordt, volgt per systeem uit een afweging tussen de economische meerkost van de betere isolatie en de daling van de warmteverliezen. Het is belangrijk om op te merken dat de tweede minst geïsoleerde categorie bestaat uit twee verschillende soorten vaten: de CVAA-A, die nauw aansluit bij de CVA(A), maar bestaat enkel voor vatgroottes tot 200L en het CVWA-type, dat ook een beter geïsoleerde variant is van het CVA(A)-type, maar dan voor vaten groter dan 300L. Beide vaten worden verder verzameld onder de categorienaam *100V+*. Ook de andere types

worden verder afgekort onder een soortgelijke naam. Dezelfde isolatievolgorde wordt met deze nieuwe namen: $100V < 100V+ < 300V < 300V+$.

- 100E-reeks: dit type vat bevat geen interne warmtewisselaar en is dus eigenlijk gewoon een metalen cilindervorm met isolatie langs de wanden. Omdat bij de configuratie met zonnepanelen geen warmtewisselaar in het opslagvat vereist is, wordt dit type vat voor deze configuratie gebruikt, aangezien dit vat goedkoper is dan de 100V-reeks.
- De 100W-reeks: deze reeks vaten is gelijkend op de 100V-reeks, maar is minder goed compatibel met een elektrische weerstand. Hierdoor zijn deze vaten enkel nuttig voor de gasboilerconfiguratie, omdat deze configuratie geen weerstand in het vat vereist. Ook hier is er weer een beter en een minder goed geïsoleerde variant, die respectievelijk beschreven worden als 100W+ en 100W.

De prijzen van elk opslagvat variëren in functie van het volume en van het type vat. Tabel A.1 geeft voor de verschillende soorten onderzochte vaten de prijs in euro voor bepaalde volumes volgens de VIESSMAN catalogus. In deze thesis worden echter alle opslaggroottes toegelaten. Om de kostprijs van een vat met een willekeurige grootte te bepalen, wordt de kost daarom bepaald op basis van een kostentrendlijn. Tabel A.2 geeft weer welke functie gebruikt is als kostentrendlijn. Er is voor elk vat apart een afweging gemaakt welke soort functie de werkelijkheid het best benaderde. Deze tabel geeft ook weer tussen welke grenzen de kostentrendlijn representatief is.

Soort vat	120L	150L	160L	200L	300L	400L	500L	600L
100V type CVA(A)	/	/	906	934	1199	/	2138	/
100V type CVAA-A	/	/	1041	1073	/	/	/	/
300V type EVIA-A	/	/	1718	1771	2276	/	4057	/
300V type EVIA-A+	/	/	1975	2036	/	/	/	/
100E	/	/	/	899	/	1065	/	1274
100W type CUGA	882	949	/	/	/	/	/	/
100W type CUGA-A	1013	1091	/	/	/	/	/	/

Tabel A.1: Kost van een opslagvat in euro in functie van het volume van het vat

Soort vat	$V_{vat,min}$ [L]	$V_{vat,max}$ [L]	Gebruikte kostentrendlijn [€]
100V	100	300	$633,51 * \exp(0,0021 * V_{vat})$
	300	1300	$4,9109 * V_{vat} - 299,83$
100V+	100	200	$0,8 * V_{vat} + 913$
	200	1300	$5,7359 * V_{vat} - 70,23$
300V	100	300	$1199,5 * \exp(0,0021 * V_{vat})$
	300	1300	$8,905 * V_{vat} - 395,5$
300V+	100	250	$1,525 * V_{vat} + 1731$
100E	0	200	$3,026 * V_{vat} + 293,81$
	200	1300	$0,9375 * V_{vat} + 704,33$
100W	50	250	$2,333 * V_{vat} + 614$
100W+	50	250	$2,633 * V_{vat} + 697$

Tabel A.2: De gebruikte functies om de kost van een opslagvat met willekeurige grootte te bepalen

Elke van de zes onderzochte configuraties vereisen ook dat bepaalde extra faciliteiten aanwezig zijn in het opslagvat. Tabellen A.3 en A.4 hieronder geven respectievelijk weer wat de prijs is van elke extra component die bij een opslagvat kan worden aangesloten en welke configuraties welke extra componenten vereisen.

Component	100V	100V+	300V	300V+	100E	100W	100W+
Extra weerstand 1	586	438	644	644	438	/	/
Extra weerstand 2	586	587	644	644	438	/	/
Temperatuursensor	26	26	26	26	26	26	26
Temperatuurregelaar	124	124	124	124	124	124	124
Veiligheidsgroep	189	189	189	189	189	189	189

Tabel A.3: Kost in euro voor extra componenten per type opslagvat

Component	GAS	PV	WP	ZC	WP2	WPPV
Extra weerstand 1	0	1	1	1	0	1
Extra weerstand 2	0	1	0	0	0	0
Temperatuursensor	1	2	2	2	1	2
Temperatuurregelaar	1	2	2	2	1	2
Veiligheidsgroep	1	1	1	1	1	1

Tabel A.4: Aantal benodigde extra componenten in het opslagvat per configuratie

Warmtepomp

Deze thesis neemt zes soorten warmtepompen mee, allemaal geproduceerd door VIESSMANN. Alle zes warmtepompen zijn lucht-water warmtepompen en zijn van de reeks *VITOCAL 200-S*. Het verschil tussen deze warmtepompen zit in hun nominaal thermisch vermogen. Een warmtepomp met een hoger thermisch nominaal vermogen heeft ook een hogere COP en elektrisch vermogen. Het nadeel deze warmtepompen is de meerkost bij de initiële investering. Tabel A.5 hieronder vat het verschil tussen de warmtepompen overzichtelijk samen. Het nominale thermische vermogen en de COP zijn uitgedrukt voor een luchttemperatuur van 7°C en een watertemperatuur van 35°C (A7W35), zoals dit meestal gebeurt. In de tabel wordt ook de catalogusprijs met en zonder interne weerstand weergegeven.

Soort WP	D04	D06	D08	D010	D013	D016
$P_{nom,therm}$ bij A7W35 [kW]	4	4,8	5,6	7	7,9	8,6
COP_{nom} bij A7W35 [-]	4,6	4,6	4,7	4,7	4,7	4,5
Prijs WP zonder weerstand [€]	4866	4996	5370	7241	7964	8596
Prijs WP met weerstand [€]	5452	5582	5956	7698	8424	9053

Tabel A.5: Basisparameters en prijzen van de verschillende onderzochte warmtepompen

Zonnepanelen

De kost voor zonnepanelen bestaat uit vier delen: een kost voor de panelen, een kost voor de convertoren, een kost voor de installatie en een kost voor de montagematerialen. Voor elk van deze vier deelen is de kost afzonderlijk bepaald. Omdat het BTW-tarief voor de plaatsing van zonnepanelen kan variëren tussen 6 en 21% (zie 2.2.1), zijn alle prijzen exclusief BTW gegeven. Achteraf kan het juiste BTW-percentages dan toegepast worden.

De eerste kost is een kost voor de zonnepanelen zelf. Er worden vijf soorten zonnepanelen meegenomen, elk met een eigen maximale AC-vermogen (uitgedrukt in Wp) en rendement. Ook deze zonnepanelen zijn van VIESSMANN, maar ze staan niet in dezelfde prijzenlijst. Daarom is de prijs bepaald door verschillende bronnen online te vergelijken. Tabel A.6 geeft de belangrijkste eigenschappen van de panelen, net als de prijs en de bron van deze prijs. Om te weten hoeveel panelen er nodig zijn, is het verder nog belangrijk om te weten dat elk van de vijf soorten zonnepanelen een oppervlakte heeft van $1,6\text{m}^2$.

AC-capaciteit [Wp/paneel]	Rendement [%]	Prijs [€/paneel]	Bron
270	16,3	124	[56, 57]
285	17,5	125	[56, 58]
300	18,1	135	[56, 59]
305	18,7	155	[56, 60]
320	19,3	160	[56, 61]

Tabel A.6: Basisparameters van de verschillende onderzochte soorten zonnepanelen

De kostprijs van de convertoren is afhankelijk van de grootte van de installatie. Hoe groter het vermogen dat de convertor moet kunnen verwerken, hoe goedkoper de convertor wordt per eenheid vermogen [62]. Daarom wordt er interpolerende functies gebruikt die de kost voor de convertor bepalen in functie van het nodige vermogen (P_{nom}) dat deze convertor moet kunnen verwerken. Deze interpolatiefuncties zijn gegeven in tabel A.7.

P_{min} [Wp]	P_{max} [Wp]	Interpolatiefunctie [€]
0	2200	$0,0661 * P_{nom} + 504,96$
2200	4000	$0,0488 * P_{nom} + 719,01$
4000	10000	$0,00004101 * P_{nom}^2 - 0,0929 * P_{nom} + 648,48$

Tabel A.7: Gebruikte functies voor het bepalen van de PV convertorkost

De prijs voor de installatie van de zonnepanelen is afhankelijk van het aantal zonnepanelen dat geïnstalleerd wordt [63, 64]. Bij een installatie van een groter aantal panelen, daalt de installatiekost per paneel. Tabel A.8 geeft weer welke twee functies gebruikt worden om de installatiekost per paneel te bepalen. Hierbij stelt N_{paneel} het aantal panelen voor dat geïnstalleerd wordt.

$N_{paneel,min}$	$N_{paneel,max}$	Interpolatiefunctie [€/paneel]
0	20	$0,1904 * N_{paneel}^2 - 8,3242 * N_{paneel} + 160,48$
20	40	$-0,422 * N_{paneel} + 78,98$

Tabel A.8: Gebruikte functies voor het bepalen van de installatiekost per paneel

Tot slot is er ook nog een kost voor de montagematerialen die noodzakelijk zijn bij de installatie. De kosten per paneel voor deze materialen zijn weergegeven in tabel A.9 [65].

Component	Prijs per stuk [€]	Aantal nodig per paneel [-]	Prijs per paneel [€]
Balken	4,97	3	14,90
Klemmen	2,49	6	14,93
Schroeven	0,34	9	3,39
Totaal	-	-	33,22

Tabel A.9: Opsplitsing van de kost voor de montagematerialen per paneel

De totale prijs voor de zonnepanelen is de som van deze vier componenten, vermeerderd met de BTW. Zoals eerder gezegd, kan het toegepaste BTW-tarief 6% of 21% zijn, afhankelijk van de ouderdom van het huis waarop de zonnepanelen geïnstalleerd worden. Omdat er gekozen is om eerst alles uit te rekenen zonder subsidies, is er gekozen om te rekenen met 21% BTW op de zonnepanelen.

Zonnecollector

Binnen deze thesis worden twee soorten zonnecollectoren meegenomen, wederom beide geproduceerd door VIESSMANN: de Vitosol-100FM en de Vitosol-200FM. Er is gekozen om de vacuümbuiscollectoren niet te weerhouden, gezien deze doorgaans niet voordelig zijn voor SWW-installaties. Tabel A.10 vat de karakteristieken van beide soorten zonnecollectoren overzichtelijk samen. De kost per paneel is echter niet gegeven in de catalogus. Daarom is er gekeken naar de prijs van verschillende pakketten die deze panelen bevatten en het aantal panelen per pakket om zo de kost per paneel en een vaste kost per installatie te bekomen door het oplossen van een stelsel. Ook deze waarden zijn weergegeven in de tabel.

Eigenschap	Vitosol 100-FM	Vitosol 200-FM
η_0 [-]	0,813	0,823
k_1 [W/(m ² * K)]	3,845	4,421
k_2 [W/(m ² * K ²)]	0,045	0,022
Appertuuroppervlak per paneel [m ²]	2,02	2,33
Prijs per paneel [€]	600	800
Vaste kost per installatie [€]	200	200
Kost expansievat per paneel [€]	25	20
Kost klepventiel expansievat [€]	11	11

Tabel A.10: Basiskarakteristieken van de verschillende onderzochte zonnecollectoren

Bovenop de kost voor de zonnecollectoren zelf, komt er uiteraard ook nog de kost voor de installatie van deze panelen. Deze kost bestaat, net zoals bij zonnepanelen, uit een installatiekost per paneel (die een dalende functie is in functie van het aantal panelen) en een kost voor de montagematerialen die nodig zijn om de zonnecollectoren te monteren op het dak. Er is aangenomen dat de data voor beide kosten overeenkomstig zijn met de kosten voor zonnepanelen.

Gasboiler

Deze thesis onderzoekt vier soorten gasboilers, afkomstig uit twee types gasboilers, namelijk de VITODENS 050-W en de VITODENS 100-W. Dit zijn beide condenserende gasboilers en bijgevolg hebben ze dus een rendement dat groter kan zijn dan 1 ten opzichte van de lagere verwarmingswaarde. Het grootste verschil tussen beide types gasboilers is dat de 100-W een iets gebruiksvriendelijkere interface en een net iets hoger rendement heeft. Tabel A.11 geeft een overzicht van al de gebruikte karakteristieken van deze soorten gasboilers.

Soort gasboiler	Afkorting	P_{therm} [kW]	η [%]	Prijs [€]
VITODENS 050-W	50Wa	5,9-21,9	108	1446
	50Wb	8,0-30,1	108	1624
VITODENS 100-W	100Wa	5,9-23,8	109	1966
	100Wb	8,0-32,1	109	2090

Tabel A.11: Basiskarakteristieken van de verschillende onderzochte gasboilers

Bij de aankoop van een gasboiler komen echter extra kosten bij kijken. Tabel A.12 toont waarvoor deze extra kosten nodig zijn en hoe groot deze kosten zijn.

Systeem	Component	Prijs [€]
Regeling	Thermometer	26
Regeling	Veiligheidsgroep	40
Regeling	Aan/uit schakelaar	47
Regeling	Totaal	113
Rookgassysteem	Buizen (10m + 2 bochten)	161
Rookgassysteem	Rest materiaal	52
Rookgassysteem	Installatie	96
Rookgassysteem	Totaal	309
Condensatiewater	Neutralisatie	216
Condensatiewater	Pomp	188
Condensatiewater	Neutraliseringsgranulaat	68
Condensatiewater	Totaal	472
TOTAAL		894

Tabel A.12: Benodigde componenten bij aankoop van een gasboiler met hun bijbehorende prijs in euro

A.1.2 Prijscorrectiefactor voor de VISSMANN-componenten

Zoals eerder vermeld, zijn de prijzen uit de gebruikte catalogus iets hoger dan de werkelijke marktprijs. Daarom is er beslist om per component te bepalen hoeveel duurder de prijs in de catalogus is ten opzichte van deze werkelijke marktprijs.

Omdat de prijs van de zonnepanelen niet uit deze catalogus komt, geldt deze regeling niet voor de PV-prijzen. Tabel A.13 geeft er vergelijking tussen de echte prijs en de goedkoopste prijs die elders te vinden is. De kolom "Bron" verduidelijkt met behulp van tabel A.14 op welke plaats deze laagste prijs te vinden is. Door de relatieve verschillen per type component te vergelijken, is het mogelijk om een gemiddelde correctiefactor te bepalen per component, waarmee alle originele prijzen van VIESSMANN verlaagd moeten worden. Deze factoren zijn weergegeven in tabel A.15. De reden dat met een dergelijke correctiefactor wordt gewerkt, is om op deze manier de imperfecties van de markt uit te middelen, maar de relatieve verschillen tussen alle componenten wel te bewaren. De laatste kolom van tabel A.13 geeft ten slotte de prijs weer per component, zoals deze verder in deze thesis gebruikt wordt.

A.1.3 Kostprijs nutsvoorzieningen

Kost van water

Voor de kostprijs van leidingwater is gekeken naar de werkelijke prijs, zoals deze wordt aangerekend op de factuur van particulieren in Vlaams-Brabant. Op deze factuur bestaat de totale kost uit twee delen: een vaste kost en een variabele kost. De vaste kost bestaat uit een kost voor productie en aanleveren van water (€50), een kost voor het zuiveren van het water (€20) en een kost voor de afvoer van het water (€30) [66]. Dit brengt de totale vast kost van water op €100 per jaar. Er is echter nog een korting van €10 per inwonende persoon per jaar.

De variabele kost van water is opnieuw bedoeld voor het dekken van de kosten voor aanleveren, zuiveren en afvoeren van het water. De grootte van deze kost is afhankelijk van de relatieve grootte van het afgenomen debiet ten opzichte van het basisdebiet ($30m^3 + 30m^3$ per inwonende persoon). Als de vraag kleiner is dan het basisdebiet, dan kost één kubieke meter $4,1 \text{ €/}m^3$. Vanaf dat het debiet groter wordt dan dit basisdebiet, kost elke extra kubieke meter dubbel zoveel.

De kost van water wordt integraal meegenomen in de economische kost van elke configuratie om zo de werkelijke totale kost van sanitair warm water te kennen.

Kost van elektriciteit

Ook voor de kost van elektriciteit wordt gekeken wat de residentiële gebruiker vandaag betaalt voor elektriciteit. Volgens de V-test van de VREG is de prijs van elektriciteit ongeveer €0,26 per kWh, bij verbruiken rond de 6000 kWh/jaar [43]. De reden dat een verbruik wordt genomen dat groter is dan het gemiddelde elektriciteitsverbruik van ongeveer 4000 kWh/jaar [9], is dat elk van de vijf hernieuwbare configuraties veel elektriciteit verbruiken voor de productie van SWW, daar waar dit bij de meeste huishoudens momenteel geen deel uitmaakt van het elektriciteitsverbruik.

Kost van aardgas

De kostprijs voor aardgas wordt op een soortgelijke manier bepaald als die voor elektriciteit. Ook voor gas is de residentiële prijs per kWh bepaald op de V-test.

Type	Component	VIESSMANN prijs	Laagste prijs	Bron	Relatief verschil	Nieuwe prijs inclusief correctie
Vat	100V 160L	906	668	1	1,36	671
Vat	100V 200L	934	656	1	1,42	692
Vat	100V 300L	1199	882	1	1,36	888
Vat	100V 500L	2138	1575	1	1,36	1584
Vat	100V+ 160L	1041	704	1	1,48	771
Vat	100V+ 200L	1073	793	1	1,35	795
Vat	100V+ 300L	1581	1195	1	1,32	1171
Vat	100V+ 500L	2734	2015	1	1,36	2025
Vat	300V 160L	1718	1239	1	1,39	1273
Vat	300V 300L	2276	1675	1	1,36	1686
Vat	300V+ 160L	1975	1455	1	1,36	1463
Vat	300V+ 200L	2036	1500	1	1,36	1508
Vat	100E 200L	899	663	1	1,36	666
Vat	100E 400L	1065	788	1	1,35	789
Vat	100E 600L	1274	937	1	1,36	944
Vat	100W 120L	885	660	2	1,34	656
Vat	100W 150L	949	710	2	1,33	703
WP	D04 zonder weerstand	4866	3910	3	1,24	3893
WP	D06 zonder weerstand	4996	4189	3	1,2	3997
WP	D08 zonder weerstand	5370	4417	3	1,22	4296
WP	D04 met weerstand	5452	4190	4	1,30	4362
WP	D06 met weerstand	5582	4460	4	1,25	4466
WP	D08 met weerstand	5956	4665	4	1,28	4765
ZC	100-FM paneel	600	485	5	1,24	480
ZC	200-FM paneel	800	575	5	1,39	640
Extra	Weerstand 100V	586	391	1	1,38	419
Extra	Weerstand 300V	644	459	2	1,40	460
Extra	Weerstand 100E	438	288	1	1,52	323
Extra	Veiligheidsgroep	189	131.4	1	1,44	135
Extra	Temperatuurregelaar	124	98.5	1	1,26	89
Extra	Temperatuursensor	26	16.9	1	1,54	17
GB	50Wa	1446	1000	6	1,45	904
GB	50Wb	1624	1000	6	1,62	1015
GB	100Wa	1966	1217	6	1,62	1229
GB	100Wb	2090	1283	6	1,62	1306

Tabel A.13: Vergelijking van de VIESSMANN-catalogusprijzen met de marktprijzen

Deze prijs bleek gelijk te zijn aan €0,050 per kWh [45].

A.1.4 Andere kosten

Kost voor plaats

Omdat de oppervlakte in een gemiddelde Vlaamse woning beperkt is, wordt er binnen deze thesis een kost toegekend die toeneemt naarmate het opslagvat meer plek inneemt. Deze kost voor oppervlakte wordt uitgedrukt per vierkante meter en

Bronnummer	Winkel
1	Heizungsdiscout24.de
2	Loebbeshop
3	Handwerkstraum.de
4	Meinhausshop
5	Alternatieve haustechnik
6	Boilerprices.co.uk

Tabel A.14: Verduidelijking “bron”-kolom uit tabel A.13

Type component	Correctiefactor
Opslagvat	1,35
Warmtepomp	1,25
Zonnecollector	1,3
Extra componenten	1,4
Gasboiler	1,6

Tabel A.15: Algemene correctiefactor per type componenten

ligt rond de 1500 €/m^2 . De moeilijkheid van deze kost is de periode waarover deze moet worden afgeschreven. Er is gekozen dat deze periode gelijk is aan de levensduur van het buffervat, wat 30 jaar is. Rekening houdend met het gekozen verwachte rendement van 4% per jaar, kan deze kost uitgedrukt worden in een kost per jaar: $86,7 \text{ €/m}^2 / \text{jaar}$. Deze kost wordt meegenomen in de jaarlijkse totale kost.

Kost voor CO_2

De kost voor de uitstoot van CO_2 zou kunnen meegenomen worden in deze thesis. Het grote probleem is dat er geen universele consensus is over de grootte van de kost voor het uitstoten van 1 kg CO_2 . In bepaalde sectoren, waaronder de residentiële sector, heeft deze uitstoot geen kost. In andere sectoren wordt deze kost bepaald door het emissiehandelssysteem, maar kan deze kost wel variëren van dag tot dag [49]. Tot slot is het ook mogelijk om te kijken naar de kost om deze CO_2 achteraf terug uit de lucht te halen en deze waarde te nemen als kost van de vervuiling [52]. Dit zou volgens de gerefereerde bron een kost zijn van 94 tot 232 €/ton CO_2 . Omdat er te veel discussie is over welke prijs er effectief genomen moet worden, is er gekozen om de kost voor de CO_2 -uitstoot niet mee te nemen in de algemene economische optimalisatie. De invloed van de verschillende hierboven besproken kostprijzen wordt echter wel onderzocht in de sensitiviteitsanalyse.

A.1.5 Totale kost

Om de totale kost te bepalen per configuratie, moet de kost van de eenmalige investeringen opgeteld kunnen worden bij de jaarlijks terugkerende kosten. Omdat

geld een tijds waarde heeft die niet te verwaarlozen is (als gevolg van inflatie en de opportuniteitskost van geld), is er gekozen om te werken met een verwacht rendement van 4% per jaar. Deze waarde is volgens de Europese Unie een courante waarde voor lange termijn residentiële projecten [42]. Gezien de verschillende gebruikte technologieën een verschillende levensduur hebben, is het moeilijk om ze rechtstreeks met elkaar te vergelijken. Daarom is er gekozen om de investeringskosten te annualiseren. Dit betekent dat er een equivalent bedrag wordt bepaald dat elk jaar betaald wordt en dat over de levensduur van de component een gelijke equivalente waarde heeft als de normale investeringskost, rekening houdend met de gekozen tijds waarde van geld. Om deze annualiseringsfactor te bepalen, kan de volgende formule toegepast worden, waarbij i de tijds waarde van geld is en n de levensduur van de component [67]:

$$\frac{\text{Investeringskost}}{\text{Jaarlijkse Kost}} = \frac{(1+i)^n - 1}{i * (1+i)^n} \quad (\text{A.1})$$

Om deze formule te kunnen gebruiken moet de levensduur van elke component gekend zijn. Deze staan weergegeven in tabel A.16.

De totale economische kost voor sanitair warm water, die gehanteerd wordt in deze thesis, bestaat uit de som van de hieronder opgesomde kosten:

1. De geannualiseerde, gecorrigeerde kost voor de component die de warmte produceert.
2. De geannualiseerde, gecorrigeerde kost voor het opslagvat, inclusief de kost voor alle noodzakelijke extra componenten in dit vat, zoals gegeven in tabel A.3.
3. De kost voor de gebruikte elektriciteit
4. De kost voor het gebruikte aardgas, in geval van de gasboilerconfiguratie
5. De kost voor water, die in alle zes de modellen dezelfde is
6. De kost voor plaats, verrekend aan 1500 €/m^2

Type component	Levensduur [jaar]	Bron
Opslagvat	30	[68, 69]
Warmtepomp	20	[68, 69]
Zonnecollector	20	[36, 69–71]
Gasboiler	20	[68, 69]
Zonnepanelen	25	[69, 72]

Tabel A.16: Levensduur van elke component

A.2 Waarde overschot elektriciteit bij een digitale meter

In de huidige plannen van Fluvius begint de uitrol van de digitale meter op 1 juli 2019 [73]. Door deze digitale meter zou het mogelijk worden om de ingaande en uitgaande elektriciteitsstromen te onderscheiden, waardoor het mogelijk wordt om te weten hoeveel elektriciteit zonnepanelen op het net zetten. Hierdoor kan de valorisatie van deze elektriciteit dan ook maatschappelijk correcter verlopen dan in het huidige reglementaire kader (de terugdraaiende teller).

In de eerste fase zou de VREG een verloning willen introduceren ter grootte van het huidige elektriciteitstarief, verminderd met de bijdrage voor het gebruik van het distributienet en het transmissienet. Dit houdt in dat de verloning om elektriciteit op het distributienet te zetten gelijk is aan de huidige energiecomponent van de elektriciteitsprijs, verhoogd met enkele bijdragen. Hieronder worden beide aspecten besproken:

- De energiekost van elektriciteit is afhankelijk van de gekozen elektriciteitsleverancier, maar bestaat meestal uit een vaste en een variabele kost. Enkel de variabele prijs zou echter terugbetaald worden. Deze variabele prijs bedraagt voor de vijf goedkoopste leveranciers op de V-test van de VREG gemiddeld €0,0646 per kWh [43]. Bovenop deze prijs voor de energiecomponent komen nog enkele heffingen voor Groenestroomcertificaten (€0,02074/kWh) en een bijdrage voor warmtekrachtkoppelingsinstallaties (€0,003074/kWh). Ook voor deze twee bijdragen is het gemiddelde van de vijf goedkoopste leveranciers genomen. Hierbovenop komt nog 21% BTW. Dit geeft de energiecomponent een totale waarde van €0,107/kWh.
- De verloning voor het overschot aan elektriciteit omvat ook nog de heffingen die geheven worden op de energiefactuur. Zowel de federale bijdrage (€0,003348/kWh [74, 75]) als de energiebijdrage (€0,0019261/kWh [76]) komen nog bovenop de energiecomponent.

In totaal zou dit voorstel van de VREG dus inhouden dat de elektriciteit die door een PV-installatie op het distributienet gezet wordt, gevaloriseerd zou worden aan €0,1123/kWh.

A.3 Verliezen opslagvat

Omdat de temperatuur van het opslagvat hoger is dan die van de omgeving, zijn er warmteverliezen vanuit dit opslagvat naar de omgeving. Om deze verliezen te kwantificeren wordt er gewerkt met de volgende formule:

$$Q_{loss} = UA * (T_{vat} - T_{omgeving}) \quad (A.2)$$

De UA-waarde is een maat voor de thermische grootte van het vat. Hoe hoger deze UA-waarde, hoe groter de verliezen zijn en hoe slechter het vat dus geïsoleerd is.

Voor het bepalen van deze UA-factoren is dezelfde methode toegepast als voor het bepalen van de kostprijs van elk vat. Opnieuw is er gekeken naar de UA-waardes van elk vattype en elke vatgrootte dat op de markt aanwezig is. Deze staan getabelleerd in tabel A.17. Met behulp van deze waardes zijn er opnieuw trendlijnen bepaald die deze UA-factoren zo goed mogelijk benaderen voor de gegeven groottes, om zo de UA-waarde voor een willekeurige opslagvatgrootte te kunnen bepalen. Deze trendlijnen en de grenzen tussen de welke ze gelden staan weergegeven in tabel A.18.

Soort vat	120L	150L	160L	200L	300L	400L	500L	600L
100V type CVA(A)	/	/	1,39	1,574	2,04	/	2,963	/
100V type CVAA-A	/	/	0,90	0,963	/	/	/	/
300V type EVIA-A	/	/	0,833	0,843	0,981	/	1,269	/
300V type EVIA-A+	/	/	0,65	0,70	/	/	/	/
100E	/	/	/	1,35	/	1,67	/	1,945
100W type CUGA	1,02	1,12	/	/	/	/	/	/
100W type CUGA-A	0,695	0,778	/	/	/	/	/	/

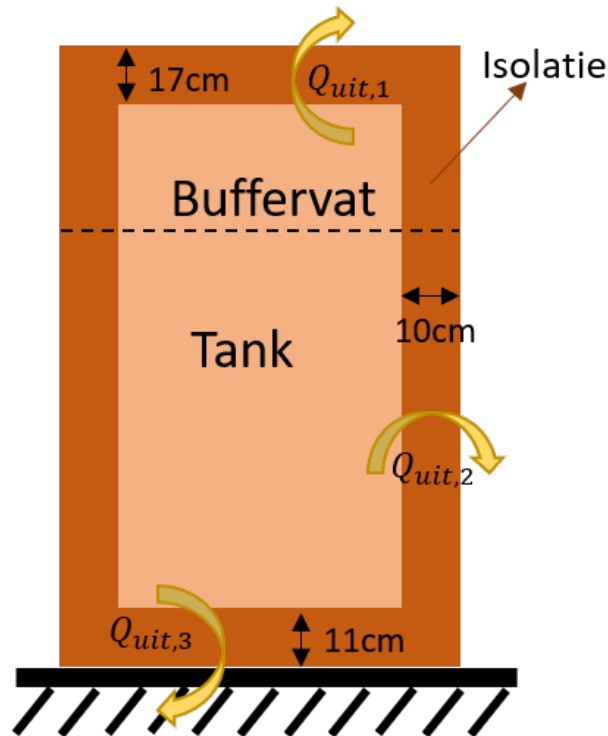
Tabel A.17: UA-factor van een opslagvat in functie van het volume en type van het vat, uitgedrukt in W/K

Soort vat	$V_{vat,min}$ [L]	$V_{vat,max}$ [L]	Gebruikte UA-trendlijn [W/K]
100V	100	500	$0,0046 * V_{vat} + 0,6496$
	500	1300	$0,0002 * V_{vat} + 1,9308$
100V+	100	200	$0,0016 * V_{vat} + 0,6389$
	200	300	$0,00565 * V_{vat} - 0,165$
	300	1300	$0,0011 * V_{vat} + 1,1967$
300V	100	1300	$0,0013 * V_{vat} + 0,5958$
300V+	100	250	$0,0012 * V_{vat} + 0,4622$
100E	0	200	$0,0031 * V_{vat} + 0,7281$
	200	1300	$0,0015 * V_{vat} + 1,06$
100W	25	250	$0,0034 * V_{vat} + 0,6112$
100W+	50	250	$0,0028 * V_{vat} + 0,3611$

Tabel A.18: De gebruikte functies om de UA-waarde voor een willekeurig opslagvat te berekenen

Formule A.2 moet in theorie zowel op het buffervat als op de tank afzonderlijk toegepast worden, omdat er verondersteld is dat beide vaten een andere temperatuur hebben. Indien de formule echter twee maal zou worden toegepast, dan zou er een overschatting gebeuren van de verliezen, gezien beide vaten één vlak gemeenschappelijk hebben en dus langs dit vlak geen verliezen hebben naar de omgeving. Daarom is er aangenomen dat er geen verliezen zijn over dit oppervlak, noch naar de omgeving, noch tussen de twee vaten onderling. Het aandeel van dit

oppervlak in de gebruikte UA-factor moet dus weggelaten worden. De makkelijkste optie om de invloed van dit vlak weg te laten is door het relatieve aandeel van dit oppervlak te bepalen in de totale oppervlakte en een even groot relatief deel van de UA-factor weg te laten. Deze methode neemt dus aan dat $UA = U \times A$. Deze aanname is enkel gegrond indien de U-waarde van de verschillende vlakken ongeveer even groot is. Dit wordt hieronder gecontroleerd:



Figuur A.1: Detail van het opslagvat met isolatie en verliezen

Figuur A.1 toont de situatie waaruit de verliezen bepaald kunnen worden. Het opslagvat heeft drie vlakken waarlangs er warmte verloren gaat: de bovenkant, het manteloppervlak en de onderkant. Voor elk van deze drie vlakken wordt hieronder de thermische weerstand bepaald voor een type 100V opslagvat van 500L, waaruit vervolgens de U-waarde bepaald wordt:

- Langs de bovenkant bestaat de thermische weerstand uit drie delen: convectie tussen het water in de tank en de isolatie (gekenmerkt door h_1), conductie doorheen de isolatie en opnieuw convectie, maar nu met de lucht van de omgeving (gekenmerkt door h_2). Uit de wetten van de warmteoverdracht volgt dat de h_1 veel groter is dan h_2 , waardoor deze weerstand ($=1/(h \cdot A)$) hier verwaarloosbaar is. Uit de Nusselt-correlatie voor een horizontale plaat en het Rayleigh-getal volgt dat h_2 bij benadering gelijk is aan $6,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Gezien de oppervlakte van het bovenzvlak gelijk is aan $0,57 \text{ m}^2$ is deze convectieweerstand

gelijk aan 0,27 K/W. De conductieweerstand van de isolatie (zachte pur) is ongeveer 12. Dit betekent dat de convectieweerstand bij benadering verwaarloosbaar is t.o.v. de conductieweerstand. Gezien de UA-waarde gelijk is aan het omgekeerde van de totale thermische weerstand, is deze gelijk aan 0,08 W/K. Gegeven de oppervlakte van $0,57m^2$ is U_1 bijgevolg gelijk aan $0,14 W/Km^2$ ($U \cdot A = R_{thermisch}$).

- Voor het manteloppervlak kan dezelfde berekening gemaakt worden. Uit de vorige berekening bleek echter dat beide convectieweerstanden verwaarloosbaar zijn t.o.v. de isolatieweerstand. Daarom wordt enkel nog deze conductieweerstand bepaald, die een grootte heeft van 1,018 K/W. Gegeven dat het manteloppervlak $4,48 m^2$ groot is, is U_2 gelijk aan $0,22 W/Km^2$.
- Voor het bodemoppervlak geldt nog meer dat de isolatieweerstand de dominante thermische weerstand is, omdat er langs dit vlak geen convectie met de buitenlucht mogelijk is, maar enkel conductie naar de grond. De isolatieweerstand is gelijk aan 7,55 voor dit vlak, wat een U_3 van $0,23 W/Km^2$.

Uit deze berekeningen volgt dus dat de U-waardes van de drie vlakken inderdaad dezelfde grootteorde hebben. Hieruit volgt dat de aanname “ $UA = U \times A$ ” gegronnd is en dat de verliezen dus op de hierboven besproken manier bepaald mogen worden.

Bijlage B

Berekeningen

B.1 Bepalen van het minimale temperatuurverschil tussen de aanstuurtemperaturen van een warmtepomp

Deze thesis neemt aan dat warmtepompen aangestuurd worden met behulp van een hysteresis-aansturing. Dit betekent dat de warmtepomp aanspringt wanneer de temperatuur van de tank daalt onder een gegeven temperatuur (T_1) en dat de warmtepomp terug stopt met werken wanneer het water in de tank een temperatuur boven een tweede gegeven temperatuur bereikt (T_2).

Een warmtepomp verslijt sneller wanneer deze vaker aan en uit wordt geschakeld. Daarom is het best om de temperaturen T_1 en T_2 niet te dicht bij elkaar te leggen. Deze sectie bepaalt hoever deze twee temperaturen uiteen moeten liggen opdat de warmtepomp minstens een bepaalde tijd aansluitend werkt.

Eerst wordt de energie bepaald die de warmtepomp toevoegt aan de tank:

$$\Delta E = P_{WP,therm} * \Delta t = 4,05MJ \quad (B.1)$$

We poneren dat de warmtepomp minstens 15 minuten moet werken om niet te snel te verslijten, wat een Δt van 900 sec impliceert. Verder hebben de onderzochte warmtepompen meestal een gemiddeld elektrisch vermogen van rond de 1,5kW en een gemiddelde COP rond 3. Dit geeft een gemiddeld thermisch vermogen van ongeveer 4,5 kW Dit verklaart voor de tweede gelijkheid.

Door deze toegevoegde energie te vergelijken met de formule die de opwarming van het water in de tank beschrijft, kan het minimale temperatuurverschil bekomen worden:

$$\Delta E = \Delta T * \rho_{water} * c_{p,water} * V_{tank} \quad (B.2)$$

Hierbij zijn ρ_{water} en $c_{p,water}$ respectievelijk 988 kg/m^3 en 4180 J/kgK , zoals aangenomen in hoofdstuk 3.2. Voor V_{tank} wordt worst case gerekend met de minimale waarde die verwacht wordt, 100L. Dit geeft het volgende minimale

temperatuurverschil:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{\Delta E}{\rho_{water} * c_{p,water} * V_{tank}} = \frac{4050000}{988 * 4180 * 0,1} = 9,8 \approx 10 \quad (\text{B.3})$$

Het minimale temperatuurverschil tussen beide aanstuurtemperaturen is bijgevolg gelijk aan 10°C. Dit temperatuurverschil wordt verder in deze thesis gehanteerd worden.

B.2 Residentiële productieprijs van PV-elektriciteit

Om de kostprijs van de zonnepanelen te bepalen voor het PV-/WPPV-systeem, bespreekt appendix A.1 zeer uitgebreid welke aannames er genomen worden over de kostprijs van zonnepanelen. Gegeven deze aannames, kost een PV-installatie van 40m², bestaande uit 320Wp zonnepanelen €9250.

Gegeven het huidige stralingsprofiel is er elk jaar 1047kWh invallende straling per vierkante meter zonnepaneel. Aangezien het rendement van deze zonnepanelen gelijk is aan 19,3%, geeft dit een elektriciteitsproductie van 202kWh elektriciteit per m² per jaar of 8080kWh elektriciteit voor de gehele installatie.

Met behulp van formule A.1 is het mogelijk om de kost van de investering in de PV-installatie te annualiseren. Gegeven het gevraagde monetaire rendement van 4% en de aangenomen levensduur van 25 jaar, is de annualiseringsfactor gelijk aan 15,6. Dit geeft een equivalente jaarlijkse kost van €593. Wetende dat er jaarlijks 8080kWh elektriciteit geproduceerd kan worden met deze PV-installatie, is de productiekost gelijk aan €0,0734/kWh.

Bijlage C

Optimalisaties

C.1 Invloed gebruikersprofiel

C.1.1 Bad vs douche

In de onderstaande tabel wordt de energetisch optimale dimensionering gegeven samen met de bijbehorende systeemkarakteristieken voor het gebruikersprofiel van 4 personen met een bad.

Parameter	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Volume buffervat [L]	×	400	250	500	×	100
Volume tank [L]	140	800	1450	150	400	900
Oppervlakte panelen [m^2]	×	40	20	×	×	40
T_1 [°C]	55	×	×	45	50	45
T_2 [°C]	65	×	×	55	60	55
T_3 [°C]	×	50	50	42	42	42
Weerstand buffervat [kW]	×	4	4	2	2	2
Soort opslagvat	100W+	100E	300V	300V	300V	300V
Soort warmtepomp	×	×	×	D16	D016	D016
Soort zonnepanelen	×	320Wp	×	×	×	320Wp
Soort zonnecollectoren	×	×	200FM	×	×	×
Soort gasketel	50Wa	×	×	×	×	×
Hernieuwbare energie [kWh/jaar]	-	5517	4646	4473	4155	6250
Elektriciteit net [kWh_{el} /jaar]	20	1315	1991	1677	1770	384,3
Energie gas [kWh/jaar]	6160	-	-	-	-	-
Energetisch rendement [%]	-	80,8	70,0	72,7	68,3	94,2
Energietekort [kWh/jaar]	0,49	0,25	0,86	0	0,84	0
Energietekort [aantal keer/jaar]	1	1	16	0	7	0
Totale Kost [€/jaar]	981	1592	2272	1751	1716	2172
Uitstoot [kg CO_2 /jaar]	1236	263	398	335	386	77

Tabel C.1: Energetische optimalisering voor een gebruikersprofiel van vier personen waarbij er een bad aanwezig is

C.1.2 Variatie in aantal personen

Gebruikersprofiel voor 1 persoon

De onderstaande tabel geeft de economische optimalisatie van het 1p-profiel.

Parameter	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Volume buffervat [L]	×	100	50	50	×	50
Volume tank [L]	60	200	150	150	150	150
Oppervlakte panelen [m^2]	×	13	8,5	×	×	1
T_1 [°C]	55	×	×	45	50	45
T_2 [°C]	65	×	×	55	60	55
T_3 [°C]	×	55	50	42	42	42
Weerstand buffervat [kW]	×	2	4	2	2	2
Soort opslagvat	100W+	100E	100V+	100V+	100V+	100V+
Soort warmtepomp	×	×	×	D06	D06	D04
Soort zonnecollectoren	×	×	200FM	×	×	×
Soort zonnepanelen	×	285Wp	×	×	×	285Wp
Soort gasketel	50Wa	×	×	×	×	×
Hernieuwbare energie [kWh/jaar]	-	1705	1339	1349	1222	1381
Elektriciteit net [kWh_{el} /jaar]	6	402	589	546	640	570
Energie gas [kWh/jaar]	186	-	-	-	-	-
Energetisch rendement [%]	-	78,5	69,6	71	64,6	70,8
Energietekort [kWh/jaar]	0,64	1	0,344	0	0,123	0
Energietekort [aantal keer/jaar]	4	6	33	0	4	0
Totale Kost [€/jaar]	423	611	625	693	731	731
Uitstoot [kg CO_2 /jaar]	374	93,5	117	109	128	114

Tabel C.2: Economische optimalisering voor een gebruikersprofiel van één persoon

De onderstaande tabel geeft de energetische optimalisatie van het 1p-profiel.

Parameter	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Volume buffervat [L]	×	50	100	50	×	50
Volume tank [L]	80	650	700	100	100	450
Oppervlakte panelen [m^2]	×	40	20	×	×	40
T_1 [°C]	45	×	×	45	45	45
T_2 [°C]	55	×	×	55	55	55
T_3 [°C]	×	50	50	42	42	42
Weerstand buffervat [kW]	×	4	4	2	2	2
Soort opslagvat	100W+	100E	300V	300V	300V	300V
Soort warmtepomp	×	×	×	D16	D016	D016
Soort zonnepanelen	×	320Wp	×	×	×	320Wp
Soort zonnecollectoren	×	×	200FM	×	×	×
Soort gasketel	50Wa	×	×	×	×	×
Hernieuwbare energie [kWh/jaar]	-	2740	1987	1364	1298	2312
Elektriciteit net [kWh_{el} /jaar]	6	45	321	480	528	13,2
Energie gas [kWh/jaar]	1831	-	-	-	-	-
Energetisch rendement [%]	-	98,4	83,0	74	0,71	0,995
Energietekort [kWh/jaar]	0,39	0	0	0	0,07	0
Energietekort [aantal keer/jaar]	3	0	0	0	2	0
Totale Kost [€/jaar]	424	910	1114	922	933	1525
Uitstoot [kg CO_2 /jaar]	367	9	64	96	106	2,63

Tabel C.3: Energetische optimalisering voor een gebruikersprofiel van één persoon

Gebruikersprofiel voor 2 personen

De onderstaande tabel geeft de economische optimalisatie van het 2p-profiel.

Parameter	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Volume buffervat [L]	×	150	150	50	×	50
Volume tank [L]	90	300	300	150	300	150
Oppervlakte panelen [m^2]	×	32	9,5	×	×	49
T_1 [°C]	50	×	×	45	50	45
T_2 [°C]	60	×	×	55	60	55
T_3 [°C]	×	55	50	42	42	42
Weerstand buffervat [kW]	×	4	4	2	2	2
Soort opslagvat	100W+	100E	100V+	100V+	100V+	100V+
Soort warmtepomp	×	×	×	D06	D06	D06
Soort zonnepanelen	×	285Wp	×	×	×	300Wp
Soort zonnecollectoren	×	×	100FM	×	×	×
Soort gasketel	50Wa	×	×	×	×	×
Hernieuwbare energie [kWh/jaar]	-	3759	2551	3145	3164	3650
Elektriciteit net [kWh_{el} /jaar]	15	1208	2213	1466	1607	1012
Energie gas [kWh/jaar]	4633	-	-	-	-	-
Energetisch rendement [%]	-	75,7	53,5	0,68	66,3	78,3
Energietekort [kWh/jaar]	0,97	0,83	1	0,36	0,72	0,04
Energietekort [aantal keer/jaar]	3	5	41	14	20	4
Totale Kost [€/jaar]	784	1240	1352	1148	1233	1203
Uitstoot [kg CO_2 /jaar]	930	242	443	293	321	202,5

Tabel C.4: Economische optimalisering voor een gebruikersprofiel voor twee personen

De onderstaande tabel geeft de energetische optimalisatie van het 2p-profiel.

Parameter	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Volume buffervat [L]	×	200	200	100	×	100
Volume tank [L]	110	750	1350	100	200	650
Oppervlakte panelen [m^2]	×	40	20	×	×	40
T_1 [°C]	45	×	×	45	45	45
T_2 [°C]	55	×	×	55	55	55
T_3 [°C]	×	50	50	42	42	42
Weerstand buffervat [kW]	×	4	2	2	2	2
Soort opslagvat	100W+	100E	300V	300V	300V	300V
Soort warmtepomp	×	×	×	D16	D016	D016
Soort zonnepanelen	×	320Wp	×	×	×	320Wp
Soort zonnecollectoren	×	×	200FM	×	×	×
Soort gasketel	50Wa	×	×	×	×	×
Hernieuwbare energie [kWh/jaar]	-	4650	3939	3349	3228	4851
Elektriciteit net [kWh_{el} /jaar]	15	725	1284	1225	1341	234
Energie gas [kWh/jaar]	4621	-	-	-	-	-
Energetisch rendement [%]	-	86,5	76,5	73,2	70,6	95,4
Energietekort [kWh/jaar]	0,83	0	0,65	0,12	0,77	0
Energietekort [aantal keer/jaar]	2	0	28	02	20	0
Totale Kost [€/jaar]	786	1314	1912	1338	1374	1909
Uitstoot [kg CO_2 /jaar]	927	145	257	245	268	47

Tabel C.5: Energetische optimalisering voor een gebruikersprofiel voor twee personen

C.2 Energietekort

De onderstaande tabel geeft de economische optimalisatie bij een totaal toegelaten energietekort van 0,1 kWh/jaar.

Parameter	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Volume buffervat [L]	×	250	250	100	×	100
Volume tank [L]	90	600	500	200	450	200
Oppervlakte panelen [m^2]	×	37	11,5	×	×	15
$T_1 - T_2$ [°C]	55-65	×	×	45-55	50-60	45-55
T_3 [°C]	×	50	50	42	45	42
Weerstand buffervat [kW]	×	4	4	2	2	2
Soort opslagvat	100W+	100E	100V+	100V+	100V+	100V+
Soort warmtepomp	×	×	×	D06	D06	D06
Soort PV/ZC	×	285Wp	200FM	×	×	285Wp
Soort gasketel	50Wa	×	×	×	×	×
Elektriciteit net [kWh_{el} /jaar]	19	1267	2495	1768	2042	1123
Totale Kost [€/jaar]	941	1454	1727	1356	1492	1392
Energietekort [kWh/jaar]	0,032	0	0,05	0,06	0,08	0,03
Energietekort [# /jaar]	1	0	2	6	7	2

Tabel C.6: Economische optimalisering bij een maximaal energietekort van 0,1 kWh/jaar

De onderstaande tabel geeft de economische optimalisatie bij een totaal toegelaten energietekort van 5,5 kWh/jaar.

Parameter	GB	PV	ZC	WP	WP2	WPPV
Volume buffervat [L]	×	150	100	50	×	50
Volume tank [L]	80	700	300	150	250	150
Oppervlakte panelen [m^2]	×	34	11,5	×	×	12
$T_1 - T_2$ [°C]	55-65	×	×	45-55	50-60	45-55
T_3 [°C]	×	50	55	42	45	42
Weerstand buffervat [kW]	×	4	4	2	2	2
Soort opslagvat	100W+	100E	100V+	100V+	100V+	100V+
Soort warmtepomp	×	×	×	D06	D06	D06
Soort PV/ZC	×	285Wp	200FM	×	×	285Wp
Soort gasketel	50Wa	×	×	×	×	×
Elektriciteit net [kWh_{el} /jaar]	19	1336	2725	1795	1960	1141
Totale Kost [€/jaar]	939	1439	1673	1329	1402	1365
Energietekort [kWh/jaar]	1,7	3,07	5,23	1,57	3	0,456
Energietekort [# /jaar]	8	16	84	26	56	10

Tabel C.7: Economische optimalisering bij een maximaal energietekort van 5,5 kWh/jaar

Bibliografie

- [1] Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield. Summary for policymakers.
- [2] Marie christine Marghem. Belgisch interfederaal energiepact.
- [3] De vlaamse Milieumaatschappij. Emissie broeikasgassen per sector (co_2 , ch_4 , n_2o , sf_6 , $hfk's$, $pfk's$, nf_3). <https://www.milieuraapport.be/milieuthemas/klimaatverandering/broeikasgassen/emissies-broeikasgassen-per-sector>, laatst geraadpleegd op 01-05-2019.
- [4] Pablo Heiliegers. Het gemiddelde elektriciteitsverbruik in België. <https://callmepower.be/nl/faq/gemiddeld-elektriciteitsverbruik>, laatst geraadpleegd op 09-04-2019.
- [5] Odyssee-Mure. Belgium: Energy efficiency trends and policies. <http://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-trends-policies-profiles/belgium.html> , laatst geraadpleegd op 09-04-2019.
- [6] Vlaamse regering. Ontwerp vlaams energieplan voor de periode 2021-2030, 2018.
- [7] Jos Delbeke and Peter Vis. Eu climate policy explained.
- [8] Rene Kemna, Martijn van Elburg, Sanne Aarts, and Andrea Corso. WH Water Heaters Ecodesign and Energy Label Preparatory Review Study Task 2 [DRAFT] Market Analysis Special review study on categorisation Ecodesign and Energy Label. Technical report, European commission, 2017.
- [9] Kaat Jaspers and Nadine Dufait. Energiebalans vlaanderen, 1990-2016.
- [10] Danielle Devogelaer. 2030 kader voor klimaat en energie in België.
- [11] Bart Bleys. Basisprincipes sanitair warm water. https://www.tetra-sww.be/wp-content/uploads/2014/11/DEEL1_Inleiding_BBleys_IVerhaert.pdf, laatst geraadpleegd op 10-04-2019.
- [12] Felix A. Peuser, Karl-Heinz Remmers, and Martin Schnauss. *Solar thermal systems*. MPG Books Limited, 2010.

-
- [13] Paola Borella. Legionella infection risk from domestic hot water. *Emerging infectious diseases*, 2004.
- [14] BRUNO STRUYS. Wat zijn de symptomen van legionella? dit weten we over de uitbraak in gent. <https://www.demorgen.be/nieuws/wat-zijn-de-symptomen-van-legionella-dit-weten-we-over-de-uitbraak-in-gent~b7700f6> laatst geraadpleegd op 26-05-2019.
- [15] Jamie Bartram, Yves Chartier, John V Lee, Kathy Pond, and Susanne Surman-Lee. Legionella and the prevention of legionellosis.
- [16] Agentschap Zorg en Gezondheid. Legionella. <https://www.zorg-en-gezondheid.be/legionella>, laatst geraadpleegd op 18-04-2019.
- [17] Will Scheffer and Eric van der Blom. Nen 1006:2015 bevat voorschriften voor een legionellaveilige installatie.
- [18] Vlaams Energieagentschap. Groenestroomcertificaten voor zonnepanelen. <https://www.vlaanderen.be/groenestroomcertificaten-voor-zonnepanelen>, laatst geraadpleegd op 18-04-2019.
- [19] Zonnepanelenenergie. Terugdraaiende teller. <https://zonnepanelenenergie.be/zonnepanelen/terugdraaiende-teller>, laatst geraadpleegd op 18-04-2019.
- [20] Zonnepanelenenergie. Energielening in 2019. <https://zonnepanelenenergie.be/zonnepanelen/energielening>, laatst geraadpleegd op 18-04-2019.
- [21] Zonnepanelenenergie.be. Het btw-tarief op zonnepanelen. <https://zonnepanelenenergie.be/gratis-advies/btw-tarief-zonnepanelen>, laatst geraadpleegd op 01-05-2019.
- [22] FEBEG vzw. Statistieken elektriciteit. <https://www.febeg.be/statistieken-elektriciteit>, laatst geraadpleegd op 18-04-2019.
- [23] Jeroen Belien, Liesje De Boeck, Jan Colpaert, and Gert Cooman. The best time to invest in photovoltaic panels in flanders. *Renewable Energy: An International Journal*, 50:348–358, 2013.
- [24] Vlaanderen.be. Zonneboiler. <https://www.vlaanderen.be/zonneboiler>, laatst geraadpleegd op 19-04-2019.
- [25] Zonnecollector-info. Zonneboilers voor woonhuizen. <https://www.zonnecollector-info.nl/nl/woonhuis2.html#leegloop>, laatst geraadpleegd op 19-04-2019.
- [26] Luc Peeters. Inventaris hernieuwbare energiebronnen vlaanderen.

-
- [27] Vlaanderen.be. Premie van de netbeheerder voor een zonneboiler. <https://www.vlaanderen.be/premie-van-de-netbeheerder-voor-een-zonneboiler>, laatst geraadpleegd op 19-04-2019.
- [28] VIESSMANN. *Vitocal, planningshandleiding*.
- [29] Vlaamse Overheid. Bouwen, wonen en energie. <https://www.vlaanderen.be/bouwen-wonen-en-energie>, laatst geraadpleegd op 10-04-2019.
- [30] DuBo Limburg. Warmteopwekking: Condensatieketel - werking.
- [31] A.D. Moore, T. Urmee, P.A. Bahri, S. Rezvani, and G.F. Baverstock. Life cycle assessment of domestic hot water systems in australia. *Renewable Energy*, 103:187 – 196, 2017.
- [32] Nallapaneni Manoj Kumar and Mobi Mathew. Comparative life-cycle cost and ghg emission analysis of five different water heating systems for residential buildings in australia. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(4):748 – 751, 2018.
- [33] Luigi Passos, José M. Cardemil, and Sergio Colle. Feasibility study of using domestic solar hot water systems as alternative to reduce the electricity peak demand in brazil. *Energy Procedia*, 57:2487 – 2495, 2014. 2013 ISES Solar World Congress.
- [34] Majdi Hazami, Nabih Naili, Issam Attar, and Abdelhamid Farhat. Solar water heating systems feasibility for domestic requests in tunisia: Thermal potential and economic analysis. *Energy Conversion and Management*, 76:599 – 608, 2013.
- [35] Qiang Wang, Yu Zhou, and Shiqing Gao. Feasibility analysis of solar water heating system in rural areas. *Procedia Engineering*, 205:3852 – 3859, 2017. 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, 19-22 October 2017, Jinan, China.
- [36] Benjamin Greening and Adisa Azapagic. Domestic solar thermal water heating: A sustainable option for the uk? *Renewable Energy*, 63:23 – 36, 2014.
- [37] Luigi Passos, José M. Cardemil, and Sergio Colle. Feasibility study of using domestic solar hot water systems as alternative to reduce the electricity peak demand in brazil. *Energy Procedia*, 57:2487 – 2495, 2014. 2013 ISES Solar World Congress.
- [38] K. Martin-Escudero, E. Salazar-Herran, A. Campos-Celador, G. Diarce-Belloso, and I. Gomez-Arriaran. Solar energy system for heating and domestic hot water supply by means of a heat pump coupled to a photovoltaic ventilated façade. *Solar Energy*, 183:453 – 462, 2019.
- [39] Thomas Nowak. Heat pumps: a gem in energy efficiency and renewables use!

-
- [40] M Stone, J Ahmed, and J Evans. The continuing risk of domestic hot water scalds to the elderly. *Burns*, 26(4):347 – 350, 2000.
- [41] Judith A. Clarke, Anna E. Waller, Stephen W. Marshall, and John D. Langley. Barriers to the reduction of domestic hot water temperatures. *Safety Science*, 18(3):181 – 192, 1995.
- [42] European commission. Guide to cost-benefit analysis of investment projects.
- [43] VREG. Resultaat elektriciteitscontracten. <https://vtest.vreg.be/Compare/Result?Environment=Hh>, laatst geraadpleegd op 27-04-2019.
- [44] CREG. A european comparison of electricity and natural gas prices for residential and small professional consumers.
- [45] VREG. Resultaat aardgascontracten. <https://vtest.vreg.be/Compare/Result?Environment=Hh>, laatst geraadpleegd op 28-04-2019.
- [46] Andreas TIREZ. Nota over de opvallende evoluties op de belgische groothandelsmarkten voor elektriciteit en aardgas in 2017.
- [47] Sibelga. Hoeveel CO_2 stoot mijn woning uit. <https://www.energids.be/nl/vraag-antwoord/hoeveel-co2-stoot-mijn-woning-uit/68/>, laatst geraadpleegd op 05-05-2019.
- [48] Ecoscore. Hoe bereken je de CO_2 -uitstoot uit het brandstofverbruik? <http://ecoscore.be/nl/info/ecoscore/co2>, laatst geraadpleegd op 24-05-2019.
- [49] Markets businessinsider. CO_2 european emission allowances. <https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-emissionsrechte>, laatst geraadpleegd op 30-05-2019.
- [50] VREG. Prosumententarief 2019.
- [51] Tobe Steel. Terugdraaiende teller voor zonnepanelen op losse schroeven. <https://www.tijd.be/netto/energie/terugdraaiende-teller-voor-zonnepanelen-op-losse-schroeven/10110835.html>, laatst geraadpleegd op 30-05-2019.
- [52] David W. Keith, Geoffrey Holmes, David St. Angelo, and Kenton Heidel. A process for capturing CO_2 from the atmosphere. *Joule*, 2(8):1573 – 1594, 2018.
- [53] Energiebesparen.be. 6% btw bij renovatie. <https://www.energiesparen.be/6-btw-bij-renovatie>, laatst geraadpleegd op 31-05-2019.
- [54] Energiebesparen.be. Individuele premies van je netbeheerder voor eindfacturen vanaf 1 januari 2019 tot en met 31 december 2019 in bestaande woningen. <https://www.energiesparen.be/sites/default/files/atoms/files/overzicht2019def.pdf>, laatst geraadpleegd op 31-05-2019.

- [55] VIESSMANN BELGIUM bvba sprl. *Compact-prijslijst BE Pakketten 2018*.
- [56] Green and Durable Energy. Viessmann panelen. <https://gd-energy.be/nederlands/webshop/artikel-groep/viessmann-panelen>, laatst geraadpleegd op 06-05-2019.
- [57] VIESSMANN. *VITOVOLT 300, datenblatt, Typ P265MB, P270MB, P275MB*.
- [58] VIESSMANN. *VITOVOLT 300, technisch blad, Type P275AB, P280AB, P285AB*.
- [59] VIESSMANN. *VITOVOLT 300, datenblatt, Typ M295OA, M300OA*.
- [60] VIESSMANN. *VITOVOLT 300, datenblatt, Typ Typ M295PA, M300PA, M305PA*.
- [61] VIESSMANN. *VITOVOLT 300, datenblatt, Typ M320PC, M325PC*.
- [62] Green and Durable Energy. Solaredge monofase omvormers. <https://gd-energy.be/vlaanderen/webshop/artikel-groep/solaredge-monofase-omvormers>, laatst geraadpleegd op 06-05-2019.
- [63] Zonnepanelen.net. <https://www.zonnepanelen.net/prijs/>. <https://www.zonnepanelen.net/prijs/>, laatst geraadpleegd op 06-05-2019.
- [64] Zonnepanelen.net. <https://www.zonnepanelen.net/prijs/>. <http://www.westlandsolar.nl/solar/montage-van-zonnepanelen>, laatst geraadpleegd op 06-05-2019.
- [65] Durasun. Montagematerialen, schuin dak, pannen dak.
- [66] Vlaamse milieu maatschappij. Bereken je waterfactuur. <https://www.vmm.be/data/bereken-je-waterfactuur>, laatst geraadpleegd op 27-04-2019.
- [67] Leland blank and Anthony Tarquin. *Engineering Economy, eighth Edition*. Mc Graw Hill education, 2018.
- [68] Viral P. Shah, David Col Debella, and Robert J. Ries. Life cycle assessment of residential heating and cooling systems in four regions in the united states. *Energy and Buildings*, 40(4):503 – 513, 2008.
- [69] TOTEM-tools. Toelichting levensduren mmg2017/totem.
- [70] Christopher J. Koroneos and Evanthia A. Nanaki. Life cycle environmental impact assessment of a solar water heater. *Journal of Cleaner Production*, 37:154 – 161, 2012.
- [71] Fulvio Ardente, Giorgio Beccali, Maurizio Cellura, and Valerio Lo Brano. Life cycle assessment of a solar thermal collector: sensitivity analysis, energy and environmental balances. *Renewable Energy*, 30(2):109 – 130, 2005.

- [72] Rubén Contreras-Lisperguer, Emilio Muñoz-Cerón, Jorge Aguilera, and Juan de la Casa. Cradle-to-cradle approach in the life cycle of silicon solar photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 168:51 – 59, 2017.
- [73] Joren Moelans. Digitale meter: What's in it for you!
- [74] CREG. Federale bijdrage. <https://www.creg.be/nl/professionals/levering/federalebijdrage>, laatst geraadpleegd op 12/05/2019.
- [75] CREG. Federale bijdrage op elektriciteit 2019. <https://www.creg.be/sites/default/files/assets/Tarifs/CotFed/CotFedE2019NL.pdf>, laatst geraadpleegd op 12/05/2019.
- [76] Luminus. Luminus energie: prijzen en voorwaarden. <https://www.luminus.be/nl/prive/elektriciteit-gas/productfiches-overzicht>, laatst geraadpleegd op 31/05/2019.