

Rapport

“Onderzoek naar vervanging fossiele verbrandingstoestellen door warmtepomp in een residentieel gebouw”

Opdrachtgever:
ODE-Vlaanderen vzw

Contents

1. Referentiewoning.....	3
Kengetallen van woning Type6 uit Tabula (begintoestand)	3
Aannames woning.....	3
2. Aannames kostenbepaling.....	4
Investeringskost verwarmingsinstallatie.	4
Investeringskost gebouwrenovatie.....	5
Energiekost.	6
3. Renovatiescenario's en bijhorende kosten.....	7
Behoud van bestaande radiatoren.	7
Beschikbaar vermogen afgifte.	7
Renovatiemaatregelen + kostprijs	7
Aandachtspunten.....	8
Plaatsen van vloerverwarming.....	8
Beschikbaar vermogen afgifte.	8
Renovatiemaatregelen + kostprijs	8
Plaatsen van LL-WP.....	9
Beschikbaar vermogen afgifte.	9
Renovatiemaatregelen + kostprijs	9
Energiekosten en CO2-uitstoot.....	10
4. Kosten en baten van netondersteunende diensten	11
Aannames modellering	11
Gebouwparameters	11
Warmtepomp.....	12
Vloerverwarming	13
Radiatoren.....	13
Dynamisch tarief	14
Peak shaving.....	16


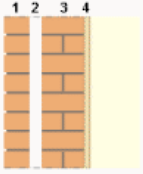
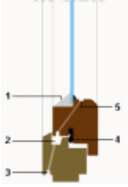
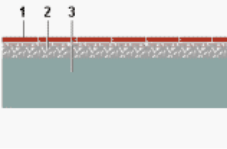

Resultaten peak shaving	19
Referentiesituatie	19
Activatie peak shaving-strategie	20
Resultaten dynamisch tarief	23
Referentiesimulaties	23
Resultaten met actieve sturing warmtepomp via een dynamisch tarief.....	24
Effect van (on)beschikbaarheid van deellastdata warmtepomp.....	26
Adviezen voor verder onderzoek.....	27
Conclusie	28
Referenties.....	29

1. Referentiewoning.

Kengetallen van woning Type6 uit Tabula (begintoestand)

Bouwperiode: 1946-1970 Bruto vloeroppervlakte: 236m ² Beschermd volume: 648m ³ Totale verliesoppervlakte: 539m ² K181 Stookolieketel ouder dan 1985 Geen ventilatiesysteem EPC label F	
--	--

Detailinfo gebouwschil

DAK 	GEVEL 	VENSTERS 
Schuin dak met dakpannen op kepers en onderdak $U_{gem} = 1.90 \text{ W/m}^2\text{K}$ $Opp = 157.5 \text{ m}^2$	Klassieke spouwmuur (1 ^e generatie, 5cm) $U_{gem} = 1.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ $Opp = 202.9 \text{ m}^2$	Houten profiel met enkele beglazing $U_{gem} = 5.00 \text{ W/m}^2\text{K}$ $Opp = 51 \text{ m}^2$
VLOEREN 	DEUREN 	
Vloer op volle grond $U_{gem} = 0.89 \text{ W/m}^2\text{K}$ $Opp = 127 \text{ m}^2$	$U_{gem} = 4.00 \text{ W/m}^2\text{K}$ $Opp = 9.5 \text{ m}^2$	

Aannames woning

- Vloeroppervlakte ruimtes:

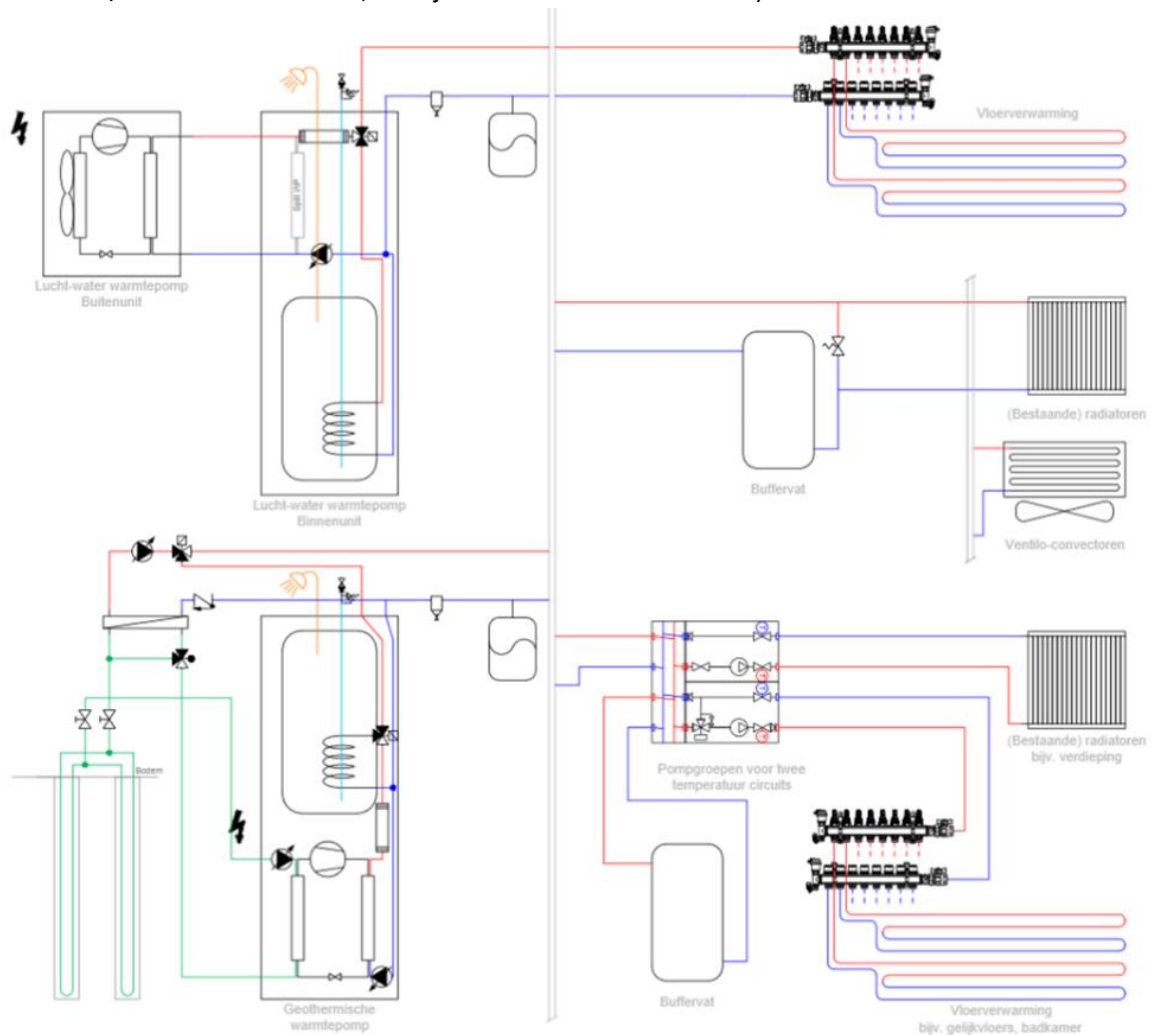
Woonkamer 48m ² Open keuken 16m ² Inkom 10m ² Toilet 2m ² Wasplaats 12m ² Bergruimte 20m ²	Nachthal 14m ² Badkamer 16m ² Slaapkamer1 27m ² Slaapkamer2 18m ² Slaapkamer3 18m ²
---	--

- Vloer op volle grond (variant: volledige woning onderkelderd)
- Oriëntatie voorgevel: Noord
- v50 = 12

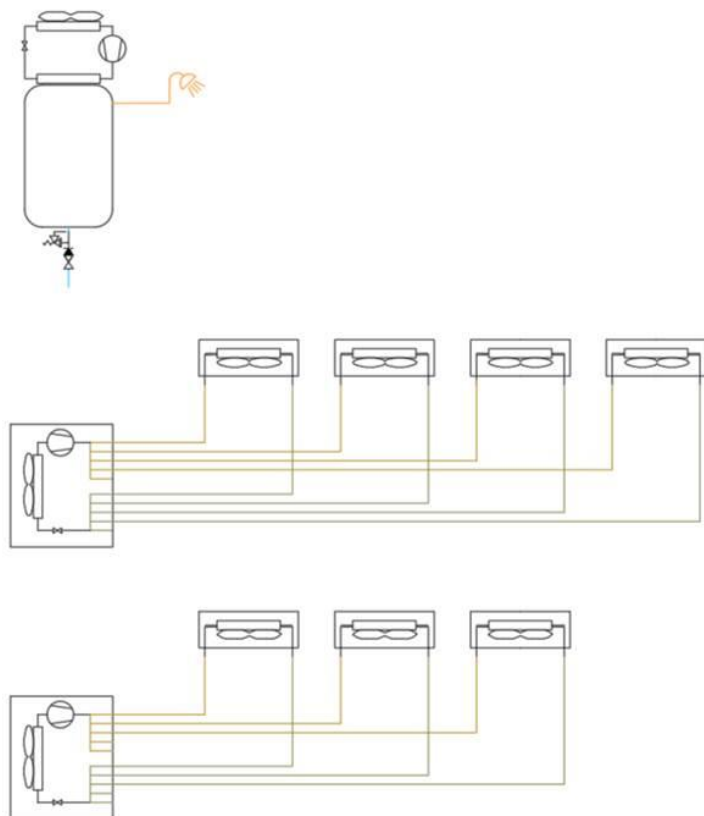
2. Aannames kostenbepaling.

Investeringskost verwarmingsinstallatie.

De kosten van de installatie omvatten materiaal en plaatsing. Het verwijderen van de bestaande installatie (stookolieketel – en tank, radiatoren indien van toepassing, schouw blijft staan) wordt ook mee opgenomen in de installatiekost. Hieronder worden de schema's weergegeven voor de installaties met water aan afgiftekant. Links staan de beschouwde opwekkers (lucht-water of bodem-water warmtepomp), rechts de beschouwde afgiftesystemen (hetzij vloerverwarming, hetzij radiatoren/ventilo-convectoren, hetzij een combinatie van beide).



Links = Cases opwekking (L/W en B/W WP); Rechts = cases afgifte



schema LL-WP

Investeringskost gebouwrenovatie.

De kosten zijn gebaseerd op de kostendatabase die ontwikkeld is in het kader van de studies naar kosten-optimale EPB-eisen voor residentiële gebouwen (opdrachtgever VEKA) en het project Renofase. Er is een goede overéénkomst met de kostenraming uit EPC. Eventuele verschillen kunnen veelal verklaard worden door de afwerking, bijv type gevelbekleding bij buitenisolatie.

Er bestaan verschillende mogelijkheden om een bepaalde U-waarde te behalen. Er is steeds gekozen voor een goedkope/de meest gangbare variant voor de situatie van deze woning, zodat de opgegeven investeringskosten eerder moeten beschouwd worden als een onderwaarde.

Hieronder een overzicht van de beschouwde renovatiewerken.

- Er wordt in eerste instantie gestreefd naar een minimale isolatie die overeenkomt met de U_{max} -waarden uit de EPB. Voor deze U-waarden wordt een indicatie gegeven van de benodigde isolatiediktes.
- De kosten houden ook rekening met plaatsing en secundaire kosten, zoals stellingen en andere werfinrichting, afwerking tpv vensters, regenafvoer, dakoversteken, enz

Gevels

- $U = 0.55 \text{ W/m}^2\text{K}$: opspuiten spouw met EPS-parels (uitgaande van een spouw van 5cm).

- $U = 0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$ en beter: buiten-isolatie aangebracht (EPS) met afwerkingslaag (crepi), na afbraak van de buitenspouwmuur (12cm EPS voor $U = 0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Schuin dak.

- dakstructuur blijft behouden
- minerale wol tussen kepers en gordingen, incl binnenafwerking met gipsplaten en plaatsing dampscherm (18cm MW voor $U = 0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Vloer.

- De vloer op volle grond (op zand) wordt volledig vervangen. De kosten omvatten dus ook het verwijderen van de bestaande vloer, de nieuwe vloerplaat, vloerafwerking (tegels) en PUR-isolatie. (7cm gespoten PUR voor $U = 0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Indien vloer boven kelder, wordt vloer behouden en langs onder geïsoleerd. De kosten omvatten dus enkel het na-isoleren van de bestaande vloer, en het uitbreken van de toplaag indien vloerverwarming wordt geplaatst. (5cm isolatie voor $U = 0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Vensters.

De kosten omvatten de afbraak van de bestaande vensters en het leveren en plaatsen van nieuwe vensters (ongeveer de helft zijn vaste vensters, de helft opengaand).

Energiekost.

De energieprijzen zijn moeilijk eenduidig in rekening te brengen door de schommelingen op de energiemarkt. Om tot een vergelijking te komen werd de maximprijs voor stookolie bij een afname groter dan 2000l 24/11/2021 gebruikt (0.7471€/l). Hier werd in onze berekeningen nog wel een korting van 2.5% afgetrokken om korter bij de werkelijke aangerekende prijs te komen. Voor elektriciteit werd op hetzelfde moment (24/11/2021) de V-test ingevuld. Voor een elektriciteitscontract met enkel tarief. Hier werd het goedkoopste tarief (exclusief sociaal tarief, of tarieven waarvoor aandelen gekozen van een coöperatie gekocht moeten worden) gekozen. Hierbij kwamen we op een elektriciteitskost van 0.326€/ kWh, inclusief distributienet tarieven en heffingen. Deze kosten zijn telkens inclusief BTW.

3. Renovatiescenario's en bijhorende kosten.

In de voorgestelde renovatiescenario's wordt er uitgegaan van:

- Bij isoleren van een schildeel, streven naar minsten $U = 0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$ (cf. EPB-eisen), met uitzondering van streefwaarde voor na-isoleren spouw $U = 0.55 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Doorgedreven isolatiemaatregelen gebouwschil leiden tot betere luchtdichtheid ($n_{50}=4/h$)
- Warmteverliesberekening volgens NBN EN 12831-1 ANB:2020 (incl. bouwknoepen) , rekening houdend met ventilatieverliezen bij 1/3 van nominaal ventilatie-debiet.

Hoewel er binnen de EPB-context geen K-peil eis meer bestaat, wordt het K-peil hier gebruikt als indicator van het isolatieniveau.

Behoud van bestaande radiatoren.

Beschikbaar vermogen afgifte.

- Vermogen bestaande radiatoren geschat op **35kW** (aangenomen dat gedimensioneerd op basis van vuistregels)
- Vermogen radiatoren bij aanvoertemperatuur 55°C à 50°C is dan **14kW à 11kW** (uitgaande van temperatuurregime 90/70 in bestaande toestand)

Renovatiemaatregelen + kostprijs

Ventilatiesysteem C

Luchtdichtheid $n_{50}=4/h$

Indien dak en gevels (na-isoleren spouw of buitenisolatie) geïsoleerd worden en vensters worden vervangen, telkens naar de U_{max} -waarden volgens EPB, blijkt dat de nodige vermogens kleiner zijn dan 14kW en dus haalbaar met de bestaande radiatoren.

K-peil	K61	K50
Dak	$0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$ (*1)	$0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$ (*1)
Gevel	$0.55 \text{ W/m}^2\text{K}$ (*2)	$0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$ (*3)
Venster	$1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ (*4)	$1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ (*4)
Vloer	Blijft behouden	Blijft behouden
Warmteverlies	13kW	11kW
Taanvoer	54°C	50°C
Kosten gebouwschil	€36.000	€64.500
Kosten installatie		
- LW WP	€15.500	€14.500
- BW WP	€23.500	€23.000

(*1) komt overeen met circa 18cm MW. Indien het dak reeds geïsoleerd is met minstens 12cm MW, dan kunnen de bestaande radiatoren voldoende vermogen leveren bij een aanvoertemp van 55°C .

(*2) opspuiten spouw (5cm spouwbreedte). In bepaalde situaties (te smalle spouw, gevel in slechte staat, enz.) is na-isolatie geen optie en moet sowieso voor het alternatief gekozen worden, nl buitenisolatie tot $U=0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$ (zie *3)

(*3) komt overeen met circa 12cm EPS

(*4) hoogrendementsbeglazing ($U=1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Aandachtspunten.

Tenslotte geven we hieronder nog een aantal algemene aandachtspunten, die echter buiten de scope van deze studie vallen.

- Omwille van comfortredenen wordt in het algemeen aangeraden om met de bestaande radiatoren niet lager te gaan dan 50°C. Deze grens werd aangehouden, maar niet verder onderzocht in deze studie.
- In de praktijk zou het kunnen voorkomen dat in een bepaalde ruimten zoals de badkamer, onvoldoende vermogen kan geleverd worden met de bestaande radiatoren op lage temperatuur. Indien dit probleem zich beperkt voordoet, kan dit evt opgevangen worden door lokaal een elektrisch toestel bij te plaatsen.
- Eventueel opnieuw inregelen bestaande radiatoren
- Indien reeds isolatiewerken zijn uitgevoerd in de woning dan kan de haalbaarheid van regimetemperatuur 50°C in de praktijk uitgetest worden tijdens het winterseizoen.

Plaatsen van vloerverwarming.

Beschikbaar vermogen afgifte.

- Voor een afgiftevermogen van 15kW is een aanvoertemperatuur van 40°C vereist
- Mikken we op een aanvoertemp van 35°C, dan is het beschikbare vermogen beperkt tot 11kW

Renovatiemaatregelen + kostprijs

Luchtdichtheid n50=4/h

Ventilatiesysteem C

Hier worden 2 renovatiescenario's voorgesteld waar gestreefd wordt naar de U_{max} waarden van EPB (K47 en K36), en een derde scenario waarin beter wordt geïsoleerd (K30). Dit laatste scenario heeft in combinatie met BW WP de laagste Totale Actuele Kost ¹(houdt rekening met investerings- en energiekosten, onderhoudskosten en ook met de restwaarde van de woning) over de levensduur van het gebouw.

K-peil	K47	K36	K30
Dak (* ¹)	0.24 W/m ² K	0.24 W/m ² K	0.14 W/m ² K
Gevel (* ²), (* ³)	0.55 W/m ² K	0.24 W/m ² K	0.2 W/m ² K
Vensters (* ⁴)	1.5 W/m ² K	1.5 W/m ² K	1.5 W/m ² K
Vloer (* ⁵)	0.24 W/m ² K	0.24 W/m ² K	0.2 W/m ² K
Ugem	0,46 W/m ² K	0,34 W/m ² K	0,28 W/m ² K
Warmteverlies	11 kW	9 kW	8 kW
Taanvoer	34°C	32°C	31°C
Kosten gebouwschil - vloer op zand/vloer op kelder	€55.500 - €40.500	€84.000 - €69.000	€89.000 -€73.000
Kosten installatie, VV nat +0			

¹ Berekend volgens zelfde methodiek als kostenoptimale studies VEKA (<https://www.energiesparen.be/epb-pedia/beleid/studies>)

- LW WP droog/ ventilo+1	€27.000/ €25.000	€24.000/ €22.000	€24.000/€22.000
- BW WP droog /ventilo +1	€35.000/€33.000	€33.000/€31.000	€33.000/€31.000
EPC labelA, labelB (zonder koeling)			

(*1) $U=0.24\text{W/m}^2\text{K}$ komt overeen met circa 18cm MW, $U=0.14\text{W/m}^2\text{K}$ met 30cm MW

(*2) opspuiten spouw (5cm spouwbreedte). In bepaalde situaties (te smalle spouw, gevel in slechte staat, enz) is na-isolatie geen optie en moet sowieso voor het alternatief gekozen worden, nl buitenisolatie tot $U=0.24\text{W/m}^2\text{K}$ (*3)

(*3) komt overeen met circa 12cm EPS voor $U=0.24\text{W/m}^2\text{K}$ en 16cm EPS voor $U=0.2\text{W/m}^2\text{K}$

(*4) hoogrendementsbeglazing ($U=1.0\text{W/m}^2\text{K}$)

(*5) voor vloer op volle grond 7cm of 10cm gespoten PUR, voor vloer boven kelder 5cm ($\lambda=0.035\text{W/mK}$ of $\lambda=0.027\text{W/mK}$), voor telkens respectievelijk $U=0.24\text{W/m}^2\text{K}$ en $U=0.2\text{W/m}^2\text{K}$

- bestaande vloer op zand, wordt volledig uitgebroken en vervangen door een nieuwe vloer.

- bestaande vloer op kelder: isolatie wordt aangebracht onderkant vloer + uitbreken toplaag

Plaatsen van LL-WP.

Beschikbaar vermogen afgifte.

In principe is er geen beperking op het afgiftevermogen. We beschouwen hier zowel het minimale isolatieniveau volgens U_{max} -eisen EPB, als het kosten optimale renovatieniveau (dat hier ook op K30 ligt).

Renovatiemaatregelen + kostprijs

Luchtdichtheid $n_{50}=4/h$

Ventilatiesysteem C

K-peil	K61	K30
Dak (*1)	0.24 $\text{W/m}^2\text{K}$	0.14 $\text{W/m}^2\text{K}$
Gevel (*2)	0.55 $\text{W/m}^2\text{K}$	0.2 $\text{W/m}^2\text{K}$
Vensters (*3)	1.5 $\text{W/m}^2\text{K}$	1.5 $\text{W/m}^2\text{K}$
Vloer (*4)	blijft behouden	0.2 $\text{W/m}^2\text{K}$
Ugem		0,28 $\text{W/m}^2\text{K}$
Warmteverlies	13 kW	8 kW
Kosten gebouwschil - vloer op zand/vloer op kelder	€36.000	€89.000 -€72.000
Kosten installatie, - LL WP (*5)	€18.500	€18.000
EPC labelA, labelB (zonder koeling)		

(*1) $U=0.24\text{W/m}^2\text{K}$ komt overeen met circa 18cm MW, $U=0.14\text{W/m}^2\text{K}$ met 30cm MW

(*2) $U=0.55\text{W/m}^2\text{K}$:opspuiten spouw (5cm spouwbreedte), $U=0.2\text{W/m}^2\text{K}$:16cm EPS buitenisolatie

(*3) hoogrendementsbeglazing ($U=1.0\text{W/m}^2\text{K}$)

(*4) $U=0.2\text{W/m}^2\text{K}$: vloer op volle grond met 10cm gespoten PUR, of vloer boven kelder onderkant isoleren met 5cm ($\lambda=0.027\text{W/mK}$)

- bestaande vloer op zand, wordt volledig uitgebroken en vervangen door een nieuwe vloer.

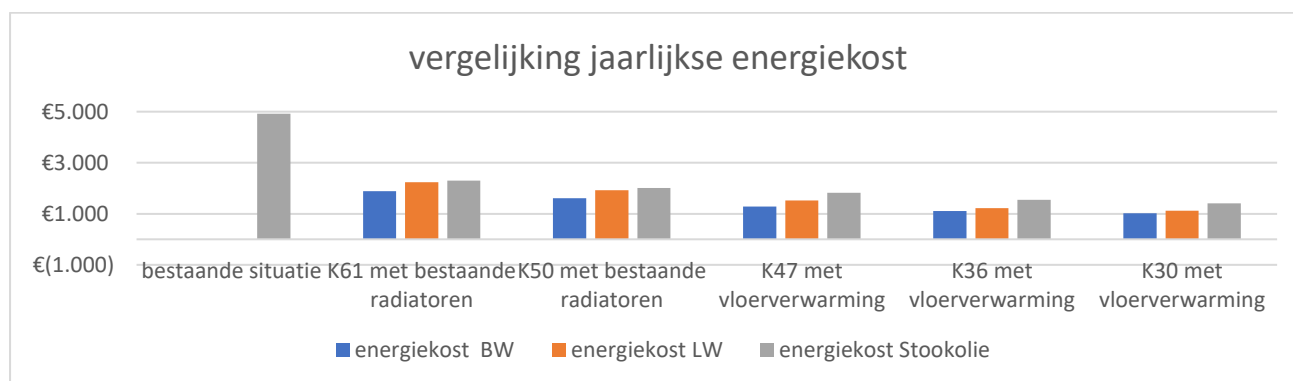
- bestaande vloer op kelder: isolatie wordt aangebracht onderkant vloer + uitbreken top laag

(*5) ondanks het verschil in warmteverlies (en dus te installeren vermogen), is er weinig verschil in installatiekost. Dit heeft te maken met het minimale vermogen van 1 binnenunit (2kW). In elke verwarmde ruimte wordt dus 1 binnenunit geplaatst van minstens 2kW, wat zeker in het geval van K30 beduidend groter kan zijn dan het warmteverlies van die ruimte.(dus in beide scenario's 7 binnenunits @ minstens 2 kW, 2 buitenunits)

Energiekosten en CO2-uitstoot.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de energiekosten en CO2-uitstoot voor de belangrijkste renovatiescenario's. Voor de volledigheid wordt de totale investeringskost, zoals hoger berekend, toegevoegd.

		CO2 uitstoot ton/jaar	Energiekost Euro/jaar	Richtwaarde investeringskost
Stookolie	K181	20.118	4.915	-
Radiatoren @50°C	K50			
• BW-WP		0,973	1.580	87.500
• LW-WP		1,16	1.879	79.000
VV @35°C	K47			
• BW-WP		0,793	1.288	82.000
• LW-WP		0,933	1.516	74.000
VV @30°C	K30			
• BW-WP		0,626	1.017	113.000
• LW-WP		0,69	1.121	104.000
LL-WP	K61	1,271	2.065	54.500
LL-WP	K30	0,766	1.414	98.500



Energiekosten stookolie: voor gerenoveerde gebouwschil ,met de oude stookolieketel (zonder WP)

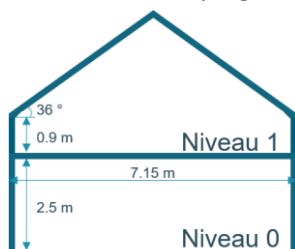
4. Kosten en baten van netondersteunende diensten

Het leveren van flexibiliteitsdiensten aan het elektriciteitsnet werd voorzien via twee mogelijke strategieën, namelijk het volgen van een dynamisch tarief voor residentiële klanten of peak shaving gedurende een vastgelegde periode. Voor beide strategieën werd het dynamische simulatiepakket Dymola gebruikt, wat verder gebaseerd is op de open-source programmeertaal Modelica. De toegepaste modellen werden ontleed van de open-source IDEAS-bibliotheek (1) en verder ontwikkeld op basis van de modelleringsbehoeften.

Aannames modellering

Gebouwparameters

Figuur 1 toont de gemodelleerde gebouwstructuur waarin twee verschillende temperatuurzones werden aangenomen en waarbij Tabel 1 bijkomende aannames weergeeft. De gelijkvloerse ruimte werd hierbij beschouwd als algemene leefruimte, terwijl de ruimte op de eerste verdieping eerder als slaapzone beschouwd werd.



Figuur 1 Gemodelleerd gebouw

Tabel 1 Gebouwparameters

Bruto afmetingen	7,15 m x 17,73 m
Verliesoppervlak	538 m ²
Beschermd volume	648 m ³
Oriëntatie hellend dak	Noord – zuid
Lengte interne muren	25 m gelijkvloers & 32 m eerste verdieping
Bruikbare hoogte	2,5 m gelijkvloers & gemiddeld 2,2 m bij eerste verdieping
Luchtvolume	280 m ³ gelijkvloers & 248 m ³ eerste verdieping
Ventilatie	Constant debiet op 60 % van nominaal debiet. Beide verdiepingen hebben een identiek extractiedebiet.
Vloeropbouw gelijkvloers	<ol style="list-style-type: none">1. 16 cm betonplaat2. 3 cm uitvullaag3. 7 cm PUR4. 6 cm chape5. 2 cm tegels
Vloeropbouw verdieping	<ol style="list-style-type: none">1. 12 cm welfsel2. 3 cm uitvullaag3. 4 cm PUR4. 4 cm chape5. 2 cm tegels
Muuropbouw	<ol style="list-style-type: none">1. 14 cm EPS2. 14 cm snelbouwsteen

	3. 2 cm pleister binnenmuur
Dakopbouw	1. 3,2 cm onderdak 2. 6 cm kepers met PUR isolatie 3. 12 cm uitvulplanken met PUR isolatie 4. 2 cm pleister
Binnenmuuropbouw	1. 2 cm pleister 2. 14 cm snelbouwsteen 3. 2 cm pleister
Bouwknoopen	0,05 W/m.K
Vensters	70 % venster (U = 1,1 W/m ² .K ; g = 0,589) 30 % frame (U = 2,4 W/m ² .K)
Deuren	50 % venster (U = 1,1 W/m ² .K ; g = 0,589) 50 % frame (U = 2,4 W/m ² .K)
Nominaal warmteverlies	7,4 kW bij 20°C/-8°C waarvan: <ul style="list-style-type: none"> • 3,98 kW voor de gelijkvloerse ruimte • 3,42 kW voor de eerste verdieping
Sanitair warm water verbruik	100 l/dag op 60 °C (2)
Jaartal data klimaat- en elektriciteitsprijs	2018 (1,3)
Kamerthermostaat	Elke verdieping is uitgerust met één centrale kamerthermostaat die de verwarming van de bijbehorende verdieping volledig in- of uitschakelt

Warmtepomp

De flexibiliteitsanalyse bevat zowel een lucht/water (L/W WP) als water/water warmtepomp (W/W WP). Tabel 2 geeft een overzicht van de warmtepompdata en aannames. Voor beide types warmtepompen werd, onder referentie-omstandigheden, het sanitair warm water (SWW) vat gehouden tussen 45 – 50 °C en werd er geen back-up weerstand voorzien.

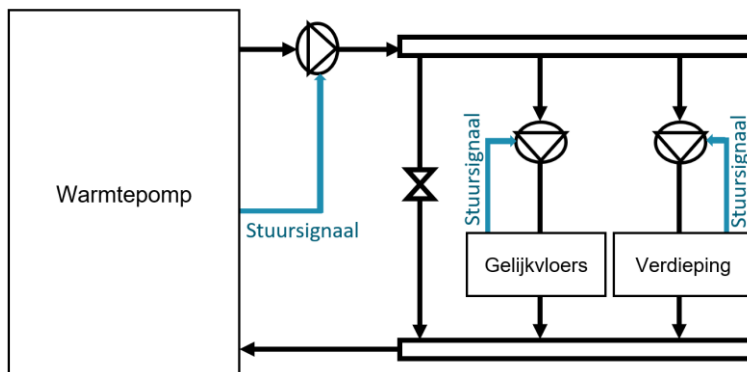
Tabel 2 Overzicht warmtepompdata flexibiliteitsanalyse

Soort	Lucht/water	Water/water
Merk & type	Viessmann Vitocal 222-S C08 (4)	Daikin EGSAH06D(A)9W (5)
Minimum modulatie	25 %	30 %
Minimum compressor aan/uit-tijd	5' / 5'	
Volume geïntegreerde SWW tank	210 l	180 l
Condensordebiet bij opladen sanitair warm water tank	25 l/min	
Condensordebiet bij ruimteverwarming	Constant waterdebiet bepaald bij nominale last en temperatuurverschil tussen aanvoer en retour van 5 °C bij vloerverwarming of van 10 °C bij radiatoren	
Verdamperdebiet	Constant luchtdebiet bepaald bij 2600 m ³ /h op 20 °C	Constant waterdebiet bepaald bij 2 maal

		condensordebiet onder nominale belasting
Verdampertemperatuur	Weersafhankelijk	Constante bron op 5 °C
Inputdata compressor	Modulatie van 25 % tot 100 % op basis van opgemeten deellastdata op 25 % / 50 % / 75 % / 100 %	Modulatie van 30 % tot 100 % op basis van opgemeten deellastdata op 30 % / 50 % / 70 % / 90 % / 100 %

Vloerverwarming

De thermische inertie van vloerverwarmingssystemen laat een rechtstreekse koppeling tussen een modulerende warmtepomp en het verwarmingssysteem toe, zonder de noodzaak voor een buffervat. De thermische traagheid van de vloer is immers voldoende om energie te bufferen. Het benodigde waterdebiet voor elke verdieping werd bepaald onder nominale omstandigheden bij een temperatuurverschil van 5 °C tussen aanvoer- en retourwater. De ruimte op de gelijkvloerse en eerste verdieping werden uitgerust met respectievelijk een nat en droog systeem. Beide systemen beslaan een verwarmd vloeroppervlak van 108 m² met 7 parallelle kringen en beschikken over een gemeenschappelijke voedingstemperatuur. De pasafstand op elke verdieping bedraagt 15 cm. De stooklijn is ingesteld op 29,5 °C bij nominale buitencondities van -8 °C en 25 °C voedingstemperatuur bij een buitentemperatuur van 20 °C. De kamerthermostaatsetting bedraagt 20 °C ± 0,25 °C. Zoals aangegeven in Figuur 2, bedienen de ruimtethermostaten de pompen van de vloerverwarming, terwijl de warmtepompregeling zorgt voor de sturing van de algemene omlooppomp. Bijkomend werd ook een drukverschilregelaar tussen de aanvoer- en retourcollector voorzien.

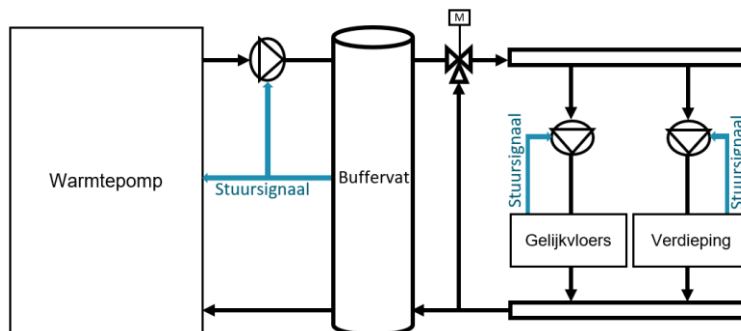


Figuur 2 Opbouw controlesysteem vloerverwarming

Radiatoren

Bij gebruik van radiatoren ontstaat de noodzaak aan een buffervat tussen de warmtepomp en het verwarmingssysteem. De thermische inertie van de radiatoren volstaat niet om een relevante hoeveelheid energie te bufferen voor het leveren van netondersteunende diensten. Het buffervat werd ontworpen om een bepaalde periode net-onafhankelijk te kunnen zijn gedurende het gemiddelde stookseizoen. Hiervoor werd de gemiddelde buitentemperatuur over de maanden januari – april en van november – december genomen (6). Analyse van belastingprofielen van het Belgische transmissienet (3) leidde tot een peak shaving-periode van drie uren, gaande van 17:00 tot 20:00. Indien de woning voorafgaand aan de peak shaving-periode kan verwarmd worden met een verhoogd thermostaatsetpunt, toonden zowel simulaties als vuistregels aan dat een buffervat van 400 l volstaat.

Zoals aangegeven in Figuur 3, werd het buffervat geplaatst tussen de warmtepomp en de radiatoren. De kamerthermostaten van beide verdiepingen sturen de bijbehorende pomp aan. De mengkraan achter het buffervat levert de gewenste aanvoertemperatuur naar de radiatoren. De stooklijn voor de radiatoren werd ingesteld op 47 °C bij nominale condities en 30 °C bij een buitentemperatuur van 20 °C. Verder stuurt de thermostaat van het buffervat de warmtepomp en de bijbehorende condensorpomp aan. De stooklijn van de buffervatthermostaat volgt de stooklijn van de radiatoren, maar met een hysteresis van + 5 °C/-2,5 °C. De warmtepomp werd ingesteld op een aanvoertemperatuur gelijk aan de aanvoertemperatuur van de radiatoren vermeerderd met 5 °C. Het benodigde waterdebiet voor elke verdieping werd bepaald onder nominale omstandigheden bij een temperatuurverschil van 10 °C tussen aanvoer- en retourwater. De condensorpomp werd ingesteld op het gesommeerde debiet van beide verdiepingen.



Figuur 3 Koppeling warmtepomp & buffervat bij radiatoren

Om met de beschouwde radiatoren en aanvoertemperaturen een gelijkwaardig comfort te bieden als bij het beschouwde vloerverwarmingssysteem, werd de kamerthermostaatsetting beschouwd op $20,50\text{ °C} \pm 0,25\text{ °C}$. Dit resulteerde in gelijkwaardige operationele temperaturen (50 % luchttemperatuur en 50 % stralingstemperatuur) voor beide verwarmingssystemen.

Om een eenduidige vergelijking met het buffervat te bekommen, werd het buffervat ontworpen voor een peak shaving-strategie, maar ook identiek geïntegreerd binnen de strategie met het dynamisch tarief. Dit kan als aanvaardbaar worden aangenomen gezien de kleine thermische inertie van de radiatoren, de benodigde minimum draaitijd van de compressor en de nadelige invloed op het elektriciteitsverbruik bij een groot aantal schakelcycli van de compressor. Bijkomend sluiten huidige ontwikkelingen binnen netondersteunende diensten niet uit dat eenzelfde installatie voor slechts één flexibiliteitsdienst kan gebruikt worden, maar zijn combinaties eveneens mogelijk.

Dynamisch tarief

Het dynamisch tarief is gebaseerd op het residentieel verkrijgbaar tarief "Dynamic" van Engie (7). Hiervoor werd de volledige prijsstructuur in kaart gebracht, gaande van de fundamentele energiekost tot netkosten en heffingen. De kostenstructuur is gebaseerd op de prijsfiche van november 2021 en

Tabel 3 toont verdere details. De distributienetbeheerder werd vastgelegd op Iveka, terwijl geopteerd werd voor een enkelvoudig tarief. Alle vermelde kosten zijn inclusief BTW. Het elektriciteitsverbruik houdt enkel en alleen rekening met het energieverbruik van de warmtepomp zonder verdere huishoudelijke toestellen te voorzien.

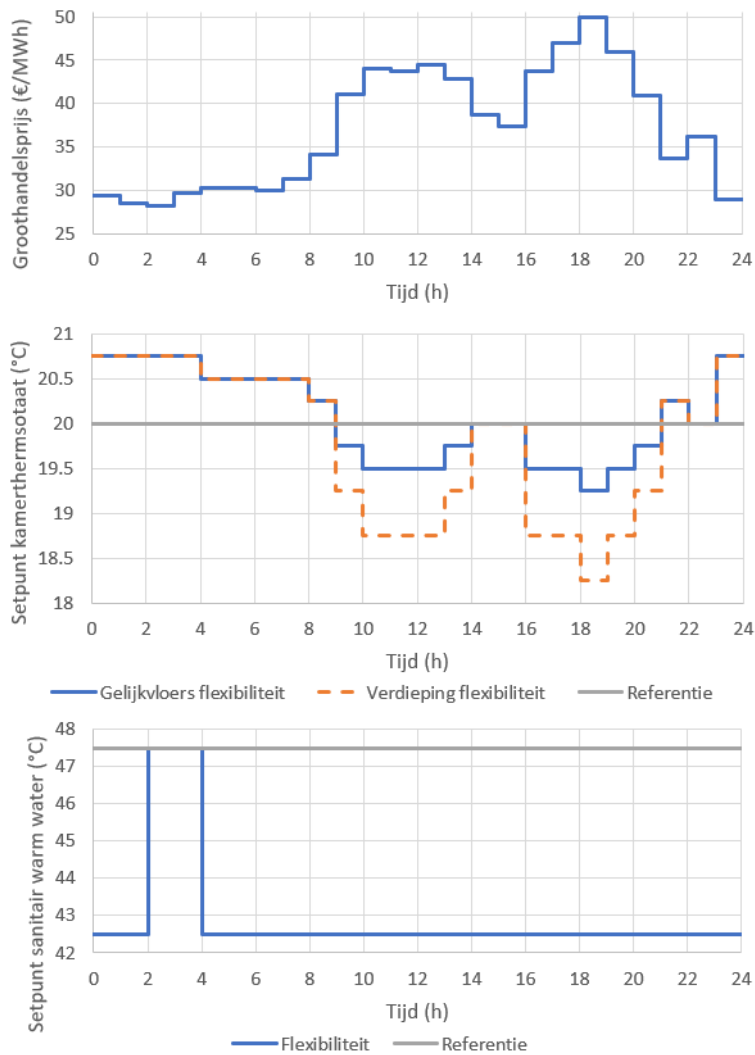
Tabel 3 Kostenstructuur dynamisch tarief

Energiekost vaste vergoeding	114,95 €/jaar
Energiekost dynamisch tarief	$1,21 * (0,1 * (\text{groothandelsprijs in } \text{€}/\text{MWh}) + 0,2040) / 100$ uitgedrukt in €/kWh
Kosten groene stroom	0,02472 €/kWh
Kosten warmtekrachtkoppeling	0,00339 €/kWh
Energiekost distributienetbeheerder	0,132 €/kWh
Vaste kost distributienetbeheerder	14,80 €/jaar
Kost transmissienetbeheerder	0,0287 €/kWh
Toeslag Energiebijdrage	0,0023306 €/kWh
Toeslag Federale bijdrage	0,0035117 €/kWh
Bijdrage Energiefonds	0,43 €/maand

De controlestrategie voor het dynamisch tarief is gebaseerd op het volgen van de veranderingen van de elektriciteitsprijs per uur zoals reeds onderzocht werd door Coccia et al. (8). Hierin veranderen de temperatuursetpunten van het buffervat, de warmtepomp en de kamerthermostaat naargelang de elektriciteitsprijs. De elektriciteitsprijs op dag D wordt op dag D-1 om 14u00 gepubliceerd via de website van Engie. Echter werkt de controlestrategie van 0u00 tot 23u59 en houdt deze dus nog geen rekening met de prijzen van de volgende dag. Voor de gelijkvloerse ruimte is het setpunt bij de laagste/hogste prijs 20,75 °C / 19,25 °C. Om verder gebruik te kunnen maken van het dynamisch tarief en de twee aanwezige thermische zones, is er bij de eerste verdieping voor geopteerd om het onderste setpunt verder te verlagen. Hierdoor is het setpunt bij de laagste/hogste prijs 20,75 °C / 18,25 °C. Bijkomend bedraagt de hysteresis in alle gevallen ± 0,25 °C. De opgegeven temperaturen zijn voor een vloerverwarmingssysteem en dienen enkel met 0,5 °C verhoogd te worden om de setpunten van het systeem met radiatoren te bekomen.

Ook de controlestrategie voor het sanitair warm water werd aangepast. Echter toonden simulaties aan dat het sanitair warm water vat slechts één tot twee keer per dient opgewarmd te worden. Het volgen van een dynamische elektriciteitsprijs bij SWW toonde daarom ook aan dat dit enkel tot een hoger energieverbruik en hogere kosten zou leiden. De warmtepomp zou hierbij continu moeten schakelen tussen ruimteverwarming op lagere temperaturen en SWW-voorziening op hogere temperaturen. Daardoor dient de warmtepomp continu hogere temperaturen aan te maken, met een lagere COP als gevolg. Om toch flexibiliteit met het SWW-vat te kunnen leveren, werd ervoor geopteerd om de temperatuurregeling van het SWW-vat te veranderen. Het setpunt doorheen de dag werd hierbij verlaagd van 47,5 °C naar 42,5 °C. Enkel tijdens het uur met de laagste prijs en het daaropvolgende uur zal het setpunt verhoogd worden naar 47,5 °C. De hysteresis blijft ongewijzigd en dus gehouden op ± 2,5 °C.

Figuur 4 geeft de werking van de controlestrategie weer voor een welbepaalde dag voor een systeem met vloerverwarming. Hieruit volgt duidelijk dat de voorkeur gegeven wordt aan een actieve warmtepompwerking tijdens momenten met een lage elektriciteitsprijs.



Figuur 4 Dynamische tariefsturing temperatuursetpunt voor vloerverwarming en sanitair warm water

Peak shaving

Het gedurende drie uren uitschakelen van een warmtepomp voor flexibiliteitsdiensten met peak shaving dient voorafgegaan te worden door een voorverwarmingsperiode. Op die manier kunnen de woning en het SWW-vat voldoende opgewarmd worden om het gebruikerscomfort minimaal te beïnvloeden. Hiervoor werd een vaste periode van drie uren voorzien, zowel voor systemen met radiatoren als voor vloerverwarming. Deze keuze kan verantwoord worden doordat de voorverwarmperiode niet weersafhankelijk werd beschouwd waardoor voldoende oplaadtijd voor lage buitentemperaturen voorzien moet worden. Zowel voor vloerverwarming als radiatoren moet ook voldoende tijd voorzien worden omwille van de thermische inertie in de vloer of het geplaatste buffervat in geval van radiatoren. Bijkomend dient het SWW-vat voldoende geladen te zijn om de peak shavingperiode te overbruggen. Hierin werd het laden van het SWW-vat bevorderd aan de hand van een verkleinde hysteresis waarbij de onderste hysteresislimiet verhoogd werd en het setpunt behouden bleef. Hierdoor kan het SWW-vat geladen worden zonder een verhoging van de voedingstemperatuur, waardoor het energieverbruik minimaal beïnvloed wordt. Simulaties toonden hierbij ook aan dat dit behouden setpunt meestal voldoende is om de peak shavingperiode te kunnen overbruggen. Uitzonderingen zijn het nemen van een douche/bad waarbij grote afnamevolumes zorgden voor een te snelle ontlading van het SWW-vat.

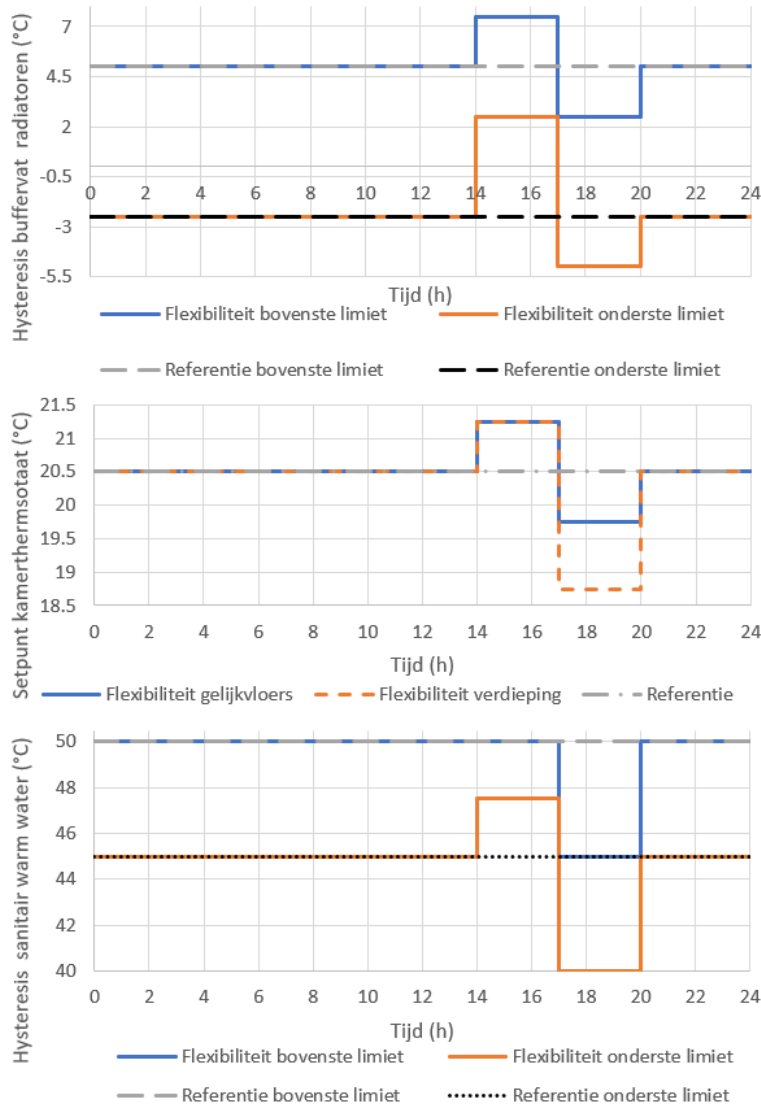
Na verificatie op correcte werking, werd de volgende controlestrategie geïmplementeerd:

- Sturing ruimteverwarming bij systemen met vloerverwarming:
 - Constante hysteresis van $\pm 0,25$ °C voor beide ruimtethermostaten
 - 0:00 – 14:00 → Setpunt 20 °C voor beide ruimtes
 - 14:00 – 17:00 → Setpunt 20,75 °C voor beide ruimtes
 - 17:00 – 20:00 → Setpunt 19,25 °C voor gelijkvloers
→ Setpunt 18,25 °C voor eerste verdieping
 - 20:00 – 0:00 → Setpunt 20 °C voor beide ruimtes

- Sturing ruimteverwarming bij systemen met radiatoren:
 - Constante hysteresis van $\pm 0,25$ °C voor beide ruimtethermostaten
 - Setpunt buffervat ruimteverwarming volgt uit een weersafhankelijke regeling die ook afhangt van de gevraagde temperatuur op de gelijkvloers.
 - 0:00 – 14:00 → Setpunt 20,5 °C voor beide ruimtes
→ Hysteresis buffervat = setpunt +5 °C / -2,5 °C
 - 14:00 – 17:00 → Setpunt 21,25 °C voor beide ruimtes
→ Setpunt buffervat = setpunt +7,5 °C / +2,5 °C
 - 17:00 – 20:00 → Setpunt 19,75 °C voor gelijkvloers
→ Setpunt 18,75 °C voor eerste verdieping
→ Setpunt buffervat = setpunt +2,5 °C / -5 °C
 - 20:00 – 0:00 → Setpunt 20,5 °C voor beide ruimtes
→ Hysteresis buffervat = setpunt +5 °C / -2,5 °C

- Sturing sanitair warm water buffervat:
 - 0:00 – 14:00 → Setpunt 47,5 °C met hysteresis +2,5 °C / -2,5 °C
 - 14:00 – 17:00 → Setpunt 47,5 °C met hysteresis +2,5 °C / 0 °C
 - 17:00 – 20:00 → Setpunt 42,5 °C met hysteresis +2,5 °C / -2,5 °C
 - 20:00 – 0:00 → Setpunt 47,5 °C met hysteresis +2,5 °C / -2,5 °C

Figuur 5 geeft een grafisch overzicht van de sturing in geval van een systeem met radiatoren.



Figuur 5 Overzicht strategie peak shaving bij radiatoren met buffervat

Resultaten peak shaving

Tabel 4 geeft een overzicht van de simulatieresultaten voor de flexibiliteitsdienst peak shaving. Hierin stemmen de afkortingen "Ref" en "Flex" overeen met respectievelijk de referentiesituatie zonder peak shaving en de situatie met een peak shaving-strategie.

Tabel 4 Resultatenoverzicht peak shaving (Ref = referentie ; Flex = activatie flexibiliteit voor peak shaving)

Systeem	Vloerverwarming				Radiatoren			
	W/W WP		L/W WP		W/W WP		L/W WP	
Scenario	Ref	Flex	Ref	Flex	Ref	Flex	Ref	Flex
Elektriciteitsverbruik (kWh)	3023	3030	4468	4454	4358	4376	5010	4976
COP (-)	5,87	5,85	3,96	3,96	4,13	4,13	3,58	3,62
Compressor cycli (-)	787	946	1066	1142	2597	2451	2553	2380
Uittoestand warmtepomp tussen 17:00 – 20:00 (%)	56,85	97,14	60,42	97,35	69,79	97,33	69,42	93,42
Operatieve temperatuur gelijkvloers < 20 °C (u/stookseizoen)	2	8	37	69	0	12	38	51
Operatieve temperatuur verdieping < 20 °C (u/stookseizoen)	79	240	233	494	16	164	123	298
Operatieve temperatuur gelijkvloers > 22 °C (u/stookseizoen)	329	328	317	323	236	242	222	233
Operatieve temperatuur verdieping > 22 °C (u/stookseizoen)	18	19	17	16	19	19	17	18

Referentiesituatie

Uit Tabel 4 volgt dat de warmtepomp zonder een aangepaste strategie reeds tussen de 56,85 % en 69.79 % van de peak shaving-periode uitgeschakeld kan zijn. Aangezien de warmtepomp ook SWW voorziet, werd het volledige jaar in rekening gebracht en niet enkel het stookseizoen. Dit verklaart ook het relatief hoge percentage voor de uitgeschakelde toestand van de warmtepomp tussen 17:00 – 20:00 in de referentiesituatie. Ook vertonen de radiatoren een hogere uitschakeltijd dan de vloerverwarming in de referentiesituatie. Dit is te verklaren door de continue werking van de vloerverwarming en het aan/uit-gedrag van de radiatoren, wat ook volgt uit het vergelijken van het aantal compressorcycli in de tabel. Hierdoor is de kans dat de warmtepomp bij het systeem met de radiatoren uitgeschakeld is tijdens de peak shaving-periode groter dan bij het systeem met vloerverwarming.

Daarnaast is het verschil in energieverbruik tussen beide types warmtepompen en verwarmingssystemen ook duidelijk zichtbaar. De weersafhankelijkheid van de L/W WP zorgt

voor een stijging van 47,80 % en 14,96 % ten opzichte van de W/W WP voor respectievelijk vloerverwarming en radiatoren. De kleinere stijging voor het systeem met radiatoren is te wijten aan de prestatiecurves van beide types warmtepompen. Analyse toonde aan dat de L/W WP een constantere prestatiecurve voor variabele condensortemperaturen bezit. Daardoor is de invloed van een verhoogde temperatuur bij radiatoren ten opzichte van vloerverwarming minder merkbaar bij de L/W WP dan bij de W/W WP.

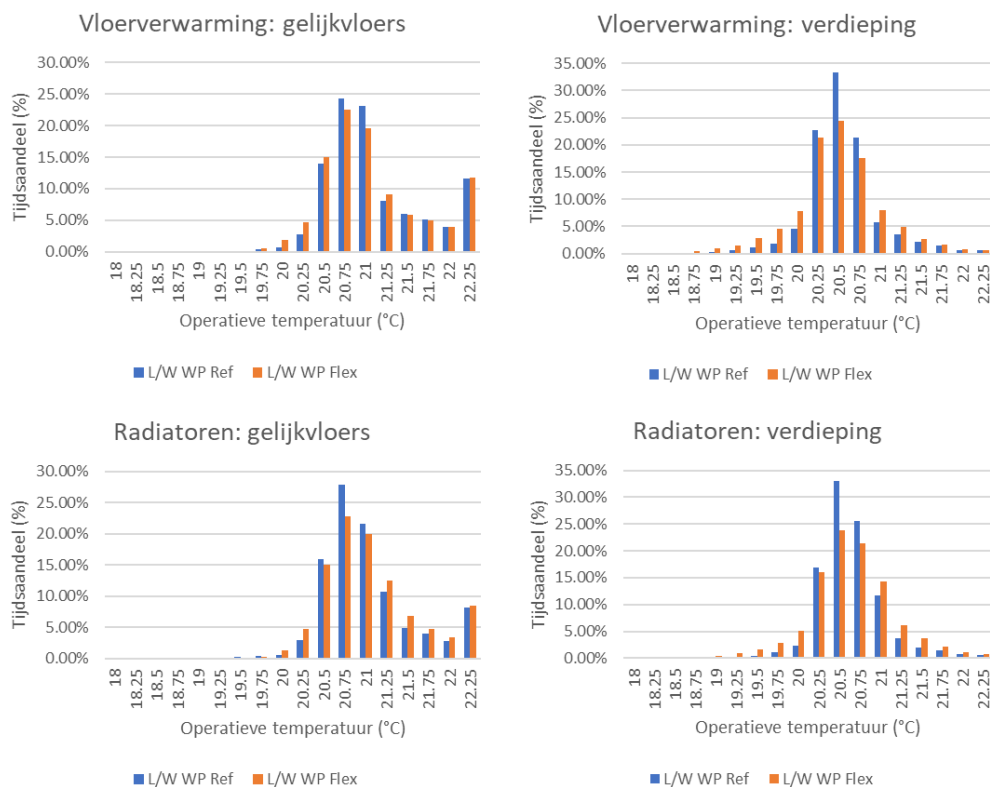
Activatie peak shaving-strategie

Wanneer de activatie van de peak shaving-strategie in Tabel 4 bekeken wordt, kan afgeleid worden dat de strategie zorgt voor een gemiddelde slaagkans van 96,31 % voor een uitgeschakelde warmtepomp tussen 17:00 en 20:00. Dit geeft ook de goede dimensionering van het buffervat voor de radiatoren en de gekozen voorverwarmingsperiode weer. Een gemiddelde slaagkans van 100 % werd niet behaald omwille van een aantal redenen. Ten eerste voorziet de warmtepomp ook SWW. Hierdoor zorgt het nemen van een douche/bad voor grote afnamevolumes waarbij de temperatuur in het SWW-vat zakt tot beneden de toegelaten minimumtemperatuur. Een verhoging van de oplaadtemperatuur van het SWW-vat tijdens de voorverwarmperiode, bracht hierin weinig verbetering in, maar leidde wel consequent tot een verhoogd elektriciteitsverbruik. In sommige gevallen werd de slaagkans op peak shaving zelfs kleiner doordat het opladen van het SWW-vat langer duurde en zorgde voor lagere ruimtetemperaturen vlak voor het beëindigen van de voorverwarmperiode. Dit leidde dan tot een snellere activatie van de warmtepomp voor ruimteverwarming tijdens de eigenlijke peak shaving-periode. Ten tweede gebeurt de aan/uit-sturing van de warmtepomp enkel op basis van thermostaatsetpunten. Aangezien de setpunten elkaar niet overlappen, zou de warmtepomp automatisch uitgeschakeld moeten worden. Echter toonde analyse aan dat bij lage buitentemperaturen, de thermische compressorcapaciteit niet altijd voldoende was om de woning snel en volledig op te warmen tijdens de voorverwarmperiode. Daardoor schakelde de compressor ook niet uit bij het ingaan van de peak shaving-periode. Hierin dient ook opgemerkt te worden dat de mogelijke aanwezigheid van een elektrische back-up weerstand niet in model werd gebracht, terwijl een dergelijke weerstand de compressor normaliter ondersteunt tijdens de koudste dagen van het jaar. Vooral voor de gekozen L/W WP kon dit nuttig zijn aangezien simulaties aantoonde dat vanaf een buitentemperatuur beneden $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, de L/W WP praktisch continu in vollast zal werken om de woning op temperatuur te houden. Dit veroorzaakt dus ook dat de implementatie van een peak shaving-strategie voor de L/W WP bij vriesdagen kan zorgen voor een comfortverlies, daar in het referentiescenario al kleine comfortreducties waarneembaar waren omwille van het niet bereiken van de ruimtetemperatuursetpunten. Door te werken met thermostaatsetpunten in plaats van een geforceerde uitschakeling, kan een dergelijke comfortreductie vermeden worden.

Figuur 8 toont de operationele temperatuur (50 % stralingstemperatuur en 50 % luchttemperatuur) in geval van een L/W WP gedurende het stookseizoen (midden september – midden mei). Verder toont Tabel 4 ook een overzicht van de overschrijding van een operationele temperatuur beneden $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en boven $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ in het aantal uren per stookseizoen. Hieruit volgt dat de peak shaving-strategie slechts een minimale impact op het comfort van de eindgebruiker zal hebben. De resultaten en figuren zijn analoog voor de W/W WP. Zowel de voorverwarmperiode als de eigenlijke peak shaving zorgen slechts voor een minimale temperatuurschommeling. Bijkomend blijkt ook het nut van een tweede temperatuurzone

waarbij de temperatuur op de eerste verdieping verder verlaagd kon worden tot 18 °C in plaats van 19 °C. Hierdoor zal deze ruimte langer inactief kunnen blijven. Daardoor kan de energie in het buffervat nagenoeg volledig gebruikt worden voor het behouden van het comfort op de gelijkvloers in geval van radiatoren. Bij vloerverwarming zal het gebruik van een tweede temperatuurzone ervoor zorgen dat als de warmtepomp toch zou inschakelen tijdens de peak shaving-periode, het opgenomen elektrisch vermogen beperkt zal blijven doordat enkel de gelijkvloerse ruimte verwarmd zal worden. Daarnaast toont de temperatuurverdeling van beide ruimtes de invloed van de zonnestraling aan, waarbij de gelijkvloerse ruimte meer vensteroppervlakte heeft. Dit resulteert uiteindelijk in grotere temperatuurschommelingen voor de gelijkvloers, terwijl het temperatuursverloop op de eerste verdieping een meer symmetrisch verloop vertoont. Het nadeel van een verminderd vensteroppervlak op de eerste verdieping toont zich dan ook op een snellere daling van de ruimtetemperatuur.

Daarnaast werd de gemodelleerde woning niet voorzien van de nodige zonnewering, waardoor een vaste instelling van de ruimtetemperatuur tijdens de voorverwarmingsperiode met een peak shaving-strategie in het tussenseizoen mogelijks kan zorgen voor oververhittingsverschijnselen. Dit verklaart ook waarom er gekozen werd om de ruimtetemperatuur met slechts 0,75 °C te verschuiven, wat resulteerde in een minimale invloed op het comfort en slechts weinig oververhittingsverschijnselen.



Figuur 6 L/W WP – Operatieve temperatuur bij referentie (Ref) en peak shaving (Flex)

De peak shaving-strategie leidde tot gemiddeld 12,68 % meer compressorcycli bij systemen met vloerverwarming, maar ook tot 6,19% minder cycli bij systemen met radiatoren. Het verschil in thermische inertie tussen beide systemen ligt hier aan de basis. De hoge thermische inertie van de vloerverwarming zorgt voor een vrijwel constante werking in de referentiesituatie zonder peak shaving. Bij de implementatie van een peak shaving-strategie,

wordt dit continu werkingspatroon doorbroken door een uittoestand na een voorverwarmingsperiode. De weersinvloeden en cycli voor SWW zorgen ook voor de nodige compressorcycli waarbij kort na de middag de compressor uitgeschakeld wordt omwille van het bereiken van de bovenste hysteresis van de ruimtethermostaat. Bij peak shaving zal het thermostaatsetpunt verhoogd worden om 14:00, wat leidt tot een nieuwe compressorcyclus. Wanneer voor de referentiesituatie de radiatoren worden vergeleken met de vloerverwarming, levert de vergelijking van de compressorcycli op dat de lage thermische inertie van de radiatoren zorgt voor een stijging van het aantal compressorcycli met 229,99 % en 139,49 % voor respectievelijk de W/W WP en L/W WP. De kleinere stijging voor de L/W WP wordt veroorzaakt door de kleinere capaciteit van de L/W WP, waardoor de L/W WP een langere draaitijd heeft. Bij peak shaving met radiatoren daalt het aantal compressorcycli omdat de warmtepomp in vollast zal werken tijdens de voorverwarmperiode. Dit resulteert voor de radiatoren in langere, maar minder cycli tijdens de voorverwarmperiode en nagenoeg geen cycli in de peak shaving-periode.

Tabel 4 toont ook een verwaarloosbaar verschil in elektriciteitsverbruik aan. Bij de L/W WP kan zelfs een lichtjes lager elektriciteitsverbruik behaald worden doordat de voorverwarmperiode tijdens de warmste periode van de dag gebeurt. Hierdoor kan besloten worden dat de implementatie van de peak shaving-strategie kan leiden tot een win-win situatie voor het elektriciteitsnet en de eindgebruiker. Enerzijds kan het elektriciteitsnet ontlast worden op momenten van zware belasting (koude, donkere winterdagen tijdens de avondpiek). Anderzijds, verandert het energieverbruik van de eindconsument nagenoeg niet en blijft de impact op het ruimtecomfort minimaal.

Resultaten dynamisch tarief

Jaarsimulatieresultaten bij toepassing van een dynamisch tarief zijn voor beide types warmtepompen en verwarmingssystemen terug te vinden in Tabel 5. Hierin zijn de referentiesimulaties en simulaties met flexibiliteitsdiensten aan de hand van een dynamisch tarief afgekort met respectievelijk "Ref" en "Flex".

Tabel 5 Resultatenoverzicht dynamisch tarief (Ref = referentie ; Flex = activatie flexibiliteit met dynamisch tarief)

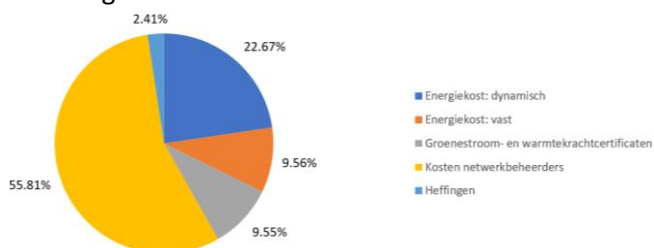
	Vloerverwarming				Radiatoren			
	W/W WP		L/W WP		W/W WP		L/W WP	
	Ref	Flex	Ref	Flex	Ref	Flex	Ref	Flex
Dynamische energiekost (€/jaar)	202,43	177,60	296,72	264,12	292,00	262,91	333,78	304,81
Totale kost (€/jaar)	925,76	897,90	1301,33	1259,36	1275,19	1238,10	1443,88	1401,55
Elektrische energie (kWh/jaar)	3023	3007	4468	4420	4358	4317	5010	4941
COP (-)	5,87	5,86	3,96	3,96	4,13	4,17	3,58	3,63
Operatieve temperatuur gelijkvloers < 20 °C (u/stookseizoen)	2	43	37	118	0	24	38	74
Operatieve temperatuur verdieping < 20 °C (u/stookseizoen)	79	915	233	1064	16	553	123	703
Operatieve temperatuur gelijkvloers > 22 °C (u/stookseizoen)	329	418	317	390	236	282	222	274
Operatieve temperatuur verdieping > 22 °C (u/stookseizoen)	18	44	17	39	19	40	17	37

Referentiesimulaties

De referentiesimulaties uit Tabel 5 zijn identiek aan de referentiesimulaties bij peak shaving in Tabel 4. Enkel werd het dynamisch tarief bijkomend in rekening gebracht, maar zonder een aangepaste werkingsstrategie van de warmtepomp. Deze warmtepompsturing houdt hierin dus geen rekening met een lage/hoge elektriciteitsprijs. Uit de vergelijking van beide types warmtepompen en verwarmingssystemen valt opnieuw op dat de L/W WP door zijn weersafhankelijkheid een hoger elektriciteitsverbruik heeft en dat de verhoogde toevoertemperatuur voor de radiatoren zorgt voor een hoger elektriciteitsverbruik en daaraan gebonden hogere elektriciteitsfactuur. Analoog aan de resultaten bij peak shaving,

valt op dat de W/W WP gevoeliger was voor een toename van de voedingstemperatuur bij de omschakeling van systemen met vloerverwarming naar systemen met radiatoren.

Opvallend in de referentiesimulaties is het aandeel van de dynamische energiekost ten opzichte van de totale elektriciteitsfactuur. Figuur 7 geeft een beeld van de gemiddelde samenstelling van de elektriciteitsfactuur over de verschillende referentiesimulaties heen. Alle kosten werden inclusief BTW gerekend. Uit de figuur blijkt dat de dynamische energiekost slechts 22,67 % van de eindfactuur uitmaakt, terwijl de overige kosten bestaan uit vaste jaarlijkse kosten (o.a. vaste vergoeding), maar vooral uit kosten die berekend worden op basis van de jaarlijkse kWh meting (o.a. kosten groene stroom). Zoals verder zal worden aangetoond, is een mogelijke verlaging van de elektriciteitsfactuur door implementatie van een dynamisch tarief uitermate gevoelig aan een stijging van het jaarlijks elektriciteitsverbruik terwijl prijschommelingen in de dynamische energiekost slechts relatief weinig zullen doorwegen.



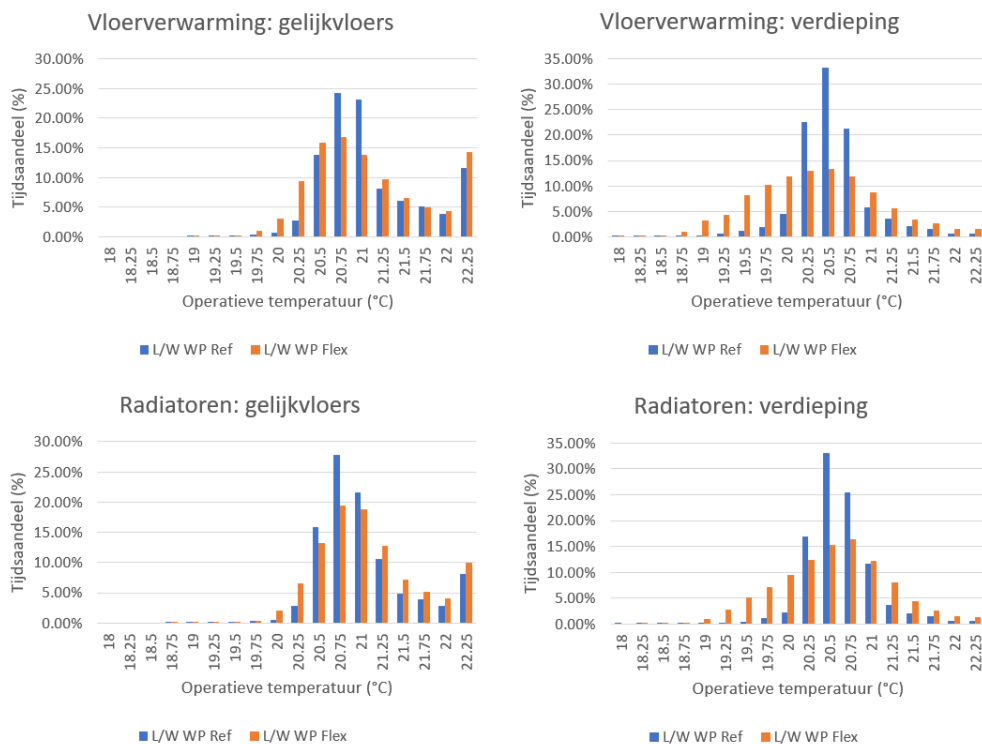
Figuur 7 Samenstelling elektriciteitsfactuur bij gebruik dynamisch tarief (kosten BTW inclusief)

Resultaten met actieve sturing warmtepomp via een dynamisch tarief

Zoals aangegeven in Tabel 5, kan een actieve sturing van de warmtepomp tijdens een dynamisch tarief zorgen voor een daling in de elektriciteitsfactuur. Door de samenstelling van de elektriciteitsfactuur, is de procentuele daling van de dynamische energiekost echter opmerkelijk groter ten opzichte van de daling van de totale eindfactuur. De dynamische energiekost werd gemiddeld gereduceerd met 10,27 %, terwijl de eindfactuur met gemiddeld 3,02 % daalde. Simulaties met andere controlestrategieën toonden ook de gevoeligheid van de energiefactuur voor de flexibiliteitsdiensten aan. Agressievere strategieën met verhoogde voedingstemperaturen werden ook getest en waren in staat de dynamische energiekost nog verder te laten dalen. Echter leidden deze agressievere strategieën ook tot een verhoogd jaarlijks elektriciteitsverbruik omwille van een verhoogde condensortemperatuur tijdens momenten van lage elektriciteitsprijzen. Aangezien de elektriciteitsfactuur hoofdzakelijk gebaseerd is op een energieverbruik vermenigvuldigd met een vaste kWh-prijs (o.a. nettarieven en heffingen) leidde deze lichte stijging in elektriciteitsverbruik echter tot een stijgende energiefactuur. Hierdoor werd het actief volgen van een dynamisch tarief economisch oninteressant ten opzichte van de referentiesituatie zonder actieve sturing. Dit toonde ook aan dat controlestrategieën voor netondersteunende diensten met de nodige voorzichtigheid getest en geïmplementeerd moeten worden.

Zoals Tabel 5 toont, liet een mildere controlestrategie waarin de voedingstemperatuur slechts lichtjes verhoogd werd, een kleine daling van het elektriciteitsverbruik toe. Vooral een lagere toegelaten temperatuur in de thermische zone van de eerste verdieping leverde hierin een belangrijke bijdrage, mede veroorzaakt door de afwezigheid van sterke zonne-invloeden op deze verdieping.

Zowel Tabel 5 als Figuur 8 geven verder ook aan dat de operationele temperaturen binnen comfortabele grenzen blijven. In vergelijking met de peak shaving-strategie, zullen de temperatuurwijzigingen wel groter zijn. Echter was dit te verwachten vanwege de continue bijsturing van de temperatuursetpunten ten opzichte van een gelimiteerd tijdslot voor de peak shaving-strategie van 14:00 tot 20:00. De temperatuurverdeling toont opnieuw de effecten van de grotere vensteroppervlakte bij de gelijkvloerse ruimte. Hierin is ook een stijging bij de hogere ruimtetemperaturen waarneembaar en deze werd veroorzaakt door een verhoogd temperatuursetpunt bij lage prijzen, gevolgd door een zonnige periode met daaraan gebonden zonnewarmte. Een voorspelling van de zonnestraling kan een oplossing bieden om verdere oververhittingsverschijnselen in te perken, alhoewel verhoogde setpunten voor kamerthermostaten reeds binnen comfortabele grenzen werden gehouden. De afwezigheid van grote vensteroppervlaktes stelde de thermostaatsturing van de eerste verdieping beter in staat om het dynamische karakter van de elektriciteitsprijs te volgen. Zoals uit de grafieken voor de temperatuurverdeling volgt, waren de radiatoren door hun lagere thermische inertie, minder gevoelig aan dergelijke zonne-invloeden. Bijkomend stelde de snellere reactietijd van de radiatoren de eindgebruiker in staat om het oorspronkelijke temperatuurniveau sneller te herstellen na een langer tijdslot met hoge prijs.



Figuur 8 Operatieve temperaturen bij referentie- en flexibiliteitscases voor beide verdiepingen

Bovendien toont Tabel 5 een lichte stijging van de COP doordat de warmtepomp meer in vollast zal werken. Door het volgen van de elektriciteitsprijs zal het temperatuursetpunt veranderen en zal de warmtepomp ofwel uitgeschakeld worden ofwel werken tegen een hogere belasting. Daar de optimale COP meestal rond 80 % van de belasting ligt, kan de dynamische sturing de COP ten goede komen. Tot slot dient opgemerkt te worden dat de dynamische strategie de activatie van de warmtepomp bevorderde naar nachtelijke periodes omwille van lage elektriciteitsprijzen. Met de sluiting van kerncentrales en verdere integratie van zonnepanelen in het vooruitzicht, kan de COP van de L/W WP verder verbeterd worden door de actieve sturing. Inderdaad, indien de elektriciteit tijdens momenten van zonneshijn goedkoper wordt dan 's nachts, zal de warmtepomp vooral overdag geactiveerd worden. Door de hogere buitentemperaturen overdag, zal de COP van de L/W WP stijgen en kunnen zonnepanelen en warmtepompen elkaar verder aanvullen.

Effect van (on)beschikbaarheid van deellastdata warmtepomp

De (on)beschikbaarheid van deellastdata van de warmtepomp werd ook nagegaan door het ontwerp van twee verschillende warmtepompmodellen. Resultaten uit voorgaande delen bevatten telkens de deellastdata op volgende punten:

- W/W WP: 30 %, 50 %, 70 %, 90 % en 100 % bij voedingstemperaturen 25 °C, 35 °C, 45 °C, 55 °C en 60 °C
- L/W WP: 25 %, 50 %, 75 % en 100 % bij voedingstemperaturen 35 °C, 45 °C, 55 °C en 60 °C

Echter wordt dergelijke data niet altijd door fabrikanten ter beschikking gesteld en is vaak enkel vollastdata ter beschikking. In deze gevallen kan enkel de vollastdata gebruikt worden en dit veronderstelt meestal een ideale modulatie van de warmtepomp, d.i. geen wijziging van de COP tijdens deellast. Om de gevoeligheid van de analyse na te gaan, werd voor het dynamisch tarief ook gebruik gemaakt van een dergelijke ideale schaling. Tabel 6 toont in het zwart de resultaten met deellastdata en in het rood de resultaten zonder gebruik van deellastdata. Hierin werden volgende variaties vastgesteld:

- dynamische energiekost van -2,59 % tot -0,43 %
- eindfactuur van -2,26 % tot +0,29 %
- elektriciteitsverbruik van -2,51 % tot +0,60 %
- COP van -0,12 % tot 2,54 %

Hieruit blijkt de nood aan de aanlevering van deellastdata bij onderzoek naar nieuwe controlestrategieën. De variatie aan mogelijke uitkomsten in zowel positieve als negatieve richting kan er bijvoorbeeld voor zorgen dat de uiteindelijke installatie meer zal verbruiken en minder efficiënt zal werken, terwijl simulatieresultaten juist anders aantoonde omwille van een gebrek aan deellastdata. Vooral de W/W WP toonde hierin belangrijke verschillen bij overgang van systemen met vloerverwarming naar radiatoren en dit omwille van de verhoogde voedingstemperatuur naar de radiatoren bij belasting in deellast. In vergelijking met de L/W WP vertoonde de W/W WP hierop sterkere reducties in de prestatiecurves.

Tot slot dient de aangeleverde data ook van voldoende temperatuurmeetpunten voorzien te worden. Dit was vooral van belang bij de L/W WP waarbij de data startte vanaf 35 °C, terwijl condensortemperaturen tot 25 °C mogelijk waren. Hierdoor komt het voordeel van gebruik van zeer lage temperatuurverwarmingssystemen minder goed tot uiting bij de L/W WP.

Tabel 6 Resultaten dynamisch tarief met gebruik deellastdata in zwart en enkel vollastdata in rood

	Vloerverwarming				Radiatoren			
	W/W WP		L/W WP		W/W WP		L/W WP	
	Ref	Flex	Ref	Flex	Ref	Flex	Ref	Flex
Dynamische energiekost (€/jaar)	202,43 201,13	177,60 176,83	296,72 295,31	264,12 261,77	292,00 284,43	262,91 256,53	333,78 331,47	304,81 302,30
Totale kost (€/jaar)	925,76 921,48	897,90 895,70	1301,33 1305,12	1259,36 1259,56	1275,19 1246,36	1238,10 1212,03	1443,88 1443,25	1401,55 1400,72
Elektrische energie (kWh/jaar)	3023 3008	3007 3000	4468 4495	4420 4433	4358 4249	4317 4216	5010 5019	4941 4950
COP (-)	5,87 5,90	5,86 5,88	3,96 3,95	3,96 3,97	4,13 4,23	4,17 4,27	3,58 3,59	3,63 3,64

Adviezen voor verder onderzoek

Naar aanleiding van de geleverde inzichten in deze studie, kunnen volgende onderwerpen verder in detail bekeken worden:

- Ontwerp van nieuwe controlestrategieën voor levering van flexibiliteitsdiensten
 - Gebruik optimalisatiesoftware voor het verder verbeteren van de strategie bij een dynamisch tarief. Optimalisatiesoftware en voorspellende software kunnen de afhankelijkheid van de prestaties van de warmtepomp bij verhoogde temperaturen in rekening brengen en kunnen ook verder rekening houden met elektriciteitsprijzen en weersomstandigheden
 - Integratie van zonnepanelen in de woning waarbij een dynamisch tarief geïmplementeerd is en tegelijk de zelfconsumptie van zonne-energie geoptimaliseerd wordt
 - analyse dynamisch tarief waarin de elektriciteitsprijs beter afhangt van de invloeden van hernieuwbare energie en minder van kernenergie
 - invoering nieuw capaciteitstarief distributienetbeheerders: integratie peak shaving-strategie ter bewaking van een achter-de-meter injectie- en afnamelimiet om de gevraagde capaciteit te beperken
 - onderzoek naar nieuwe en mogelijk efficiëntere manieren om de activatie van de warmtepomp te bevorderen tijdens momenten van lage elektriciteitsprijzen
 - Bijkomende flexibiliteit bij omkeerbare warmtepompen in koelmodus in combinatie met zonnepanelen
- Mogelijke impact van thermische zonnepanelen, zowel op economisch vlak als op vlak van netondersteunende diensten
- Betrekken van verschillende fabrikanten van warmtepompen in de analyse om een beter beeld te krijgen van de werkelijke impact van flexibiliteit op het energieverbruik van de warmtepomp

Conclusie

Deze studie onderzocht de levering van flexibiliteitsdiensten aan het elektriciteitsnet door huishoudelijke gebruikers met een warmtepomp. De onderzochte woning betrof een gerenoveerde woning met een isolatieniveau gelijkwaardig aan een nieuwbouwwoning waarbij de oude stookolieketel vervangen werd door een warmtepomp. Met betrekking tot de flexibiliteitsanalyse werden hierin twee types warmtepompen en twee verschillende verwarmingssystemen onderzocht, namelijk water/water warmtepompen of lucht/water warmtepompen en uitgerust met vloerverwarming of radiatoren. Beide types warmtepompen werden ook uitgerust met een sanitair warm water buffervat. De analyse bevatte twee verschillende flexibiliteitsdiensten, enerzijds het volgen van een dynamisch elektriciteitsstarief en anderzijds peak shaving tijdens momenten van piekbelasting op het Belgische elektriciteitsnet van 17:00 tot 20:00. Voor beide strategieën werden de thermostaatsetpunten van de installatie aangepast ter bevordering van een gewenst gedrag, terwijl de invloed op het gebruikerscomfort werd beperkt en ook werd gecontroleerd. Ter bevordering van de flexibiliteitsdiensten werd de woning opgedeeld in twee thermische zones met elk een eigen kamerthermostaat. Dit maakte het mogelijk om de woning op te delen in een leef- en slaapzone. Een dergelijke opdeling maakte een verruiming van de thermostaatgrenzen voor de slaapzone mogelijk, terwijl de leefzone binnen striktere grenzen werd gehouden.

In geval van peak shaving toonden de resultaten aan dat zowel het elektriciteitsnet als de eindgebruiker kunnen profiteren van een dergelijke flexibiliteitsdienst. Vergelijking met de referentiecases toonde aan dat een correct gekozen strategie kan zorgen dat de gemiddelde slaagkans op peak shaving tussen 17:00 en 20:00 stijgt van 64,12 % naar 96,31 %, terwijl het elektriciteitsverbruik en comfort minimaal beïnvloed worden. In sommige gevallen leidde de flexibele strategie tot een verlaging in het elektriciteitsverbruik, terwijl een voorverwarmperiode van 14:00 tot 17:00 ervoor zorgde dat de verstoring van het comfort in de woning en de voorziening van sanitair warm water minimaal bleven.

In geval van een dynamisch tarief vertoonde de analyse grotere verschillen, maar ook belangrijke kanttekeningen bij een dergelijke flexibiliteitsdienst. Het volgen van een dynamisch tarief zorgde voor een continue aanpassing van de thermostaatsetpunten en daaraan gekoppelde voedingstemperatuur. Verschillende stuurmogelijkheden werden hierin onderzocht, maar agressievere strategieën leidde veelal tot een kleine verhoging van het elektriciteitsverbruik, terwijl de dynamische energiekost wel verder verlaagd kon worden. Echter beslaat de dynamische energiekost slechts een relatief klein gedeelte van de totale elektriciteitsfactuur. Daardoor leidde een agressieve strategie wel tot een verlaging van de dynamische energiekost tot boven 12 %, maar steeg het elektriciteitsverbruik lichtjes waardoor de totale kost uiteindelijk steeg. Door gebruik van minder agressieve strategieën kon uiteindelijk het werkingsschema van warmtepomp bijna gelijkwaardig verschoven worden, maar kon het elektriciteitsverbruik zelfs verder dalen. Uiteindelijk leidde dit tot een lager elektriciteitsverbruik en een lagere dynamische energiekost, terwijl het comfort minimale veranderingen vertoonde.

Referenties

1. Jorissen F, Reynders G, Baetens R, Picard D, Saelens D, Helsen L. Implementation and verification of the IDEAS building energy simulation library. *J Build Perform Simul* [Internet]. 2018 Nov 2;11(6):669–88. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19401493.2018.1428361>
2. Jordan U, Vajen K, Braas H. DHWcalc: Tool for the Generation of Domestic Hot Water Profiles on a Statistical Basis (version 2.02b). 2017;10(March):1–14.
3. Elia. Elia Open Data Portal [Internet]. 2021. Available from: <https://opendata.elia.be/pages/home/>
4. Technical Data Vitocal 222-S Viessmann. 2019.
5. Technical Data EGSAH/X series Daikin. Oostende; 2020.
6. KMI. Klimaatstatistieken van de Belgische gemeenten. 2015;1–6.
7. Engie. Engie Dynamic [Internet]. 2021. Available from: <https://www.engie.be/nl/dynamic-tarief/>
8. Coccia G, D'Agaro P, Cortella G, Polonara F, Arteconi A. Demand side management analysis of a supermarket integrated HVAC, refrigeration and water loop heat pump system. *Appl Therm Eng*. 2019;152:543–50.