

# Simulatie-gebaseerde methode voor integratie van warmtepompen in luchtbehandelingsunits

**Jasper Van der Auwera**

Masterproef tot het behalen van een diploma Master of Science in de  
**industriële wetenschappen: elektromechanica**

Promotoren

**Ing. Jonas Cleiren**

Copromotor

**Ing. Iven Suykens**

## Voorwoord

Met het afronden van dit werk sluit ik een belangrijk hoofdstuk af in mijn academische traject als master in de industriële wetenschappen. Deze masterproef vormt niet alleen het sluitstuk van mijn opleiding, maar markeert ook een periode waarin ik als ingenieur in wording sterk gegroeid ben, zowel inhoudelijk als analytisch. Gedreven door leergierigheid en interesse in duurzame technieken, heb ik getracht om tijdens dit proces zoveel mogelijk bij te leren en kritisch te verdiepen in het onderwerp, ondanks de moeilijke start.

Dit werk had echter nooit gerealiseerd kunnen worden zonder de waardevolle steun en begeleiding van velen. In het bijzonder wil ik mijn promotor, Jonas Cleiren, oprecht bedanken voor zijn deskundige ondersteuning, motiverende begeleiding en kritische feedback tijdens elke fase van dit project. Zijn betrokkenheid en beschikbaarheid waren van onschatbare waarde.

Daarnaast ben ik ook Iven Suykens, mijn copromotor, dankbaar voor zijn inhoudelijke ondersteuning en constructieve input, die mee vorm heeft gegeven aan dit werk. Verder gaat mijn dank uit naar de professoren en medewerkers van de onderzoeksgroep EMIB voor hun nuttige suggesties en begeleiding gedurende het hele proces.

Een bijzondere dank wil ik ook uitspreken aan het volledige team van Hysopt, en in het bijzonder aan Igor Kovacevic, voor de intensieve begeleiding tijdens het modelleren en simuleren. Zijn technische inzichten, praktijkervaring en bereidheid om kennis te delen hebben mijn leerproces aanzienlijk verrijkt. De samenwerking met Hysopt bood me niet alleen toegang tot een krachtige simulatietool, maar ook tot een stimulerende leeromgeving waarin ik mijn vaardigheden verder kon verdiepen.

Tot slot wil ik mijn familie en vrienden bedanken voor hun steun doorheen heel dit academiejaar.

## Abstract

De transitie naar  $CO_2$ -vrije gebouwen vereist de elektrificatie van verwarmings- en ventilatiesystemen, met warmtepompen als sleuteltechnologie. De integratie van warmtepompen in bestaande luchtbehandelingsunits, met name in niet-residentiële gebouwen, blijft echter een uitdaging vanwege bestaande ontwerpen die afgestemd zijn op warmtebronnen met hoge temperaturen. Deze studie stelt een simulatiegebaseerde methodologie voor om de integratie van laagtemperatuur-warmtepompsystemen in dergelijke renovatiescenario's systematisch te beoordelen en te optimaliseren.

Een referentiegebouw met een conventioneel luchtbehandelingsunit-ontwerp wordt gemodelleerd in Hysopt om de gangbare ontwerpfilosofie, zoals bepaald door Europese normen en lokale regelgeving, weer te geven. Vanuit deze uitgangssituatie wordt een parametrisch kader ontwikkeld om de gevoeligheid van de systeemprestaties voor belangrijke invloedsfactoren te evalueren, waaronder de isolatiegraad van de gebouwschil, ventilatiebehoeften, configuraties voor warmteterugwinning, ontwerp-inblaastemperatuur en de hydraulische dimensionering van de verwarmingsbatterijen. De analyse maakt gebruik van dynamische simulaties om de impact van ontwerpkeuzes op seizoensgebonden prestatie-indicatoren zoals de Seasonal Coefficient of Performance (SCOP),  $CO_2$ -uitstoot en operationele kosten te kwantificeren.

De resultaten tonen aan dat de systeemprestaties sterk afhankelijk zijn van de interactie tussen isolatiegraad van het gebouw, de kenmerken van het afgiftesysteem, de aanwezigheid van warmterecuperatie en de regelstrategie. Zo tonen de resultaten aan dat binnen een warmtepompconfiguratie de toevoeging van ontwerpmaatregelen zoals vraaggestuurde ventilatie, warmterecuperatie, een verhoogde UA-waarde en een verbeterde gebouwschil kan leiden tot een reductie van 52% in operationele kosten en  $CO_2$ -uitstoot. Optimale prestaties vereisen bovendien een iteratieve verfijning van zowel de luchtzijdige als waterzijdige subsystemen. De studie toont aan dat statische, eenmalige ontwerpbenaderingen het risico op suboptimale integratie verhogen. Iteratieve, simulatiegestuurde processen maken daarentegen oplossingen mogelijk die de efficiëntie van warmtepompen verbeteren en het binnencomfort waarborgen.

Dit werk levert een gestructureerde methodologie aan die ontwerpbeslissingen in HVAC-renovatieprojecten met warmtepompen ondersteunt. Met een generieke maar aanpasbare simulatiebenadering wordt het mogelijk om de haalbaarheid van retrofittoepassingen onderbouwd te evalueren. Dit levert een concrete bijdrage aan de verduurzaming van het niet-residentiële gebouwenbestand.

# Inhoudsopgave

|       |                                                                                           |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Inleiding.....                                                                            | 9  |
| 1.1   | Situering klimaatdoelstellingen.....                                                      | 9  |
| 1.1.1 | Trias Energetica .....                                                                    | 9  |
| 1.2   | Toelichting onderzoek .....                                                               | 10 |
| 1.2.1 | Concept HVAC-installaties in niet-residentiële kantoorgebouwen.....                       | 11 |
| 1.2.2 | Dimensionering conventionele installaties.....                                            | 11 |
| 1.2.3 | Elektrificatie conventionele ventilatie- en verwarmingsinstallaties .....                 | 12 |
| 1.3   | Probleemstelling.....                                                                     | 13 |
| 1.4   | Doelstelling.....                                                                         | 14 |
| 1.5   | Methodologische aanpak .....                                                              | 15 |
| 2     | Literatuurstudie .....                                                                    | 16 |
| 2.1   | State of the art .....                                                                    | 16 |
| 2.1.1 | Conclusie voorafgaande studies.....                                                       | 18 |
| 2.2   | Exploratie van mogelijke concepten .....                                                  | 18 |
| 2.2.1 | Warmtepompen in renovatiecontext.....                                                     | 19 |
| 2.2.2 | Distributie.....                                                                          | 22 |
| 2.2.3 | Warmtewisselaars binnen luchtbehandelingsunits .....                                      | 23 |
| 2.2.4 | Verwarmingsbatterij.....                                                                  | 23 |
| 2.2.5 | Warmterecuperatie .....                                                                   | 24 |
| 2.3   | Modellen rond verwarmingsbatterijen in luchtbehandelingsunits .....                       | 25 |
| 2.3.1 | Bepaling batterijen .....                                                                 | 25 |
| 3     | Ontwerpproces ventilatie- en verwarmingsinstallaties voor niet-residentiële gebouwen..... | 29 |
| 3.1   | Richtlijnen ontwerpproces ventilatie .....                                                | 29 |
| 3.2   | Richtlijnen ontwerpproces centrale verwarming.....                                        | 30 |
| 3.3   | Noodzaak dynamische simulaties en herevaluatie van ontwerpkeuzes.....                     | 34 |
| 3.3.1 | Hysopt-software .....                                                                     | 38 |
| 4     | Methode.....                                                                              | 39 |
| 4.1   | Concept case .....                                                                        | 39 |
| 4.1.1 | Randvoorwaarden referentiecasi.....                                                       | 41 |
| 4.2   | Warmtepomp integratie bij hoge temperatuurregime (60/50°C) .....                          | 43 |
| 4.2.1 | Bijkomende randvoorwaarden warmtepomp integratie .....                                    | 43 |
| 4.3   | Overzicht invloedsparameters .....                                                        | 45 |
| 4.3.1 | Isolatiegraad gebouwschil.....                                                            | 46 |
| 4.3.2 | Vraaggestuurde ventilatie-systemen – VAV (type D+) .....                                  | 47 |
| 4.3.3 | Warmteterugwinning/recuperatie - WTW .....                                                | 50 |
| 4.3.4 | Verhoging UA-waarde verwarmingsbatterij in luchtbehandelingsunit.....                     | 50 |
| 4.3.5 | Ontwerpdebiet op basis van gewenste luchttemperatuur .....                                | 51 |

|       |                                                                                                 |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4   | Key Performance Indicators .....                                                                | 52 |
| 5     | Resultaten en analyse .....                                                                     | 54 |
| 5.1   | Resultaten referentiecasse: conventionele ketelinstallatie .....                                | 54 |
| 5.2   | Deel 1: Sensitiviteitsstudie op basis van een minimaal ontwerp ventilatiedebiet .....           | 55 |
| 5.2.1 | Toepassing vraaggestuurde ventilatie type D+ .....                                              | 56 |
| 5.2.2 | Toepassing warmterecuperatie in luchtbehandelingsunit .....                                     | 56 |
| 5.2.3 | Capaciteit verwarmingsbatterij in luchtbehandelingsunit .....                                   | 57 |
| 5.2.4 | Vergelijking invloedsparameters .....                                                           | 58 |
| 5.2.5 | Gecombineerde toepassing invloedsparameters .....                                               | 59 |
| 5.2.6 | Impact verhoging isolatiegraad .....                                                            | 60 |
| 5.2.7 | Overzicht invloedsparameters deel 1 van de sensitiviteitsstudie .....                           | 61 |
| 5.3   | Deel 2 sensitiviteitsstudie: ontwerpdebiet op basis van gewenste inblaas luchttemperatuur ..... | 64 |
| 5.3.1 | Impact wijziging ontwerpdebiet .....                                                            | 64 |
| 5.3.2 | Analyse simulaties deel 2 .....                                                                 | 65 |
| 5.4   | Vergelijking tussen deel 1 en deel 2 .....                                                      | 67 |
| 6     | Conclusie en toekomstig onderzoek .....                                                         | 69 |
| 7     | Bibliografie .....                                                                              | 71 |
| 8     | Appendix .....                                                                                  | 74 |
| 8.1   | Validatie bestaande literatuurmodellen .....                                                    | 74 |
| 8.2   | Methode validatie .....                                                                         | 74 |
| 8.2.1 | Methode 1: UA water en lucht alle metingen .....                                                | 76 |
| 8.2.2 | Methode 2: UA water en lucht zonder minimale luchtdebietmetingen .....                          | 77 |
| 8.2.3 | Methode 3: UA water zonder minimale luchtdebietmetingen .....                                   | 78 |
| 8.2.4 | Conclusie validatie .....                                                                       | 79 |
| 8.3   | Model Referentiecasse ketel .....                                                               | 82 |
| 8.4   | Model warmtepomp uitgangspunt sensitiviteitsanalyse .....                                       | 83 |

## Symbolen

| Symbol        | Betekenis en eenheid                  |
|---------------|---------------------------------------|
| $\dot{Q}$     | Thermisch vermogen [W]                |
| $T$           | Temperatuur [°C of K]                 |
| $\Delta T$    | Temperatuurverschil [K]               |
| $\dot{V}$     | Volumedebiet [m³/s]                   |
| $\dot{m}$     | Massadebiet [kg/s]                    |
| $c$           | Soortelijke warmtecapaciteit [kJ/kgK] |
| $\dot{C}$     | Warmtecapaciteit [kJ/sK]              |
| $U$           | Warmtedoorgangscoefficient [W/m²K]    |
| $A$           | Oppervlakte [m²]                      |
| $UA$          | Geleidbaarheid [W/K]                  |
| $\Delta p$    | Drukval [Pa]                          |
| $\varepsilon$ | Effectiviteit                         |
| $NTU$         | Number of transfer units              |
| $\rho$        | Dichtheid [kg/m³]                     |
| $E$           | Thermische energie [J]                |
| $v$           | Stroomsnelheid [m/s]                  |
| $H$           | Opvoerhoogte [m]                      |

## Afkortingen

| Afkorting             | Betekenis                                |
|-----------------------|------------------------------------------|
| <i>L/W warmtepomp</i> | Lucht-water warmtepomp                   |
| <i>LMTD</i>           | Logarithmic Mean Temperature Difference  |
| <i>CO<sub>2</sub></i> | Koolstofdioxide                          |
| <i>CV</i>             | Centrale verwarming                      |
| <i>HVAC</i>           | Heating Ventilation and Air Conditioning |
| <i>KPI</i>            | Key Performance Indicator                |
| <i>SWW</i>            | Sanitair warm water                      |
| <i>OPEX</i>           | Operating Expenditures                   |
| <i>CAPEX</i>          | Capital Expenditures                     |

## Figurenlijst

|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figuur 1: Typisch energieverbruik overzicht in niet-residentiële gebouwen.....                                                                                                                                                                                                         | 9  |
| Figuur 2: Trias Energetica, aanpak voor het behalen van de klimaatdoelstellingen.....                                                                                                                                                                                                  | 10 |
| Figuur 3: Voorstelling energievoorziening niet-residentiële gebouwen met hybride warmteafgifte configuratie van luchtbehandelingsunit en end-users zoals radiatoren.....                                                                                                               | 11 |
| Figuur 4: Conventionele HVAC installaties worden traditioneel ontworpen op basis van hoge temperatuurregimes, binnen het kader van een ketelconfiguratie.....                                                                                                                          | 12 |
| Figuur 5: Integratie van warmtepompsysteem in conventionele installaties.....                                                                                                                                                                                                          | 13 |
| Figuur 6: Visualisatie doelstelling inclusief de verschillende drijfveren en uitdagingen voor de integratie van warmtepompen in ventilatiesystemen.....                                                                                                                                | 14 |
| Figuur 7: Aantal uitgevoerde studies met betrekking tot verduurzaming en verbetering van de energie-efficiëntie, waarbij de meest uitgevoerde strategieën worden weergegeven.....                                                                                                      | 16 |
| Figuur 8: Opbouw 2.2 exploratie van de concepten.....                                                                                                                                                                                                                                  | 18 |
| Figuur 9: Diagram principe warmtepomp.....                                                                                                                                                                                                                                             | 19 |
| Figuur 10: Negatief kringproces van warmtepomp, waarbij Q1 de geleverde warmte voorstelt en A de arbeid die nodig is om deze om deze warmte te genereren.....                                                                                                                          | 21 |
| Figuur 11: Berekening voor SCOP volgens norm EN 14 825, waarbij deze standaardmethode drie klimaatzones gebruikt, rekening houdend met deellastomstandigheden.....                                                                                                                     | 22 |
| Figuur 12: Drie soorten schakelingen: verdeelschakelings, mengschakeling en smoorschakeling.....                                                                                                                                                                                       | 22 |
| Figuur 13: Verduidelijkende nomenclatuur tegenstroom warmtewisselaar met bijhorende parameters en variabelen.....                                                                                                                                                                      | 25 |
| Figuur 14: Traditionele richtlijnen voor het ontwerpproces van CV weergegeven in een flowchart.....                                                                                                                                                                                    | 31 |
| Figuur 15: Warmtebalans van een kamer/ruimte.....                                                                                                                                                                                                                                      | 32 |
| Figuur 16: Retrofit ontwerpproces ventilatie en CV-installatie met noodzakelijke aanvullingen.....                                                                                                                                                                                     | 36 |
| Figuur 17: De drie hoofdcategorieën van KPI's die worden gebruikt in pareto analysis van Hysopt om verschillende concepten op gelijkwaardige manier met elkaar te vergelijken.....                                                                                                     | 38 |
| Figuur 18: Conceptbeschrijving referentiecasi. De verse buitenlucht wordt geconditioneerd door een luchtbehandelingsunit, waarbij de ruimteverwarming wordt gerealiseerd door hybride afgiftestrategie.....                                                                            | 39 |
| Figuur 19: Installatie concept referentiecasi in Hysopt, waarbij de ruimteverwarming wordt gerealiseerd door een lucht- en water systeem.....                                                                                                                                          | 41 |
| Figuur 20: Plattegrond kantoor gebouw fictieve referentiecasi.....                                                                                                                                                                                                                     | 42 |
| Figuur 21: Installatie concept lucht-water warmtepomp integratie in Hysopt, waarbij de ruimteverwarming wordt gerealiseerd door een lucht- en water systeem.....                                                                                                                       | 43 |
| Figuur 22: Methode van dit onderzoek, waarbij een referentiecasi wordt opgesteld a.d.h.v. het huidige ontwerpproces om vervolgens te onderzoeken welke invloedsparameters de grootste impact hebben op een efficiënte integratie van warmtepompsystemen in bestaande installaties..... | 45 |
| Figuur 23: Dynamisch bezettingsprofiel kantoor 1 en 2, wat de procentuele bezetting van de desbetreffende ruimtes weerspiegelt geurende een hele dag.....                                                                                                                              | 48 |
| Figuur 24: Dynamisch bezettingsprofiel vergaderzaal, wat de procentuele bezetting van de desbetreffende ruimtes weerspiegelt geurende een hele dag.....                                                                                                                                | 48 |
| Figuur 25: Dynamisch bezettingsprofiel koffieruimte, wat de procentuele bezetting van de desbetreffende ruimtes weerspiegelt geurende een hele dag.....                                                                                                                                | 49 |
| Figuur 26: Dynamisch bezettingsprofiel koffieruimte, wat de procentuele bezetting van de desbetreffende ruimtes weerspiegelt geurende een hele dag.....                                                                                                                                | 49 |
| Figuur 27: Begrenzing lucht inblaastemperatuur luchtbehandelingsunit.....                                                                                                                                                                                                              | 52 |
| Figuur 28: Visualisatie van de SCOP op basis van de gehanteerde waterzijdige regimes uit tabel 18.....                                                                                                                                                                                 | 64 |
| Figuur 29: Visualisatie van de SCOP op basis van de gehanteerde waterzijdige regimes uit tabel 20.....                                                                                                                                                                                 | 68 |

## Tabellenlijst

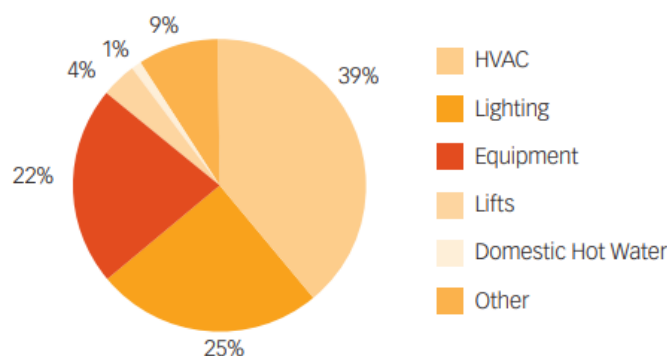
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1: Hoofdbeperkingen met betrekking tot het uitvoeren van retrofitstrategieën met oog op verduurzaming van bestaande gebouwen.....                                                                                                                                                                                                            | 17 |
| Tabel 2: Vergelijking tussen kruisstroomplatenwarmtewisselaar en warmtewiel.....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 24 |
| Tabel 3: Effectiviteit voor gelijkstroom, tegenstroom en kruisstroom warmtewisselaars.....                                                                                                                                                                                                                                                         | 27 |
| Tabel 4: U-waarden gebouwschil volgens EPB-eisen.....                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 41 |
| Tabel 5: Totaal verwarmingsvermogen per ruimte referentie case bij gehanteerde comforttemperaturen.....                                                                                                                                                                                                                                            | 42 |
| Tabel 6: Randvoorwaarden en resultaten referentiecasse met conventionele gasketel t.o.v. dezelfde case waar de ketel wordt vervangen door een lucht-water warmtepomp.....                                                                                                                                                                          | 44 |
| Tabel 7: Overzicht van de gehanteerde invloedsparameters voor de sensitiviteitsstudie van de 48 simulaties.....                                                                                                                                                                                                                                    | 46 |
| Tabel 8: Variaties U-waarden van de gebouwschil toegepast in de simulaties.....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 47 |
| Tabel 9: CO <sub>2</sub> -uitstoot in [kg/kWh], waarden bekomen voor gas en elektriciteit.....                                                                                                                                                                                                                                                     | 53 |
| Tabel 10: Tarieven gas en elektriciteit gehanteerd in de simulatierapporten Hysopt.....                                                                                                                                                                                                                                                            | 54 |
| Tabel 11: De vergelijking wordt gemaakt tussen de referentiecasse 1 met conventionele ketel en de vervanging van deze productie-eenheid met een lucht-water warmtepomp.....                                                                                                                                                                        | 56 |
| Tabel 12: Vergelijking tussen de referentiecasse WP 1 waar de ketel één-op-één wordt vervangen door een lucht-water warmtepomp en de case waar een vraaggestuurd ventilatiesysteem (type D+) wordt toegepast.....                                                                                                                                  | 57 |
| Tabel 13: Vergelijking tussen de referentiecasse WP waar de ketel één-op-één wordt vervangen door een lucht-water warmtepomp en de case waar een WTW-unit wordt toegepast.....                                                                                                                                                                     | 58 |
| Tabel 14: Vergelijking tussen de referentiecasse WP waar de ketel één-op-één wordt vervangen door een lucht-water warmtepomp en de case waar de UA-waarde wordt verhoogd ten opzichte van de oorspronkelijke verwarmingsbatterij.....                                                                                                              | 59 |
| Tabel 15: Resultaten sensitiviteitsstudie waarbij initieel bij “referentie WP” de ketel wordt vervangen door een lucht-water warmtepomp en vervolgens de impact van het ventilatietype; warmteterugwinning (WTW) en een verhoogde UA-waarde van de verwarmingsbatterij weerspiegeld. “E en € besparing” staat voor energie en kostenbesparing..... | 59 |
| Tabel 16: Resultaten sensitiviteitsstudie waarbij de impact van ventilatietype D+, een WTW-unit en een verhoogde UA waarde van de verwarmingsbatterij gecombineerd wordt onderzocht, zonder het wijzigen van de U-waarden van de gebouwschil.....                                                                                                  | 60 |
| Tabel 17: Impact van wijziging op niveau van de gebouwschil, waarbij er 3 scenario's worden onderzocht: hoge U-waarden volgens maximaal opgelegde waarden in EPB-regelgeving toegepast in de referentiecasse WP1, gemiddelde en lage U waarden.....                                                                                                | 61 |
| Tabel 18: Resultaten voor eerste 24 scenario's waarbij ontwerpdebiet wordt bepaald op basis van een minimaal ventilatiedebiet in functie van het aantal aanwezige personen in de ruimtes.....                                                                                                                                                      | 63 |
| Tabel 19: Vergelijking tussen de referentiecasse WP 1 van deel 1 en referentiecasse WP 2, waarbij het ontwerp ventilatiedebiet niet langer wordt bepaald op basis van een minimaal debiet in functie van het aantal aanwezige personen, maar op basis van een gewenste inblaastemperatuur.....                                                     | 66 |
| Tabel 20: Resultaten voor overige 24 scenario's waarbij het ontwerpdebiet wordt bepaald in functie van een gewenste inblaastemperatuur.....                                                                                                                                                                                                        | 67 |
| Tabel 21: Vergelijking tussen case 24 van deel 1 en case 48 van deel 2 in de sensitiviteitsstudie.....                                                                                                                                                                                                                                             | 69 |

# 1 Inleiding

## 1.1 Situering klimaatdoelstellingen

Wereldwijd vindt een energietransitie plaats naar hernieuwbare energiebronnen om de effecten van klimaatopwarming tegen te gaan [1]. De nood aan duurzame oplossingen wordt steeds dringender, aangezien de uitstoot van broeikasgassen, met CO<sub>2</sub> als belangrijkste component, blijft toenemen. Zonder doortastende maatregelen dreigt het klimaat op een onomkeerbare manier te veranderen [2].

In Europa zijn de gebouwen momenteel verantwoordelijk voor ongeveer 40% van het totale energieverbruik en dragen deze aanzienlijk bij aan de uitstoot van broeikasgassen [3,4]. Binnen deze gebouwen bestaat Heating, Ventilation en Air-Conditioning (HVAC) dan weer voor 40% van de totale energievraag, zoals geïllustreerd in figuur 1 [3]. Binnen deze context vormt het energieverbruik van HVAC-systemen in zowel residentiële als niet-residentiële gebouwen één van de meest bepalende factoren, wat de noodzaak onderstreept om de energie-efficiëntie te verbeteren en de productie van duurzame energie te vergroten om de EU-klimaatdoelstellingen te behalen.

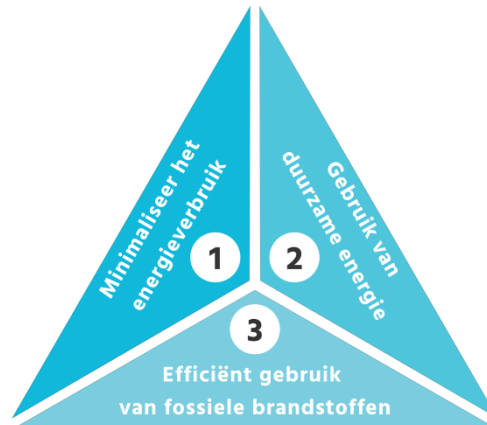


Figuur 1: Typisch energieverbruik overzicht in niet-residentiële gebouwen [5]

Volgens het Internationaal Energie Agentschap (IEA) moet tegen 2050 meer dan 85% van alle gebouwen koolstofvrij zijn om de doelstellingen omtrent het beperken van de opwarming van de aarde te behalen. Hiernaast werd door het Europese klimaatbeleid ook beslist dat vanaf 2030 alle nieuwe gebouwen emissievrij moeten zijn, en dat de 26% slechtst presterende niet-residentiële gebouwen moeten gerenoveerd worden tegen 2033 [3,4]. De warmtepomp wordt algemeen beschouwd als een veelbelovende technologie voor het behalen van deze doelstellingen [6].

### 1.1.1 Trias Energetica

In het streven naar een duurzame toekomst vormt het principe van de Trias Energetica een concrete aanpak. Dit denkkader vormt een driedig stappenplan, waarbij het belangrijk is om de energie-afhankelijkheid te verkleinen, door bijvoorbeeld beter te isoleren en zo dus de energievraag te beperken. De energie die opgewekt wordt, dient zoveel mogelijk geproduceerd te worden met duurzame alternatieven, waarbij deze energie zo efficiënt mogelijk gebruikt dient te worden. Deze driedigedige aanpak wordt weergegeven in figuur 2.



*Figuur 2: Trias Energetica, aanpak voor het behalen van de klimaatdoelstellingen [7]*

Het beperken van de energievraag is belangrijk om toe te passen in sectoren of grote energieverbruikers. Zoals besproken waren gebouwen verantwoordelijk voor ongeveer 40% van het totale energieverbruik, waarbij de meeste energievraag komt van bestaande gebouwen, aangezien nieuwbouw in verschillende landen maar 1-3% van de gebouwen vertegenwoordigt [8]. Het hele gebouw dient bij te dragen aan een zo efficiënt mogelijk energieverbruik, waarbij duurzame en hernieuwbare energiebronnen zoveel mogelijk dienen ingezet te worden.

Hoewel het reduceren van de energievraag (eerste stap in de Trias Energetica) essentieel blijft, richt dit onderzoek zich voornamelijk op de tweede stap van de Trias Energetica: het zo efficiënt mogelijk inzetten van duurzame energiebronnen. In het bijzonder wordt gefocust op de elektrificatie van ventilatie- en verwarmingssystemen in niet-residentiële gebouwen, met oog op de integratie van warmtepompsystemen.

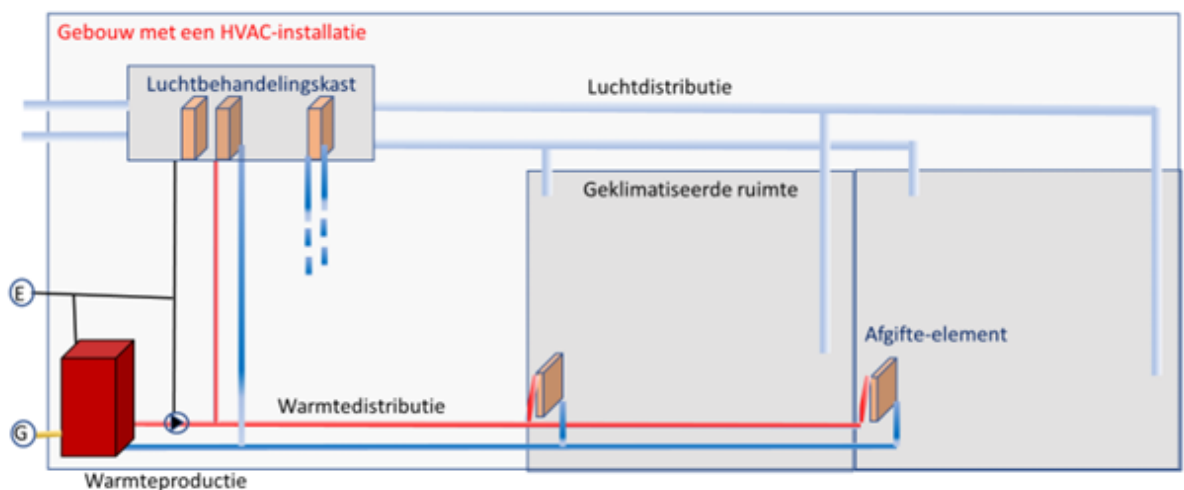
Elektrificatie wordt hierbij algemeen beschouwd als de belangrijkste strategie om de uitstoot van broeikasgassen in de gebouwensector te reduceren en efficiënter met het energieverbruik om te gaan [1, 4, 9 - 11].

## 1.2 Toelichting onderzoek

Deze thesis maakt deel uit van het DIMPROVENT-project, een TETRA-project dat zich hoofdzakelijk richt op de verduurzaming van ventilatiesystemen. Binnen dit kader focust dit onderzoek zich op de verduurzaming van ventilatie- en verwarmingssystemen in niet-residentiële gebouwen, waarbij efficiënte implementatie van warmtepompsystemen centraal staat als sleuteltechnologie voor het realiseren van een energiezuinige en toekomstgerichte installatie. Dit project beoogt ontwerprichtlijnen op te stellen voor efficiënte integratie van deze duurzame productie-eenheden in bestaande niet-residentiële gebouwen. Hiervoor wordt de problematiek en complexiteit, die optreedt bij het implementeren van warmtepompsystemen in huidige installaties, verder besproken.

### 1.2.1 Concept HVAC-installaties in niet-residentiële kantoorgebouwen

De warmtevraag in niet-residentiële gebouwen wordt doorgaans ingevuld via een hybride afgiftestrategie, waarbij zowel luchtbehandelingsunits als conventionele eindgebruikers instaan voor ruimteverwarming [12]. In deze gebouwen worden ventilatie- en verwarmingssystemen doorgaans sequentieel en los van elkaar ontworpen [13, 14]. De warmteproductie vindt meestal centraal plaats, typisch via conventionele opwekkingseenheden zoals gasgestookte ketels. De warmteafgifte daarentegen gebeurt vaak via een hybride configuratie, waarbij enerzijds verwarmingsbatterijen in de luchtbehandelingsunits (AHU's) worden ingezet, terwijl anderzijds lokale end-users zoals radiatoren instaan voor ruimteverwarming in de afzonderlijke thermische zones, zoals geïllustreerd in figuur 3 [12]. In bestaande gebouwen treft men typisch een configuratie aan waarin de end-users bestaan uit klassieke radiatoren, die vaak zijn overgedimensioneerd wat leidt tot een lagere efficiëntie [12].



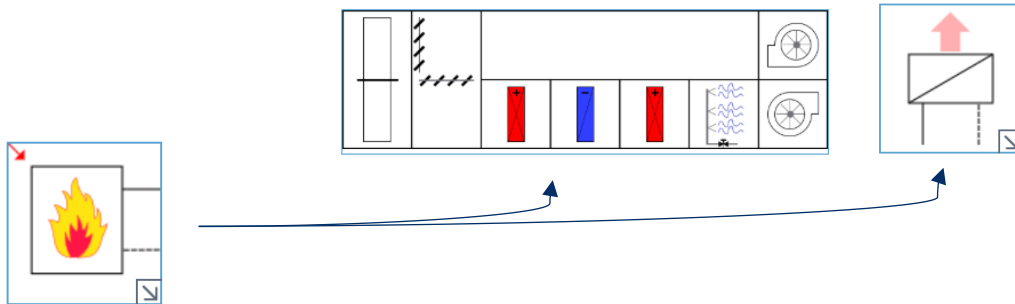
*Figuur 3: Voorstelling energievoorziening niet-residentiële gebouwen met hybride warmteafgifte configuratie van luchtbehandelingsunit en end-users zoals radiatoren [15]*

In elk gebouw is er ook nood aan ventilatie. Ventilatie is essentieel voor het garanderen van zowel thermisch comfort als een adequate binnenluchtkwaliteit [16]. Naast de verwarmingsfunctie dient de luchtbehandelingsunit binnenlucht te conditioneren en te verdelen volgens vooraf vastgelegde kwaliteits- en comfortnormen. Binnen deze units worden verschillende luchtbehandelingsprocessen gecombineerd in één geïntegreerd systeem, waardoor ze een centrale rol spelen in zowel thermisch comfort als binnenluchtkwaliteit. Deze units zijn uitgerust met componenten zoals bijvoorbeeld ventilatoren, filters, verwarmings- en koelbatterijen (coils), bevochtigingselementen en eventueel warmteterugwinningssystemen [12, 15].

### 1.2.2 Dimensionering conventionele installaties

Een belangrijk aspect binnen het ontwerp van deze systemen is de dimensionering van de verwarmingselementen, die vaak op basis van conventionele ketels werd gebaseerd, zoals geïllustreerd in figuur 4. Deze aanpak heeft geleid tot vaste ontwerppraktijken met hoge temperatuurregimes, die vandaag onder druk komen te staan in de context van de verduurzaming van ventilatie-systemen en integratie van warmtepompen [17,18]. Traditioneel worden verwarmingsinstallaties ontworpen om te functioneren binnen hoge temperatuurregimes, doorgaans

voor watertemperaturen van 60 tot 80°C onder ontwerpcondities, in lijn met het conventionele gebruik van gasketels als warmtebron [6].



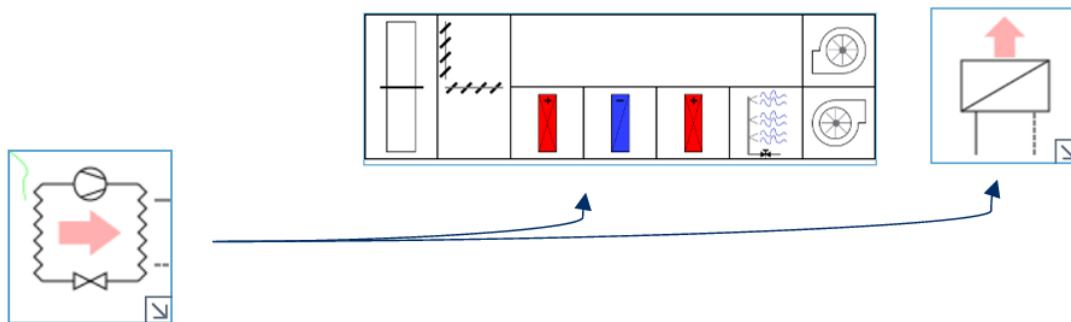
*Figuur 4: Conventionele HVAC installaties worden traditioneel ontworpen op basis van hoge temperatuurregimes, binnen het kader van een ketelconfiguratie*

### 1.2.3 Elektrificatie conventionele ventilatie- en verwarmingsinstallaties

Dit onderzoek richt zich op de tweede stap van de Trias Energetica: het zo efficiënt mogelijk inzetten van duurzame energiebronnen. Het volledig decarboniseren van deze systemen vereist elektrificatie van het verwarmings- en ventilatiesysteem, met oog op de integratie van warmtepompsystemen.

Hoewel er meerdere vormen van elektrificatie technisch mogelijk zijn, zoals elektrische weerstandsketels die initieel haalbaar lijken door hun lagere initiële kosten en plaatsbeperking, resulteert deze keuze volgens P. Raftery et al. [12] in aanzienlijk hogere operationele kosten en een toename van de totale  $CO_2$ -emissie. Daarom wordt de warmtepomp gezien als een van de meest geschikte duurzame productie-eenheden bij de elektrificatie van deze conventionele installaties, aangezien zij efficiënter functioneren [8].

In de literatuur ontbreken uitgebreide richtlijnen over de integratie van warmtepompen in bestaande installaties, wat voor veel ontwerpdiscussies zorgt [19]. Oude gebouwen en hun hydraulische systemen zijn vaak ontworpen op basis van hoge temperatuurregimes met het gebruik van traditionele ketels. De randvoorwaarden van traditionele gebouwen, besproken in 1.2.2, van hydronische verwarming zijn ook van belang voor deze warmtepomp integratie. Warmtepompen functioneren aanzienlijk efficiënter bij lagere aanvoerwatertemperaturen en  $\Delta T$ 's van idealiter 5-10K [19, 20]. De meeste warmtepompen hebben hiernaast ook een bovengrens voor de aanvoertemperatuur. Typisch bedraagt deze begrensde aanvoertemperatuur voor lucht-water warmtepompen ongeveer 55°C [12]. Deze mismatch tussen de huidige ontwerprijchlijnen en de randvoorwaarden van warmtepompen resulteert in diverse technische problemen en economische uitdagingen, aangezien de warmteafgiftesystemen werden ontworpen op basis van die hoge watertemperaturen [21]. Het temperatuurregime verlagen betekent dat de bestaande afgiftesystemen, waaronder de verwarmingsbatterijen en radiatoren mogelijks niet meer voldoende vermogen afgeven en hun capaciteit dus onvoldoende groot is voor de desbetreffende installatie.



*Figuur 5: Integratie van warmtepompsysteem in conventionele installaties*

### 1.3 Probleemstelling

Warmtepompen worden vandaag beschouwd als een sleuteltechnologie voor de verduurzaming van de verwarmings- en ventilatiesystemen en spelen een centrale rol in de verduurzaming van gebouwen. Toch blijft de integratie ervan in bestaande installaties bijzonder complex. Bestaande installaties zijn doorgaans ontworpen op basis van hoge temperatuurregimes, afgestemd op conventionele warmteopwekkers zoals gasketels. Warmtepompen vereisen echter fundamenteel andere randvoorwaarden om efficiënt te functioneren, waaronder lage aanvoertemperaturen en compatibele afgiftesystemen. Deze tegenstelling leidt tot een systeemtechnische mismatch die de prestaties van warmtepompen in renovatiecontext sterk kan beperken [22].

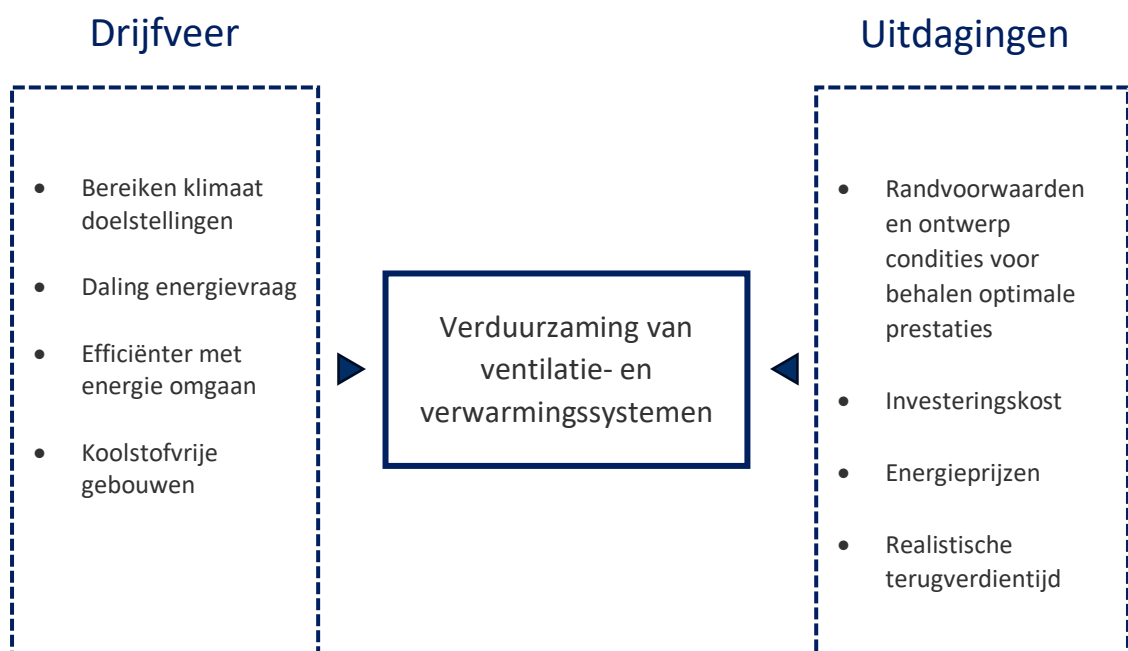
Hierdoor ontbreekt in de praktijk vaak de nodige methodologische ondersteuning om een warmtepomp op een technisch verantwoorde en energie-efficiënte manier te integreren. Installateurs en ingenieurs worden geconfronteerd met uiteenlopende ontwerpkeuzes, maar beschikken niet over duidelijk ontwerprichtlijnen om deze keuzes onderbouwd te maken. Deze leemte in richtlijnen en ontwerpkenis bemoeilijkt het inschatten of een warmtepomp in een specifieke situatie daadwerkelijk een geschikte oplossing vormt. Om warmtepompen op een doeltreffende manier te kunnen implementeren in bestaande installaties, is een herziening van het ontwerpproces noodzakelijk, aangevuld met heldere en gevalideerde ontwerp- en beslissingsrichtlijnen die contextspecifieke en performante keuzes ondersteunen.

## 1.4 Doelstelling

Dit onderzoek heeft als doel om praktisch toepasbare retrofit ontwerprichtlijnen te ontwikkelen voor de integratie van warmtepompen in bestaande ventilatie- en verwarmingsinstallaties van niet-residentiële gebouwen. De term retrofit staat voor het uitvoeren van wijzigingen en aanpassingen van componenten van een gebouw zoals een verwarmingsinstallatie of aan het gebouw zelf met als doel het verbeteren van de energie-prestaties en duurzaamheid van het gebouw [23]. Aangezien warmtepompen andere randvoorwaarden bevatten, leidt hun toepassing tot een fundamentele systeemismatch met de bestaande afgiftecomponenten, wat de noodzaak onderstreept voor een aangepaste ontwerprichtlijnen.

De eerste doelstelling van dit onderzoek is het systematisch in kaart brengen van de complexiteit die gepaard gaat met warmtepompintegratie in een retrofitcontext. Daarbij wordt nagegaan welke ontwerpkeuzes en systeemparemeters bepalend zijn voor het correct functioneren van een warmtepomp, en welke aanpassingen aan het traditionele ontwerpproces nodig zijn om tot een zo performant mogelijk scenario te komen.

De tweede doelstelling bestaat erin om op basis van deze analyse onderbouwde ontwerprichtlijnen en een beslissingskader te formuleren, die installateurs en ingenieurs kunnen ondersteunen bij het maken van contextspecifieke ontwerpkeuzes. Deze richtlijnen moeten toelaten om, binnen de beperkingen van bestaande installaties, het meest performante en toekomstgerichte systeemconcept te identificeren. In Figuur 6 wordt de centrale doelstelling schematisch weergegeven aan de hand van de belangrijkste drijfveren en ontwerpuitdagingen binnen dit onderzoek.



*Figuur 6: Visualisatie doelstelling inclusief de verschillende drijfveren en uitdagingen voor de integratie van warmtepompen in ventilatiesystemen*

## 1.5 Methodologische aanpak

Dit onderzoek beoogt de ontwikkeling van praktisch toepasbare retrofit ontwerprichtlijnen voor de integratie van warmtepompen in bestaande verwarmings- en ventilatiesystemen van niet-residentiële gebouwen. Om dit systematisch te onderbouwen en te vertalen naar toepasbare ontwerpkeuzes, wordt de volgende aanpak gevolgd:

In een eerste fase wordt aan de hand van een **literatuuronderzoek** in kaart gebracht welke onderzoeken reeds uitgevoerd zijn rond de elektrificatie en verduurzaming van bestaande HVAC-installaties. Daarbij wordt specifiek gekeken naar de complexiteit van warmtepompen bij integratie in bestaande systemen en naar de mogelijke concepten die hiervoor bestaan.



Vervolgens wordt het gangbare **ontwerpproces** voor ventilatie- en verwarmingssystemen in niet-residentiële gebouwen gereconstrueerd, waarbij de noodzaak voor een retrofit ontwerpproces wordt aangehaald. In de praktijk wordt hierbij vaak slechts één ontwerpvoorstel uitgewerkt, waarbij een systematische aanpak via dynamische simulaties doorgaans ontbreekt. Daardoor blijft onduidelijk of de gekozen configuratie ook effectief het meest performante ontwerp oplevert voor de specifieke gebouwsituatie.



Vervolgens wordt een fictieve **case** opgesteld volgens de traditionele ontwerpaanpak, waarbij gebruik wordt gemaakt van een conventionele warmteopwekker zoals een ketel en een hoog temperatuurregime. Deze configuratie weerspiegelt de gangbare praktijk in bestaande installaties. Deze fase maakt het mogelijk om de systematiek en impliciete aannames van het huidige ontwerpproces kritisch te analyseren.



De kern van dit onderzoek bestaat uit een uitgebreide **sensitiviteitsstudie** waarin, vertrekkend van de referentiecasse, verschillende ontwerpkeuzes en systeemparemeters systematisch gevarieerd worden in een **Hysopt-software**. Op die manier wordt nagegaan welke factoren de grootste impact hebben op de prestaties van een warmtepompsysteem binnen een retrofitcontext. De resultaten van deze analyse geven inzicht in welke aanpassingen noodzakelijk zijn om een efficiënt en betrouwbaar systeem te realiseren, zonder verlies van comfort.



Op basis van de simulatieresultaten worden ontwerpprincipes geëxtraheerd die als uitgangspunt kunnen dienen voor een gestandaardiseerde retrofitaanpak. Deze worden vertaald naar een **beslissingskader** en **ontwerprichtlijnen** dat ontwerpers en installateurs ondersteunt bij het maken van gefundeerde keuzes. Het doel is om de vertaalslag te maken van complexe systeemanalyse naar een bruikbaar instrument in de praktijk.

## 2 Literatuurstudie

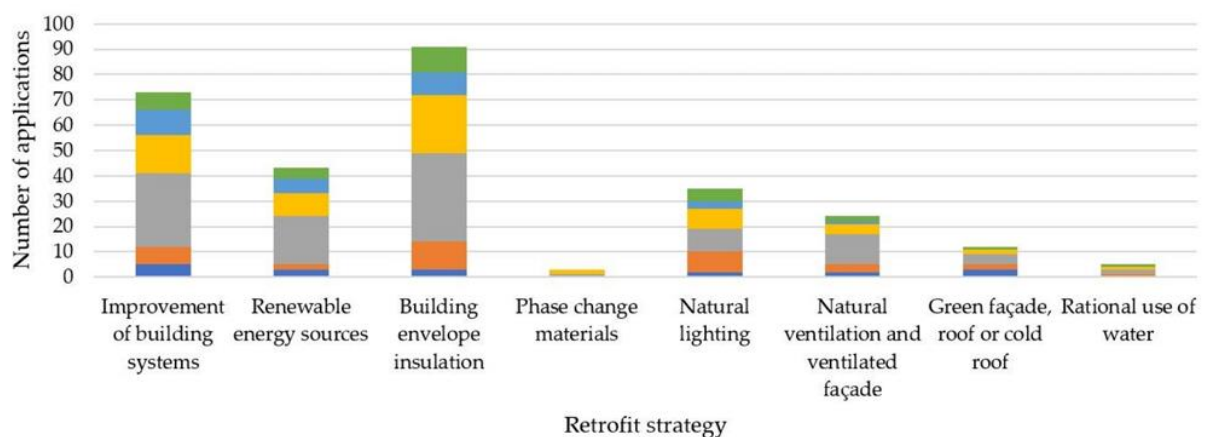
Deze literatuurstudie bespreekt voorafgaande onderzoeken met betrekking tot verduurzaming van bestaande installaties of retrofitstrategieën besproken. Hiernaast wordt ook dieper ingegaan op de complexiteit en specifieke randvoorwaarden die komen kijken bij de implementatie van duurzame-productie-eenheden in bestaande installaties van niet-residentiële gebouwen. Ten slotte worden verschillende mogelijke concepten met betrekking tot een ventilatie- en/of verwarmingsinstallatie besproken om een overzicht te creëren.

### 2.1 State of the art

Volgens Chen et al. [24] zijn de drie belangrijkste factoren van het energieverbruik de gebouwkenmerken, de componenten en werking van de betreffende installatie en het gebruikersgedrag. Daaruit blijkt de gebouwschil het meest voorspelbare element te zijn, terwijl het gebruikersgedrag vaak voor veel onzekerheden zorgt. Hiernaast haalt Robert et al. [25] aan dat het toepassen van vraaggestuurde ventilatie met representatieve bezettingsprofielen en het verhogen van de luchtdichtheid van gebouwen het energieverbruik kan reduceren met meer dan 30%.

Onderzoek van Citadini et al. [8] is gebaseerd op een vergelijkende literatuurstudie van onderzoeken van de voorbije zeven jaar in verschillende landen met als doel een overzicht te bieden van retrofitstrategieën die gericht zijn op de verhoging van de energie-efficiëntie en duurzaamheid van gebouwen, met betrekking tot HVAC-installaties. Figuur 7 geeft het aantal toepassingen door elke retrofitstrategie weer voor 273 niet-residentiële gebouwen [8].

Uit dat onderzoek blijkt dat de aanpak die het meest wordt toegepast het verhogen van de isolatiegraad van de gebouwschil is, gevolgd door technische aanpassingen aan de installaties zelf en het gebruik van hernieuwbare energiebronnen. Het verbeteren van gebouwsystemen heeft voornamelijk betrekking tot HVAC-systemen. Hierbij wordt aangehaald dat het toepassen van vraaggestuurde ventilatie en warmterecuperatiesystemen het energieverbruik en de broeikasgasemissie aanzienlijk doen dalen en het thermisch comfort voor gebruikers verhoogt. Een vaak voorkomend nadeel is de nood tot hoge initiële investeringskosten.



Figuur 7: Aantal uitgevoerde studies met betrekking tot verduurzaming en verbetering van de energie-efficiëntie, waarbij de meest uitgevoerde strategieën worden weergegeven [8]

Hiernaast haalt de studie ook aan dat het verhogen van de isolatiegraad en het gebruik van duurzame alternatieven voor productie-eenheden resulteert in aanzienlijke dalingen van het energieverbruik en broeikasgasemissie.

Citadini et al. [8] en studies [23-26] geven ook weer wat de voornaamste huidige beperkingen zijn met betrekking tot de realisatie van de verduurzaming. De studies tonen aan dat er onzekerheid is over de resultaten van energie- en broeikasgasemissie van retrofit- en renovatiemaatregelen en dat er nood is aan onderbouwde beslissingskaders en ontwerprichtlijnen in het kader van renovatieprojecten van bestaande installaties. Dit is noodzakelijk voor installateurs en ingenieurs bij het maken van ontwerpkeuzes voor het realiseren van de meest optimale uitkomst binnen de betreffende installatie. De grootste beperkingen worden besproken in tabel 1.

| Beperkingen          |                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Milieu en prestaties | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Onzekerheid over de uitkomst van diverse retrofitstrategieën met betrekking tot energie-prestaties en broeikasgasemissie</li> </ul>                                                                             |
| Economisch           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• De kostprijs van deze ingrepen ligt vaak initieel hoog en er kunnen lange terugverdientijden optreden</li> </ul>                                                                                                |
| Technisch            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Door het ontbreken van onderbouwde ontwerprichtlijnen en beslissingskaders is er in de praktijk vaak een tekort aan kennis voor het maken van ontwerpkeuzes binnen het kader van renovatieprojecten.</li> </ul> |

*Tabel 1: Hoofdbeperkingen met betrekking tot het uitvoeren van retrofitstrategieën met oog op verduurzaming van bestaande gebouwen [8, 23 - 26]*

Ardente et al [23] stelde een energiebesparing en  $CO_2$ -reductie rond de 40% vast door het toepassen van een warmtepomp in combinatie met een verhoging van de isolatiegraad van de gebouwschil. In dit onderzoek wordt ook vastgesteld dat optimalisaties van de beglazing besparingen opleveren tussen de 2% en 15%. Deze studie concludeerde hiernaast dat het verbeteren van de thermische isolatie van de gebouwschil in bestaande gebouwen de beste resultaten met betrekking tot energiebesparingen en broeikasgasemissie behaalt. De grootste invloedsfactoren die deze wijzigingen of aanpassingen bepalen zijn de initiële kost, economisch potentieel wat betrekking heeft tot de kostenbesparing en terugverdientijd, zoals ook angehaald in tabel 1.

Hiernaast werd ook onderzoek gedaan naar verwarmings- en ventilatiesystemen in bestaande gebouwen. Zo onderzocht P. Raftery et al [12] de verwarmingsinstallatie van 259 niet-residentiële gebouwen en stelden vast dat de gemiddelde waterzijdige aanvoertemperatuur binnen het bereik van 60°C tot 65°C, terwijl warmtepompen idealiter functioneren bij lage regimes. Daarnaast toont deze studie aan dat de gemiddelde aanvoertemperatuur in veel bestaande installaties ook bij buitentemperaturen boven de 20 °C rond de 60 °C blijft. Bovendien blijkt dat dergelijke systemen vaak geen gebruik maken van een 'reset'-regeling, waarbij de aanvoertemperatuur automatisch wordt verlaagd naarmate de buitentemperatuur stijgt of de warmtevraag daalt.

P. Raftery et al. [12] haalt ook aan dat verwarmingssystemen doorgaans sterk overgedimensioneerd zijn en resulteren in lage energie-efficiënties, vooral in deellast. De studie haalde hierbij ook aan dat 94% van de tijd de verwarmingsinstallatie werkt bij een belasting van 50% of minder ten opzichte van het maximale ontwerpvermogen. Door deze overdimensionering, ontstaat ruimte om het waterzijdig regime van de bestaande installaties te verlagen, wat voordelig is bij de integratie van warmtepompen.

Volgens MA et al. [27] is het effectief en efficiënt doorvoeren van retrofitstrategieën afhankelijk van dynamische simulatiemethodiek en is het noodzakelijk deze verschillende strategieën of ontwerpkeuzes met elkaar te vergelijken. Aan de hand van die vergelijkende analyses wordt zo een correcte beoordeling en selectie van de meest optimale strategieën en ontwerpkeuzes verkregen. Er dient een systematische onderbouwde aanpak ontwikkeld te worden.

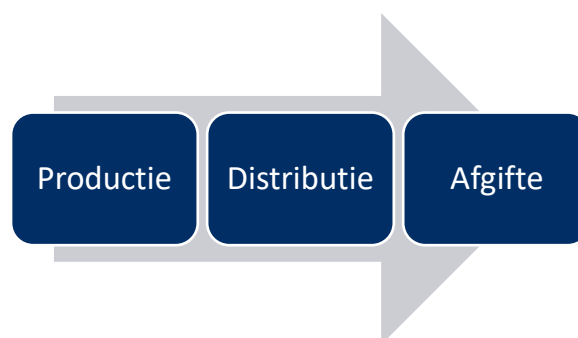
### 2.1.1 Conclusie voorafgaande studies

Op basis van de voorgaande studies kan worden geconcludeerd dat er reeds een breed scala aan retrofitstrategieën bestaat in uiteenlopende contexten. Studies zoals die van Citadini et al. [8] en Ardente et al. [23] tonen aan dat maatregelen zoals het verbeteren van de gebouwschil, het toepassen van vraaggestuurde ventilatie bij het inzetten van warmtepompen aanzienlijke energetische winsten kunnen opleveren. Tegelijk wordt in meerdere bronnen gewezen op terugkerende beperkingen, zoals de hoge initiële investeringskost en het gebrek aan een onderbouwd beslissingskader en ontwerprichtlijnen [12,25].

Een van de voornaamste beperkingen in dit proces is echter het ontbreken van een duidelijke, algemeen aanvaarde methodologie en ontwerprichtlijn voor retrofitprojecten binnen deze renovatiecontext. Aangezien elk gebouw unieke eigenschappen en gebruiksvoorwaarden kent, is het van essentieel belang om dynamische simulaties uit te voeren waarmee verschillende conceptuele ontwerpvarianten kunnen worden geëvalueerd en vergeleken. Het ontwerptraject dient daarbij niet beschouwd te worden als een lineair proces, maar als een herhaalbare en iteratieve ontwerpcirkel, waarin op systematische wijze diverse combinaties van uitgangsparameters worden onderzocht om zo te komen tot een technisch realiseerbare en energetisch performante systeemconfiguratie.

## 2.2 Exploratie van mogelijke concepten

Om te begrijpen welke impact en complexiteit deze implementatie van een warmtepomp met zich meebrengt en welke aanpassingen noodzakelijk zijn aan HVAC-installaties, is het uitvoeren van dynamische simulaties cruciaal. In de literatuurstudie wordt een grondig inzicht verworven in de opbouw van HVAC-systemen, met aandacht voor de mogelijke configuraties, componenten en hun onderlinge interacties. Daarbij worden de specifieke randvoorwaarden van lucht/water-warmtepompen ten opzichte van ketelgestuurde systemen geanalyseerd, inclusief afgiftesystemen en hydraulische schakelingen. Inzicht in de werking, dimensionering en onderlinge interacties van deze componenten is essentieel om realistische simulaties op te bouwen, correcte aannames te formuleren, en technische parameters op gefundeerde wijze te kunnen vastleggen. De opbouw wordt geïllustreerd in onderstaande figuur 8.

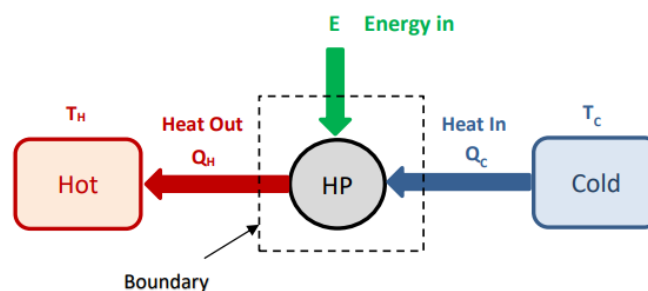


Figuur 8: Opbouw 2.2 exploratie van de concepten

### 2.2.1 Warmtepompen in renovatiecontext

Warmtepompen worden algemeen beschouwd als één van de meest veelbelovende technologieën voor de verduurzaming van HVAC-installaties [19, 20]. De rol van warmtepompen reikt verder dan louter technologische innovatie, deze productie-eenheden vormen een belangrijke component voor het realiseren van de klimaatdoelstellingen en het verhogen van de energie-efficiëntie in zowel nieuwe als bestaande gebouwen [28].

Warmtepompen zijn productie-eenheden die warmte overbrengen van een bron met een lagere temperatuur, zoals de buitenomgeving, naar een warmere binnenruimte. In plaats van warmte te genereren door verbranding (zoals bij traditionele ketels), verplaatst een warmtepomp warmte uit natuurlijke bronnen, zoals de buitenlucht, de bodem of grondwater, naar een verwarmingssysteem binnen een gebouw, wat wordt geïllustreerd in figuur 9. Dit gebeurt met behulp van externe aandrijfenergie, meestal in de vorm van elektriciteit [22]. Het algemene prinsipschema van een warmtepomp wordt weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 9: Diagram principe warmtepomp [29]

Warmtepompen kunnen worden onderverdeeld in verschillende categorieën, afhankelijk van de gebruikte energiebron en het medium waarmee de warmte wordt overgedragen [19]. De meest gangbare types omvatten:

- **Lucht-lucht warmtepompen**  
Hierbij wordt warmte onttrokken aan de buitenlucht en direct overgedragen aan de binnenlucht.
- **Lucht-water warmtepompen**  
Deze units onttrekken energie uit de buitenlucht en geven deze af aan een watercircuit, dat instaat voor de ruimteverwarming bijvoorbeeld via radiatoren, vloerverwarming of batterijen in luchtbehandelingsunits.
- **Grond-water warmtepompen**  
Deze systemen onttrekken warmte uit de bodem via horizontale of verticale captatielussen. Binnen deze lussen circuleert doorgaans een mengsel van water en glycol om bevriezing te voorkomen [19].
- **Water-water warmtepompen**  
De warmtepomp onttrekt warmte uit het opgepompte water afkomstig van de bron en pompt het op een andere plek terug. Bij dit systeem kan het concept worden voorgesteld als een

systeem van twee putten, waarbij de afstand tussen beide voldoende groot dient te zijn om thermische interferentie te vermijden [19].

Voor deze studie is bewust gekozen om de focus te leggen op de integratie van een lucht-water warmtepomp als warmteopwekker in luchtbehandelingsunits. Dit type warmtepomp wordt, naast lucht-lucht warmtepompen, in Europese landen het meest toegepast vanwege hun relatief lagere investeringskosten en eenvoudigere installatie in vergelijking met andere types [19]. Binnen het kader van dit onderzoek is het van cruciaal belang om inzicht te verwerven in de eigenschappen, randvoorwaarden en beperkingen van lucht-water warmtepompen.

#### 2.2.1.1 Randvoorwaarden en uitdagingen warmtepomp

De integratie van warmtepompen is cruciaal voor de verduurzaming van HVAC-installaties, maar verloopt vaak complex door het gebrek aan concrete ontwerprichtlijnen. Dit resulteert in suboptimale toepassingen en lage systeemefficiëntie. Vooral in oudere gebouwen, ontworpen voor hoge temperatuurregimes met ketels, veroorzaakt de mismatch met de werkingsprincipes van warmtepompen uiteenlopende technische en regeltechnische uitdagingen [19-21,30].

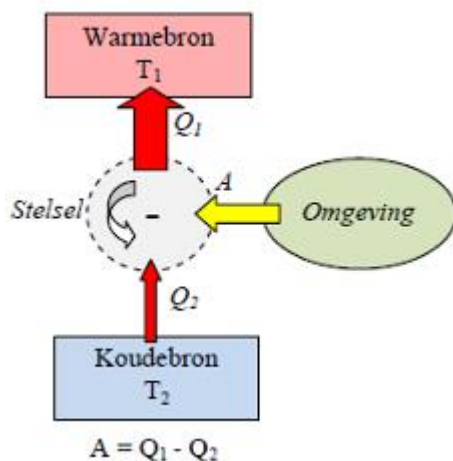
De warmteafgifte systemen, waaronder de radiatoren en de verwarmingsbatterijen in de luchtbehandelingsunits zijn doorgaans berekend op waterzijdige aanvoertemperaturen tussen 60°C en 80 °C. Warmtepompen leveren echter veel efficiënter warmte af bij lage watertemperaturen, typisch tussen 35°C en 55 °C [19-21]. Hiernaast behalen warmtepompen een optimaal rendement wanneer het waterzijdig temperatuurregime en de buitentemperatuur zo dicht mogelijk liggen tegen de gebruikerstemperatuur [6,7]. Bij hogere aanvoertemperaturen daalt hun Coefficient of Performance (COP) aanzienlijk [20]. Hiernaast functioneren warmtepompen efficiënter met idealiter een  $\Delta T$  tussen de 5K-10K [19,20].

De energieprestaties zijn dus zeer afhankelijk van de temperatuurniveaus. In bestaande gebouwen zijn afgiftesystemen, zoals radiatoren en verwarmingsbatterijen, doorgaans gedimensioneerd op hoge temperatuurregimes. Het temperatuurregime verlagen betekent dat de bestaande afgiftesystemen niet meer voldoende vermogen afgeven. Het herzien van deze warmteafgiftesystemen is niet altijd mogelijk wegens beperkte ruimte in bestaande installaties of brengen aanzienlijke investeringskosten met zich mee [30].

De integratie van deze warmtepompen wordt typisch interessant wanneer de verwarmingseisen in gebouwen dalen, nadat het gebouw bijvoorbeeld beter wordt geïsoleerd [19]. Hierdoor wordt het mogelijk het comfort te garanderen met een reductie van het waterzijdig regime [21]. Het herdimensioneren van de afgiftesystemen kan de mogelijkheid bieden om deze temperatuurregimes verder te verlagen, wat de efficiëntie van warmtepompen verhoogt [19]. Dit vereist echter de vervanging van diverse componenten binnen de bestaande installatie, wat niet altijd de meest kosteneffectieve oplossing blijkt te zijn. Daarom is het essentieel om per gebouw afzonderlijk te evalueren of dergelijke ingrepen technisch en economisch verantwoord zijn met behulp van simulaties [6].

### 2.2.1.2 Coëfficiënt of Performance

Het rendement van een warmtepomp is een cruciale factor bij het evalueren en is een maat voor de efficiëntie en kosteneffectiviteit van een warmtepompsysteem [20]. Het rendement van een warmtepomp wordt uitgedrukt via de Coefficient of Performance (COP). De COP is een veelgebruikte maatstaf om het rendement van een warmtepomp te meten en is sterk afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de warmtebron en de warmteafgifte [20]. De COP is de verhouding tussen de geleverde warmte en de energie die wordt gebruikt om die warmte te genereren, wat wordt geïllustreerd door het negatieve kringproces van de warmtepomp in figuur 10. Een hogere COP duidt op een efficiëntere warmtepomp.



$$COP = \frac{\text{Afgeleverde warmte}}{\text{Elektrisch verbruik}} = \frac{\dot{Q}_1}{A}$$

*Figuur 10: Negatief kringproces van warmtepomp, waarbij Q<sub>1</sub> de geleverde warmte voorstelt en A de arbeid die nodig is om deze om deze warmte te genereren [15]*

De SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) is een maat voor de gemiddelde efficiëntie van een warmtepomp over een volledig verwarmingsseizoen. SCOP karakteriseert dus het werkelijke rendement van de warmtepomp in echte bedrijfsomstandigheden veel nauwkeuriger dan in het geval van COP-evaluatie. Fabrikanten van warmtepompen geven deze SCOP, die berekend is op basis van een standaardprocedure gedefinieerd in EN 14825 [31]. SCOP wordt berekend aan de hand van het EN 14825 gemiddelde profiel, onderverdeeld in drie klimaatzones (gemiddeld en warm en koud optioneel), rekening houdend met deellastomstandigheden [32]. Dit profiel wordt weergegeven in figuur 11.

#### Average profile:

|                     |      |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|------|
| Indoor temperature  | 20°C | 20°C | 20°C | 20°C |
| Part load ratio     | 88%  | 54%  | 35%  | 15%  |
| Outdoor temperature | -7°C | 2°C  | 7°C  | 12°C |

#### Warmer profile:

|                     |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|
| Indoor temperature  | 20°C | 20°C | 20°C |
| Part load ratio     | 100% | 64%  | 29%  |
| Outdoor temperature | 2°C  | 7°C  | 12°C |

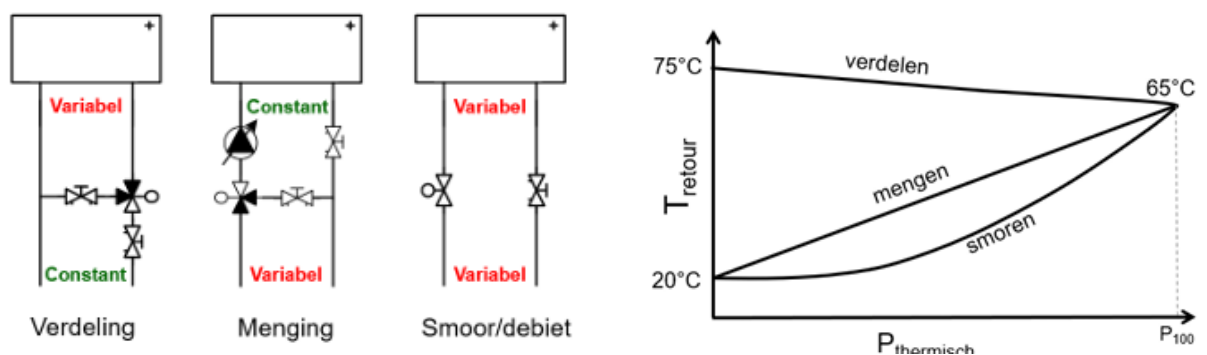
#### Colder profile:

|                     |       |      |      |      |      |
|---------------------|-------|------|------|------|------|
| Indoor temperature  | 20°C  | 20°C | 20°C | 20°C | 20°C |
| Part load ratio     | 82%   | 61%  | 37%  | 24%  | 11%  |
| Outdoor temperature | -15°C | -7°C | 2°C  | 7°C  | 12°C |

Figuur 11: Berekening voor SCOP volgens norm EN 14 825, waarbij deze standaardmethode drie klimaatzones gebruikt, rekening houdend met deellastomstandigheden [31,32]

## 2.2.2 Distributie

Hydraulische schakelingen vormen het fundament van de warmte- of koudedistributie binnen thermische installaties. Elke installatie beschikt over een specifieke configuratie die wordt bepaald door het type distributiecircuit, de aard van de afgiftecomponenten en het gewenste temperatuurregime in de verschillende hydraulische kringen. Binnen deze schakeling worden de energiestromen tussen de opwekker(s) en de verbruikers gereguleerd, waarbij een correcte vermogensverdeling cruciaal is voor zowel comfort als efficiëntie. Afhankelijk van de opbouw kunnen drie fundamentele hydraulische principes worden onderscheiden, elk met hun eigen toepassingsgebied en ontwerpimplicaties: een verdeelschakeling, een mengschakeling en een smoorschakeling zoals weergegeven in figuur 12.



Figuur 12: Drie soorten schakelingen: verdeelschakelings, mengschakeling en smoorschakeling [59]

- Een **verdeelschakeling** bevat in deellast hogere retourtemperaturen dan in vollast, wat ongunstig is voor de efficiëntie van de installatie. Bij deze schakelingen is de secundaire temperatuur constant, waardoor er op basis van debiet geregeld wordt. De retourtemperatuur zal toenemen naarmate het regelventiel verder sluit.

- Een **mengschakeling** regelt op basis van de temperatuur, waarbij het secundair debiet constant wordt gehouden. Bij ketels was een mengschakeling zeer ingeburgerd voor het combineren van verschillende hydraulische kringen zoals bijvoorbeeld lage temperatuurkringen, typisch toegepast voor vloerverwarming, en hoge temperatuurkringen. Mengschakelingen worden doorgaans vermeden bij warmtepompen, aangezien een te hoge temperatuur ter hoogte van de warmtepomp is nadelig voor de COP [22].
- Een **smoorschakeling** regelt op basis van debiet, waarbij in deellast een verlaagd debiet resulteert in een wijziging van de verblijftijd en dus het afgegeven vermogen wijzigt.

### 2.2.3 Warmtewisselaars binnen luchtbehandelingsunits

In de literatuur bestaan diverse configuraties en constructietypes van warmtewisselaars, elk ontworpen voor specifieke toepassingsgebieden, mediumtypes, thermodynamische eigenschappen en ruimtelijke randvoorwaarden. In dit onderzoek ligt de focus expliciet op luchtbehandelingsunits. Binnen deze context zijn slechts twee types warmtewisselaars relevant voor analyse, namelijk:

1. **Verwarmingsbatterijen**, of lucht-water warmtewisselaars, die instaan voor de conditionering van de lucht in de luchtbehandelingsunits.
2. **Lucht-lucht warmtewisselaars**, die onderdeel uitmaken van warmteterugwinningssystemen (WTW), waarbij de thermische energie uit de afgevoerde lucht wordt gerecupereerd naar de toegevoerde verse buitenlucht, met als doel het beperken van de ventilatieverliezen.

### 2.2.4 Verwarmingsbatterij

Verwarmingsbatterijen zijn het meest gebruikte type warmtewisselaar in luchtbehandelingsunits [33], [34]. Deze batterijen zijn verantwoordelijk voor het verwarmen van de lucht die door het ventilatiesysteem wordt verspreid in de ruimtes, wat essentieel is voor het handhaven van thermisch comfort in gebouwen. Deze componenten werken door warmte over te dragen van een verwarmingsmedium, zoals water, naar de luchtstroom die over de lamellen van de batterijen stroomt [35]. Deze batterijen vormen de connectie tussen het hydraulisch deel en het aëraulisch deel van de HVAC-installatie. Deze batterijen vormen de fysieke schakel waar de thermische energie van het hydraulisch circuit wordt overgedragen aan de luchtstromen die in het gebouw worden verdeeld.

Traditioneel zijn verwarmingsbatterijen ontworpen om te functioneren binnen hoge temperatuurregimes, doorgaans in de orde van bijvoorbeeld 70/50°C of 60/50°C tot 80/60°C, in lijn met het klassieke gebruik van gasketels als warmtebron [6]. Deze hoge watertemperaturen garanderen een hoge afgiftecapaciteit, wat toelaat om met relatief compacte coils in de luchtbehandelingsunits voldoende vermogen over te dragen om aan de warmtevraag van het gebouw te voldoen. De verwarmingsbatterij kan enerzijds functioneren als voorverwarmingsbatterij, waarbij deze voornamelijk de warmteverliezen dekt. Anderzijds kan deze batterij ook gebruikt worden als naverwarmingsbatterij om zo de gewenste inblaascondities te bereiken en het thermisch comfort in de ruimtes te garanderen [15].

### 2.2.5 Warmterecuperatie

Een aanzienlijk deel van de energie gaat via verwarming en ventilatie verloren. Het is efficiënter om deze energie te recupereren door het toepassen van recuperatiesystemen of warmteterugwinningssystemen [36]. Energie van de afvoerlucht die normaal verloren zou gaan, wordt gebruikt om de inkomende lucht voor te verwarmen, waardoor het energieverbruik van de verwarmingssystemen verlaagt [37]. Een warmteterugwinningseenheid is een specifieke warmtewisselaar binnen een luchtbehandelingsunit dat energie recupereert uit de afvoerlucht, met dus als doel het energetisch rendement van het ventilatiesysteem te verhogen. Door het integreren van een warmterecuperatiesysteem in de luchtbehandelingsunit, wordt een deel van het vermogen gereduceerd [15]. Hierdoor vermindert ook het vereiste verwarmingsvermogen [15]. Er bestaan diverse systemen die kunnen worden gebruikt, maar enkel de types die in de Hysopt software worden toegepast, worden kort besproken in onderstaande tabel.

| Kruisstroomplatenwarmtewisselaar                  |                                        | Warmtewiel                 |                                           |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|
| Voordelen                                         | Nadelen                                | Voordelen                  | Nadelen                                   |
| Eenvoudig en betrouwbaar                          | Afvoer en toevoer dicht bij elkaar     | Voelbare en latente warmte | Contaminatie verse lucht mogelijk         |
| Lange levensduur                                  | Nood aan bypass in zomer               | Hoge rendementen           | Luchtstromen dicht bij elkaar             |
| Weinig onderhoud                                  | Enkel voelbare warmte                  | Compact                    | Meer onderhoud dan platenwarmtewisselaars |
| Luchtstromen afzonderlijk, laag besmettingsrisico | Vorstgevaar en condensbak noodzakelijk | Geen condensafvoer nodig   |                                           |

Tabel 2: Vergelijking tussen kruisstroomplatenwarmtewisselaar en warmtewiel

De rendementen liggen vaak tussen de 50-80% voor platenwarmtewisselaars, maar hogere rendementen zijn mogelijk [15,37]. De rendementen van warmtewielen liggen vaak rond of boven de 75% voor voelbare warmte en rond de 15% voor latente warmte [36].

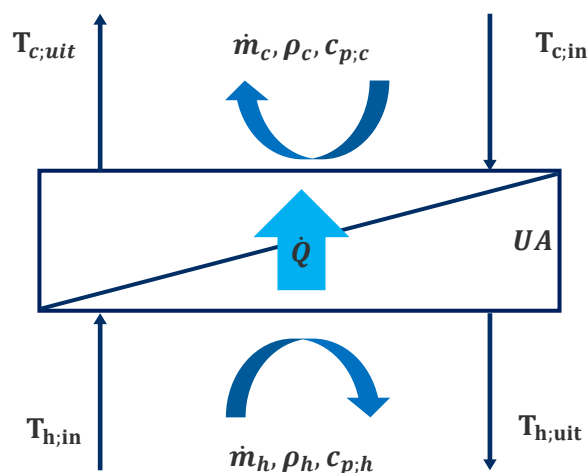
In Hysopt is ook de optie voor een mengsysteem toe te passen. Een mengsysteem is een relatief eenvoudige vorm van warmteterugwinning waarbij warmte wordt gerecupereerd via gedeeltelijke of volledige menging van afvoerlucht met verse toevoerlucht. Dit type systeem wordt vooral toegepast in situaties waar eenvoud, lage kostprijs en robuustheid voorop staan, en waar luchtkwaliteitsvereisten beperkt zijn [36]. Er wordt in deze studie niet verder op ingegaan, waarbij voor een volledig overzicht van recuperatiesystemen wordt verwezen naar HVAC- calculaties [15].

## 2.3 Modellen rond verwarmingsbatterijen in luchtbehandelingsunits

Om de impact van de implementatie van warmtepompen binnen luchtbehandelingsunits beter te begrijpen, is het essentieel inzicht te verkrijgen in de specifieke warmtewisselaars in luchtbehandelingsunits en de modellen die daarvoor bestaan om hun prestaties te simuleren en analyseren. Deze modellen zijn cruciaal om de thermische en hydraulische parameters van een installatie weer te geven en te optimaliseren.

### 2.3.1 Bepaling batterijen

Deze batterijen zijn kritische componenten, aangezien deze de connectie vormen tussen zowel het aëraulisch gedeelte en het hydraulische gedeelte. Het dimensioneren en de keuze van het type warmtewisselaar binnen een bepaalde toepassing is doorgaans een complexe taak. Dit proces omvat niet alleen de keuze van het type warmtewisselaar, maar ook een gedetailleerde analyse van verschillende geometrische parameters zoals bijvoorbeeld het aantal rijen, de configuratie en plaatsing van vinnen, de beschikbare ruimte, het type fluïdum en het temperatuur regime. Al deze aspecten hebben een invloed op de warmteoverdracht, de drukval en algemeen op de efficiëntie van een warmtewisselaar [38]. Figuur 13 geeft een overzicht van de relevante parameters en variabelen die van toepassing zijn voor een warmtewisselaar. De weergegeven configuratie betreft een tegenstroomopstelling, die louter illustratief is en wordt opgenomen ter verduidelijking van de toegepaste rekenmethoden.  $T_h$  stelt de temperaturen van het warme fluïdum voor, terwijl  $T_c$  de temperaturen voor het koude fluïdum vertegenwoordigt. Hiernaast stellen  $\dot{m}_h$  en  $\dot{m}_c$  de massadebiten voor beide stromen voor in de desbetreffende warmtewisselaar, terwijl  $c_p$  de soortelijke warmtecapaciteit voor en  $\rho$  de dichtheid van het fluïdum voorstelt.



*Figuur 13: Verduidelijkende nomenclatuur tegenstroom warmtewisselaar met bijhorende parameters en variabelen [50]*

Bij de ontwikkeling van verschillende componenten voor een luchtbehandelingssysteem wordt in de industrie steeds vaker gebruik gemaakt van modelleringstechnieken [39]. Een model voor een warmtewisselaar kan worden opgedeeld in twee benaderingen, namelijk een ontwerpbenadering en een simulatiebenadering [40]. De modellen die in deze thesis worden besproken focussen zich op het dimensioneren en simuleren van verwarmingsbatterijen binnen de luchtbehandelingsunits.

1. **De ontwerpbenadering**, waarin de verwarmingsbatterij wordt gedimensioneerd op basis van ontwerpcondities en berekend wordt welke geleidbaarheid (UA-waarde) vereist is.
2. **De simulatiebenadering**, waarin deze UA-waarde als vast gegeven wordt beschouwd en gebruikt wordt in dynamische simulaties om de prestaties van het systeem onder variërende bedrijfscondities te evalueren.

In de literatuur komen doorgaans twee type analytische modellen terug die worden gebruikt voor deze modellen, namelijk de logarithmic mean temperature difference (LMTD) methode en de  $\epsilon$ -NTU methode die wordt toegepast in de Hysopt-software [41,42]. De bestaande modellen maken meestal gebruik van de  $\epsilon$ -NTU methode voor de benadering van de warmteoverdracht van warmtewisselaars, aangezien de onbekende uitgaande temperaturen met deze methode kunnen worden berekend zonder het toepassen van een iteratief proces [41,43]. De LMTD methode is vooral interessant wanneer alle in- en uitgaande temperaturen van beide fluïda zijn gekend [42].

De LMTD-methode maakt gebruik van de globale energiebalans die wordt weergegeven door volgende formules:

$$\bullet \quad \dot{Q} = \dot{m}_h \cdot c_{p,h} \cdot (T_{h,in} - T_{h,uit}) \quad (1)$$

$$\bullet \quad \dot{Q} = \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \cdot (T_{c,uit} - T_{c,in}) \quad (2)$$

$$\bullet \quad \dot{Q} = UA \cdot \Delta T_{LMTD} \quad (3)$$

De batterijen in luchtbehandelingsunits bevatten typisch een kruisstroom configuratie. Deze vergelijking verschilt in vergelijking met de gelijkstroom en tegenstroom configuratie. Bij de kruisstroom configuratie wordt  $\Delta T_{LMTD}$  voorgesteld door het logaritmisch temperatuurverschil  $\Delta T_{LMTD;CF}$  en een correctie factor F [41].

$$\bullet \quad \Delta T_{LMTD} = \Delta T_{LMTD;CF} \cdot F \quad (4)$$

$$\bullet \quad \Delta T_{LMTD;CF} = \frac{(T_{h,in} - T_{c,uit}) - (T_{h,uit} - T_{c,in})}{LN \frac{(T_{h,in} - T_{c,uit})}{(T_{h,uit} - T_{c,in})}} \quad (5)$$

De  $\epsilon$ -NTU-methode kan rechtstreeks worden gebruikt om de uitlaattemperaturen van een warmtewisselaar te bepalen wanneer de geleidbaarheid (UA) gekend is, of omgekeerd om de vereiste warmtewisselcapaciteit te bepalen wanneer de gewenste uitlaattemperaturen gekend zijn. De effectiviteit-NTU-methode is wiskundig equivalent aan de LMTD-methode en levert identieke resultaten op, maar de structuur en formulering van de  $\epsilon$ -NTU-methode is aanzienlijk beter afgestemd op diverse ontwerp- en simulatietoepassingen van warmtewisselaars [41].

De  $\epsilon$ -NTU-methode vertrekt net zoals de LMTD-methode vanuit de globale energiebalans, waarbij er wordt uitgegaan dat de warmtewisselaar goed is geïsoleerd. Dit wordt weergegeven in formules 6 en 7:

$$\bullet \quad \dot{Q} = \dot{m}_h \cdot c_{p,h} \cdot (T_{h,in} - T_{h,uit}) = \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \cdot (T_{c,uit} - T_{c,in}) \quad (6)$$

En door de effectiviteit, gedefinieerd als [43]:

$$\bullet \quad \dot{Q} = \varepsilon \cdot \dot{C}_{min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in}) = \varepsilon \cdot \dot{Q}_{max} \quad (7)$$

Waarbij:

$$\dot{C}_{min} = \min(\dot{m}_h \cdot c_{p,h}; \dot{m}_c \cdot c_{p,c}) \quad C_R = \frac{\dot{C}_{min}}{\dot{C}_{max}} \quad NTU = \frac{UA}{\dot{C}_{min}} \quad (8)$$

Onderstaande tabel geeft het verband weer tussen de effectiviteit en NTU (number of transfer units) voor de drie verschillende stromingsconfiguraties.

| Gelijkstroom                                                 | Tegenstroom                                                                                 | Kruisstroom                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU \cdot (1 + C_R)}}{1 + C_R}$ | $\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU \cdot (1 - C_R)}}{1 - C_R \cdot e^{-NTU \cdot (1 - C_R)}}$ | $\varepsilon = 1 - e^{\left(\frac{e^{-NTU^{0.78} \cdot C_R} - 1}{C_R \cdot NTU^{0.22}}\right)}$ |

*Tabel 3: Effectiviteit voor gelijkstroom, tegenstroom en kruisstroom warmtewisselaars [42]*

Tijdens de ontwerpfase wordt de UA-waarde vastgesteld op basis van vooraf gedefinieerde ontwerpcondities. Dit vormt de basis voor het dimensioneren van de warmtewisselaar en garandeert dat deze bij de meest ongunstige omstandigheden kan voldoen aan de gevraagde warmteoverdracht. Hierbij worden doorgaans twee analytische benaderingen toegepast: de LMTD-methode en de  $\varepsilon$ -NTU methode. Beide methodes zijn algebraïsch equivalent en zullen onder gelijke invoer dezelfde resultaten opleveren [41]. De  $\varepsilon$ -NTU methode wordt doorgaans toegepast voor toepassingen waarbij de UA-waarde en debieten gekend zijn, maar de uitgangstemperaturen nog moeten worden berekend [41,42]. Daarom wordt in simulatiefilosofieën doorgaans de effectiviteit-NTU methode als meest efficiënte aanpak beschouwd [41].

Hoewel deze analytische modellen breed worden toegepast in zowel ontwerp- als simulatietoepassingen, blijven het vereenvoudigde benaderingen. Ze gaan uit van constante parameters, zoals bijvoorbeeld de UA-waarde, de soortelijke warmtecapaciteit en dichtheid van de fluïda. In werkelijkheid variëren deze grootheden in functie van het debiet en de temperatuur. Deze aannames beperken de nauwkeurigheid van de modellen, vooral bij werking in deellast [43, 44].

Een belangrijk voordeel van deze modelleringstechnieken is hun relatief beperkte inputvereiste, waardoor ze minder foutgevoelig zijn en computationeel efficiënt kunnen worden ingezet in grotere simulatiekaders. Toch tonen verschillende studies, waaronder Ruivo et al. [44], aan dat deze modellen aanzienlijke afwijkingen vertonen onder deellastcondities, in het bijzonder bij sterk variërende debieten. Doordat dergelijke modellen geen expliciete beschrijving bevatten over bijvoorbeeld de geometrische eigenschappen van de batterij of de complexe stromingspatronen die optreden, zijn deze modellen minder accuraat wanneer onder deellast omstandigheden [34,41,44-46].

Daartegenover staan meer gedetailleerde modellen die in de literatuur beschreven worden, waarin de geometrische eigenschappen van de batterij (zoals buislengte, lamelafstand, materiaaleigenschappen) expliciet worden meegenomen, en waarin het stromingsgedrag intern gedifferentieerd wordt bijvoorbeeld op basis CFD-analyses. Dergelijke modellen kunnen aanzienlijk nauwkeuriger gedrag voorspellen bij deellastwerking, maar vereisen gedetailleerde inputdata die in praktijktoepassingen vaak niet beschikbaar zijn. Bovendien zijn ze doorgaans computationeel zwaar, en kunnen ze sterk foutgevoelig zijn [44,46].

In het kader van dit onderzoek wordt een aanvullende validatie uitgevoerd om na te gaan in welke mate de besproken modellen geschikt blijven voor de modellering van verwarmingsbatterijen bij lage temperatuurregimes. Aangezien deze modellen oorspronkelijk werden gevalideerd in de context van hoge temperatuurverwarming, wordt onderzocht of deze modellen betrouwbare resultaten blijven opleveren. De opzet en bevindingen van deze validatie worden toegelicht in hoofdstuk 8.1 van de Appendix.

### 3 Ontwerpproces ventilatie- en verwarmingsinstallaties voor niet-residentiële gebouwen

In de meeste bestaande niet-residentiële gebouwen worden vandaag nog conventionele ketelinstallaties gebruikt voor ruimteverwarming [12]. Deze systemen zijn doorgaans ontworpen en gedimensioneerd volgens het standaard ontwerpproces, waarbij uitgegaan wordt van hoge waterzijdige temperatuurregimes. Hierbij worden typisch diverse systeemkeuzes gemaakt met de uitwerking van doorgaans één ontwerpvoorstel. Hiernaast zijn ook de oorspronkelijke dimensioneringsregels, die gebaseerd zijn op deze temperatuurregimes, vandaag niet meer toepasbaar met de nadruk op een warmtepomp implementatie. In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op het traditioneel ontwerpproces en de problematiek die hierbij komt kijken in bestaande systeemconfiguraties. Het doel van dit hoofdstuk is om te onderzoeken welke aanpassingen nodig zijn aan dit huidig ontwerpproces voor het optimaliseren van bestaande installaties, met het oog op de implementatie van een warmtepomp binnen renovatiecontext.

#### 3.1 Richtlijnen ontwerpproces ventilatie

In de huidige Buildwise-richtlijnen voor het ontwerp van HVAC-installaties in niet-residentiële gebouwen worden ventilatie en centrale verwarming (CV) typisch afzonderlijk behandeld [16].

De uitgang voor het ontwerp van een ventilatiesysteem vertrekt typisch vanuit het **pakket van eisen** (PvE). Eens dit pakket wordt vastgelegd, start het eigenlijke ontwerpproces. Het programma van eisen bepaalt de functionele vereisten, financiering en opgelegde wetgevingen voor een installatie en vormt het kader om deze te vertalen naar concrete, meetbare criteria. Het PvE bevat informatie over bijvoorbeeld de energieprestatie-eisen voor het gebouw, de warmte-isolatie van het betreffende gebouw, technische eisen van de installatie, thermisch comfort en kwaliteit en de ventilatievoorzieningen waaraan het gebouw moet voldoen [15]. Deze vormen vervolgens het uitgangspunt voor het verdere ontwerpproces. Hierbij wordt er ook onderscheid gemaakt tussen winter en zomer voor de dimensionering van verschillende componenten.

Binnen dit proces horen ook verschillende **systeemkeuzes** en afwegingen die worden gemaakt. Dit kan gaan over bijvoorbeeld de soort ventilatie, welke inblaastemperaturen worden gehanteerd, welk regime de verwarmingsbatterij hanteert of welke regelstrategieën worden toegepast. Hiernaast zijn er ook meerdere manieren of overwegingen om het **ontwerpdebiet** te berekenen, wat verder wordt besproken in hoofdstuk 4. Het dimensioneren van het ontwerpdebiet wordt doorgaans gebaseerd op NBN EN 12831-1 en NBN B 62-003 [47,48]. Op basis van dit ontwerpdebiet worden de **ventilatieverliezen** bepaald, wat wordt berekend door middel van formule 9:

$$\dot{Q}_{\text{ventilatie}} = \dot{V}_{\text{ventilatie}} \cdot \rho_{\text{lucht}} \cdot c_{p;\text{lucht}} \cdot (T_{\text{int}} - T_{\text{ex}}) \quad (9)$$

Waarbij:

$\dot{V}_{Ventilatie}$ : Het ventilatiedebiet van de betreffende ruimte [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$\rho_{lucht}$ : De dichtheid van de lucht bij  $T_{int}$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$c_{p;lucht}$ : De specifieke warmtecapaciteit van de lucht bij  $T_{int}$  [ $\text{kJ}/\text{kgK}$ ]

$T_{int}$ : De basisbinnentemperatuur van de betreffende ruimte [ $^{\circ}\text{C}$ ]

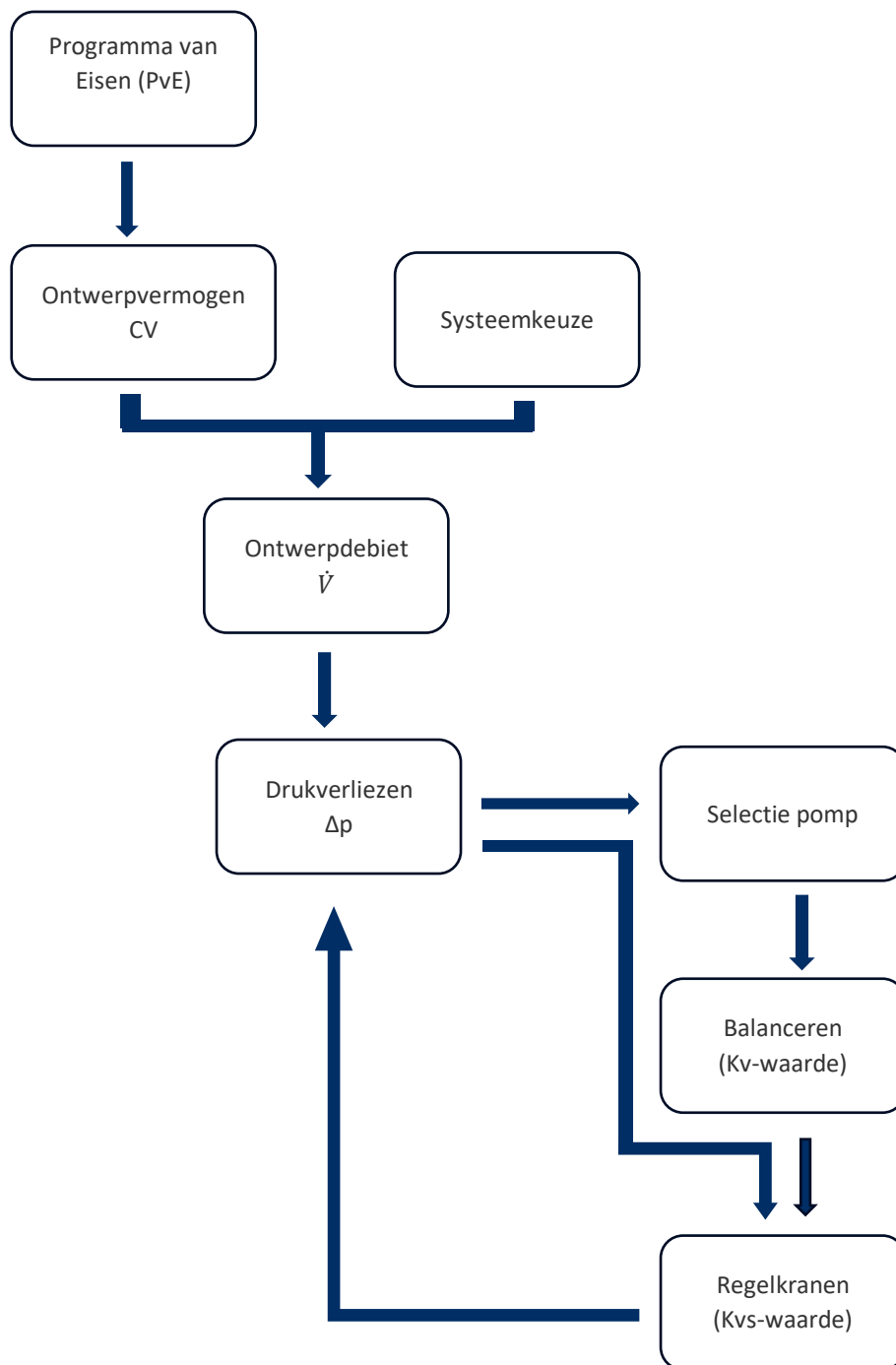
$T_{ex}$ : De basisbuitentemperatuur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Hoewel ventilatie en CV in de richtlijnen doorgaans afzonderlijk worden behandeld, impliceert het ventilatieontwerp reeds een aantal keuzes die een directe impact hebben op de CV-installatie. Het eindresultaat van het ventilatieontwerpproces resulteert in de dimensionering van alle componenten van de luchtbehandelingsunit, waaronder ook de verwarmingsbatterij. Daarbij is het waterzijdig temperatuurregime waarop deze batterij wordt gedimensioneerd reeds impliciet vervat in de systeemkeuzes van dit ontwerpproces, nog voor het ontwerpproces van CV. Dit onderstreept de noodzaak om ventilatie en CV niet gescheiden te behandelen maar geïntegreerd te benaderen.

## 3.2 Richtlijnen ontwerpproces centrale verwarming

Het doel van dit hoofdstuk is het toelichten van de gangbare ontwerpprincipes voor centrale verwarmingssystemen. Dit dient als basis om inzicht te krijgen in het bestaande kader en om de implicaties ervan voor duurzame systeemintegratie beter te begrijpen. De traditionele aanpak voor het ontwerpproces van CV wordt gevisualiseerd in figuur 14 in een flowchart.

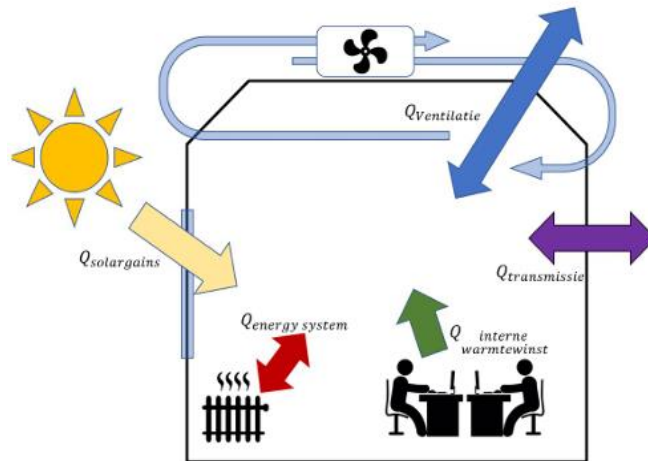
Bestaande gebouwen zijn vaak ontworpen en gedimensioneerd op basis van beperkte technische criteria zoals de warmteverliezen, temperatuurregimes, drukverliezen en regelingen [16]. Vandaag de dag wordt er ook rekening gehouden met de energieprestatieregelgeving voor verwarmingsinstallaties, die vroeger niet geraadpleegd kon worden. Het PvE is echter ook van belang voor de verwarmingsinstallatie. Op basis van deze uitgangspunten wordt de basis gelegd voor de verdere dimensionering. Sanitair warm water (SWW) wordt in dit ontwerpproces vaak als afzonderlijk subsysteem beschouwd, tenzij specifiek anders vermeld [16]. In dit onderzoek wordt bijgevolg het ontwerpproces van SWW niet besproken en behandeld.



*Figuur 14: Traditionele richtlijnen voor het ontwerpproces van CV weergegeven in een flowchart*

Vervolgens wordt het vereiste verwarmingsvermogen, wat afhankelijk is van de berekende warmteverliezen, bepaald. Dit vermogen neemt af naarmate de isolatiegraad van het gebouw toeneemt. De bepaling van het minimaal te installeren verwarmingsvermogen in een gebouw gebeurt aan de hand van de genormaliseerde berekening van de warmteverliezen van het gebouw, conform de norm NBN EN 12831-1 [48]. Deze warmteverliezen worden bepaald op basis van de warmtebalans van een ruimte, zoals geïllustreerd in figuur 15 en weergegeven in formule 10:

$$\frac{dE(t)}{dt} = Q_{\text{zonnewinsten}} \pm Q_{\text{interne warmtewinsten}} \pm Q_{\text{verwarmingssysteem}} \pm Q_{\text{Ventilatie}} \pm Q_{\text{Transmissie}} \quad (10)$$



Figuur 15: Warmtebalans van een kamer/ruimte [15]

Het is de bedoeling om het thermisch comfort te bereiken en de kamer op eenzelfde temperatuur te houden. Hiervoor wordt de warmtebelasting per ruimte bepaald op basis van de transmissieverliezen  $Q_{\text{Transmissie}}$ , de ventilatieverliezen  $Q_{\text{Ventilatie}}$  en een supplementair opwarmingsvermogen  $Q_{\text{Opwarming}}$ . Bij het berekenen van de warmteverliezen wordt uitgegaan van het piekvermogen, wat betekent dat het te installeren verwarmingssysteem in staat moet zijn om, onder de meest ongunstige klimaatomstandigheden, de volledige warmtevraag van het gebouw te dekken. Bij deze berekeningen wordt uitgegaan van een uitzonderlijk lage buitentemperatuur die gemiddeld slechts één keer per jaar voorkomt (NBN B 62-003). Interne warmtewinsten en zoninstraling worden buiten beschouwing gelaten, aangezien de installatie ook onder deze 'worst-case'-omstandigheden in staat moet zijn het vereiste vermogen te leveren. Hiernaast wordt er ook een supplementair opwarmingsvermogen berekend dat rekening houdt met de thermische inertie van een gebouw, temperatuurdalingen tijdens de verlaging van de verwarming en de gekozen opwarmtijd [16].

Door de verstrenging van de isolatie-eisen uit de energieprestatieregelgeving zullen de warmteverliezen steeds meer en meer gebaseerd zijn op de ventilatieverliezen [22]. Het minimaal te installeren ontwerpvermogen wordt bepaald aan de hand van het totale warmteverlies, weergegeven in formule 11:

$$Q_{\text{warmtevermogen}} = Q_{\text{Transmissie}} + Q_{\text{Ventilatie}} + Q_{\text{Opwarming}} \quad (11)$$

Waarbij:

$Q_{Transmissie}$ : De transmissieverliezen [W]

$Q_{Ventilatie}$ : De ventilatieverliezen [W]

$Q_{Opwarming}$ : Het opwarmingsvermogen [W]

Het selecteren van het type warmteopwekker, het type afgiftesysteem, het leidingsnet en de werkingscondities kan worden vertaald onder de systeemkeuze. Het watertemperatuurregime dient zorgvuldig geselecteerd te worden, rekening houdend met de aard van het warmteafgiftesysteem en de productie-eenheid. In Vlaanderen is er sinds 2025 een belangrijke beleidswijziging doorgevoerd. Vanaf 1 januari is het verboden om bij nieuwbouwprojecten een aardgasaansluiting te voorzien. Dit geldt zowel voor residentiële als niet-residentiële gebouwen [22,49]. De keuze van het type warmteopwekker is dus niet altijd volledig vrijblijvend met het oog op de verduurzaming van verwarmings- en ventilatiesystemen.

Vervolgens bepaald de installateur de plaats van de warmteafgiftesystemen en productie-eenheid, met oog op het ontwerpen van het leidingsnet. Op basis van het berekende ontwerpvermogen en de systeemkeuzes wordt het waterzijdig ontwerpdebiet voor de verwarmingsinstallatie berekend, waarbij de benodigde gegevens het thermisch vermogen ( $Q$ ), de soortelijke massa ( $\rho$ ), de soortelijke warmtecapaciteit ( $c$ ) en het temperatuurverschil ( $\Delta T$ ) zijn:

$$\dot{V} = \frac{Q}{\rho \cdot c \cdot \Delta T} \quad (12)$$

Dit debiet vormt de basis voor de dimensionering van de leidingen, waarbij gebruik wordt gemaakt van DIN-normen voor leidingdiameters en ontwerpregels omtrent stromingssnelheden [16]. Wat betreft de keuze van het leidingnet bestaat er geen universele voorkeur, aangezien dit afhangt van verschillende factoren zoals de aard, de vorm, de afmetingen en functionele eigenschappen van het desbetreffende gebouw [16].

Nadat de drukverliezen worden berekend van het hydraulisch circuit, wordt de pompselectie uitgevoerd. De berekeningen voor de drukverliezen van de leidingsegmenten gebeuren op basis van formules 13 en 14 [16]:

$$\Delta p = \lambda \cdot \rho \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \quad (13)$$

$$v = \dot{V} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \quad (14)$$

Waarbij:

L: de lengte van het buisstuk of leidingsegment [m]

$\lambda$ : de wrijvingscoëfficiënt van de leiding

D: de binnendiameter van de leiding [m]

v: de watersnelheid in de leiding [m/s]

De drukverliezen ten gevolge van de kranen en afgiftesystemen zijn afhankelijk van de Kv-waarde van de gekozen componenten. De berekening wordt in formule 15 weergegeven, waarbij ( $\rho$ ) de dichtheid van de werkelijke vloeistof voorstelt en ( $\rho_{ref}$ ) de vloeistof tijdens de Kv metingen [50]:

$$\Delta p = \left( \frac{\dot{V}}{Kv} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (15)$$

Voor de pompselectie van een hydraulische installatie zijn het te overbruggen drukverschil en het ontwerpdebiet noodzakelijke gegevens. Pompen kunnen worden ingedeeld op basis van opvoerhoogte ( $H$ ), waarbij de berekening wordt gegeven door formule 16:

$$H = \frac{\Delta p_{tot}}{\rho \cdot g} \quad (16)$$

Een belangrijk aspect dat hierop volgt, is het hydraulisch inregelen van het systeem. Indien er geen inregeling is voorzien zullen de werkelijke debieten afwijken van de ontwerpdebieten. Dit onderstreept de noodzaak voor het inregelen van de installatie. Door gebruik te maken van inregelkranen (voorzien van instelbare Kv-waarden) worden de verschillende zones in balans gebracht, zodat het ontwerpdebiet wordt gerealiseerd. Dit beïnvloedt op zijn beurt opnieuw de drukverliezen in het systeem, waardoor de werkingscondities van de pomp moeten worden herzien. Naast het balanceren van het systeem dienen de regelkranen (Kvs-waarde) een klepautoriteit te bevatten rond 0,3-0,7 voor gunstig gedrag [22]. Een perfect gebalanceerd systeem kan perfect functioneren in vollast, maar kan in deellast ongunstig gedrag vertonen bij niet-optimale autoriteit [22]. Tegenwoordig worden steeds vaker drukonafhankelijke regelkranen of Pressure Independent Control Valves (PICV's) gebruikt als alternatief voor een tweeweg modulerende kraan gecombineerd met een dynamische inregelkraan [51].

Hoewel het traditionele ontwerpproces ventilatie en centrale verwarming doorgaans afzonderlijk benadert, gebeurt dit idealiter in samenhang binnen één geïntegreerd traject. Bovendien blijken de huidige richtlijnen onvolledig en ontoereikend voor een duurzame systeemaanpak. In de volgende paragraaf wordt toegelicht welke aanpassingen noodzakelijk zijn om dit ontwerpproces te optimaliseren.

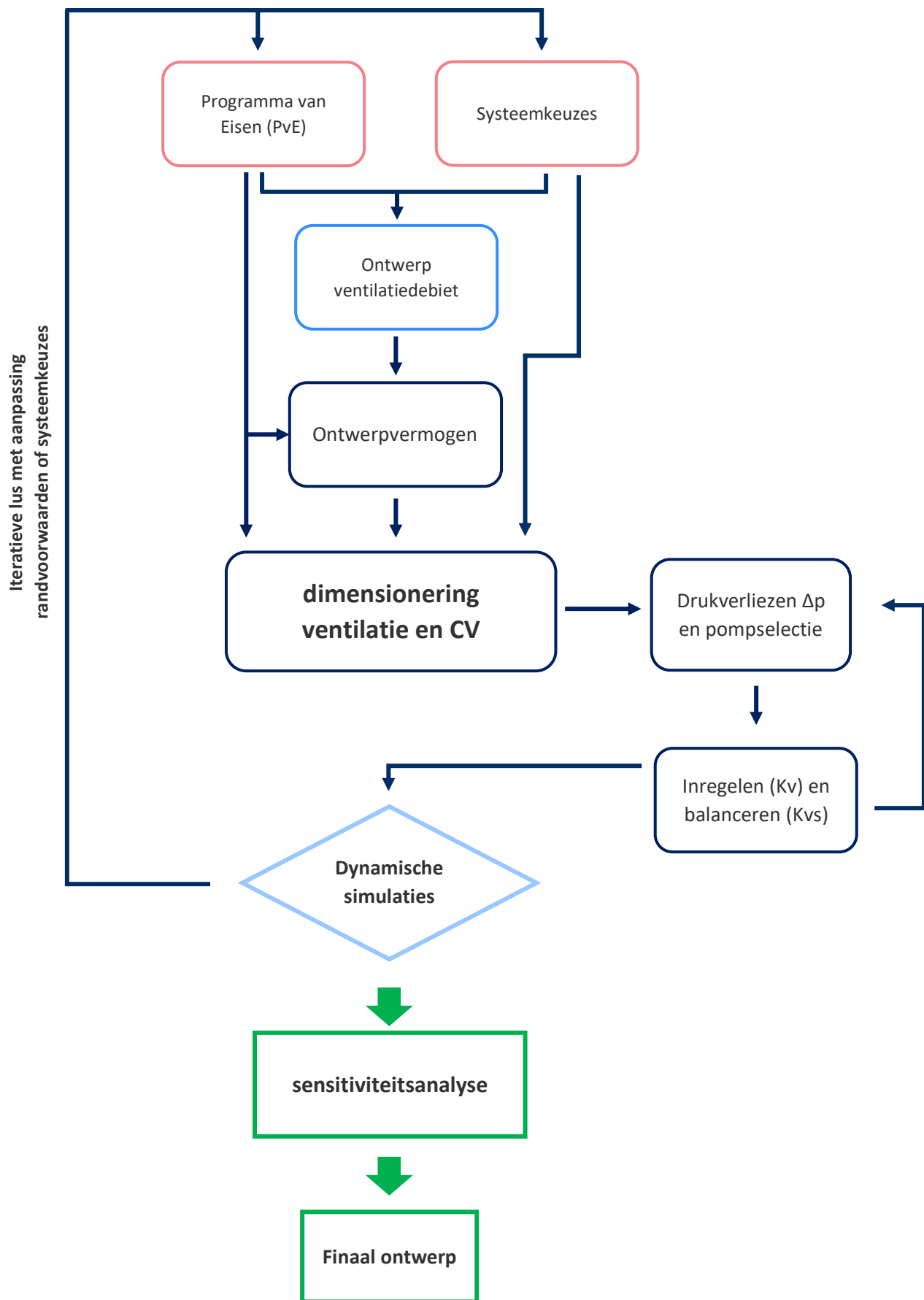
### 3.3 Noodzaak dynamische simulaties en herevaluatie van ontwerpkeuzes

In paragrafen 4.1 en 4.2 wordt het gangbare ontwerpproces voor HVAC-installaties in grote lijnen besproken. Binnen dit proces wordt doorgaans een opeenvolging van keuzes gemaakt zoals bijvoorbeeld de afgiftestrategie, de productie-eenheid, soorten regelingen en het gehanteerde temperatuurregime. In de praktijk worden deze ontwerpbeslissingen vervolgens verder uitgewerkt tot een volledig installatieconcept.

Het gangbare ontwerpproces voor HVAC-installaties kenmerkt zich vaak door een lineaire benadering waarin doorgaans één ontwerpvoorstel wordt uitgewerkt, zonder dat alternatieve systeemconfiguraties expliciet in overweging worden genomen. Een cruciale stap ontbreekt: er is geen systematische evaluatiefase waarin wordt onderzocht of de genomen ontwerpkeuzes daadwerkelijk leiden tot het meest performante scenario binnen de context van de beoogde installatie.

Hierdoor is het noodzakelijk om aan het bestaande ontwerpproces een aanvullende iteratieve stap toe te voegen, waarin de voorgestelde configuratie wordt onderworpen aan dynamische simulaties door middel van een sensitiviteitsanalyse. Deze analyse laat toe om op objectieve en kwantitatieve wijze te evalueren in welke mate alternatieve ontwerpkeuzes, resulteren in een betere systeemprestatie. Op basis van deze resultaten kan het oorspronkelijke ontwerp herzien worden, wat leidt tot een geoptimaliseerde configuratie die afgestemd is op de specifieke gebouwkarakteristieken en randvoorwaarden.

In figuur 16 wordt dit voorstel grafisch weergegeven: het traditionele ontwerpproces wordt uitgebreid met een terugkoppeling die, gevoed door de resultaten van de simulaties, het proces opnieuw doorloopt met alternatieve ontwerpkeuzes. Deze iteratieve aanpak vormt een belangrijke stap in het realiseren van duurzame en performante installaties. De laatste stap in dit uitgebreide proces bestaat uit de vergelijkende evaluatie van de onderzochte ontwerpkeuzes, waarbij het scenario met de meest evenwichtige combinatie van energie-efficiëntie, comfort en technische haalbaarheid als voorkeursconfiguratie wordt geselecteerd.



Figuur 16: Retrofit ontwerpproces ventilatie en CV-installatie met noodzakelijke aanvullingen

### **Stap 1: Programma van Eisen (PvE) en systeemkeuze**

Het programma van eisen blijft ongewijzigd en is van toepassing op zowel het ventilatie- als het verwarmingssysteem. Het PvE bevat impliciet al de transmissieverliezen van het gebouw. Parallel hiermee worden diverse systeemkeuzes gemaakt zoals besproken in paragraaf 4.2.

### **Stap 2: Ontwerp ventilatie debiet**

In de volgende stap wordt het ontwerp ventilatiedebiet berekend (NBN EN 12831-1), wat dan op zijn beurt de ventilatieverliezen bepaald.

### **Stap 3: Ontwerpvermogen**

Op basis van de warmteverliesberekeningen wordt het minimaal te installeren vermogen bepaald. Dit is het maximale vermogen dat de productie-eenheid gelijktijdig moet kunnen leveren om te kunnen voldoen aan de verwarmingsbehoeften.

### **Stap 4: Dimensionering ventilatie en CV**

Op basis van het ontwerpvermogen en de systeemkeuzes, waarin beslist wordt hoeveel gedekt wordt door ventilatie en hoeveel door CV, wordt het waterzijdig ontwerpdebiet  $\dot{V}$  berekend. Vervolgens worden de verschillende componenten zoals de verwarmingsbatterij, de radiatoren en de leidingen gedimensioneerd.

### **Stap 5 en 6: Drukverliezen, pompselectie, inregelen en balanceren**

In dit geval wijkt de werkwijze niet af van het traditionele ontwerpproces; de stappen verlopen overeenkomstig de beschrijving in paragraaf 4.2.

### **Stap 7: Dynamische simulaties**

Vervolgens worden dynamische simulaties uitgevoerd waarin het ontworpen systeem onder variërende randvoorwaarden en systeemkeuzes wordt geëvalueerd. Deze simulaties maken het mogelijk om via een iteratief proces alternatieve ontwerpkeuzes te testen en hun invloed op de systeemprestaties te analyseren.

### **Stap 8: Sensitiviteitsanalyse en finaal ontwerp**

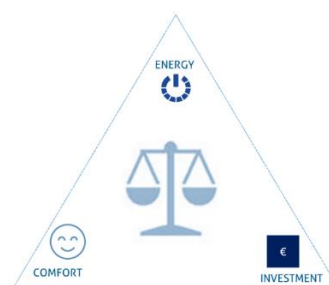
Binnen de sensitiviteitsanalyse worden alle resultaten van de uitgevoerde simulaties met elkaar vergeleken om de impact van verschillende ontwerpkeuzes en randvoorwaarden systematisch te evalueren. Deze aanpak maakt het mogelijk om het meest performante ontwerp te identificeren, optimaal afgestemd op de specifieke gebouwenkenmerken en randvoorwaarden, met bijzondere aandacht voor een efficiënte integratie van de warmtepomp.

### 3.3.1 Hysopt-software

Om de iteratieve ontwerpfase op een efficiënte en gestructureerde wijze te doorlopen zijn er verschillende mogelijkheden, waarbij in dit onderzoek gebruik wordt gemaakt van de Hysopt-software. Hysopt is een krachtige en gebruiksvriendelijke software die het mogelijk maakt een gedetailleerde visualisatie van de installatie weer te geven en beoogt de meest optimale systeemprestaties te bekomen. Door het uitvoeren van ontwerpberekeningen en dynamische simulaties maakt Hysopt het mogelijk het thermisch- en hydraulisch gedrag en de energieprestaties van een installatie te evalueren. Hysopt draagt in dit onderzoek voornamelijk bij door zijn gebruiksvriendelijke interface, die het mogelijk maakt om de opeenvolgende stappen van het simulatieproces, zoals weergegeven in de methodologische flowchart, grotendeels te automatiseren. Hierdoor kunnen verschillende ontwerpconfiguraties snel en gestructureerd geëvalueerd worden.

Het ontwerpen en optimaliseren van een installatie gebeurt op basis van drie hoofdstappen in Hysopt:

1. Het **digitaliseren** van een bestaande of nieuwe installatie en het uitvoeren van **ontwerpberekeningen**, waarbij Hysopt het mogelijk maakt een digitale tweeling te creëren. Deze fase omvat in essentie de volledige beslissingsstructuur met de uitwerking van één concept. Deze stap komt overeen met het gedeelte van de flowchart dat reikt tot net vóór de uitvoering van de dynamische simulaties (stap 1-6):
  - a. Ontwerpdebieten
  - b. Leidingselectie en componenten dimensionering
  - c. Inregeling
2. Het uitvoeren van **dynamische simulaties** onder variabele omstandigheden en verschillende concepten (stap 7)
3. In de evaluatiefase worden de bekomen resultaten onderling vergeleken om zo tot het meest optimale ontwerpvoorstel te komen. Deze stap wordt weergegeven door de groene blokken in de flowchart van figuur 16 (stap 8), waarin op basis van verschillende Key Performance Indicators (KPI's) een afweging kan worden gemaakt tussen de verschillende scenario's. De gehanteerde KPI's en hun betekenis worden uitgebreid besproken in hoofdstuk 4. Figuur 17 geeft een overzicht van de verschillende categorieën van KPI's die in Hysopt als vergelijkingsbasis kunnen worden gebruikt.



*Figuur 17: De drie hoofdcategorieën van KPI's die worden gebruikt in pareto analysis van Hysopt om verschillende concepten op gelijkwaardige manier met elkaar te vergelijken [52]*

De mogelijkheden van Hysopt om iteratieve ontwerpvarianten te analyseren vormen de basis voor het opstellen van een casestudie in het volgende hoofdstuk. Deze case dient als uitgangspunt voor een gevoeligheidsanalyse van verschillende ontwerpkeuzes en randvoorwaarden.

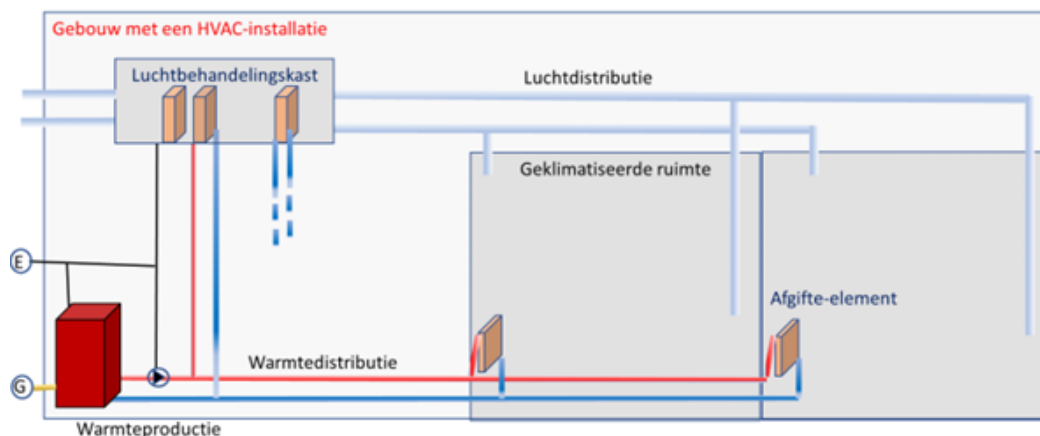
## 4 Methode

Het ontbreken van een geïntegreerd beoordelingskader bemoeilijkt een objectieve evaluatie van de geschiktheid van warmtepomptoeepassingen binnen renovatiecontexten. Er is nood aan onderbouwde ontwerprichtlijnen en een beslissingskader om dergelijke integraties verantwoord te onderbouwen.

In dit kader wordt een fictieve referentiecasi opgesteld die het traditionele ontwerpproces weerspiegelt, typisch gekenmerkt door hoge temperatuurregimes en conventionele warmteopwekking via een gasketel. Aan de hand van deze case wordt onderzocht hoe ontwerpkeuzes en invloedsparameters de systeemprestaties beïnvloeden wanneer een warmtepomp wordt toegepast. Het eerste deel van dit hoofdstuk beschrijft de casus in detail, gevolgd door een toelichting van de geanalyseerde parameters en de gehanteerde KPI's.

### 4.1 Concept case

In deze case wordt zowel ventilatie als verwarming behandeld. De verwarming gebeurt centraal door een aardgasketel. De luchtbehandelingsunit conditioneert de verse buitenlucht vooraleer deze de verschillende ruimtes wordt ingeblazen. De case maakt gebruik van een hybride energie afgiftestrategie, waarbij de ruimteverwarming wordt gerealiseerd door enerzijds radiatoren in de ruimtes en anderzijds door de verwarmingsbatterij in de luchtbehandelingsunit. De keuze voor radiatoren wordt bewust genomen, aangezien deze afgiftesystemen de meest gebruikte verwarmingslichamen zijn in bestaande installaties [16]. Het concept wordt voorgesteld in figuur 18.



Figuur 18: Conceptbeschrijving referentiecasi. De verse buitenlucht wordt geconditioneerd door een luchtbehandelingsunit, waarbij de ruimteverwarming wordt gerealiseerd door hybride afgiftestrategie

De installatie bestaat uit vier hoofddelen:

- De centrale productie
- De distributie
- Ventilatie
- De energie afgiftesystemen voor ruimteverwarming (verwarmingsbatterij en radiatoren)

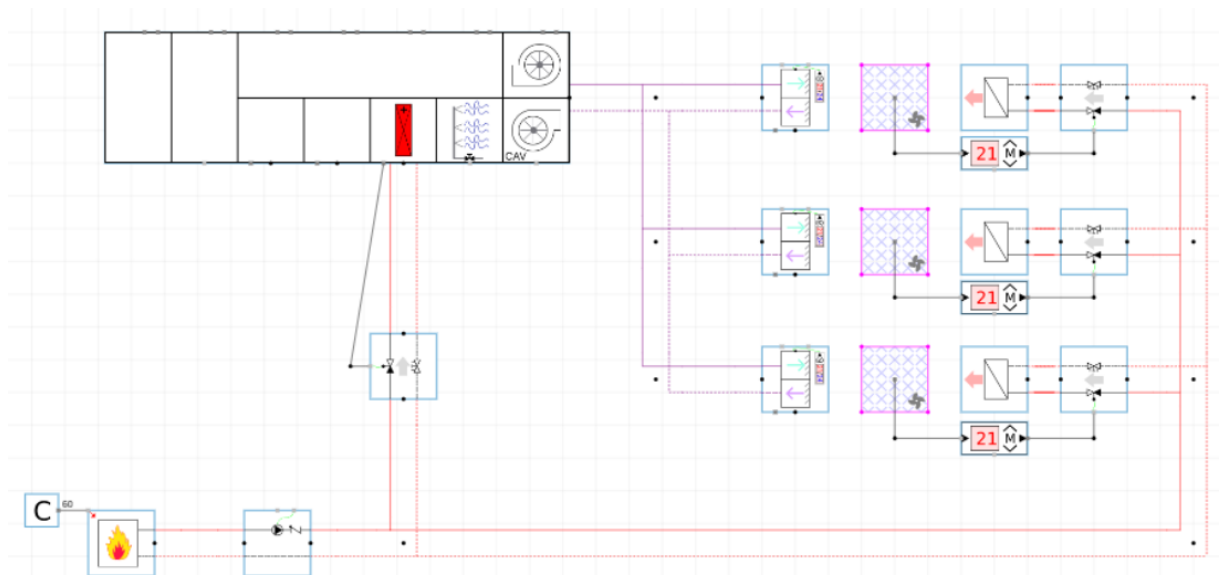
De distributiecircuits zijn telkens uitgerust met een smoorschakeling, waarbij deze schakeling steeds het gevraagde debiet naar de afgiftesystemen regelt. Deze smoorschakelingen worden visueel weergegeven in hoofdstuk 8.3 in de appendix.

Binnen het gekozen systeemconcept wordt de verse buitenlucht geconditioneerd door een luchtbehandelingsunit met ventilatiesysteem type D, waarbij het ontwerpdebiet gedeeltelijk instaat voor de verwarming van de verschillende ruimtes. Er wordt bewust gekozen om geen vraaggestuurde ventilatie toe te passen omdat volgens Raftery et al. [12] veel van de bestaande gebouwen functioneren op basis van constante minimale luchtdebieten. Hiernaast beschrijven Buildwise en ISSO-richtlijnen diverse best practice regelstrategieën, maar weinig bestaande gebouwen maken hiervan gebruik [13,14,47,53]. Het ontwerpdebiet doorheen de luchtbehandelingsunit wordt bepaald op basis van een minimaal ventilatiedebiet in functie van volledige persoonsbezetting van de ruimtes en conform de eisen voor luchtkwaliteit en thermisch comfort (NBN EN 13779).

Zoals besproken wordt de ruimteverwarming gerealiseerd door een hybride afgiftestrategie. Hierbij wordt de totale energievraag gelijkmatig verdeeld over twee warmteafgiftesystemen: enerzijds de verwarmingsbatterij in de luchtbehandelingsunit en anderzijds klassieke radiatoren in de verschillende ruimtes. De installatie wordt zodanig gedimensioneerd dat beide warmte afgifte-systemen ongeveer 50% van de totale energievraag dekken (verwarmingsratio van 50%).

De verwarmingsratio van 50% via mechanische ventilatie is gekozen op basis van gangbare ontwerppraktijken, waarbij het ventilatiesysteem een substantieel aandeel levert in de totale verwarmingsbehoefte van het gebouw. Het verder verhogen van dit aandeel zou echter vereisen dat de inblaastemperaturen aanzienlijk toenemen, wat omwille van comfortoverwegingen niet wenselijk is. Om dit te vermijden, wordt gekozen voor een hybride afgiftestrategie met een verwarmingsratio van 50% voor beide afgifte-systemen. Hierbij staat het ontwerp ventilatiedebiet in voor 50% van de energievraag, terwijl de resterende 50% wordt geleverd door radiatoren die specifiek zijn gedimensioneerd op basis van de resterende warmtelast.

Onderstaande figuur geeft het concept van de referentiecasse weer in de Hysopt-software. Figuur 19 illustreert louter het concept en niet het uiteindelijke model van de referentiecasse. Dit model is terug te vinden in hoofdstuk 8.3 van de appendix.



Figuur 19: Installatie concept referentiecasse in Hysopt, waarbij de ruimteverwarming wordt gerealiseerd door een lucht- en water systeem

#### 4.1.1 Randvoorwaarden referentiecasse

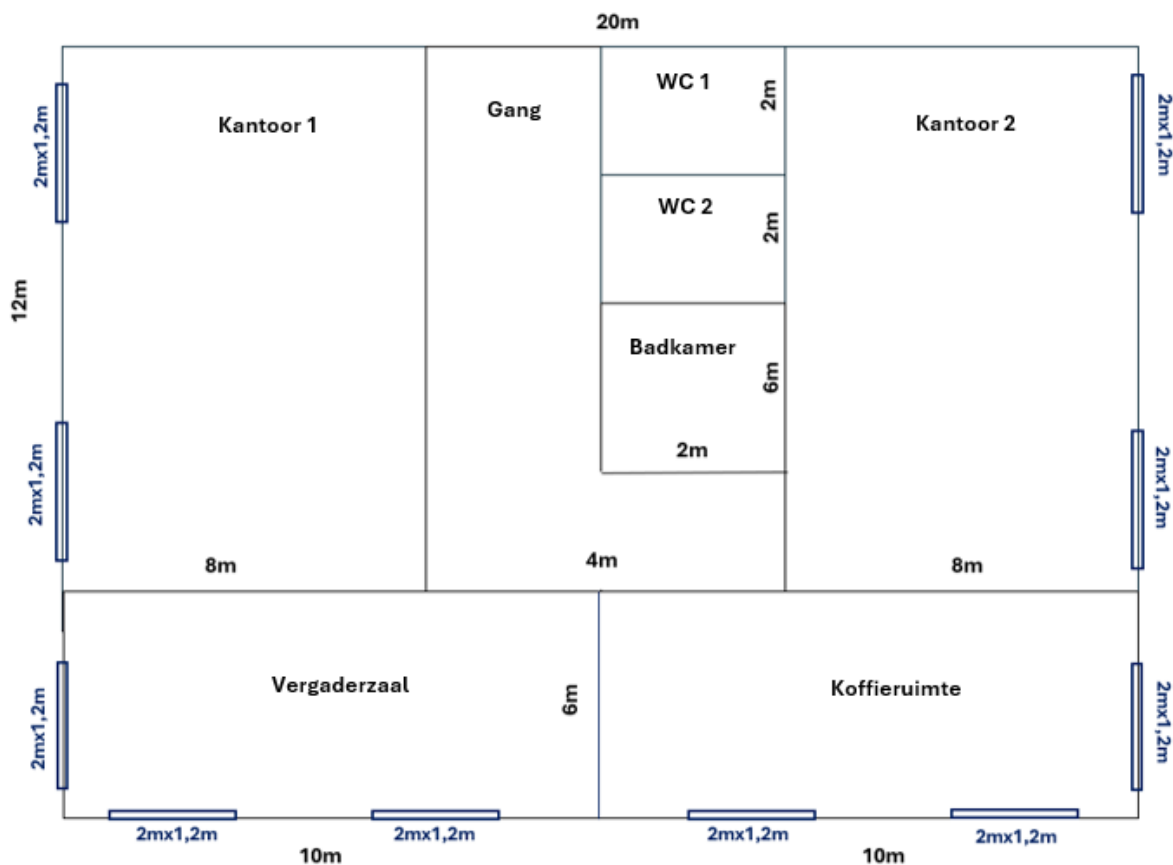
Met een totale netto vloer-oppervlakte van 360 m<sup>2</sup> en een volume van 1260 m<sup>3</sup> bestaat het gebouw uit twee kantoorruimtes, een vergaderzaal, een koffieruimte, twee wc's en een badkamer ontworpen conform Vlaamse EPB regelgeving en Buildwise normgeving. Het ontwerp wordt opgesteld met de klimatologische condities van Vlaanderen als uitgangspunt, en wordt gevisualiseerd in figuur 20. Conform de ontwerpcriteria van NBN B 62-003 wordt voor de winterperiode een ontwerp-buitentemperatuur van -9°C gehanteerd. Dit vormt de basis voor de dimensionering van het verwarmingssysteem, dat het thermisch comfort moet kunnen garanderen onder deze worst-case omstandigheden [16].

In lijn met het traditionele ontwerpproces wordt voor de referentiecasse gekozen voor een verwarmingssysteem dat gebaseerd is op een temperatuurregime van 60/50 °C. Volgens Yang et al. [6] en Raftery et al. [12] wordt dit temperatuurregime beschouwd als een gangbaar regime in de praktijk.

De thermische eigenschappen van de gebouwschil vormen een essentiële parameter voor de berekening van de warmteverliezen en bijgevolg voor de dimensionering van het verwarmingssysteem. Voor de bepaling van de U-waarden worden tabellen geraadpleegd van de geldende regelgeving voor nieuwbouw en ingrijpende renovaties in Vlaanderen. Concreet wordt gebruik gemaakt van de EPB-eisen zoals vastgelegd door het Vlaams Energie- en Klimaatagentschap (VEKA). Deze waarden zijn terug te vinden in tabel 4.

| $U_{\text{Buitenmuur}}$<br>[W/m <sup>2</sup> K] | $U_{\text{Binnenmuur}}$<br>[W/m <sup>2</sup> K] | $U_{\text{Raam}}$<br>[W/m <sup>2</sup> K] | $U_{\text{Vloer}}$<br>[W/m <sup>2</sup> K] | $U_{\text{Plafond}}$<br>[W/m <sup>2</sup> K] |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 0,24                                            | 1,1                                             | 1,5                                       | 0,24                                       | 0,24                                         |

Tabel 4: U-waarden gebouwschil volgens EPB-eisen [48]



Figuur 20: Plattegrond kantoor gebouw fictieve referentiecasse

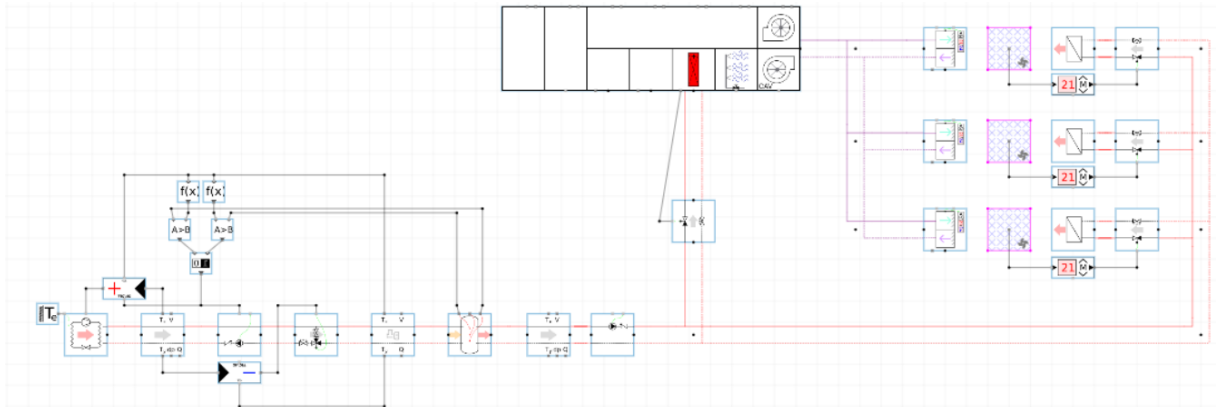
Voor elke ruimte wordt een comforttemperatuur bepaald, afgestemd op het gebruik van de ruimtes. Voor elke ruimte wordt het totaal benodigde verwarmingsvermogen berekend, waarbij zowel transmissieverliezen als ventilatieverliezen in rekening worden gebracht. Voor eenvoud van de case study wordt het supplementair opwarmingsvermogen buiten beschouwing gelaten. De berekeningen voor de transmissieverliezen worden uitgevoerd met behulp van de norm NBN EN 12831-1, terwijl de ventilatieverliezen worden bepaald volgens de minimeisen voor binnenluchtkwaliteit, zoals opgelegd door de norm NBN EN 16798-3 en NBN EN 12831-1.

|              | Comforttemperatuur [°C] | Transmissieverliezen [kW] | Ventilatieverliezen [kW] |
|--------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Kantoor 1    | 21                      | 1,87                      | 1,98                     |
| Kantoor 2    | 21                      | 1,70                      | 1,98                     |
| Vergaderzaal | 21                      | 0,99                      | 2,50                     |
| Koffieruimte | 21                      | 0,99                      | 2,50                     |
| Gang         | 17                      | -0,25                     | 0,89                     |
| WC 1         | 22                      | 0,13                      | 0,05                     |
| WC 2         | 22                      | 0,08                      | 0,05                     |
| Badkamer     | 22                      | 0,26                      | 0,05                     |

Tabel 5: Totaal verwarmingsvermogen per ruimte referentie case bij gehanteerde comforttemperaturen

## 4.2 Warmtepomp integratie bij hoge temperatuurregime (60/50°C)

De referentiecasse met een gasketel dient als uitgangspunt voor verdere evaluaties. Vervolgens wordt onderzocht wat de impact is van deze gasketel één-op-één te vervangen door een lucht-water warmtepomp, zonder andere wijzigingen aan de installatie aan te brengen. Hiervoor wordt een nieuw model ontwikkeld dat vervolgens dient als uitgangspunt voor de sensitiviteitsstudie die wordt uitgevoerd in hoofdstuk 5. In onderstaande figuur wordt het concept voorgesteld van de warmtepomp integratie in de bestaande uitgangssituatie. Ook hier is dit louter een visuele weergave van het concept en wordt het volledig bijhorende model weergegeven in hoofdstuk 8.4 van de appendix.



*Figuur 21: Installatie concept lucht-water warmtepomp integratie in Hysopt, waarbij de ruimteverwarming wordt gerealiseerd door een lucht- en water systeem*

De vergelijking tussen beide technologieën wordt besproken in hoofdstuk 5. Het model bevat dezelfde randvoorwaarden als de referentiecasse met de gasketel, besproken in paragraaf 5.1, maar er komen enkele randvoorwaarden bij.

### 4.2.1 Bijkomende randvoorwaarden warmtepomp integratie

De oorspronkelijke randvoorwaarden van de gasketel referentiecasse blijven behouden, zoals de isolatiegraad, het regime en de warmteverliezen. Hiernaast worden aanvullende randvoorwaarden opgelegd in het kader van deze warmtepompintegratie.

#### 4.2.1.1 Buffervat

Het toepassen van een buffervat in een verwarmingssysteem met een warmtepomp is in de meeste gevallen essentieel om een stabiele en efficiënte werking van de installatie te garanderen [54]. De voornaamste reden om een buffervat te voorzien is het verminderen van het aantal start/stop cycli om de levensduur van de warmtepomp te verhogen. Een vermindering van het aantal start/stop cycli resulteert in een hogere systeemefficiëntie.

Volgens ISSO-publicatie 72 [54] moet een warmtepomp bij het ontworpen temperatuursverschil ( $\Delta T$ ) minimaal 10 minuten onafgebroken kunnen functioneren. Deze minimale bedrijfstijd per cyclus vormt de basis voor het bepalen van de benodigde systeeminhoud, en dus de minimale grootte van het buffervat [11].

In de simulaties wordt er bewust gekozen voor een buffervat met een volume van  $1 \text{ m}^3$ , aangezien buffervaten doorgaans slechts in discrete volumes beschikbaar zijn. Deze keuze biedt bovendien een

functionele veiligheidsmarge die bijdraagt aan een stabiele en betrouwbare werking van het hydraulisch systeem. Om deze keuze te onderbouwen wordt een eenvoudige energiebalans uitgevoerd, waarbij wordt nagegaan hoelang het duurt om dit volume 5 °C op te warmen bij nominaal vermogen van de warmtepomp.

$$t = \frac{V \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T}{P_{WP} \cdot 3600}$$

Waarbij:

V: Volume buffervat [m<sup>3</sup>]

ρ: Dichtheid water [kg/m<sup>3</sup>]

c: Soortelijke warmtecapaciteit [kJ/kgK]

ΔT: Temperatuurverschil, gewenste temperatuurverhoging [K]

P<sub>WP</sub>: Thermisch vermogen warmtepomp [kW]

Aangezien de bedrijfstijd van de warmtepomp ongeveer 13 minuten bedraagt voor het opwarmen van een buffervat van 1 m<sup>3</sup> met een temperatuurstijging van 5 °C, kan worden gesteld dat deze vatinhoud een voldoende grote thermische buffer biedt om kortcyclisch gedrag te vermijden en een stabiele werking van de warmtepomp binnen een gunstig bedrijfspunt te garanderen.

#### 4.2.1.2 COP in Hysopt

De berekende warmteverliezen van het gebouw worden ingegeven in Hysopt, waarbij de software op basis hiervan het benodigde ontwerpvermogen van de warmtepomp berekende. In de simulaties wordt vervolgens een lucht-water warmtepomp van 27 kW toegepast. Voor de prestatiegegevens van deze warmtepomp wordt gebruikgemaakt van de standaard COP-tabel die in Hysopt geïntegreerd is. Deze tabel is niet gebaseerd op één specifiek commercieel toestel.

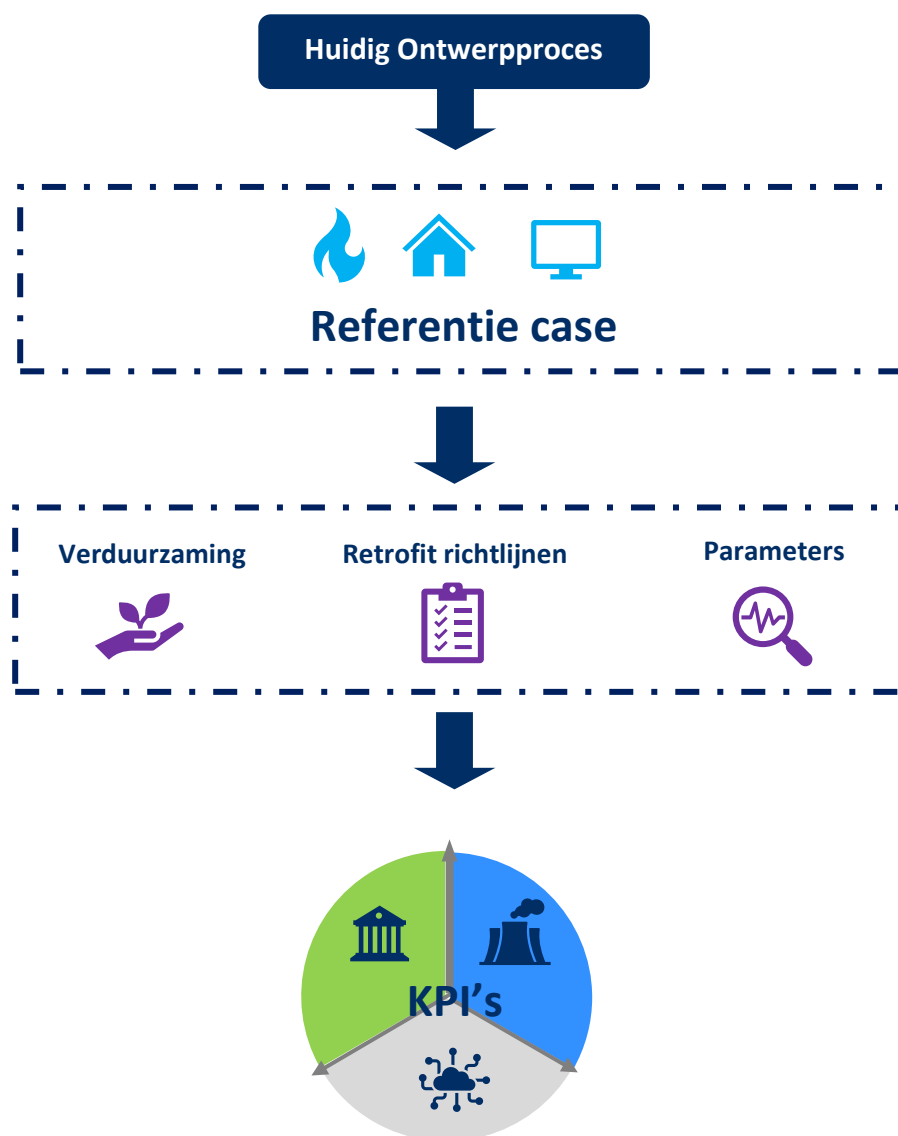
In tabel 6 wordt de impact van louter de vervanging van de productie-eenheid door een warmtepomp weergegeven. De vergelijking tussen beide technologieën wordt besproken in hoofdstuk 5.

|                                                  | Referentiecasi 1 | Referentiecasi WP 1    |
|--------------------------------------------------|------------------|------------------------|
| Systeem                                          | Ketel            | Lucht-water warmtepomp |
| Ontwerpvermogen [kW]                             | 27               | 27                     |
| Regime [°C]                                      | 60/50            | 60/50                  |
| Ontwerpdebiet [m <sup>3</sup> /h]                | 980              | 980                    |
| UA <sub>batterij</sub> [W/K]                     | 604              | 604                    |
| Totale energieverbruik (gas/elektriciteit) [kWh] | 42 972           | 15 524                 |
| Energiebesparing                                 | /                | 64%                    |
| η <sub>Ketel</sub>                               | 95,7%            | /                      |
| SCOP                                             | /                | 3,08                   |
| OPEX [€/jaar]                                    | 3900             | 3368                   |
| CO <sub>2</sub> – emissie [ton]                  | 9,15             | 3,69                   |

Tabel 6: Randvoorwaarden en resultaten referentiecasi met conventionele gasketel t.o.v. dezelfde case waar de ketel wordt vervangen door een lucht-water warmtepomp

### 4.3 Overzicht invloedsparameters

Om de impact van verschillende ontwerpkeuzes en invloedsparameters op de prestaties van een warmtepompsysteem objectief te beoordelen, wordt een uitgebreide sensitiviteitsstudie uitgevoerd. Deze aanpak onderzoekt de retrofitmogelijkheden van bestaande verwarmingssystemen, met nadruk op een efficiënte integratie van warmtepompsystemen in bestaande installaties. In deze paragraaf worden de diverse mogelijke invloedsparameters nader toegelicht en wordt gespecificeerd welke hiervan daadwerkelijk in het kader van dit onderzoek worden geanalyseerd. Onderstaande figuur 22 visualiseert de gehanteerde werkwijze, waarbij de besproken referentiecasse het uitgangspunt vormt voor verdere simulaties en concepten.



*Figuur 22: Methode van dit onderzoek, waarbij een referentiecasse wordt opgesteld a.d.h.v. het huidige ontwerpproces om vervolgens te onderzoeken welke invloedsparameters de grootste impact hebben op een efficiënte integratie van warmtepompsystemen in bestaande installaties*

Zoals besproken in paragraaf 4.2 wordt initieel de gasketel één-op-één vervangen door een lucht-water warmtepomp, zonder bijkomende aanpassingen aan het bestaande afgifte- of distributiesysteem. Dit laat toe om de impact van de warmteopwekker zelf geïsoleerd te evalueren.

In dit onderzoek worden de vijf invloedsparameters uit tabel 7 onderzocht, die in het totaal goed zijn voor 48 unieke scenario's die gesimuleerd worden. Hierbij wordt de impact van drie verschillende isolatiegraden, een vraaggestuurd ventilatiesysteem op basis van dynamische bezettingsprofielen, een warmterecuperatiesysteem, twee verschillende ontwerpdebiet configuraties en een wijziging in de UA-waarde van de verwarmingsbatterij onderzocht. Hierbij wordt onderzocht in welke mate het mogelijk wordt lagere waterzijdige aanvoertemperaturen te realiseren, aangezien warmtepompen zeer afhankelijk zijn van deze temperatuurniveaus [7], [12], [30], [55].

Het volledig aanpassen van het hydraulisch systeem is vaak niet wenselijk binnen de renovatiecontext. Binnen deze studie wordt uitgegaan van een realistisch renovatiescenario waarbij het bestaande hydraulische netwerk, inclusief leidingen, pompselectie, radiatoren en regelingen behouden blijft. In onderstaande tabel worden de verschillende concepten van de sensitiviteitsstudie weergegeven:

|                  | U-waardes<br>gebouwschil | Type ventilatie<br>(D of D+) | WTW-unit | UA-waardes<br>verwarmingsbatterij | $\dot{V}_{ventilatie}$ |
|------------------|--------------------------|------------------------------|----------|-----------------------------------|------------------------|
| Aantal variaties | 3                        | 2                            | 2        | 2                                 | 2                      |

*Tabel 7: Overzicht van de gehanteerde invloedsparameters voor de sensitiviteitsstudie van de 48 simulaties*

Bepaalde relevante aspecten vielen buiten de scope van dit onderzoek en zijn bijgevolg niet meegenomen in de uitgevoerde simulaties. Enkele voorbeelden daarvan zijn:

- Impact van interne warmtewinsten door personen en apparatuur.
- Impact van passieve zonnwinsten
- De impact van het al dan niet toepassen van nachtverlaging
- Variatie in verwarmingsratio tussen enerzijds de verwarmingsbatterij en anderzijds de radiatoren
- Het gebruiken van diverse COP-tabellen
- Impact van modulerend aangestuurde warmtepomp
- Vergelijking tussen andere types warmtepompen

Deze elementen bieden opportuniteiten voor verder onderzoek en kunnen de resultaten verder verfijnen en uitbreiden in toekomstige studies.

#### 4.3.1 Isolatiegraad gebouwschil

De isolatiegraad van het gebouw bepaalt in aanzienlijke mate de warmteverliezen en heeft een grote impact op de efficiëntie van warmtepompen [8], [56]. Er worden drie scenario's uitgewerkt voor de gebouwschil, waarbij de U-waardes worden aangepast om hun impact op een warmtepomp implementatie te illustreren. Voor de U-waarden van de gebouwschil wordt in de sensitiviteitsstudie uitgegaan van een bereik dat representatief is voor zowel bestaande als energiezuinige gebouwen. De ondergrens voor de isolatiegraad (hoge U-waardes) wordt bepaald door de minimale eisen zoals vastgelegd in de Vlaamse EPB-regelgeving en momenteel gangbaar zijn in België, terwijl de bovengrens (lage U-waardes) aansluit bij zeer performante schilconcepten, zoals toegepast in passiefbouw. De

gemiddelde U-waardes liggen tussen beide scenario's in. De drie profielen voor de U-waardes worden weergegeven in onderstaande tabel 8.

| <i>Scenario</i>     | Hoog [W/m <sup>2</sup> K] | Gemiddeld [W/m <sup>2</sup> K] | Laag [W/m <sup>2</sup> K] |
|---------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| $U_{buitenmuur}$    | 0,24                      | 0,20                           | 0,15                      |
| $U_{binnenmuur}$    | 1,1                       | 0,80                           | 0,60                      |
| $U_{raam}$          | 1,5                       | 1,25                           | 1,0                       |
| $U_{vloer/plafond}$ | 0,24                      | 0,20                           | 0,15                      |

Tabel 8: Variaties U-waarden van de gebouwschil toegepast in de simulaties [50]

#### 4.3.2 Vraaggestuurde ventilatie-systemen – VAV (type D+)

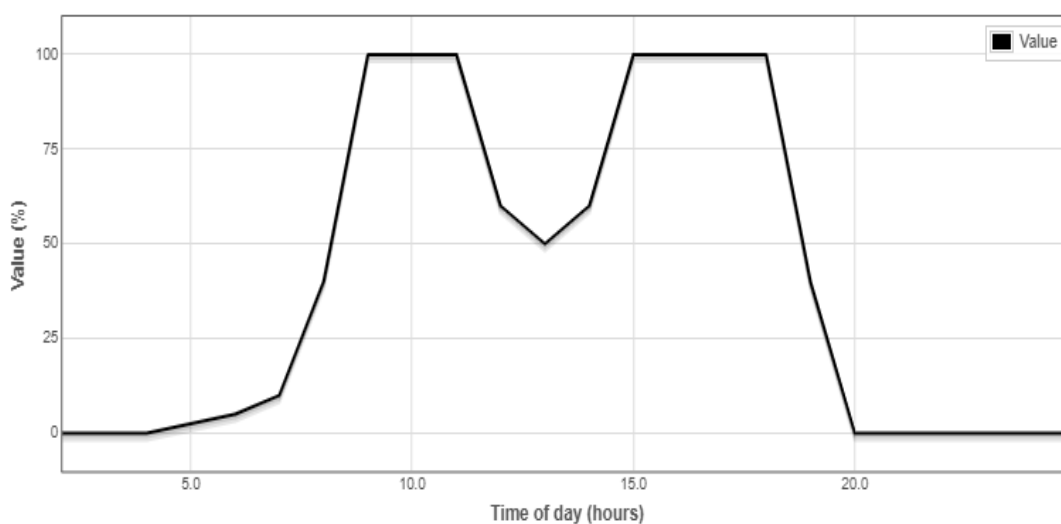
De tweede invloedsparameter betreft het gebruik van dynamische bezettingsprofielen. In plaats van een constante bezetting wordt per ruimte een tijdsafhankelijk profiel toegepast dat het werkelijke gebruik beter benadert. Door het toepassen van dynamische bezettingsprofielen wordt nagegaan wat de impact is op het totale energieverbruik van de installatie. Deze profielen beïnvloeden rechtstreeks het ventilatiedebiet door middel van het vraaggestuurde ventilatiesysteem (VAV). In dit onderzoek worden twee scenario's toegepast: enerzijds met vraaggestuurde ventilatieprofielen en anderzijds zonder.

In overeenstemming met de geldende EPB-regelgeving en de norm NBN D50-001 wordt in sanitaire ruimtes, zoals badkamers en toiletten, uitsluitend mechanische afvoer voorzien. Deze ruimtes worden beschouwd als 'natte' zones waar vervuilde en vochtige lucht effectief moet worden afgevoerd. Het voorzien van luchttoevoer in deze ruimtes is niet gebruikelijk en wordt afgeraden, aangezien dit de verspreiding van geuren en vocht naar andere delen van het gebouw kan bevorderen [53]. In het specifieke geval van de gang wordt mechanische luchttoevoer voorzien zonder directe afvoer. Er zijn voor de kantoren, de vergaderzaal, de koffieruimte en de gang telkens profielen opgesteld die hieronder zijn weergegeven.

Om de representativiteit van de bezettingsprofielen te waarborgen, worden deze vergeleken met de standaardprofielen uit ASHRAE-richtlijnen [18]. Op basis van deze vergelijking wordt bevestigd dat de gehanteerde profielen in lijn liggen met gangbare gebruikspatronen voor kantoren en vergaderruimtes.

In figuur 23 wordt het dynamisch bezettingsprofiel voor kantoor 1 en 2 weergegeven. Vanaf de ochtenduren neemt voor de kantoren 1 en 2 de bezetting geleidelijk toe, met een piek tussen circa 9:00 en 12:00 en opnieuw tussen 13:00 en 17:00. Rond het middaguur is een lichte daling zichtbaar, wat overeenkomt met de middagpauze.

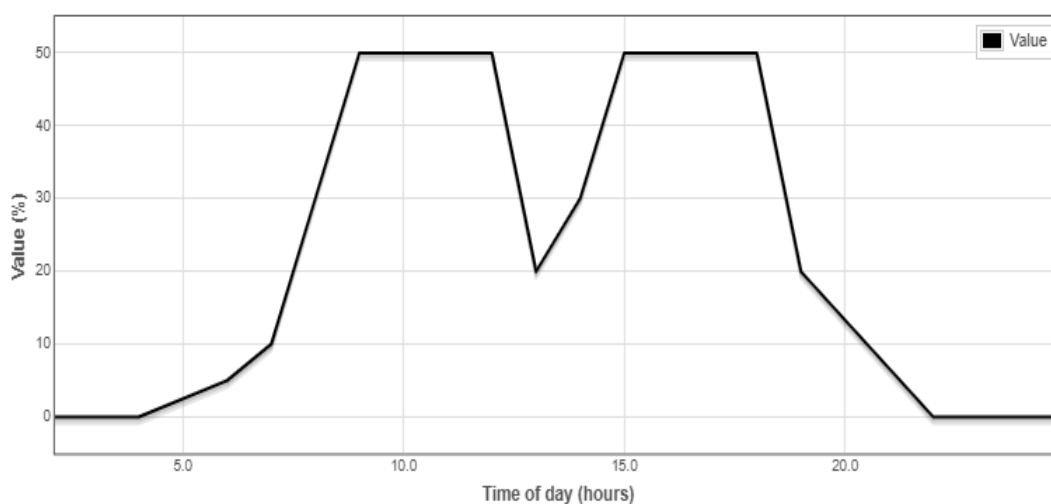
## Occupancy rate



*Figuur 23: Dynamisch bezettingsprofiel kantoor 1 en 2, wat de procentuele bezetting van de desbetreffende ruimtes weerspiegelt geuderende een hele dag*

De vergaderzaal wordt oorspronkelijk gedimensioneerd op basis van een maximale en dus volledige bezetting. Hiervoor wordt een gebruikersprofiel opgesteld met de veronderstelling dat de bezetting op geen enkel moment meer dan 50% van deze capaciteit zal bedragen, zoals geïllustreerd in figuur 24. Op deze wijze wordt een representatief gebruikspatroon van de ruimte nagebootst. Ook hier weerspiegelt de lichte daling rond 12:00 de middagpauze.

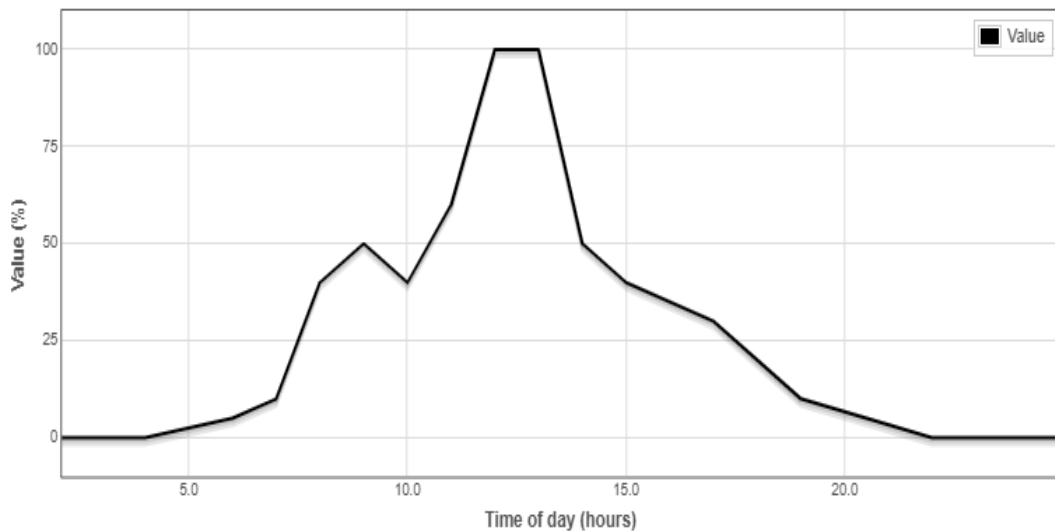
## Occupancy rate



*Figuur 24: Dynamisch bezettingsprofiel vergaderzaal, wat de procentuele bezetting van de desbetreffende ruimtes weerspiegelt gedurende een hele dag*

In figuur 25 wordt het dynamisch bezettingsprofiel voor de koffieruimte weergegeven. Het profiel voor de koffieruimte vertoont een meer uitgesproken en kortstondige piekbelasting. In de vroege ochtend en late namiddag is de bezetting beperkt, maar rond de gebruikelijke pauze tijden wordt een scherpe stijging tot volledige bezetting weerspiegelt.

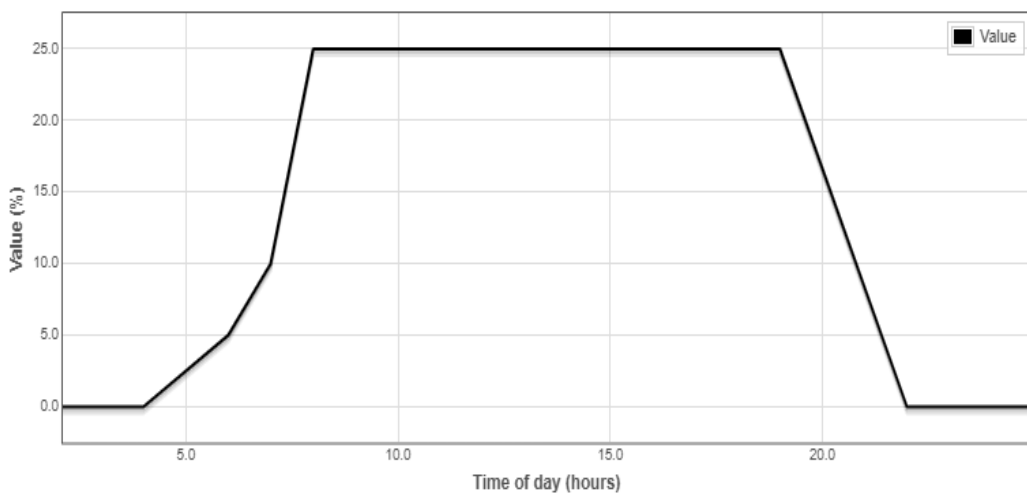
### Occupancy rate



*Figuur 25: Dynamisch bezettingsprofiel koffieruimte, wat de procentuele bezetting van de desbetreffende ruimtes weerspiegelt geurende een hele dag*

In figuur 26 wordt het bezettingsprofiel voor de gang weergegeven. Voor deze ruimte wordt uitgegaan van een simultane bezetting van maximaal 25% van het totale aantal personen, aangezien verwacht wordt dat nooit meer dan een kwart van de gebouwgebruikers zich gelijktijdig in deze circulatieruimte zal bevinden.

### Occupancy rate



*Figuur 26: Dynamisch bezettingsprofiel koffieruimte, wat de procentuele bezetting van de desbetreffende ruimtes weerspiegelt geurende een hele dag*

### 4.3.3 Warmteterugwinning/recuperatie - WTW

In de praktijk is het niet altijd haalbaar om energetische ingrepen uit te voeren op gebouwniveau. In dergelijke gevallen is het essentieel om alternatieve strategieën te onderzoeken die binnen de installatie zelf kunnen worden toegepast om alsnog een verduurzaming van het HVAC-systeem te realiseren. Naast de variatie in ventilatiestrategie en bezettingsprofielen wordt binnen deze studie ook de impact van warmteterugwinning (WTW) op de prestaties van het verwarmingssysteem onderzocht. Hoewel ontwerpoptimalisaties zoals warmterecuperatie intuïtief voor de hand liggen binnen nieuwe of duurzame gebouwconcepten, is het in de context van bestaande gebouwen niet evident dat dergelijke componenten standaard aanwezig zijn [12].

Om deze effecten te kwantificeren, worden in de simulaties twee scenario's voorzien:

- Een configuratie met warmteterugwinning
- Een configuratie zonder WTW-systeem

Op deze manier kan worden geëvalueerd in welke mate de aanwezigheid van WTW het mogelijk maakt om het temperatuurregime te verlagen en welke impact dit heeft op de prestaties en energie-efficiëntie van de installatie. In dit onderzoek wordt de keuze gemaakt voor het gebruik van een platenwarmtewisselaar als warmterecuperatiesysteem met een thermische efficiëntie van 75%.

In dit onderzoek wordt gekozen voor een platenwarmtewisselaar in plaats van een warmtewiel. Beide systemen bieden vergelijkbare thermische rendementen, maar een platenwisselaar is constructief eenvoudiger, betrouwbaarder en vereist minder onderhoud [36]. Bovendien zorgt de gescheiden luchtstroom ervoor dat kruisbesmetting uitgesloten wordt, wat de luchtkwaliteit ten goede komt.

### 4.3.4 Verhoging UA-waarde verwarmingsbatterij in luchtbehandelingsunit

Binnen dit onderzoek wordt eveneens onderzocht wat de impact is op de prestaties van de bestaande installatie door de UA-waarde van de verwarmingsbatterij te verhogen. In hoofdstuk 2 worden bestaande modellen uit de literatuur rond warmtewisselaars besproken. Voor de volledige modelbeschrijving wordt terug verwezen naar hoofdstuk 2. Het verhogen van de UA-waarde resulteert in een hoger vermogen van de verwarmingsbatterij bij eenzelfde debiet en kan worden aangetoond a.d.h.v. volgende formules 1 en 3:

$$\dot{Q} = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{w,in} - T_{w,uit}) \quad (1)$$

$$\dot{Q} = UA * \Delta T_{LMTD} \quad (3)$$

Waarbij:

$\dot{Q}$ : Warmtevermogen [W]

UA-waarde: Geleidbaarheid [W/K]

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{w;in} - T_{l;uit}) - (T_{w;uit} - T_{l;in})}{LN \frac{(T_{w;in} - T_{l;uit})}{(T_{w;uit} - T_{l;in})}}$$

Warmtepompen werken aanzienlijk efficiënter bij die lage waterzijdige aanvoertemperaturen. In de simulaties wordt gekeken in welke mate deze verhoogde UA-waarde bijdraagt aan mogelijke reductie van het huidige regime en de efficiëntieverhoging van de warmtepompintegratie.

Om de impact van deze parameter op systematische wijze te evalueren, worden twee scenario's in de sensitiviteitsstudie opgesteld. Een scenario waarin enkel de oorspronkelijke verwarmingsbatterij wordt toegepast met een UA-waarde van 604 W/K, terwijl in het tweede scenario de UA-waarde van de verwarmingsbatterij 50% wordt verhoogd (UA-waarde: 900 W/K). Hierdoor wordt louter het effect van de verhoogde warmtewisselcapaciteit onderzocht, los van eventuele optimalisaties in de afmetingen of prestaties van deze verwarmingsbatterij.

#### 4.3.5 Ontwerpdebiet op basis van gewenste luchttemperatuur

In het oorspronkelijke ontwerpconcept wordt het ventilatiedebiet bepaald op basis van het minimaal vereiste luchtdebiet om te voldoen aan de luchtkwaliteitsvereisten in functie van de bezetting. Dit ontwerpdebiet is gelijk aan het minimaal vereiste ventilatiedebiet, waardoor de ventilatieverliezen worden beperkt en zo het energieverbruik wordt geminimaliseerd. Hierdoor moet de toevoerlucht in sommige scenario's relatief sterk opgewarmd worden om het comfortniveau in de ruimtes te waarborgen, wat een belangrijke beperkende factor vormt met het oog op het verder verlagen van het temperatuurregime van het opwekkingssysteem.

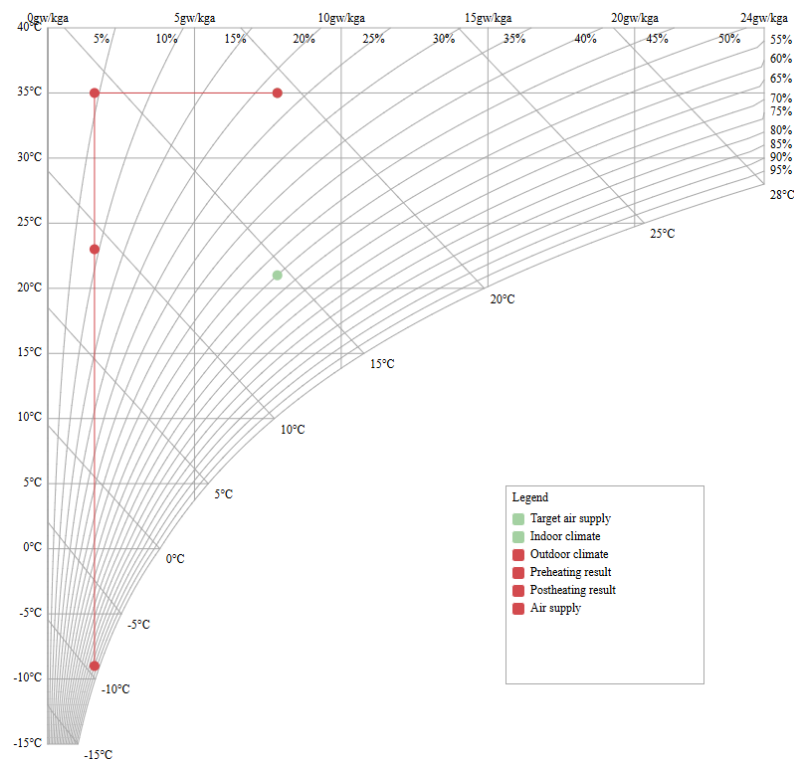
Om deze beperking te onderzoeken, wordt in de simulaties naast het scenario op basis van het minimale luchtdebiet een alternatief scenario voorzien waarbij het ontwerpdebiet wordt afgestemd op een vooraf bepaalde inblaasluchttemperatuur. Dit wordt geïllustreerd in figuur 27, waarbij de inblaasluchttemperatuur wordt begrensd op 35°C.

Binnen deze benadering wordt het ventilatiedebiet berekend op basis van de luchttoevoer die nodig is om, bij een vooraf bepaalde lucht inblaastemperatuur (maximaal 35°C), alsnog voldoende warmte aan de ruimten af te geven. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid om het temperatuurregime van de warmtepomp eventueel verder te verlagen, wat potentieel leidt tot een verbeterde seizoensgebonden efficiëntie.

Deze benadering is echter niet zonder aandachtspunten. Door het verhogen van het ontwerpdebiet stijgt het energieverbruik van de ventilatoren en wordt ook meer lucht opgewarmd, wat initieel resulteert in een hoger ontwerpvermogen voor de warmtepomp. Dit is initieel energetisch en economisch ongunstig, aangezien het kan impliceren dat een grotere en duurdere warmtepomp moet worden voorzien. Bovendien brengt deze strategie belangrijke beperkingen met zich mee op vlak van infrastructuur. Het is namelijk noodzakelijk dat zowel de luchtkanalen als de luchtbehandelingskast in staat zijn om deze verhoogde debieten te verwerken. In dit onderzoek wordt verondersteld dat deze aanpassing mogelijk is en dat de luchtbehandelingsunit over voldoende capaciteit beschikt om de

hogere lucht volumes te conditioneren. Er wordt echter niet expliciet rekening gehouden met de fysieke beperkingen van het bestaande luchtkanaalnetwerk of de ventilatorselectie.

Desondanks wordt dit alternatieve scenario onderzocht waarin wordt nagegaan of deze aanpak, ondanks de ongunstige initiële energetische en economische prestaties, op termijn resulteert in een verhoogde energie-efficiëntie van de warmtepompinstallatie.



Figuur 27: Begrenzing lucht inblaastemperatuur luchtbehandelingsunit

## 4.4 Key Performance Indicators

In het kader van deze studie worden drie Key Performance Indicators (KPI's) gebruikt om de energieprestaties van de onderzochte invloedsparameters te evalueren: de Seasonal Coefficient of Performance (SCOP), de CO<sub>2</sub>-emissies en de operationele kosten (OPEX).

### SCOP – Seasonal Coefficient of Performance

De SCOP is een maat voor de seizoensgebonden efficiëntie van de warmtepomp, zoals besproken in hoofdstuk 2. Een hogere SCOP wijst op een efficiënter werkende installatie. Het doel van de simulaties is om te onderzoeken welke parameters het meeste impact hebben op deze SCOP.

## CO<sub>2</sub>-emissies

Naast de SCOP is de CO<sub>2</sub>-emissie van een installatie een zeer belangrijke factor met het oog op het behalen van de verschillende klimaatdoelstellingen [3]. De CO<sub>2</sub>-emissies van een warmtepompsysteem worden in deze studie bepaald op basis van het totale elektriciteitsverbruik in combinatie met een gehanteerde emissiefactor. Deze factor, uitgedrukt in kg CO<sub>2</sub> per kilowattuur (kg CO<sub>2</sub>/kWh), geeft aan hoeveel broeikasgasemissies gemiddeld worden uitgestoten bij de opwekking van één kilowattuur elektriciteit, zoals weergegeven in tabel 9.

$$Emissie_{CO_2} = E * Emissiefactor_{CO_2} \quad (18)$$

| CO <sub>2</sub> -uitstoot |       |
|---------------------------|-------|
| Gas (kg/kWh)              | 0,211 |
| Elektriciteit(kg/kWh)     | 0,238 |

Tabel 9: CO<sub>2</sub>-uitstoot in [kg/kWh], waardes bekomen voor gas en elektriciteit [57]

In de simulaties wordt deze parameter gebruikt om de totale indirecte emissie van het systeem over een volledig stookseizoen te berekenen. De standaardwaarde voor deze parameter is het laatst bekende gemiddelde voor alle 27 lidstaten van de Europese Unie, zoals verstrekt door het European Environment Agency en bedraagt 0,211 kg/kWh [57]. Deze waarde wordt eveneens gehanteerd als standaardwaarde binnen de Hysopt-software.

## Operationele kosten

De operationele kosten (OPEX) omvatten het jaarlijkse elektriciteitsverbruik vermenigvuldigd met de gangbare energieprij (EP) voor gas elektriciteit (€/kWh). Deze KPI geeft een directe indicatie van de financiële implicaties van elk onderzochte configuratie:

$$OPEX = E_{elektrisch} * EP_{€/kWh} \quad (19)$$

| Gehanteerde energieprijzen Hysopt |       |
|-----------------------------------|-------|
| Energieprijs gas (€/kWh)          | 0,084 |
| Energieprijs elektriciteit(€/kWh) | 0,217 |

Tabel 10: Tarieven gas en elektriciteit gehanteerd in de simulatierapporten Hysopt [58]

Hoewel comfort geen afzonderlijke KPI vormde binnen deze studie, wordt in alle scenario's consequent een minimale comfortratio gehanteerd. Deze randvoorwaarde garandeerde dat het thermisch comfort in elke case behouden bleef, waardoor de geanalyseerde resultaten uitsluitend betrekking hebben op configuraties die voldoen aan gangbare comforteisen.

## 5 Resultaten en analyse

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de sensitiviteitsstudie gepresenteerd die worden uitgevoerd met behulp van de Hysopt-software, waarin vijf belangrijke invloedparameters systematisch worden gevarieerd en onderzocht. In totaal worden 48 scenario's gesimuleerd, telkens op basis van een warmtepompconfiguratie met unieke combinaties van isolatiewaardes van de gebouwschil (U-waardes), ventilatietype (type D of D+), warmterecuperatie, de UA-waarde van de verwarmingsbatterij en de bepaling van het ontwerp ventilatiedebiet.

Dit hoofdstuk presenteert de resultaten van de referentiecasse met ketelconfiguraties, in vergelijking met een één-op-één vervanging door een lucht-waterwarmtepomp. Aansluitend wordt de gevoeligheidsstudie besproken, die bestaat uit twee delen. In het eerste deel wordt het ontwerpdebiet bepaald op basis van het minimale ventilatiedebiet, berekend volgens het aantal aanwezige personen bij volledige bezetting. In het tweede deel wordt het ontwerpdebiet afgeleid uit een opgelegde, gewenste inblaastemperatuur. Ten slotte worden beide delen met elkaar vergeleken en besproken. Deze bekomen resultaten worden ook vergeleken met de referentiecasse met een ketelconfiguratie.

### 5.1 Resultaten referentiecasse: conventionele ketelinstallatie

De volledig doorlopen referentiecasse vormt het uitgangspunt voor de sensitiviteitsstudie die wordt uitgevoerd in dit hoofdstuk. De doelstelling is om de energetische, ecologische en economische prestaties van de warmtepompconfiguraties te vergelijken met de bestaande standaard ketelconfiguratie (referentiecasse 1).

In het kader van de sensitiviteitsstudie worden in eerste instantie de ketelconfiguratie van het referentiescenario één-op-één vervangen door een lucht-water warmtepomp (L/W warmtepomp), zonder bijkomende systeemaanpassingen. Op die manier kan de impact van de gewijzigde productie-eenheid in isolatie worden beoordeeld. Op basis hiervan wordt inzicht verkregen in de ontwerpfactoren die het meest bepalend zijn voor de prestaties van warmtepompsystemen in niet-residentiële toepassingen.

Uit de vergelijking tussen referentiecasse 1 (met gasketel) en de configuratie waarin de ketel één-op-één wordt vervangen door een warmtepomp (referentiecasse WP 1) met identiek ontwerpvermogen, blijkt dat reeds een loutere vervanging van de warmteopwekker aanzienlijke voordelen oplevert. Zoals weergegeven in tabel 11 leidt deze vervanging tot een energieverbruikdaling van 64%, wat zich vertaalt in een operationele kostenbesparing van 14% (van €3.900 naar €3.368 per jaar). Daarnaast wordt ook een substantiële reductie in CO<sub>2</sub>-uitstoot gerealiseerd, namelijk van 9,15 ton naar 3,69 ton per jaar, wat neerkomt op een besparing van 60%. De SCOP van de L/W warmtepomp wordt vastgesteld op 3,08.

|                                                     | Referentiecasi 1 | Referentiecasi WP 1 |
|-----------------------------------------------------|------------------|---------------------|
| Systeem                                             | Ketel            | L/W warmtepomp      |
| Ontwerpvermogen                                     | 27 kW            | 27 kW               |
| Regime [°C]                                         | 60/50            | 60/50               |
| Ontwerpdebiet [m <sup>3</sup> /h]                   | 980              | 980                 |
| UA <sub>batterij</sub> [W/K]                        | 604              | 604                 |
| Totale energieverbruik<br>(gas/elektriciteit) [kWh] | 42 972           | 15 524              |
| Energiebesparing                                    | /                | 64%                 |
| $\eta_{\text{Ketel}}$                               | 95,7%            | /                   |
| SCOP                                                | /                | 3,08                |
| OPEX [€/jaar]                                       | 3900             | 3368                |
| CO <sub>2</sub> – emissie [ton/jaar]                | 9,15             | 3,69                |

*Tabel 11: De vergelijking wordt gemaakt tussen de referentiecasi 1 met conventionele ketel en de vervanging van deze productie-eenheid met een lucht-water warmtepomp*

Hoewel deze cijfers aantonen dat een eenvoudige technologievervanging reeds een significante impact heeft op zowel de operationele kosten als de milieuprestatie, dient te worden opgemerkt dat in deze analyse enkel met de OPEX wordt gerekend. Voor een volledige economische evaluatie zou ook de CAPEX (investeringskost), het onderhoud en terugverdientijd van deze warmtepomp implementatie in beschouwing moeten worden genomen. Deze wordt in het kader van dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

## 5.2 Deel 1: Sensitiviteitsstudie op basis van een minimaal ontwerp ventilatiedebiet

In deze paragraaf worden de invloedsfactoren telkens vergeleken ten opzichte van de case waar de ketel wordt vervangen door een L/W warmtepomp. Hierbij worden de resultaten van de eerste 24 case's besproken, waarin telkens het ontwerp ventilatiedebiet wordt beschouwd als een constante. Deze waarde wordt bepaald op basis van een minimaal ventilatiedebiet berekend aan de hand van het aantal aanwezige personen in de ruimtes.

Om een overzichtelijk evaluatiekader te creëren wordt elke invloedsparameter eerst afzonderlijk besproken om zijn impact te weerspiegelen op de prestaties van de installatie, waarbij initieel de isolatiegraad van de gebouwschil niet wijzigt. In de tweede stap wordt de impact van de invloedsfactoren gecombineerd onderzocht, waarna ook de isolatiegraad van de gebouwschil wordt geoptimaliseerd.

### 5.2.1 Toepassing vraaggestuurde ventilatie type D+

In deze paragraaf wordt de impact van vraaggestuurde ventilatie, ook aangeduid als ventilatietype D+, onderzocht op de prestaties van het verwarmingssysteem in niet-residentiële context. Volgens Raftery et al. [12] is het merendeel van de bestaande gebouwen uitgerust met een klassiek constant-luchtvolume systeem (CAV), zonder toepassing van warmteterugwinning of performante regelingstechnieken.

Voor de analyse worden de dynamische bezettingsprofielen zoals opgesteld in hoofdstuk 4 toegepast, zodat een realistische variatie in ventilatievraag kon worden gesimuleerd. De resultaten van deze case worden vergeleken met de variant "Referentie WP 1" waarbij de ketel één-op-één wordt vervangen door een warmtepomp.

Tabel 12 illustreert dat het toepassen van vraaggestuurde ventilatie resulteert in een energie- en kostenbesparing en CO<sub>2</sub>-reductie van 18% ten opzichte van referentiecase WP 1. Het totale ontwerpvermogen van de installatie zelf wijzigt hierdoor niet, aangezien de installatie nog steeds de maximale thermische belasting moet kunnen leveren.

|                                                  | Referentiecase WP 1 | Ventilatietype D+ |
|--------------------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Systeem                                          | L/W warmtepomp      | L/W warmtepomp    |
| Regime [°C]                                      | 60/50               | 60/50             |
| Totale energieverbruik (gas/elektriciteit) [kWh] | 15 524              | 12 727            |
| Energiebesparing                                 | /                   | 18%               |
| SCOP                                             | 3,08                | 3,08              |
| OPEX [€/jaar]                                    | 3368                | 2761              |
| Kostenbesparing                                  | /                   | 18%               |
| CO <sub>2</sub> – emissie [ton/jaar]             | 3,69                | 3,03              |

*Tabel 12: Vergelijking tussen de referentiecase WP 1 waar de ketel één-op-één wordt vervangen door een lucht-water warmtepomp en de case waar een vraaggestuurd ventilatiesysteem (type D+) wordt toegepast*

De Europese norm NBN EN 16798-3 biedt richtlijnen voor het ontwerp van ventilatiesystemen in niet-residentiële gebouwen, inclusief standaardprofielen en regelstrategieën voor vraaggestuurde ventilatie. Ondanks het bestaan van deze normen en richtlijnen wordt in de praktijk vaak afgeweken van de aanbevolen regelstrategieën, zoals vraaggestuurde ventilatie. In veel bestaande gebouwen wordt nog steeds gebruik gemaakt van constante debieten, wat leidt tot onnodig energieverbruik. Dit wordt geïllustreerd in de bovenstaande tabel, waarin de implementatie van vraaggestuurde ventilatie resulteert in aanzienlijke energiebesparingen.

### 5.2.2 Toepassing warmterecuperatie in luchtbehandelingsunit

Net zoals vraaggestuurde ventilatiesystemen, is de aanwezigheid van warmterecuperatiesystemen in HVAC-installaties van bestaande gebouwen niet vanzelfsprekend [12]. Deze paragraaf geeft de impact van het toepassen van deze WTW-units weer op de prestaties van de installatie.

In deze case resulteerde de toepassing van een WTW-unit in een energie- en kostenbesparing van 25%, evenals een gelijkaardige reductie in CO<sub>2</sub>-uitstoot. Door energierecuperatie uit de afvoerlucht daalt het benodigde vermogen van de installatie. Hierdoor wordt het mogelijk een lagere waterzijdig regime toe te passen, zoals weergegeven in onderstaande tabel 13, wat resulteert in een hogere SCOP (van 3,08 naar 3,26) en bijhorende besparingen zoals besproken.

|                                                  | Referentiecasse WP 1 | WTW-unit       |
|--------------------------------------------------|----------------------|----------------|
| Systeem                                          | L/W warmtepomp       | L/W warmtepomp |
| Regime [°C]                                      | 60/50                | 56/46          |
| Totale energieverbruik (gas/elektriciteit) [kWh] | 15 524               | 11 714         |
| Energiebesparing                                 | /                    | 25%            |
| SCOP                                             | 3,08                 | 3,26           |
| OPEX [€/jaar]                                    | 3368                 | 2542           |
| Kostenbesparing                                  | /                    | 25%            |
| CO <sub>2</sub> – emissie [ton/jaar]             | 3,69                 | 2,79           |

*Tabel 13: Vergelijking tussen de referentiecasse WP waar de ketel één-op-één wordt vervangen door een lucht-water warmtepomp en de case waar een WTW-unit wordt toegepast*

### 5.2.3 Capaciteit verwarmingsbatterij in luchtbehandelingsunit

Naast het onderzoeken van vraaggestuurde ventilatie en de toepassing van een WTW-unit, wordt ook onderzoek gedaan naar de verhoging van de UA-waarde van de verwarmingsbatterij, zoals weergegeven in tabel 14.

Het verhogen van de UA-waarde van de verwarmingsbatterij resulteert in een verhoogde warmteoverdrachtscapaciteit, waardoor een verlaging van het waterzijdige temperatuurregime mogelijk wordt. Dit is gunstig voor de werking van de warmtepomp, aangezien het rendement stijgt bij lagere aanvoertemperaturen. Zoals weergegeven in tabel 14 leidt deze maatregel tot verbeteringen op zowel energetisch, ecologisch als economisch vlak.

Het verhogen van de UA-waarde van de oorspronkelijke verwarmingsbatterij van 604 W/K naar 900 W/K leidt tot een verhoging van de SCOP van 3,08 naar 3,44, waarbij de verbruikte energie, de operationele kosten en CO<sub>2</sub> - emissie zijn gedaald met 9%.

|                                                     | Referentiecasi WP 1 | Verhoging UA-waarde |
|-----------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Systeem                                             | L/W warmtepomp      | L/W warmtepomp      |
| UA-waarde batterij [W/K]                            | 604                 | 900                 |
| Regime [°C]                                         | 60/50               | 52/42               |
| Totale energieverbruik<br>(gas/elektriciteit) [kWh] | 15 524              | 14 089              |
| Energiebesparing                                    | /                   | 9%                  |
| SCOP                                                | 3,08                | 3,44                |
| OPEX [€/jaar]                                       | 3368                | 3057                |
| Kostenbesparing                                     | /                   | 9%                  |
| CO <sub>2</sub> – emissie [ton/jaar]                | 3,69                | 3,35                |

Tabel 14: Vergelijking tussen de referentiecasi WP waar de ketel één-op-één wordt vervangen door een lucht-water warmtepomp en de case waar de UA-waarde wordt verhoogd ten opzichte van de oorspronkelijke verwarmingsbatterij

#### 5.2.4 Vergelijking invloedsparameters

Tabel 15 geeft een overzicht van de impact van de drie besproken configuraties afzonderlijk weer. Deze tabel toont aan dat het toepassen van een WTW-unit, vertrekkend van de warmtepompreferentiecasi WP 1, resulteert in de grootste energie- en kostenbesparing en CO<sub>2</sub>-reductie. Het toepassen van een verhoogde UA-waarde van de verwarmingsbatterij resulteert in de grootste SCOP stijging, waarbij de SCOP is gestegen van 3,08 naar 3,44 ten opzichte van de referentiecasi WP 1, maar de energie- en kostenbesparingen en CO<sub>2</sub> - reductie blijven beperkt tot 9%. De verhoging van de UA-waarde leidde tot de grootste reductie in het waterzijdig regime en dit uit zich in het hoogste rendement.

|                                                      | Referentiecasi WP 1 | Ventilatietype D+ | WTW-unit | Verhoging UA-waarde |
|------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|----------|---------------------|
| Regime [°C]                                          | 60/50               | 60/50             | 56/46    | 52/42               |
| Totale energieverbruik<br>(gas/elektriciteit) [kWh]  | 15 524              | 12 727            | 11 714   | 14 089              |
| SCOP                                                 | 3,08                | 3,08              | 3,26     | 3,44                |
| OPEX [€/jaar]                                        | 3368                | 2760              | 2540     | 3057                |
| CO <sub>2</sub> [ton/jaar]                           | 3,70                | 3,03              | 2,79     | 3,35                |
| E- en € besparing en<br>CO <sub>2</sub> reductie [%] | /                   | 18%               | 25%      | 9%                  |

Tabel 15: Resultaten sensitiviteitsstudie waarbij initieel bij “referentie WP” de ketel wordt vervangen door een lucht-water warmtepomp en vervolgens de impact van het ventilatietype; warmteterugwinning (WTW) en een verhoogde UA-waarde van de verwarmingsbatterij weerspiegeld. “E en € besparing” staat voor energie en kostenbesparing.

### 5.2.5 Gecombineerde toepassing invloedsparameters

Hiernaast is het ook noodzakelijk om deze invloedsparameters gezamenlijk te onderzoeken. Onderstaande tabel 16 bevat nog vier andere configuraties, waarbij de isolatiegraad (U-waarden) van de gebouwschil ongewijzigd bleven. Deze resultaten geven weer in welke mate het mogelijk is de systeemprestaties te verbeteren en de kosten te verminderen zonder ingrijpende acties te ondernemen op het niveau van de gebouwschil. De case's bevatten volgende configuraties:

|        | Ventilatie (D+) | WTW-unit | Verhoging UA-waarde |
|--------|-----------------|----------|---------------------|
| Case 5 | ✓               | ✓        | x                   |
| Case 6 | ✓               | x        | ✓                   |
| Case 7 | x               | ✓        | ✓                   |
| Case 8 | ✓               | ✓        | ✓                   |

|                                              | Case 5  | Case 6  | Case 7  | Case 8  |
|----------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                              | 56/46°C | 52/42°C | 51/41°C | 51/41°C |
| SCOP                                         | 3,25    | 3,42    | 3,46    | 3,46    |
| OPEX [€/jaar]                                | 2179    | 2489    | 2400    | 2030    |
| CO <sub>2</sub> [ton/jaar]                   | 2,39    | 2,73    | 2,63    | 2,24    |
| E en € besparing en CO <sub>2</sub> reductie | 35%     | 26%     | 29%     | 39%     |

Tabel 16: Resultaten sensitiviteitsstudie waarbij de impact van ventilatietype D+, een WTW-unit en een verhoogde UA-waarde van de verwarmingsbatterij gecombineerd wordt onderzocht, zonder het wijzigen van de U-waarden van de gebouwschil

In tabel 16 wordt de gecombineerde invloed van de geselecteerde parameters op de systeemprestaties onderzocht. Tabel 16 illustreert dat de integratie van vraaggestuurde ventilatie, een warmteterugwinunit (WTW) en een verhoogde UA-waarde van de verwarmingsbatterij (case 8) leidt tot de hoogste energetische efficiëntie, alsook de laagste operationele kosten en CO<sub>2</sub>-emissies. Dit resultaat sluit aan bij de theoretische verwachtingen.

Case 8 resulteert in een totale energiebesparing, kostendaling en CO<sub>2</sub>-reductie van 39% ten opzichte van de referentieconfiguratie (WP 1), waarbij de ketel één-op-één wordt vervangen door een warmtepomp. Daarbij blijkt vooral de combinatie van vraaggestuurde ventilatie (Type D+) en warmteterugwinning verantwoordelijk voor het grootste deel van deze verbetering, met een besparingspotentieel van 35%.

Het is belangrijk te benadrukken dat deze conclusie uitsluitend van toepassing is op de drie besproken invloedsparameters. Er worden in dit deel van de analyse geen aanpassingen doorgevoerd aan de gebouwschil, noch aan de configuratie van het ontwerpdebiet. In volgende paragraaf wordt de impact van het verbeteren van de isolatiewaarden onderzocht.

### 5.2.6 Impact verhoging isolatiegraad

In deze paragraaf wordt de impact van uitsluitend het verhogen van de isolatiegraad in beschouwing genomen om de impact hiervan te onderzoeken. De drie besproken categorieën van U-waardes in hoofdstuk 4 worden hier toegepast om hun impact te onderzoeken.

Tabel 17 toont de energetische en economische prestaties van drie scenario's waarbij een L/W warmtepomp wordt toegepast. Hierbij komt de hoge U-waarde (Referentiecasi WP 1) overeen met de maximaal opgelegde U-waardes die momenteel gangbaar zijn in België, terwijl de lage U-waarde overeenkomt met de gehanteerde U-waardes voor passiefgebouwen. De gemiddelde U-waardes liggen tussen beide waardes in.

De resultaten tonen een duidelijke trend: naarmate de U-waarde van de gebouwschil daalt, nemen zowel het energieverbruik, de operationele kosten als de CO<sub>2</sub>-emissies af, terwijl de SCOP stijgt. Het energieverbruik, de kostenbesparing en de CO<sub>2</sub> - emissie dalen met respectievelijk 15% en 22% in scenario's 2 en 3 ten opzichte van de referentie.

De SCOP verbetert van 3,08 in het referentiescenario naar 3,22 in scenario 3. Een hogere isolatiegraad (dus lagere U-waardes) resulteren in een verminderde warmtevraag, wat toelaat het regime te verlagen zonder verlies van thermisch comfort.

|                                              | Referentiecasi WP 1 | Scenario 2     | Scenario 3     |
|----------------------------------------------|---------------------|----------------|----------------|
| Systeem                                      | L/W warmtepomp      | L/W warmtepomp | L/W warmtepomp |
| U-waarde gebouwschil                         | Hoog                | Gemiddeld      | Laag           |
| Regime [°C]                                  | 60/50               | 58/48          | 56/46          |
| Energieverbruik [kWh]                        | 15 524              | 13 179         | 12 100         |
| SCOP                                         | 3,08                | 3,14           | 3,22           |
| OPEX [€/jaar]                                | 3368                | 2860           | 2625           |
| CO <sub>2</sub> – emissie [ton/jaar]         | 3,69                | 3,14           | 2,88           |
| E en € besparing en CO <sub>2</sub> reductie | /                   | 15%            | 22%            |

*Tabel 17: Impact van wijziging op niveau van de gebouwschil, waarbij er 3 scenario's worden onderzocht: hoge U-waardes volgens maximaal opgelegde waardes in EPB-regelgeving toegepast in de referentiecasi WP1, gemiddelde en lage U-waardes*

### 5.2.7 Overzicht invloedsparameters deel 1 van de sensitiviteitsstudie

In deel 1 van de sensitiviteitsstudie worden 24 scenario's uitgevoerd, waarbij systematisch de besproken invloedsparameters worden gevarieerd. In bovenstaande delen wordt telkens de impact van deze invloedsparameters afzonderlijk besproken, terwijl hier een vergelijking gebeurt tussen alle mogelijke scenario's.

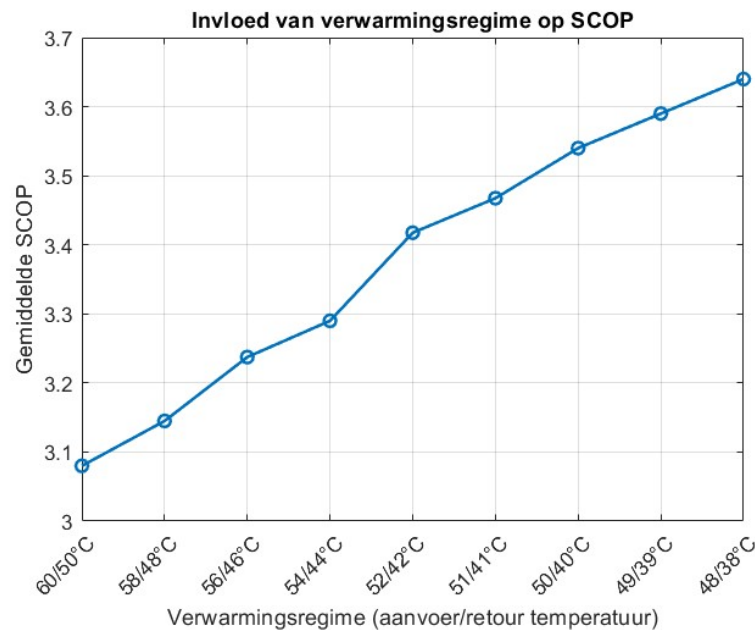
De in het groen aangeduide scenario's uit tabel 18 bevatten telkens de beste resultaten voor respectievelijk hoge, gemiddelde en lage U-waardes van de gebouwschil. De referentiecasse (WP 1), aangeduid in het oranje, vormt het uitgangspunt van de vergelijking. Bij ongewijzigde isolatiegraad (hoge U-waardes) resulteert de toepassing van vraaggestuurde ventilatie, aanwezigheid van WTW-unit en de verhoging van de oorspronkelijke UA-waarde van de verwarmingsbatterij in een kostenbesparing en  $CO_2$ -reductie van 39%, waarbij de SCOP toeneemt tot 3,46 (case 8).

Wanneer de wijziging van de isolatiegraad mee in rekening wordt genomen, worden de beste resultaten bekomen in case 24. Deze case bevat naast de verhoogde isolatiegraad dezelfde configuraties als de vooraf besproken case 8. Deze case resulteert in een kostenbesparing en  $CO_2$ -reductie van 51% ten opzichte van referentiecasse WP 1, waarbij het mogelijk wordt een regime van 48/38°C te hanteren wat resulteerde in een SCOP van 3,67.

| Cases           | U-waarde<br>gebouwschil | Ventilatie<br>type<br>(D/D+) | WTW-<br>unit | UA-waarde<br>batterij<br>[W/K] | Regime [°C] | SCOP | OPEX<br>[€/jaar] | CO <sub>2</sub> –Emissie<br>[ton/jaar] |
|-----------------|-------------------------|------------------------------|--------------|--------------------------------|-------------|------|------------------|----------------------------------------|
| Referentie WP 1 | Hoog                    | D                            | Nee          | 604                            | 60/50°C     | 3,08 | 3368             | 3,70                                   |
| 2               | Hoog                    | D+                           | Nee          | 604                            | 60/50°C     | 3,08 | 2760             | 3,03                                   |
| 3               | Hoog                    | D                            | Ja           | 604                            | 56/46°C     | 3,26 | 2540             | 2,79                                   |
| 4               | Hoog                    | D                            | Nee          | 900                            | 52/42°C     | 3,44 | 3057             | 3,35                                   |
| 5               | Hoog                    | D+                           | Ja           | 604                            | 56/46°C     | 3,25 | 2180             | 2,39                                   |
| 6               | Hoog                    | D+                           | Nee          | 900                            | 52/42°C     | 3,42 | 2489             | 2,73                                   |
| 7               | Hoog                    | D                            | Ja           | 900                            | 51/41°C     | 3,46 | 2400             | 2,63                                   |
| 8               | Hoog                    | D+                           | Ja           | 900                            | 51/41°C     | 3,46 | 2038             | 2,24                                   |
| 9               | Gemiddeld               | D                            | Nee          | 604                            | 58/48°C     | 3,14 | 2860             | 3,14                                   |
| 10              | Gemiddeld               | D+                           | Nee          | 604                            | 58/48°C     | 3,15 | 2542             | 2,79                                   |
| 11              | Gemiddeld               | D                            | Ja           | 604                            | 54/44°C     | 3,28 | 2173             | 2,38                                   |
| 12              | Gemiddeld               | D                            | Nee          | 900                            | 51/41°C     | 3,46 | 2615             | 2,87                                   |
| 13              | Gemiddeld               | D+                           | Ja           | 604                            | 54/44°C     | 3,3  | 1992             | 2,19                                   |
| 14              | Gemiddeld               | D+                           | Nee          | 900                            | 51/41°C     | 3,49 | 2305             | 2,53                                   |
| 15              | Gemiddeld               | D                            | Ja           | 900                            | 50/40°C     | 3,53 | 2048             | 2,25                                   |
| 16              | Gemiddeld               | D+                           | Ja           | 900                            | 50/40°C     | 3,55 | 1857             | 2,04                                   |
| 17              | Laag                    | D                            | Nee          | 604                            | 56/46°C     | 3,22 | 2625             | 2,88                                   |
| 18              | Laag                    | D+                           | Nee          | 604                            | 56/46°C     | 3,22 | 2313             | 2,50                                   |
| 19              | Laag                    | D                            | Ja           | 604                            | 52/42°C     | 3,37 | 1972             | 2,15                                   |
| 20              | Laag                    | D                            | Nee          | 900                            | 49/39°C     | 3,57 | 2394             | 2,63                                   |
| 21              | Laag                    | D+                           | Ja           | 604                            | 52/42°C     | 3,44 | 1770             | 1,95                                   |
| 22              | Laag                    | D+                           | Nee          | 900                            | 49/39°C     | 3,61 | 2085             | 2,29                                   |
| 23              | Laag                    | D                            | Ja           | 900                            | 48/38°C     | 3,61 | 1850             | 2,04                                   |
| 24              | Laag                    | D+                           | Ja           | 900                            | 48/38°C     | 3,67 | 1659             | 1,82                                   |

Tabel 18: Resultaten voor eerste 24 scenario's waarbij ontwerpdebiet wordt bepaal op basis van een minimaal ventilatiedebiet in functie van het aantal aanwezige personen in de ruimtes

In figuur 28 wordt de SCOP telkens geplot in functie van het waterzijdig regime. In case 24 wordt het mogelijk het regime te verlagen tot 48/38°C, wat resulteerde in een SCOP van 3,67. In tabel 18 wordt tevens weergegeven wat de impact is van de invloedsparameters zowel afzonderlijk als gezamenlijk op de mogelijke reductie in het waterzijdig regime. Dit regime weerspiegelt dan op zijn beurt de impact op de SCOP.



*Figuur 28: Visualisatie van de SCOP op basis van de gehanteerde waterzijdige regimes uit tabel 18*

Tot slot bieden de resultaten uit deze eerste reeks simulaties waardevolle inzichten in de relatieve impact van verschillende ontwerpkeuzes op de prestaties van een warmtepompinstallatie in bestaande gebouwen. Hoewel de geanalyseerde invloedsparameters, waaronder de ventilatiestrategie, warmteterugwinning, UA-waarde van de verwarmingsbatterij en isolatiegraad beperkt zijn tot een welbepaald aantal configuraties, maken de resultaten het mogelijk om gefundeerde ontwerpkeuzes te maken. In die zin kunnen de gesimuleerde scenario's dienen als richtlijn bij het bepalen van prioritaire ingrepen in het kader van een stapsgewijze renovatie of systeemoptimalisatie.

De studie toont onder meer aan welke factoren afzonderlijk of gecombineerd reeds significante energetische, ecologische of economische verbeteringen kunnen opleveren, en welke configuraties vooral in combinatie een sterke performantieverbetering realiseren.

## 5.3 Deel 2 sensitiviteitsstudie: ontwerpdebiet op basis van gewenste inblaas luchttemperatuur

In deze paragraaf worden de resultaten van de volgende 24 case's besproken, waarin telkens het ontwerpdebiet wordt bepaald op basis van een gewenste inblaas luchttemperatuur (35°C), met het oog op het verder verlagen van het waterzijdig regime. Het doel van deze paragraaf is niet zozeer de impact van de verschillende invloedsparameters te bespreken (reeds onderzocht in paragraaf 5.2), maar te onderzoeken of een andere ontwerpdebietconfiguratie op termijn gunstiger wordt.

In eerste instantie wordt louter de impact van de aanpassing van dit ontwerpdebiet weergegeven ten opzichte van referentiecasse WP 1 uit deel 1. Deze aanpassing in ontwerpdebiet wordt vervolgens genomen als uitgangspunt voor deze volgende 24 simulaties. De evaluatie gebeurt aan de hand van de SCOP, operationele kosten (OPEX) en CO<sub>2</sub>-uitstoot, en wordt uiteindelijk vergeleken met de scenario's waarbij het ontwerpdebiet louter op het minimaal vereist ventilatiedebiet gebaseerd was.

### 5.3.1 Impact wijziging ontwerpdebiet

In deel 1 van de studie resulteerde het ontwerp van het ventilatiedebiet in een relatief hoge vereiste inblaastemperatuur van 45,6 °C. In deel 2 wordt deze inblaastemperatuur begrensd tot maximaal 35 °C, wat als uitgangspunt dient voor de simulaties van deel 2. Dit wordt in tabel 19 aangeduid als "Referentiecasse WP 2". Deze benadering impliceert een aanzienlijke toename van het ontwerpdebiet van 980 m<sup>3</sup>/h naar 1724 m<sup>3</sup>/h, met als gevolg hogere ventilatieverliezen, een groter op te warmen luchtvolume en dus een toename van het warmtevermogen.

Hiernaast leverde het oorspronkelijke regime van 60/50°C onvoldoende vermogen, waardoor een regimeverhoging (naar 65/55°C) noodzakelijk was voor de gewenste setpoints te behalen. Initieel vertaalt dit zich in een lagere SCOP, hogere CO<sub>2</sub>-emissies en hogere operationele kosten en een hoger ontwerpvermogen voor de warmtepomp, zoals weergegeven in tabel 19.

Toch wordt dit alternatief scenario bewust meegenomen in de analyse. Het laat toe om te evalueren of deze benadering, ondanks de initiële nadelen, op langere termijn kan bijdragen tot een betere systeemprestatie. Er wordt echter niet expliciet rekening gehouden met de fysieke beperkingen van het bestaande luchtkanaalnetwerk of de ventilatorselectie en wordt er dus vanuit gegaan dat dit verhoogd luchtdebiet geen probleem vormt voor de huidige installaties.

|                                                     | Referentiecasi WP 1 | Referentiecasi WP 2    |
|-----------------------------------------------------|---------------------|------------------------|
| Systeem                                             | L/W warmtepomp      | Lucht-water warmtepomp |
| Lucht inblaastemperatuur [°C]                       | 45,6                | 35                     |
| Regime [°C]                                         | 60/50               | 65/55                  |
| Ontwerpdebiet [m³/h]                                | 980                 | 1724                   |
| UA <sub>batterij</sub> [W/K]                        | 604                 | 604                    |
| Verwarmingsvermogen [kW]                            | 27                  | 34                     |
| Totale energieverbruik<br>(gas/elektriciteit) [kWh] | 15 524              | 19 028                 |
| SCOP                                                | 3,08                | 2,91                   |
| OPEX [€/jaar]                                       | 3368                | 4129                   |
| CO <sub>2</sub> – emissie [ton/jaar]                | 3,69                | 4,53                   |

*Tabel 19: Vergelijking tussen de referentiecasi WP 1 van deel 1 en referentiecasi WP 2, waarbij het ontwerp ventilatiedebiet niet langer wordt bepaald op basis van een minimaal debiet in functie van het aantal aanwezige personen, maar op basis van een gewenste inblaastemperatuur*

### 5.3.2 Analyse simulaties deel 2

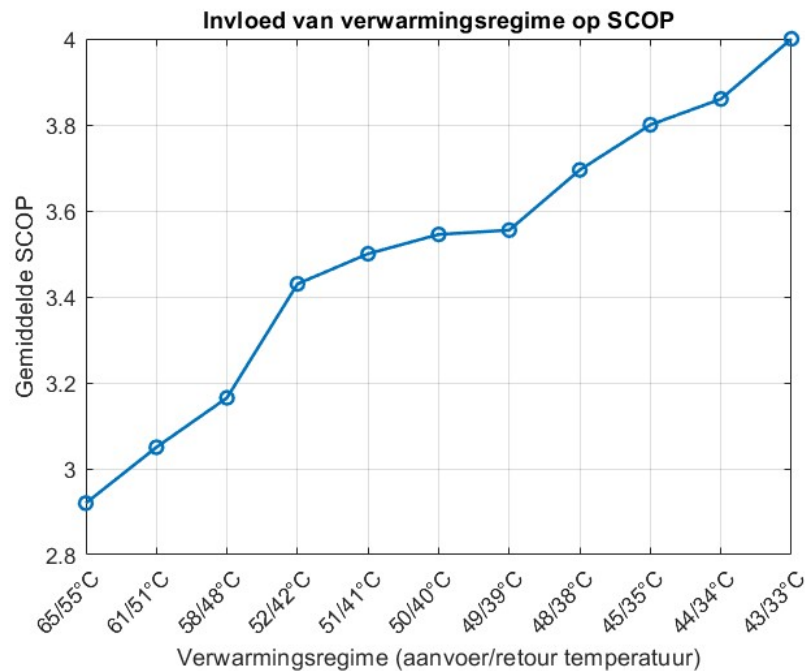
Tabel 20 bespreekt de resultaten van de volgende 24 scenario's die in bovenstaande alinea worden toegelicht. De resultaten in deze tabel bevestigen de tendensen die reeds in paragraaf 5.2 werden vastgesteld. Ook in deze tweede reeks simulaties vormt, het oranje aangeduide scenario, de referentiecasi WP 2, die als uitgangspunt wordt gehanteerd voor verdere optimalisaties. De in het groen gemarkeerde scenario's vertegenwoordigen de beste prestaties binnen elk van de drie niveaus van thermische isolatie van de gebouwschil (respectievelijk hoge, gemiddelde en lage U-waarden).

Zoals verwacht worden de meest gunstige resultaten behaald in de configuratie (case 48) waarbij een lage U-waarde van de gebouwschil wordt gecombineerd met vraaggestuurde ventilatie, een warmteterugwinningseenheid (WTW) en een verhoogde UA-waarde van de verwarmingsbatterij. Deze optimale samenstelling resulteerde in een energiebesparing, reductie van de operationele kosten en een daling van de CO<sub>2</sub>-emissie met 61% ten opzichte van de referentieconfiguratie WP 2 en 52% ten opzichte van referentiecasi WP 1. Bovendien wordt een aanzienlijke toename van de systeemefficiëntie vastgesteld, waarbij de SCOP steeg naar 4,00. Daarnaast wordt een aanzienlijke verlaging van het regime waargenomen naar 43/33°C.

| Cases               | U-waarde<br>gebouwschil | Ventilatie<br>type<br>(D/D+) | WTW-unit | UA-waarde batterij<br>[W/K] | Regime  | SCOP | OPEX<br>[€/jaar] | CO <sub>2</sub><br>Emissie<br>[ton/jaar] |
|---------------------|-------------------------|------------------------------|----------|-----------------------------|---------|------|------------------|------------------------------------------|
| 25/ Referentie WP 2 | Hoog                    | D                            | Nee      | 604                         | 65/55°C | 2,92 | 4129             | 4,50                                     |
| 26                  | Hoog                    | D+                           | Nee      | 604                         | 65/55°C | 2,92 | 3378             | 3,70                                     |
| 27                  | Hoog                    | D                            | Ja       | 604                         | 52/42°C | 3,46 | 2584             | 2,83                                     |
| 28                  | Hoog                    | D                            | Nee      | 900                         | 51/41°C | 3,5  | 3500             | 3,84                                     |
| 29                  | Hoog                    | D+                           | Ja       | 604                         | 52/42°C | 3,4  | 2198             | 2,41                                     |
| 30                  | Hoog                    | D+                           | Nee      | 900                         | 51/41°C | 3,5  | 2860             | 3,14                                     |
| 31                  | Hoog                    | D                            | Ja       | 900                         | 45/35°C | 3,8  | 2370             | 2,6                                      |
| 32                  | Hoog                    | D+                           | Ja       | 900                         | 45/35°C | 3,8  | 1990             | 2,19                                     |
| 33                  | Gemiddeld               | D                            | Nee      | 604                         | 61/51°C | 3,05 | 3700             | 4,06                                     |
| 34                  | Gemiddeld               | D+                           | Nee      | 604                         | 61/51°C | 3,05 | 2925             | 3,21                                     |
| 35                  | Gemiddeld               | D                            | Ja       | 604                         | 50/40°C | 3,51 | 2368             | 2,6                                      |
| 36                  | Gemiddeld               | D                            | Nee      | 900                         | 50/40°C | 3,58 | 3090             | 3,5                                      |
| 37                  | Gemiddeld               | D+                           | Ja       | 604                         | 50/40°C | 3,51 | 1960             | 2,15                                     |
| 38                  | Gemiddeld               | D+                           | Nee      | 900                         | 50/40°C | 3,58 | 2560             | 2,81                                     |
| 39                  | Gemiddeld               | D                            | Ja       | 900                         | 44/34°C | 3,86 | 2179             | 2,39                                     |
| 40                  | Gemiddeld               | D+                           | Ja       | 900                         | 44/34°C | 3,86 | 1790             | 1,98                                     |
| 41                  | Laag                    | D                            | Nee      | 604                         | 58/48°C | 3,17 | 3257             | 3,57                                     |
| 42                  | Laag                    | D+                           | Nee      | 604                         | 58/48°C | 3,16 | 2552             | 2,8                                      |
| 43                  | Laag                    | D                            | Ja       | 604                         | 49/39°C | 3,56 | 2119             | 2,32                                     |
| 44                  | Laag                    | D                            | Nee      | 900                         | 48/38°C | 3,7  | 2813             | 3,11                                     |
| 45                  | Laag                    | D+                           | Ja       | 604                         | 49/39°C | 3,55 | 1765             | 1,94                                     |
| 46                  | Laag                    | D+                           | Nee      | 900                         | 48/38°C | 3,69 | 2260             | 2,48                                     |
| 47                  | Laag                    | D                            | Ja       | 900                         | 43/33°C | 4    | 1940             | 2,13                                     |
| 48                  | Laag                    | D+                           | Ja       | 900                         | 43/33°C | 4    | 1610             | 1,77                                     |

Tabel 20: Resultaten voor overige 24 scenario's waarbij het ontwerpdebiet wordt bepaald in functie van een gewenste inblaastemperatuur

Ook in deel 2 worden de bekomen SCOP's uitgezet in functie van de gehanteerde waterzijdige regimes, wat wordt gevisualiseerd in figuur 29. In tabel 20 resulteerde case 48 in een waterzijdig regime van 43/33°C wat op zijn beurt resulteerde in een SCOP van 4. In tabel 20 wordt hiernaast zowel de afzonderlijke impact als de gezamenlijke impact van de invloedsparameters weergegeven op de mogelijke verlaging van het waterzijdig regime.



Figuur 29: Visualtie van de SCOP op basis van de gehanteerde waterzijdige regimes uit tabel 20

## 5.4 Vergelijking tussen deel 1 en deel 2

In paragraaf 5.4 wordt een vergelijking gemaakt tussen de twee ontwerpstrategieën die worden gehanteerd in respectievelijk deel 1 (paragraaf 5.2) en deel 2 (paragraaf 5.3) van de sensitiviteitsstudie. Zoals besproken in paragraaf 5.3 leidde enkel het wijzigen van dit ontwerpdebiet strategie in minder gunstige resultaten, wat wordt geïllustreerd in tabel 19. Om de vergelijking te maken worden case 24 van deel 1 en case 48 van deel 2 gehanteerd. Beide case's bevatten voor respectievelijk deel 1 en deel 2 de best bekomen resultaten door het gecombineerd toepassen van de onderzochte invloedsparameters.

Het verhoogde ontwerpdebiet in case 48 maakte het mogelijk om het waterzijdige temperatuurregime verder te verlagen ten opzichte van case 24 uit deel 1. Dit was het gevolg van de begrenzing van de lucht inblaas temperatuur tot maximaal 35 °C, wat als randvoorwaarde wordt gehanteerd in deze alternatieve ontwerpstrategie. Zoals weergegeven in tabel 21, leidt deze aanpak tot een verbetering van meerdere systeemprestaties: de SCOP neemt toe, terwijl zowel de operationele kosten als de CO<sub>2</sub>-emissies dalen.

|                                      | Case 24 deel 1            | Case 48 deel 2            |
|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Systeem                              | Lucht-water<br>warmtepomp | Lucht-water<br>warmtepomp |
| Ontwerpdebiet [m <sup>3</sup> /h]    | 980                       | 1724                      |
| Regime [°C]                          | 48/38                     | 43/33                     |
| Energieverbruik [kWh]                | 7 648                     | 7 264                     |
| SCOP                                 | 3,67                      | 4                         |
| OPEX [€/jaar]                        | 1659                      | 1610                      |
| CO <sub>2</sub> – emissie [ton/jaar] | 1,82                      | 1,77                      |

*Tabel 21: Vergelijking tussen case 24 van deel 1 en case 48 van deel 2 in de sensitiviteitsstudie*

In conventionele ontwerppraktijken wordt het ventilatiedebiet doorgaans bepaald op basis van de minimale vereisten voor luchtverversing, gerelateerd aan het aantal aanwezige personen in een ruimte [47]. Dit debiet draagt daarbij vaak deels bij aan de ruimteverwarming. Om kosten en systeemdimensionering te beperken, wordt het ontwerpdebiet bij voorkeur zo laag mogelijk gehouden. De resultaten van dit onderzoek tonen echter aan dat een beperkt ventilatiedebiet kan leiden tot hoge vereiste inblaastemperaturen, wat op zijn beurt de verlaging van het waterzijdige temperatuurregime beperkt bij verdere systeemoptimalisaties.

In dat opzicht kan het hanteren van een hoger ventilatiedebiet aan lagere inblaastemperaturen een gunstig alternatief vormen, doordat het toelaat lagere regimes toe te passen en zo het rendement van de warmtepomp te verhogen. Wel dient hierbij een belangrijke kanttekening gemaakt te worden: de technische en economische haalbaarheid is mede afhankelijk de compatibiliteit met het bestaande luchtkanalennetwerk en de ventilatorselectie. Deze aspecten dienen dan ook zorgvuldig geëvalueerd te worden bij toepassing in de praktijk.

## 6 Conclusie en toekomstig onderzoek

De integratie van warmtepompen in bestaande ventilatie- en verwarmingssystemen van niet-residentiële gebouwen vormt een technische en ontwerpmatige uitdaging. Deze complexiteit vloeit voort uit de oorspronkelijke dimensioneringsaanpak, waarbij systemen doorgaans werden ontworpen op basis van hoge temperatuurregimes afgestemd op conventionele opwekkers zoals gasketels.

In dit onderzoek wordt een simulatiegebaseerde retrofitmethodologie ontwikkeld om de impact van verschillende ontwerpkeuzes op de prestaties van een warmtepompsysteem systematisch te analyseren. Vertrekkend van een representatieve referentiecasse wordt een gevoeligheidsstudie opgezet op basis van dynamische simulaties in Hysopt. Door het iteratief doorlopen van verschillende ontwerpconfiguraties wordt de invloed van vijf geselecteerde invloedsparameters onderzocht: de isolatiegraad van de gebouwschil, de toepassing van vraaggestuurde ventilatie, de inzet van warmteterugwinning, de verhoging van de UA-waarde van de verwarmingsbatterij en de gekozen ventilatie ontwerpdebietconfiguratie.

De resultaten tonen aan dat deze factoren een aanzienlijke invloed uitoefenen op de systeemprestaties. In het meest performante scenario, waarin al deze optimalisaties gecombineerd worden, wordt een SCOP van 4 behaald, met een reductie van 52% in zowel operationele kosten als CO<sub>2</sub>-uitstoot ten opzichte van de niet-geoptimaliseerde warmtepomppreferentie (WP1). De analyse onderstreept vooral de meerwaarde van een geïntegreerde benadering, waarbij optimalisaties aan ventilatiezijde, de verwarmingsbatterij en gebouwschil noodzakelijk zijn om een laag temperatuurregime en bijgevolg een hogere efficiëntie te bereiken.

Een opvallende bevinding is dat de gangbare methode voor het bepalen van het ontwerpdebiet, doorgaans gebaseerd op de minimale ventilatiebehoefte, niet noodzakelijk leidt tot het meest performante resultaat binnen een specifieke installatieconfiguratie. In het eerste deel van de studie wordt gewerkt met een ontwerpdebiet gebaseerd op minimale ventilatiebehoefte per persoon. Dit leidde tot hoge inblaastemperaturen en beperktere ruimte om het temperatuurregime te verlagen. In het tweede deel wordt het ontwerpdebiet bepaald op basis van een maximale inblaastemperatuur van 35 °C. Hierdoor ontstond de mogelijkheid om het waterzijdige temperatuurregime verder te verlagen, wat in combinatie met andere optimalisaties leidde tot een hogere efficiëntie en verbeterde systeemprestaties. Deze aanpak stelt wel bijkomende eisen aan het luchtkanalenennetwerk en de ventilatorselectie, wat de technische en economische haalbaarheid kan beperken.

Een tweede belangrijke bijdrage van dit onderzoek is het aantonen van de meerwaarde van een iteratieve, simulatiegestuurde ontwerpaanpak voor de retrofit van HVAC-installaties met warmtepompen. De conventionele ontwerppraktijk werkt doorgaans één of enkele voorstellen uit, zonder een vergelijking van diverse alternatieven en invloedsfactoren. De voorgestelde methodologie maakt het mogelijk om verschillende ontwerpkeuzes systematisch te vergelijken op basis van prestatie-indicatoren zoals SCOP, operationele kosten en CO<sub>2</sub>-uitstoot. Dit leidt tot performantere en contextspecifieke configuraties, afgestemd op de werkelijke mogelijkheden en beperkingen van het gebouw.

Tegelijkertijd toont dit onderzoek aan dat het volledig doorlopen van zo'n simulatiegedreven ontwerptraject bijzonder tijdsintensief is. Dit onderstreept de nood aan een gestructureerd beslissingskader dat gedetailleerde simulatie-inzichten omzet in praktisch hanteerbare ontwerpregels. In dat kader wordt in deze studie een methodiek uitgewerkt waarbij elke simulatieconfiguratie kan worden beschouwd als een uniek referentiepunt binnen een bredere ontwerpbenadering. Vanuit elk

van deze punten kan worden onderzocht welke bijkomende optimalisaties mogelijk zijn en hoe die de globale systeemprestaties beïnvloeden. De uitgevoerde simulaties fungeren zo niet enkel als analyse-instrument, maar ook als bouwstenen voor een eerste stap richting een ontwerp- en beslissingskader. Zo'n kader ondersteunt het nemen van onderbouwde ontwerpbeslissingen zonder telkens een volledig ontwerptraject te doorlopen, en helpt bij het afwegen van prestaties, haalbaarheid en contextspecifieke randvoorwaarden.

Om de scope van dit onderzoek te verbreden, dient het aantal onderzochte invloedsfactoren verder te worden uitgebreid. In deze studie wordt de analyse beperkt tot vijf invloedsparameters, terwijl andere relevante aspecten zoals bijvoorbeeld de interactie met zonnewinsten, nachtverlagingsstrategieën en alternatieve warmtepompconfiguraties buiten beschouwing bleven.

Een volledig generiek en universeel toepasbaar kader is in de praktijk nauwelijks realiseerbaar. De grote variatie in gebouwtypes, gebruiksprofielen en technische randvoorwaarden binnen de niet-residentiële sector maakt het complex om één model op te stellen dat in elke situatie toepasbaar is. De voorgestelde benadering vormt dan ook een eerste, onderbouwde stap in de richting van een breder inzetbaar ontwerp- en beslissingskader, dat verder verfijnd moet worden op basis van aanvullende simulaties en praktijktoepassingen.

Tot slot dient ook de vertaalslag naar economische evaluatie te worden gemaakt. In dit onderzoek werd uitsluitend gefocust op de operationele kosten, CO<sub>2</sub>-uitstoot en SCOP. Het integreren van investeringskosten (CAPEX), onderhoudsvereisten en terugverdiëntijden in toekomstige studies zou toelaten om de haalbaarheid van retrofitstrategieën ook vanuit financieel perspectief vollediger te beoordelen.

Concluderend biedt deze studie een gestructureerde methodologie en eerste aanzet tot een beoordelingskader dat ontwerpers ondersteunt bij de verduurzaming van HVAC-installaties in bestaande gebouwen. Door het combineren van dynamische simulaties met een iteratieve ontwerpaanpak ontstaat een waardevol instrument voor het realiseren van technisch performante en energie-efficiënte warmtepompimplementaties binnen de renovatiepraktijk.

## 7 Bibliografie

- [1] P. Sorknæs, R. M. Johannsen, A. D. Korberg, T. B. Nielsen, U. R. Petersen, and B. V. Mathiesen, "Electrification of the industrial sector in 100% renewable energy scenarios," *Energy*, vol. 254, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124339.
- [2] "'IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change.' [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/>. [Accessed: 14-May-2025]. "
- [3] Europees Parlement, "Energiebesparing: EU-maatregelen om het energieverbruik te verminderen."
- [4] "IEA (2021), Net Zero by 2050, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, Licence: CC BY 4.0".
- [5] HVAC HESS, "HVAC HESS Heating, Ventilation & Air-Conditioning High Efficiency Systems Strategy," Sep. 2013.
- [6] L. W. Yang, Y. Li, T. Yang, and H. S. Wang, "Low temperature heating operation performance of a domestic heating system based on indirect expansion solar assisted air source heat pump," *Solar Energy*, vol. 244, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.08.037.
- [7] S. Jacobs, "Lage temperatuur-combilus met boosterwarmtepompen: een conceptstudie," Master of Science in de industriële wetenschappen: elektromechanica, Universiteit Antwerpen, Antwerpen, 2020.
- [8] C. Citadini de Oliveira, I. Catão Martins Vaz, and E. Ghisi, "Retrofit strategies to improve energy efficiency in buildings: An integrative review," *Energy Build*, vol. 321, p. 114624, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114624.
- [9] Y. Li, G. Rosengarten, C. Stanley, and A. Mojiri, "Electrification of residential heating, cooling and hot water: Load smoothing using onsite photovoltaics, heat pump and thermal batteries," *J Energy Storage*, vol. 56, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105873.
- [10] E. Ryan, D. Kosanovic, and B. McDaniel, "Application of thermal energy storage with electrified heating and cooling in a cold climate," *Appl Energy*, vol. 328, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120147.
- [11] N. Sandoval *et al.*, "Achieving equitable space heating electrification: A case study of Los Angeles," *Energy Build*, vol. 317, p. 114422, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2024.114422.
- [12] P. Raftery, R. Singla, H. Cheng, and G. Paliaga, "Insights from hydronic heating systems in 259 commercial buildings," *Energy Build*, vol. 321, p. 114543, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114543.
- [13] "ISSO, ISSO-publicatie 50: Warmwaterverwarmingsinstallaties. Rotterdam, Nederland: ISSO, 2019. ISBN: 978-90-5044-295-4."
- [14] "ISSO, ISSO-publicatie 52: Luchtzijdig inregelen van klimaatinstallaties. Rotterdam, Nederland: ISSO, 2017. ISBN: 978-90-5044-184-1."
- [15] I. Verhaert, *HVAC-calculaties*. Antwerp: Universiteit Antwerpen, 2020.
- [16] Buildwise, "Ontwerp en dimensionering van centrale-verwarmings- installaties met warm water," Apr. 2013.
- [17] H. Azeez mohammed Hussein, R. Zulkifli, W. M. Faizal Bin Wan Mahmood, and R. K. Ajeel, "Structure parameters and designs and their impact on performance of different heat exchangers: A review," 2022. doi: 10.1016/j.rser.2021.111842.
- [18] ASHRAE, *2016 ASHRAE Handbook. HVAC Systems and Equipment. SI*, vol. 20, no. 2. 2016.
- [19] T. Cholewa *et al.*, "Critical discussion on the challenges of integrating heat pumps in hydronic systems in existing buildings," *Energy*, vol. 326, p. 136158, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.136158.
- [20] A. Frik, J. Bielskus, and R. Džiugaitė-Tumėnienė, "Enhancing seasonal performance of heat pumps integrated into building ventilation systems using a multi-stage volume enlarger: A comparative study across European regions," *Journal of Building Engineering*, vol. 98, p. 111489, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.job.2024.111489.

- [21] C. Fraga, P. Hollmuller, S. Schneider, and B. Lachal, "Heat pump systems for multifamily buildings: Potential and constraints of several heat sources for diverse building demands," *Appl Energy*, vol. 225, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.004.
- [22] E. Janssen, *Ontwerpen en inregelen van cv-installaties*. Antwerpen: UNIVERSITEIT ANTWERPEN Faculteit Toegepaste Ingenieurswetenschappen.
- [23] F. Ardente, M. Beccali, M. Cellura, and M. Mistretta, "Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 460–470, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.09.022.
- [24] S. Chen, G. Zhang, X. Xia, S. Setunge, and L. Shi, "A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings," *Energy Build*, vol. 216, p. 109944, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109944.
- [25] S. Roberts, "Altering existing buildings in the UK," *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4482–4486, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.023.
- [26] F. Nemry *et al.*, "Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union—Potential and costs," *Energy Build*, vol. 42, no. 7, pp. 976–984, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.01.009.
- [27] "Z. Ma, P. Cooper, D. Daly, L. Ledo, Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art, *Energy Build*. 55 (2012) 889–902, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>."
- [28] M. C. Barma, R. Saidur, S. M. A. Rahman, A. Allouhi, B. A. Akash, and S. M. Sait, "A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions," 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.187.
- [29] Jeffrey Pattavina, "Optimal Start-Stop Algorithms for Heating & Cooling of Buildings," Jun. 2023.
- [30] A. S. Gaur, D. Z. Fitiwi, and J. Curtis, "Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review," 2021. doi: 10.1016/j.erss.2020.101764.
- [31] "EN 14825:2022 – Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling – Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance. Brussels: European Committee for Standardization (CEN)."
- [32] "Eurovent Certification, 'Understanding SEER and SCOP,' Eurovent Certification, [Online]. Available: <https://www.eurovent-certification.com/en/category/article/understanding-seer-and-scop?universe=energy-efficiency>. [Accessed: 16-May-2025]."
- [33] W. Dnyaneshwari, T. Rushang, T. Tejas, W. Chetan, W. Rahul, and S. Sunil, "Design And Analysis Of Fin And Tube Heat Exchanger," Department of Mechanical Engineering Vishwakarma Institute of Technology Pune, 2024.
- [34] C. C. Wang, K. Y. Chen, J. S. Liaw, and C. Y. Tseng, "An experimental study of the air-side performance of fin-and-tube heat exchangers having plain, louver, and semi-dimple vortex generator configuration," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 80, 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.030.
- [35] J. Van de Paer, *2-Warmteleer*, v2 ed. Antwerp: Universiteit Antwerpen, 2021.
- [36] A. Mardiana-Idayu and S. B. Riffat, "Review on heat recovery technologies for building applications," 2012. doi: 10.1016/j.rser.2011.09.026.
- [37] H. S. Dizaji, S. Pourhedayat, H. Moria, S. Alqahtani, S. Alshehry, and A. E. Anqi, "Performance boost of a commercial air-to-air plate heat recovery unit by mesh-net insert; thermal-frictional, economic, and effectiveness-NTU analysis," *Energy*, vol. 290, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2023.130037.
- [38] A. Faraj, J. Faraj, E. Harika, F. Hachem, and M. Khaled, "Development of a new method for estimating the overall heat transfer coefficient of heat exchangers – Validation in automotive applications," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101434.
- [39] C. R. Ruivo, G. Angrisani, and J. J. Costa, "Simplified component model of heating and dry-cooling coils: Influence of altitude and of glycol concentration in the heat transfer fluid on the error prediction of the heat transfer rate," *Journal of Building Engineering*, vol. 6, 2016, doi: 10.1016/j.job.2016.02.005.

- [40] K. Janssens, "Hydronisch ontwerp van luchtbehandelingssystemen in Hysopt," Master of Science, Universiteit Antwerpen, Antwerpen, 2019.
- [41] G. Nellis and S. Klein, *Heat Transfer*. New York: Cambridge University, 2009.
- [42] *EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation Engineering Reference*, 22.10.0. U.S. Department of Energy, 2022.
- [43] Y. A. Cengel, "Heat Transfer: A Practical Approach 2nd Edition," *MacGraw-Hill*, vol. 4, no. 9, 2004.
- [44] C. R. Ruivo, G. Angrisani, and J. J. Costa, "Accuracy of simplified heating coil models based on manufacturer catalogue data," *Journal of Building Engineering*, vol. 10, pp. 110–119, Sep. 2017.
- [45] M. Wetter, "Simulation Model: Finned Water-to-Air Coil without Condensation. LBNL-42355," 1998.
- [46] Y. A. Cengel, *Heat Transfer: A Practical Approach, 2nd ed.*, Boston, MA: McGraw-Hill, 2004.
- [47] "NBN EN 16798-3:2017, Energieprestatie van gebouwen – Ventilatie voor gebouwen – Deel 3: Voor niet-residentiële gebouwen – Prestatie-eisen voor ventilatie en ruimten, vereiste luchtdebieten. Brussel: NBN, 2017."
- [48] "NBN EN 12831-1:2017, Energieprestatie van gebouwen – Methode voor berekening van het ontwerpwarmteverlies – Deel 1: Ruimteverwarming – Berekening van het ontwerpwarmteverlies van gebouwen. Brussel: NBN, 2017."
- [49] "Centrale Verwarming CV, 'Verbod op aardgas en stookolie in nieuwbouw vanaf 2025,' [Online]. Available: <https://www.centraleverwarmingcv.be/nieuws/verbod-aardgas-nieuwbouw#:~:text=Vanaf%201%20januari%202025%20is,mogelijk%20fossiele%20brandstoffen%20te%20gebruiken>. [Accessed: May 5, 2025]."
- [50] J. Cleiren, "Hydronisch ontwerp van warmte- en koudeproductiesystemen met geothermische seizoensopslag," Master of Science in de industriële wetenschappen: elektromechanica, Universiteit Antwerpen, Antwerpen, 2018.
- [51] "CIBSE Journal, 'CPD Module 2019: Pressure independent control valves,' CIBSE Journal, Jan. 2019. [Online]. Available: <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2019-01-vvs/>."
- [52] "Hysopt, 'Pareto analysis usage,' Hysopt Documentation, [Online]. Beschikbaar: <https://hysopt.atlassian.net/wiki/spaces/HRM/pages/3089368665/Pareto+analysis+usage>. [Geraadpleegd: 18-mei-2025]."
- [53] "NBN, NBN D 50-001: Ventilatievoorzieningen in woongebouwen – Basisprincipes en vereisten, Bureau voor Normalisatie (NBN), Brussel, België, 1991."
- [54] "ISSO, ISSO-publicatie 72: Ontwerpen van individuele bodemgebonden warmtepompsystemen voor woningen, Rotterdam: ISSO, 2022."
- [55] M. Lämmle *et al.*, "Performance of air and ground source heat pumps retrofitted to radiator heating systems and measures to reduce space heating temperatures in existing buildings," *Energy*, vol. 242, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122952.
- [56] "International Energy Agency. Energy efficiency 2022. Online, 2022. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>. 1."
- [57] "European Environment Agency, Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe, [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>. [Accessed: 10-May-2025]."
- [58] "VREG, 'Energieprijs,' Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt. [Online]. Beschikbaar: <https://www.vreg.be/nl/energieprijs>. [Geraadpleegd: 18-mei-2025]."
- [59] B. Vanheel, "Wegwijzer voor een optimaal ontwerp van hybride verwarmingssystemen," Master of Science in de industriële wetenschappen: elektromechanica, Universiteit Antwerpen, Antwerpen, 2019.

## 8 Appendix

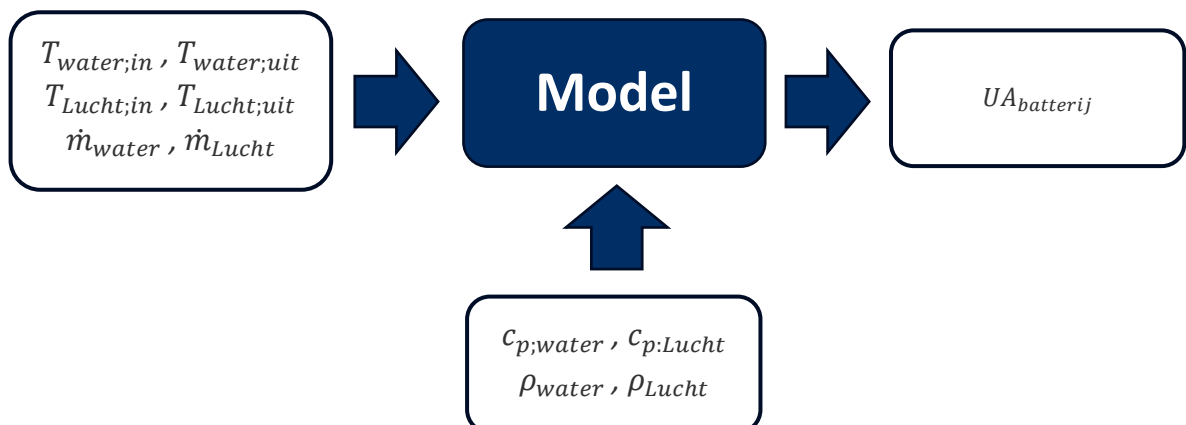
### 8.1 Validatie bestaande literatuurmodellen

Voor de onderbouwde integratie van warmtepompen in bestaande verwarmings- en ventilatiesystemen is het essentieel om simulaties uit te voeren die de systeemprestaties kunnen inschatten bij verschillende ontwerpkeuzes. Bestaande literatuurmodellen voor warmtewisselaars zijn doorgaans gevalideerd voor hoge temperatuurregimes. De nauwkeurigheid van deze bestaande modellen dient onderzocht te worden vooraleer verschillende dynamische simulaties kunnen worden uitgevoerd.

Om deze reden werd besloten om een uitgebreide validatie uit te voeren van de beschikbare warmtewisselmodellen van EnergyPlus [42] alvorens uitgebreide dynamische simulaties uit te voeren. Dit model is vergelijkbaar met het type dat wordt toegepast in Hysopt. Het doel van deze validatie is om na te gaan of dit model, initieel ontwikkeld voor hoge temperatuurtoepassingen, ook bruikbaar en accuraat blijft binnen de context van lage temperatuurverwarming.

### 8.2 Methode validatie

Gedurende deze metingen werden onder verschillende condities, waaronder variaties in luchtdebiet en watervolume, zowel de in- als uitgaande temperaturen van lucht en water gemeten in de testopstelling van het Z-gebouw van de Universiteit Antwerpen. Deze metingen zijn terug te vinden in tabel 26. Op basis van deze gegevens werd voor elk meetpunt afzonderlijk de UA-waarde berekend met behulp van de  $\epsilon$ -NTU methode, waarbij het gemiddelde van deze waarden wordt bepaald en toegepast in het simulatiemodel. Op die manier worden binnen deze validatiestudie zowel de ontwerp- als simulatiebenadering toegepast. In figuur 30 wordt de ontwerpbenadering visueel weergegeven.



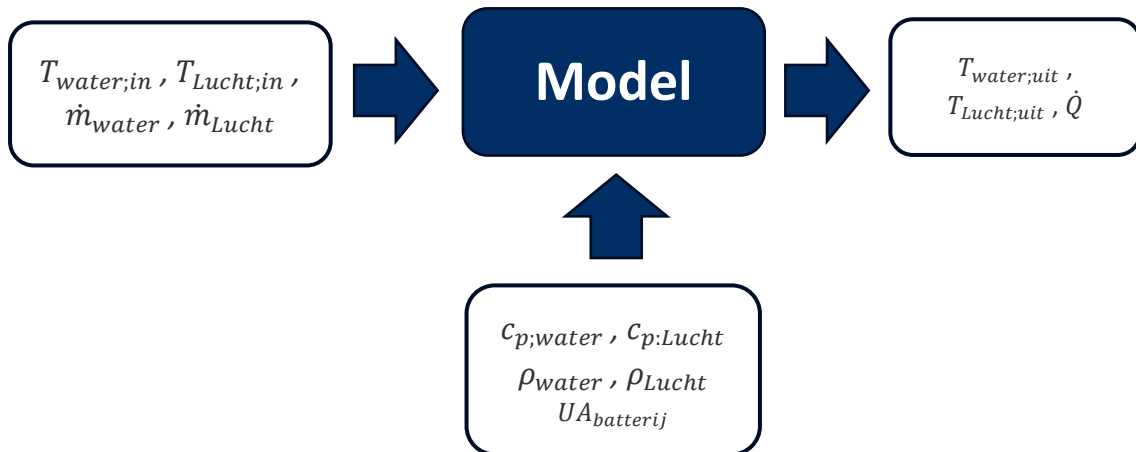
Figuur 30: Model voor de ontwerpbenadering van de verwarmingsbatterij

Vanwege de onzekerheid op de accuraatheid van de luchtdebietmetingen worden drie methodes toegepast voor de afleiding van een representatieve constante UA-waarde. Het opstellen van deze drie methodes wordt gehanteerd om te onderzoeken of de accuraatheid kan verhoogd worden. De drie methodes bevatten:

- UA water en lucht alle metingen
- UA water en lucht zonder minimale luchtdebietmetingen
- UA water zonder minimale luchtdebietmetingen

De term "UA water en lucht alle metingen" verwijst naar de gemiddelde UA-waarde die is berekend op basis van zowel de luchtzijdige als waterzijdige UA-waardes. De term "UA water zonder minimale luchtdebietmetingen" verwijst naar een gemiddelde UA-waarde die is bepaald door uitsluitend rekening te houden met de waterzijdige warmteoverdracht. In de laatste twee methodes werden de metingen, waarbij een minimaal luchtdebiet werd gebruikt, bewust uitgesloten bij het berekenen van de gemiddelde UA-waarde. De reden hiervoor wordt duidelijk bij het plotten van de resultaten.

Vervolgens worden de uitgaande temperaturen, die werden berekend met het model, vergeleken met de gemeten uitgaande temperaturen op basis van de determinatiecoëfficiënt  $R^2$  en de Root Mean Squared Error (RMSE) voor elk scenario. Deze  $R^2$  en RMSE werden voor de uitgaande lucht- en watertemperaturen afzonderlijk bepaald. In figuur 31 wordt de simulatiebenadering, waarbij de uitgaande temperaturen worden berekend, visueel weergegeven.



Figuur 31: Model simulatiebenadering voor de verwarmingsatterij

Waarbij:

$$T_{Lucht;uit} = T_{Lucht;in} + \frac{\varepsilon \cdot \dot{C}_{min} \cdot (T_{water;in} - T_{Lucht;in})}{\dot{C}_{Lucht}} \quad (20)$$

$$T_{water;uit} = T_{water;in} - \frac{\dot{C}_{Lucht} \cdot (T_{Lucht;uit} - T_{Lucht;in})}{\dot{C}_{water}} \quad (21)$$

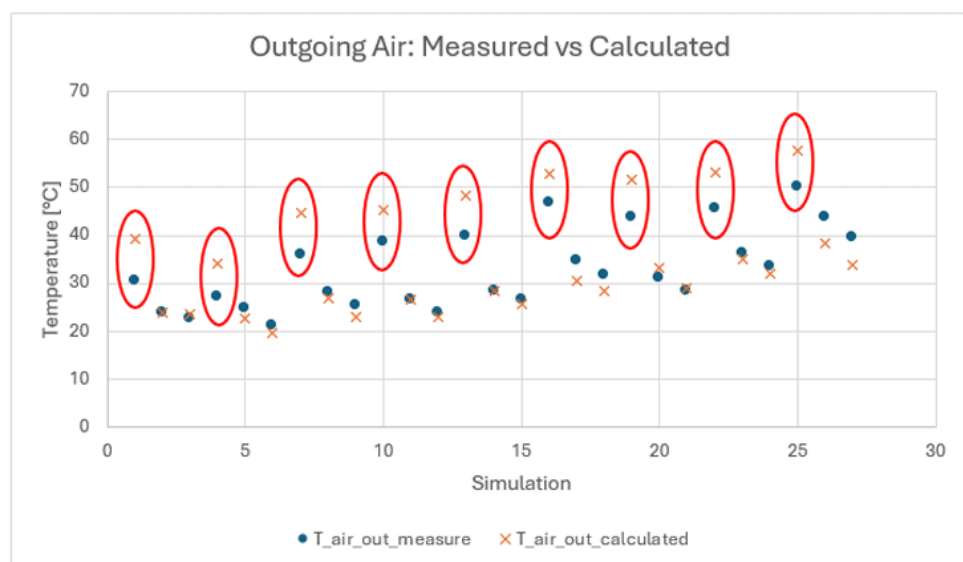
### 8.2.1 Methode 1: UA water en lucht alle metingen

In beide grafieken worden de omcirkelde punten gekenmerkt door situaties waarin het minimale luchtdebiet van toepassing was. Vooral in de eerste grafiek, die de uitgaande luchttemperatuur weergeeft, zijn de afwijkingen tussen de gemeten en berekende waarden het meest uitgesproken. Deze grotere verschillen doen zich in het bijzonder voor bij de meetpunten met een minimaal luchtdebiet. Daarnaast vertonen deze meetpunten eveneens aanzienlijke afwijkingen ten opzichte van de overige punten die corresponderen met situaties waarin een gemiddeld of maximaal luchtdebiet werd toegepast. Op basis van deze volledige dataset, inclusief de afwijkende meetwaarden, werden vervolgens de determinatiecoëfficiënt ( $R^2$ ) en de Root Mean Squared Error (RMSE) voor beide grafieken berekend.

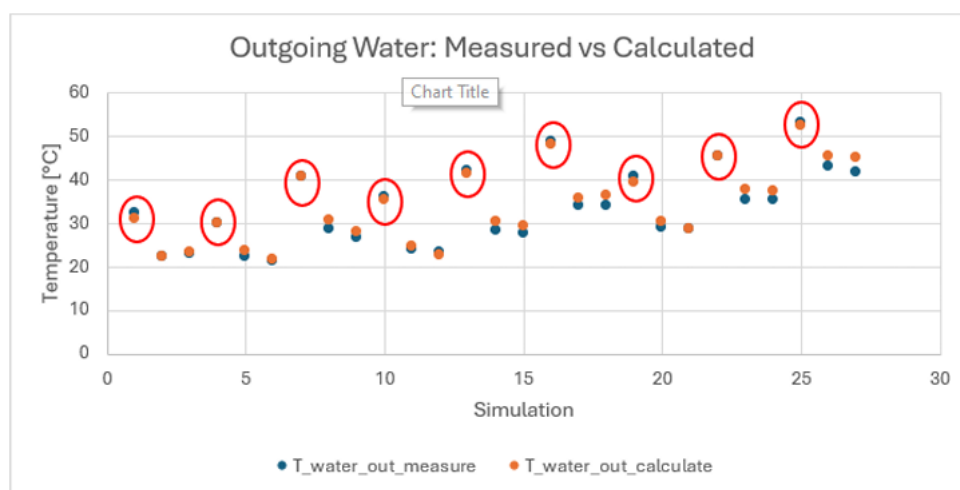
- Voor methode 1 bedraagt de gemiddelde UA-waarde: 581,53 W/K

| Grafiek 1: Uitgaande luchttemperaturen<br>(gemeten vs berekend) |      | Grafiek 2: Uitgaande watertemperaturen<br>(gemeten vs berekend) |      |
|-----------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------|------|
| $R^2$                                                           | RMSE | $R^2$                                                           | RMSE |
| 0,63                                                            | 4,86 | 0,97                                                            | 1,45 |

Tabel 22: Resultaten  $R^2$  en RMSE van beide grafieken



Figuur 32: Uitgaande luchttemperaturen: gemeten vs berekend



Figuur 33: Uitgaande watertemperaturen; gemeten vs berekend

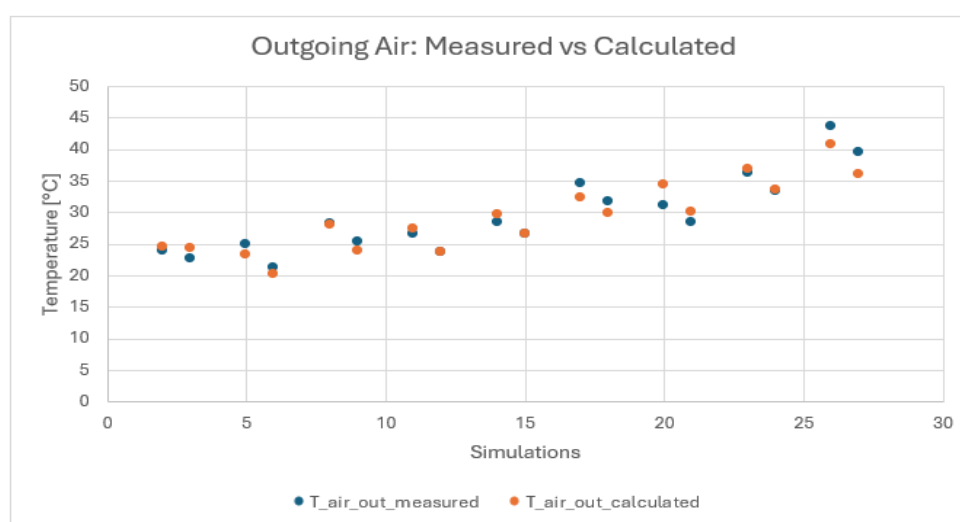
## 8.2.2 Methode 2: UA water en lucht zonder minimale luchtdebietmetingen

In dit scenario worden de metingen die betrekking hadden op situaties met een minimaal luchtdebiet bewust buiten beschouwing gelaten bij het bepalen van de UA-waarde. Door het uitsluiten van de uitschieters van methode 1 zijn de afwijkende punten in de grafieken verdwenen, wat resulteert in een duidelijk verbeterde correlatie tussen gemeten en berekende waarden. Vooral in de grafiek met betrekking tot de uitgaande luchttemperaturen is deze verbeterde overeenkomst zichtbaar.

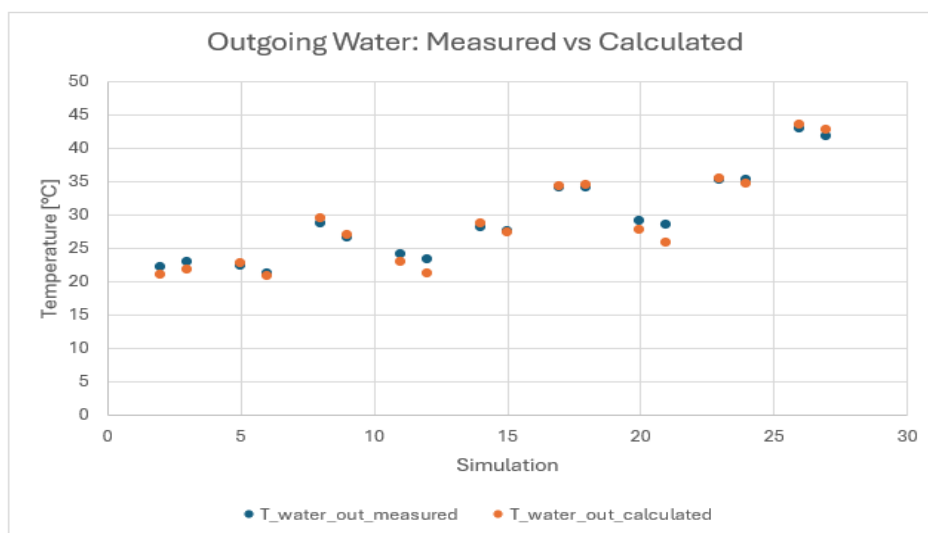
- Voor dit scenario werd een gemiddelde UA-waarde van 707,25 W/K vastgesteld.

| Grafiek 1: Uitgaande luchttemperaturen<br>(gemeten vs berekend) |      | Grafiek 2: Uitgaande watertemperaturen<br>(gemeten vs berekend) |       |
|-----------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------|-------|
| R <sup>2</sup>                                                  | RMSE | R <sup>2</sup>                                                  | RMSE  |
| 0,91                                                            | 1,74 | 0,97                                                            | 1,095 |

Tabel 23: Tabel 18: Resultaten R<sup>2</sup> en RMSE van beide grafieken



Figuur 34: Uitgaande luchttemperaturen: gemeten vs berekend



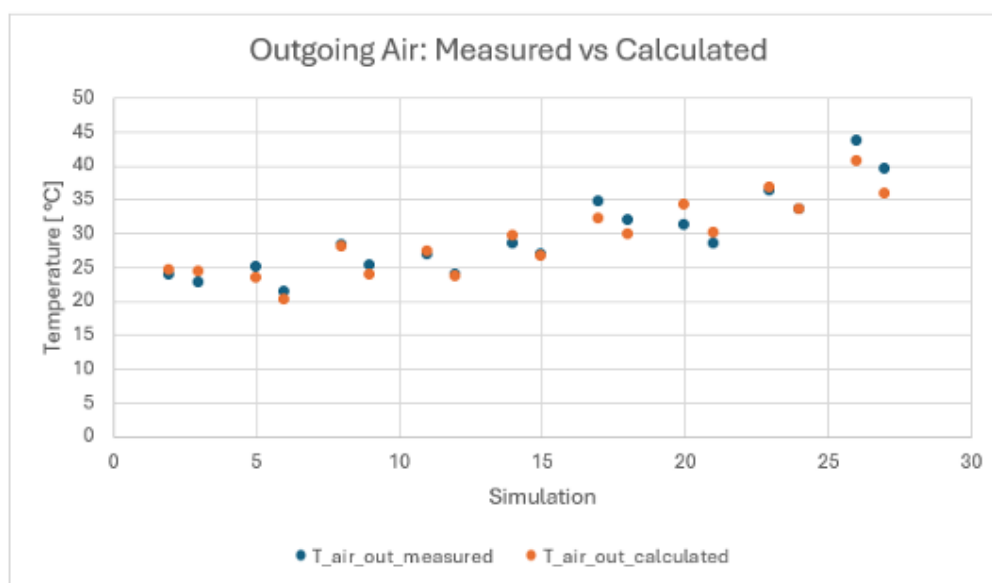
Figuur 35: Uitgaande watertemperaturen; gemeten vs berekend

### 8.2.3 Methode 3: UA water zonder minimale luchtdebietmetingen

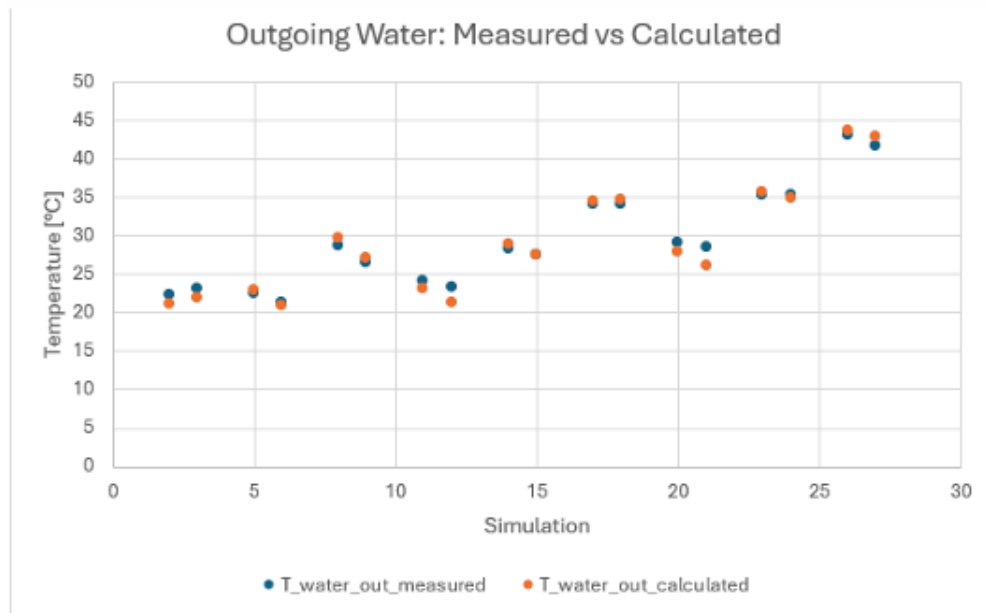
De gemiddelde UA-waarde bedraagt: 695,38 W/K

| Grafiek 1: Uitgaande luchttemperaturen<br>(gemeten vs berekend) |      | Grafiek 2: Uitgaande watertemperaturen<br>(gemeten vs berekend) |      |
|-----------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------|------|
| R <sup>2</sup>                                                  | RMSE | R <sup>2</sup>                                                  | RMSE |
| 0,91                                                            | 1,76 | 0,97                                                            | 1,04 |

Tabel 24: Table 18: Resultaten R<sup>2</sup> en RMSE van beide grafieken



Figuur 36: Uitgaande luchttemperaturen; gemeten vs berekend



Figuur 37: Uitgaande watertemperaturen; gemeten vs berekend

#### 8.2.4 Conclusie validatie

De uitgevoerde validatie toont aan dat het gehanteerde EnergyPlus-model, gebaseerd op de  $\epsilon$ -NTU-methode, ook bij lage temperatuurregimes in staat is om het thermisch gedrag van verwarmingsbatterijen nauwkeurigheid te voorspellen. De resultaten geven echter aan dat de modelnauwkeurigheid afneemt wanneer het systeem zich in deellastcondities bevindt. In dergelijke situaties treden foutieve voorspellingen op, wat in lijn ligt met eerder gerapporteerde beperkingen in de literatuur. Deze afwijkingen worden deels versterkt door meetonzekerheden, in het bijzonder op de bepaling van het luchtdebiet.

|                      | Methode 1: UA water en lucht alle metingen | Methode 2: UA water en lucht zonder minimale luchtdebietmetingen | Methode 3: UA water zonder minimale luchtdebietmetingen |
|----------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| UA-waarde            | 581,53                                     | 707,25                                                           | 695,38                                                  |
| R <sup>2</sup>       | 0,63                                       | 0,91                                                             | 0,91                                                    |
| R <sup>2</sup> water | 0,97                                       | 0,97                                                             | 0,97                                                    |
| RMSE lucht           | 4,86                                       | 1,74                                                             | 1,76                                                    |
| RMSE water           | 1,45                                       | 1,095                                                            | 1,04                                                    |

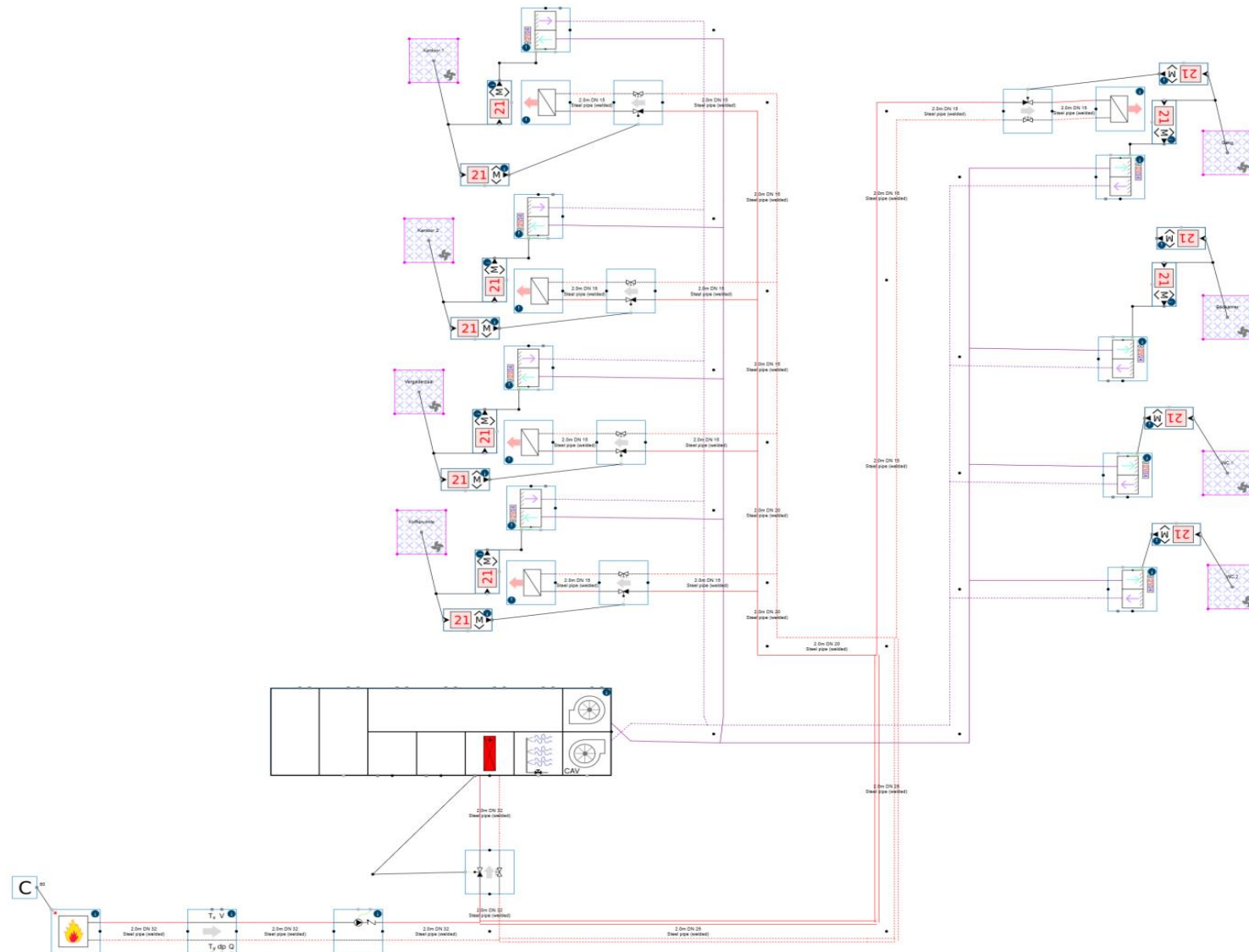
Tabel 25: Algemeen overzicht resultaten validatie van de 3 methodes

| Aantal | T_lucht_in | T_water_in | V_water_in | V_lucht_in | T_lucht_in | T_water_in | V_water_in (l/min) | V_lucht_in (m³/h) | T_lucht_uit | T_water_uit |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------------|-------------------|-------------|-------------|
| 1      | gem        | min        | min        | min        | 14,7       | 46,7       | 4,77               | 640               | 30,4        | 32,3        |
| 2      | gem        | min        | min        | gem        | 14,3       | 41,3       | 4,77               | 1970              | 23,9        | 22,2        |
| 3      | gem        | min        | min        | max        | 14,8       | 47,5       | 4,77               | 2700              | 22,7        | 23          |
| 4      | gem        | min        | gem        | min        | 15,5       | 37,8       | 7,4                | 640               | 27,2        | 29,9        |
| 5      | gem        | min        | gem        | gem        | 15,1       | 33,3       | 7,4                | 1970              | 24,9        | 22,4        |
| 6      | gem        | min        | gem        | max        | 13,8       | 32,1       | 7,4                | 2700              | 21,2        | 21,2        |
| 7      | gem        | min        | max        | min        | 15,6       | 48,6       | 11                 | 620               | 36,1        | 40,6        |
| 8      | gem        | min        | max        | gem        | 15         | 40,7       | 11                 | 1970              | 28,2        | 28,7        |
| 9      | gem        | min        | max        | max        | 14,6       | 38         | 11                 | 2700              | 25,3        | 26,5        |
| 10     | gem        | gem        | min        | min        | 16,4       | 53,7       | 4,7                | 620               | 38,6        | 36          |
| 11     | gem        | gem        | min        | gem        | 15         | 47,8       | 4,7                | 1970              | 26,7        | 24,1        |
| 12     | gem        | gem        | min        | max        | 14,7       | 46         | 4,7                | 2700              | 23,8        | 23,3        |
| 13     | gem        | gem        | gem        | min        | 16,3       | 53,6       | 7,4                | 590               | 39,8        | 42          |
| 14     | gem        | gem        | gem        | gem        | 15,3       | 47         | 7,4                | 1970              | 28,5        | 28,2        |
| 15     | gem        | gem        | gem        | max        | 15         | 47,7       | 7,4                | 2700              | 26,7        | 27,5        |
| 16     | gem        | gem        | max        | min        | 16,6       | 58,1       | 10,9               | 630               | 46,9        | 48,6        |

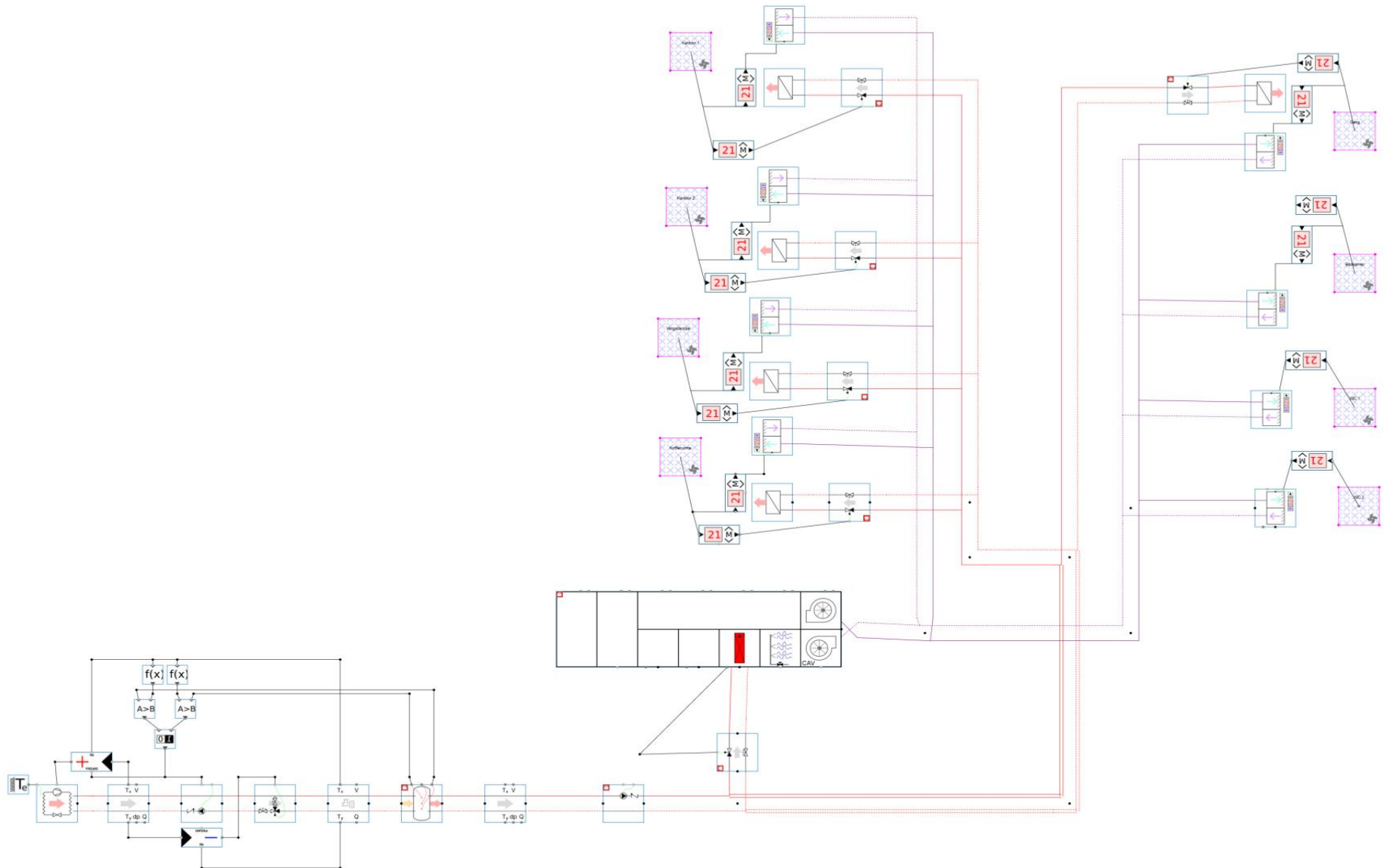
|    |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
|----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| 17 | gem | gem | max | gem | 15   | 49,3 | 10,9 | 1970 | 34,7 | 34,1 |
| 18 | gem | gem | max | max | 15,3 | 51,8 | 10,9 | 2700 | 31,8 | 34   |
| 19 | gem | max | min | min | 16,4 | 62,5 | 4,7  | 640  | 43,8 | 40,8 |
| 20 | gem | max | min | gem | 15,8 | 65,1 | 4,7  | 1970 | 31,2 | 29,1 |
| 21 | gem | max | min | max | 15   | 67,4 | 4,7  | 2700 | 28,4 | 28,5 |
| 22 | gem | max | gem | min | 16,9 | 59,5 | 7,4  | 600  | 45,7 | 45,5 |
| 23 | gem | max | gem | gem | 15,7 | 62,5 | 7,4  | 1970 | 36,2 | 35,3 |
| 24 | gem | max | gem | max | 15,3 | 65,8 | 7,4  | 2630 | 33,4 | 35,2 |
| 25 | gem | max | max | min | 17,3 | 63,6 | 11,1 | 640  | 50   | 53   |
| 26 | gem | max | max | gem | 15,9 | 64,3 | 11,1 | 1940 | 43,7 | 43   |
| 27 | gem | max | max | max | 15,9 | 66,1 | 11,1 | 2700 | 39,5 | 41,7 |

Tabel 26: Resultaten metingen validatie

### 8.3 Model Referentiecase ketel



## 8.4 Model warmtepomp uitgangspunt sensitiviteitsanalyse



Simulatie-gebaseerde methode voor integratie van warmtepompen in luchtbehandelingsunits

