

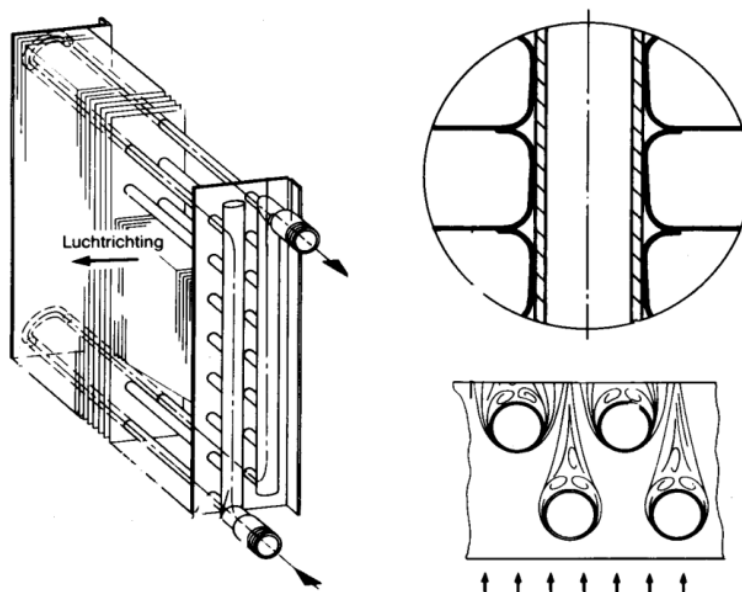


**techniplan adviseurs bv**

RAADGEVEND INGENIEURSBUREAU

Project : **Afstudeerscriptie Lennart Sebastiaan Vos**

Onderwerp : **Optimalisatie energieverbruik klimaatinstallatie door verandering temperatuurtrajecten in koel- en verwarmingsbatterijen.**

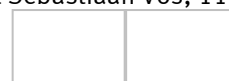


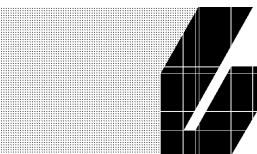
Afstudeercoach : F.C.M. Zoller  
Tweede lezer : J.J. Bil  
Bedrijfsmentor : E. Gerritsen

Documentcode : Eindrapport  
Status : Gereed

Werktuigbouwkunde  
De Haagse Hogeschool

Rotterdam, 21 december 2016  
Lennart Sebastiaan Vos; 11117141

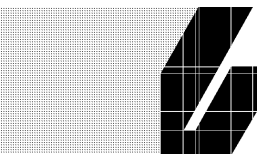




---

Eindrapport  
21 december 2016  
blad 2 van 90

*(Pagina bewust leeg gelaten)*



### **Voorwoord**

Dit afstudeeronderzoek voor mijn studie werktuigbouwkunde aan de Haagse Hogeschool te Delft is uitgevoerd voor en bij Techniplan Adviseurs te Rotterdam.

Graag zou ik van de Haagse Hogeschool Fred Zoller willen bedanken voor de zeer efficiënte begeleiding. Daarnaast zou ik van Techniplan mijn begeleidster Esther Gerritsen willen bedanken voor haar feedback op mijn stukken en haar begeleiding. Voor de technische inhoud wil ik in het bijzonder Maarten Bruinsma van Recupair B.V. bedanken, zonder zijn hulp had ik een groot deel van de gebruikte data niet tot mijn beschikking gehad.



## **Samenvatting**

Vanwege strenger wordende eisen aan het energieverbruik van gebouwen, wordt er voor het opwekken van warmte en koude steeds meer gebruik gemaakt van warmte-koudeopslag (wko). Bij wko wordt relatief koud en warm water in bronnen in de grond opgeslagen. De opgeslagen koude wordt direct aan het gebouw afgegeven (passieve koude) en de opgeslagen warmte wordt gebruikt om een warmtepomp aan te drijven, welke het gebouw voorziet van warmte. Het toepassen van wko levert een rendement tot wel 4x hoger dan conventionele systemen op.

Wko kan warmte en koude op verschillende temperatuurniveaus leveren, met verschillende opwekkingsrendementen. Dit leidt tot verschillende mogelijke temperatuurtrajecten voor de verwarmings- en koelbatterij in de LBK. De verschillende temperatuurtrajecten zijn van invloed op de grootte, en daarmee het luchtzijdig drukverlies van de batterijen in de LBK. Dit zorgt voor een variatie in verbruik van de ventilatoren. De verwachting is dat wanneer het opwekkingsrendement daalt, het ventilatorverbruik stijgt. Tot dusver is het niet bekend welke temperatuurtrajecten tot het laagste energieverbruik van een klimaatinstallatie leiden.

Voor het verwarmen met behulp van wko is het energieverbruik van de klimaatinstallatie het laagst wanneer de intredetemperatuur van de warmtebatterij zo laag mogelijk is. Deze lage intredetemperatuur zorgt voor een hoger opwekkingsrendement van de warmtepomp, die verbonden is aan de wko. Door de lagere intredetemperatuur wordt het luchtzijdig drukverlies wel hoger, waardoor het vermogen en verbruik van de ventilator in de toevoerkast ook stijgt. Het hogere verbruik van de ventilator weegt echter niet op tegen de energiewinst bij de warmteopwekking. Voor de onderzochte temperatuurtrajecten is het temperatuurtraject voor de warmtebatterij waarbij het energieverbruik het laagst is  $30^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$ .

Voor het koelen met wko is het energieverbruik van de klimaatinstallatie het laagst als het temperatuurverschil tussen de luchtzijde en waterzijde over de koelbatterij zo groot mogelijk is. Bij koelen is het opwekkingsrendement niet afhankelijk van het temperatuurniveau van de koudebron. Wel hebben de temperatuurtrajecten van de koelbatterij invloed op het verbruik van de ventilatoren en de circulatiepomp. Om het temperatuurtraject voor de koelbatterij te vinden waarbij het energieverbruik het laagst is zijn er twee factoren onderzocht, het verschil in intredetemperatuur en het temperatuurverschil tussen de in- en uittredetemperatuur van het koelwater in de batterij.

Bij lagere intredetemperaturen wordt het energieverbruik van de klimaatinstallatie lager, echter kan koelen met het temperatuurniveau van grondwater bij mogelijke uitputting van de koudebron economisch voordeliger zijn. Voor het temperatuurverschil tussen de in- en uittredetemperatuur van de koelbatterij zorgt een grotere  $\Delta T$  voor een lager verbruik van de circulatiepomp. Dit zorgt ook voor grotere batterijen en dus voor extra verbruik van de ventilator. Er is per intredetemperatuur een optimum van het verbruik van deze componenten te vinden. Voor de onderzochte temperatuurtrajecten is het energieverbruik van de klimaatinstallatie het laagst bij een temperatuurtraject van  $10^{\circ}\text{C} - 18^{\circ}\text{C}$ . Bij een intredetemperatuur van  $12^{\circ}\text{C}$  (grondwatertemperatuur) leidt in dit onderzoek een temperatuurtraject van  $12^{\circ}\text{C} - 19^{\circ}\text{C}$  tot het laagste energieverbruik.

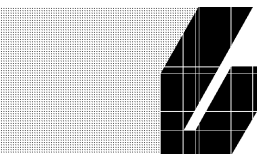


## Inhoudsopgave

|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>VOORWOORD .....</b>                                 | <b>3</b>  |
| <b>SAMENVATTING .....</b>                              | <b>4</b>  |
| <b>1. INLEIDING.....</b>                               | <b>8</b>  |
| <b>2. KLIMAATINSTALLATIES EN COMPONENTEN .....</b>     | <b>10</b> |
| 2.1. Warmte- koudeopslag.....                          | 11        |
| 2.1.1. Wko componenten .....                           | 13        |
| 2.1.2. Bereik warmte-koudeopslag.....                  | 14        |
| 2.2. Luchtbehandelingskasten.....                      | 15        |
| 2.2.1. Koel- en verwarmingsbatterijen .....            | 16        |
| 2.3. Overige afgiftesystemen .....                     | 17        |
| <b>3. FORMULES KLIMAAT EN KLIMAATINSTALLATIES.....</b> | <b>18</b> |
| 3.1. Overzicht energievragers .....                    | 18        |
| 3.2. Methode berekeningen.....                         | 19        |
| 3.3. Koude.....                                        | 20        |
| 3.3.1. Berekening koelvermogen.....                    | 20        |
| 3.3.2. Energieverbruik koudeopwekking.....             | 22        |
| 3.3.3. Hulpenergie .....                               | 23        |
| 3.4. Warmte.....                                       | 24        |
| 3.4.1. Verwarmingsvermogen.....                        | 24        |
| 3.4.2. Energieverbruik warmteopwekking.....            | 24        |
| 3.4.3. Hulpenergie .....                               | 25        |
| 3.5. Ventilatie.....                                   | 26        |
| 3.5.1. Vermogen ventilator.....                        | 26        |
| 3.5.2. Bepaling totaaldruk .....                       | 26        |
| 3.5.3. Verbruik ventilatie.....                        | 27        |
| 3.5.4. Rekenmethode verbruik ventilatoren .....        | 28        |
| 3.6. Circulatiepomp .....                              | 28        |
| 3.7. Opwekking .....                                   | 28        |
| 3.7.1. Prestaties wko .....                            | 28        |
| 3.7.2. Thermisch vermogen koudeopslag .....            | 30        |
| 3.8. Koel en verwarmingsbatterijen.....                | 30        |
| <b>4. OMSCHRIJVING CASUS .....</b>                     | <b>32</b> |



|                   |                                                                  |           |
|-------------------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.              | Eisen en wensen casus .....                                      | 32        |
| 4.2.              | Casuskeuze .....                                                 | 32        |
| 4.3.              | Analyse van het Plantronics hoofdkantoor .....                   | 33        |
| 4.4.              | Analyse klimaatinstallatie .....                                 | 34        |
| 4.4.1.            | Analyse warmte-koudeopslag .....                                 | 34        |
| 4.4.2.            | Analyse Luchtbehandelingskast .....                              | 35        |
| 4.5.              | Analyse energieverbruik casus .....                              | 37        |
| <b>5.</b>         | <b>BEPALING VAN DE TE ONDERZOEKEN TEMPERATUURTRAJECTEN .....</b> | <b>38</b> |
| 5.1.              | Temperatuurtrajecten .....                                       | 38        |
| 5.1.1.            | Temperatuurtrajecten verwarmingsbatterijen .....                 | 38        |
| 5.1.2.            | Temperatuurtrajecten koelbatterijen .....                        | 39        |
| 5.2.              | Aanvraag batterijen .....                                        | 41        |
| <b>6.</b>         | <b>VERGELIJKINGEN ENERGIEVERBRUIK KLIMAATINSTALLATIE .....</b>   | <b>45</b> |
| 6.1.              | Vergelijking verbruik warmte .....                               | 45        |
| 6.2.              | Vergelijking verbruik koude .....                                | 46        |
| 6.3.              | Constante verbruikers .....                                      | 49        |
| 6.4.              | Totaal energieverbruik klimaatinstallatie .....                  | 50        |
| <b>7.</b>         | <b>KOSTENBEREKENING .....</b>                                    | <b>53</b> |
| <b>8.</b>         | <b>CONCLUSIES, AANBEVELINGEN EN DISCUSSIE .....</b>              | <b>56</b> |
| 8.1.              | Conclusies .....                                                 | 56        |
| 8.2.              | Aanbevelingen .....                                              | 57        |
| 8.3.              | Discussie .....                                                  | 58        |
| <b>9.</b>         | <b>LITERATUUR .....</b>                                          | <b>59</b> |
| <b>BIJLAGE A.</b> | <b>BEREKENINGEN .....</b>                                        | <b>60</b> |
| A.1.              | Warmte .....                                                     | 60        |
| A.1.1.            | Berekenen warmtebehoefte .....                                   | 60        |
| A.1.2.            | Berekenen energieverbruik warmteopwekking .....                  | 60        |
| A.1.3.            | Hulpenergie .....                                                | 62        |
| A.2.              | Koude .....                                                      | 63        |
| A.2.1.            | Berekenen koudebehoefte .....                                    | 63        |
| A.2.2.            | Berekenen energieverbruik koudeopwekking .....                   | 63        |
| A.2.3.            | Hulpenergie .....                                                | 64        |
| A.3.              | Ventilatie .....                                                 | 68        |



|                   |                                                                  |           |
|-------------------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| A.3.1.            | Asvermogen ventilator .....                                      | 68        |
| A.3.2.            | Berekening verbruik ventilatoren.....                            | 72        |
| <b>BIJLAGE B.</b> | <b>BEREKENING KOSTEN .....</b>                                   | <b>77</b> |
| B.1.              | Investeringskosten .....                                         | 77        |
| B.1.1.            | Kosten overige installaties .....                                | 80        |
| B.2.              | Exploitatiekosten.....                                           | 80        |
| B.3.              | Overzicht kosten.....                                            | 82        |
| B.3.1.            | Discussie .....                                                  | 84        |
| <b>BIJLAGE C.</b> | <b>GEGEVENS BATTERIJEN.....</b>                                  | <b>85</b> |
| C.1.              | Gegevens warmtebatterijen .....                                  | 85        |
| C.2.              | Gegevens koelbatterijen .....                                    | 86        |
| <b>BIJLAGE D.</b> | <b>TABELLEN OPWEKKINGSRENDEMENTEN.....</b>                       | <b>88</b> |
| <b>BIJLAGE E.</b> | <b>ONDERZOEK TEMPERATUURNIVEAUS KOELING WKO TECHNIPLAN .....</b> | <b>90</b> |



## 1. Inleiding

De normeringen en eisen omtrent het energieverbruik van gebouwen zijn de laatste jaren regelmatig aangescherpt<sup>1</sup>. Vanuit een nationaal en Europees<sup>2</sup> beleid zullen gebouwen binnen een paar jaar zelfs geheel energieneutraal moeten zijn. Deze veranderingen in beleid hebben gezorgd voor een toename in de toepassing van duurzame klimaatinstallaties, een vereenvoudiging van het gebruik van deze duurzame klimaatinstallaties wordt in de nabije toekomst verwacht<sup>3</sup>.

Een veelgebruikte methode om klimaatinstallaties duurzamer te maken is door de duurzame opwekking van warmte en koude. Warmte-koudeopslag (wko)<sup>4</sup> is hier een voorbeeld van. Bij wko wordt warmte en koude actief in grondwaterbronnen opgeslagen en teruggewonnen<sup>5</sup>. Hierbij wordt het koude water direct gebruikt om te koelen, de warmte wordt gebruikt om energie aan een warmtepomp te leveren, die vervolgens het gebouw van warmte voorziet.

Een wko kan warmte en koude op verschillende temperatuurniveaus leveren, waarbij het opwekkingsrendement per temperatuurniveau verschilt. Deze temperatuurniveaus hebben ook invloed op de grootte van de koel- en verwarmingsbatterij in de luchtbehandelingskast (LBK).

Voor de wko geldt dat het opwekkingsrendement stijgt, als het temperatuurtraject van het water in de koel- of verwarmingsbatterij dichterbij het temperatuurniveau van de lucht in de LBK komt. Dit kleinere temperatuurverschil tussen de lucht in de LBK en het koel- of verwarmingswater leidt echter tot een slechtere warmteoverdracht. Om hetzelfde koel- of verwarmingsvermogen aan de lucht te kunnen leveren moeten de batterijen groter worden. Deze grotere batterijen zorgen voor een groter luchtzijdig drukverlies in de LBK en leiden daarbij tot een groter benodigd vermogen en een hoger verbruik van de ventilatoren.

Tot dusver is het niet bekend bij welke temperatuurtrajecten van de koel- en verwarmingsbatterijen, de opsomming van het verbruik van de opwekking en de ventilatoren het laagst is. Afhankelijk van de temperatuurtrajecten in de batterijen is er een optimum te vinden om het energieverbruik van de gehele klimaatinstallatie zo laag mogelijk te krijgen.

Het doel van het onderzoek is om inzicht te bieden in de effecten, van temperatuurtrajecten in de batterijen, op het energieverbruik van de klimaatinstallatie. Om hier inzicht in te kunnen bieden zullen de optimale temperatuurtrajecten in de koel en verwarmingsbatterijen worden gezocht

---

<sup>1</sup> (VLA, 2015)

<sup>2</sup> Zie bijvoorbeeld de ErP verordening 1253/2014 (De Europese Commissie, 2014)

<sup>3</sup> (Taskforce WKO, 2009)

<sup>4</sup> Warmte-koudeopslag dient zonder streepje tussen *koude* en *opslag* geschreven te worden. De afkorting van *warmte-koudeopslag* is *wko*, in kleine letters en zonder punten. (Genootschap Onze Taal, 2011)

<sup>5</sup> (Taskforce WKO, 2009)



waarbij het energieverbruik van de klimaatinstallatie zo laag mogelijk is. Hierbij ligt de focus op klimaatinstallaties waarbij de warmte en koude wordt opgewekt door wko, en deze door middel van batterijen aan de lucht in de LBK worden afgegeven. Om de optimale temperatuurtrajecten te vinden zal er in dit onderzoek antwoord worden gegeven op de vraag:

- *Bij welke temperatuurtrajecten voor warmte- en koelbatterijen is het energieverbruik van een klimaatinstallatie van een gebouw het laagst?*

De volgende deelvragen zijn afgeleid van de hoofdvraag, om deze te kunnen beantwoorden:

1. *Welke componenten bevat de klimaatinstallatie van een gebouw?*
2. *Hoe kan het energieverbruik van een klimaatinstallatie worden berekend?*
3. *Hoe verhouden de energieverbruiken van verschillende componenten zich tot elkaar?*
4. *Welke temperatuurniveaus kan een wko leveren en welke temperatuurtrajecten kunnen hier van worden afgeleid?*
5. *Is de meest energiezuinige optie ook de economisch meest voordelige optie?*

De deelvragen zullen dienen als leidraad voor de opbouw van dit onderzoek. Om de eerste deelvraag te kunnen beantwoorden zal de term *klimaatinstallatie* verder afgebakend moeten worden. In hoofdstuk 2 is daarom omschreven welke componenten er binnen een klimaatinstallatie vallen, hoe deze werken en welke invloed de verschillende componenten op elkaar hebben. Warmte-koudeopslag is een component van de klimaatinstallatie en is daarom ook in hoofdstuk 2 toegelicht. Hier zal ook het bereik van de wko worden gegeven.

Om de tweede deelvraag te kunnen beantwoorden moet er eerst in beeld zijn welke energievragers onder een klimaatinstallatie vallen. Aan het begin van hoofdstuk 3 is daarom een overzicht van de energievragers uit de eerder gedefinieerde klimaatinstallatie opgenomen. Per energievragers zijn berekeningen opgesteld waarmee de grootte of het vermogen van de relevante energievragers bepaald kan worden. Vervolgens zijn er formules voor het energieverbruik per energievragers opgesteld en toegelicht.

Om het energieverbruik bij verschillende temperatuurtrajecten en van verschillende componenten te vergelijken, moet het aantal variabelen geminimaliseerd worden. Om dit te bereiken is er bij dit onderzoek voor de berekeningen gebruik gemaakt van een casus op basis van een bestaand gebouw. Hierbij zijn de energievraag en klimaateisen als constant aangenomen. De klimaatinstallatie zal variëren als gevolg van verschillende temperatuurtrajecten in de batterijen. In hoofdstuk 4 is de gebruikte casus toegelicht.

Voor de beantwoording van de vierde deelvraag valt het bereik van de wko onder hoofdstuk 2. In hoofdstuk 5 zal worden toegelicht welke temperatuurtrajecten voor de batterijen zullen worden doorgerekend. De daadwerkelijke berekeningen zijn in de bijlagen opgenomen. De resultaten van de energetische berekeningen zijn gegeven in hoofdstuk 6. Om antwoord te geven op de vijfde deelvraag zal er in hoofdstuk 7 gekeken worden naar het financiële aspect van de toepassing van verschillende temperatuurtrajecten.



## 2. Klimaatinstallaties en componenten

Om de term *klimaatinstallatie* te kunnen afbakenen is het belangrijk om hier een duidelijke definitie van vast te stellen. In de dikke van Dale wordt er geen definitie gegeven, de Oxford Dictionary vermeldt dat een klimaatinstallatie<sup>6</sup> *“Een systeem is dat een gebouw kan verwarmen of koelen, of ervoor zorgt dat er verse lucht wordt verplaatst.”*

In de vakliteratuur is er meer te vinden over wat klimaatinstallaties zijn en wat voor doel zij hebben. (Grimm & Rosaler, 1990) stellen dat klimaatinstallaties ontworpen zijn om controle te bieden over de temperatuur, luchtvochtigheid, luchtvervuiling, luchtdruk, luchtverplaatsing en geluidsniveau van een ruimte. (Schalkoort, 2009) verwoordt het doel van klimaatinstallaties als “het ondersteunen van de gebouwfuncties.” Specifieker stelt hij dat klimaatinstallaties zorgen voor een binnenklimaat dat voldoet aan de gestelde comfort- en gebruikseisen van een specifieke gebouwfunctie.

Uit alle bovenstaande verklaringen kan de volgende definitie van een klimaatinstallatie gesteld worden: *Klimaatinstallaties zijn alle componenten die controle bieden over het binnenklimaat van een gebouw.*

Dit onderzoek focust zich op klimaatinstallaties waarbij er gebruik wordt gemaakt van een luchtbehandelingskast (LBK), waarbij er voor de opwekking van warmte en koude een wko wordt gebruikt. Het kader van dit onderzoek zal rond deze twee installaties liggen.

In dit hoofdstuk zal eerst de werking van wko worden toegelicht. Hierbij zullen de bijbehorende componenten benoemd worden en zijn er mogelijke variaties in temperatuurniveaus voor warmte- en koudelevering gegeven. Vervolgens zal in 2.2 de LBK en de componenten waaruit deze is opgebouwd worden toegelicht. Van deze componenten zal er zal extra toelichting gegeven worden op de batterijen.

Binnen het kader van dit onderzoek zullen naast de twee hoofdinstallaties ook de circulatiepomp en overige afgiftesystemen voor koude of warmte in het gebouw worden meegenomen. De circulatiepomp zal worden toegelicht bij de wko-componenten. De overige afgiftesystemen zullen kort worden toegelicht in 2.3.

---

<sup>6</sup> In het Engels vaak gerefereerd naar als HVAC, dit staat voor Heating Ventilation and Air Conditioning.



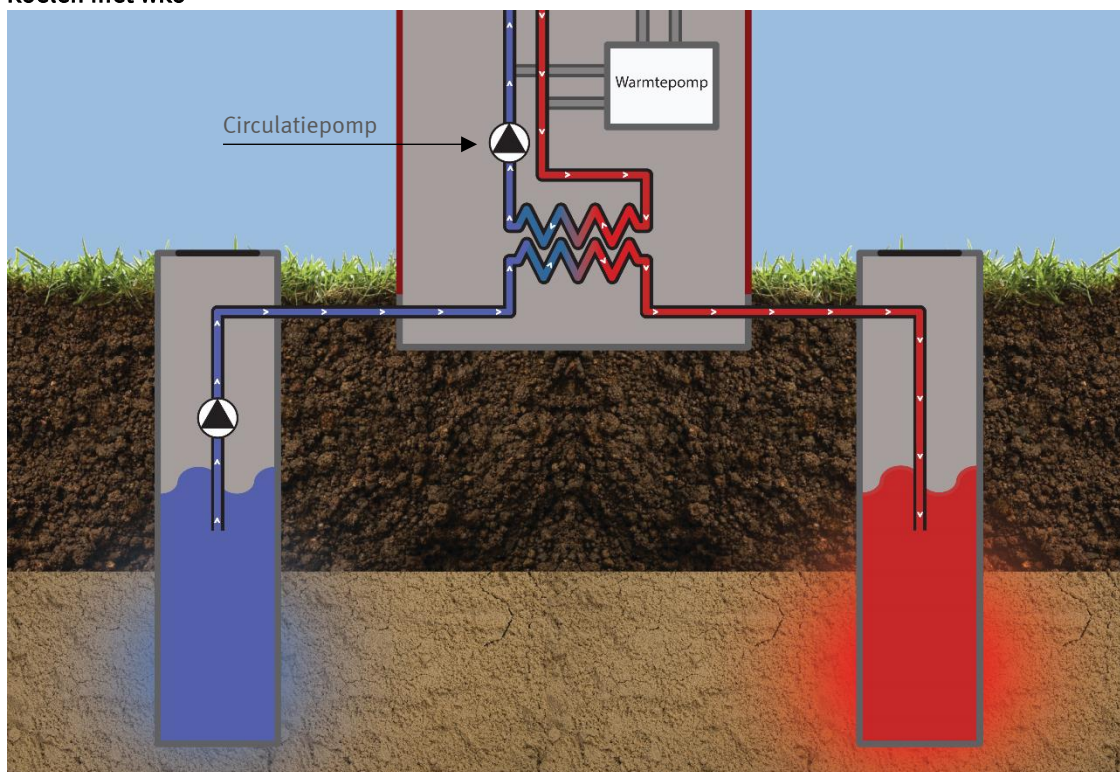
## 2.1. Warmte- koudeopslag

Om in een gebouw de gewenste binnentemperaturen te bereiken moet er 's winters een toevoer van warmte zijn en 's zomers een toevoer van koude. Wanneer warmte-koudeopslag (wko) is toegepast kan een gebouw in de koude- als warmtebehoefte worden voorzien.

Het principe van wko is dat er grondwater in dieperliggende grondlagen (circa 30 tot 150 meter onder het maaiveld (Wennekes, 2010)) wordt gebruikt als buffer om warmte en koude op te slaan. Er worden bij wko's twee bronnen aangelegd in een waterhoudende grondlaag, ook wel een aquifer genoemd. Hierbij is er één voor warmteopslag en één voor koudeopslag. Deze twee bronnen moeten niet te dicht bij elkaar liggen om thermische kortsluiting te voorkomen.

Bij de werking van wko is er een duidelijk onderscheid te maken tussen het verwarmingsproces en koelproces. De werkingen van beide situaties zijn hieronder uitgewerkt.

### Koelen met wko



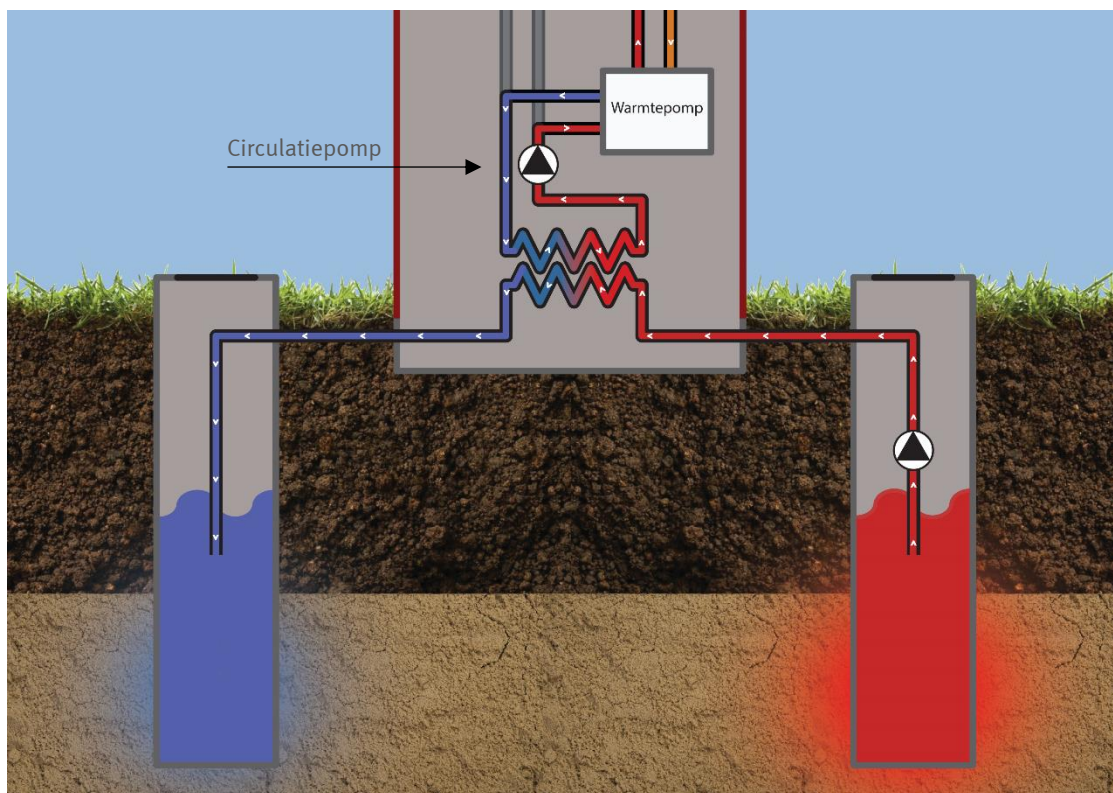
*Figuur 1 - Koelen met wko*

In de zomermaanden zal er veelal gekoeld worden met behulp van wko. Dit proces is schematisch getekend in Figuur 1. Grondwater wordt opgepompt uit de koudebron naar een (tegenstroom) platenwisselaar, waar de koude wordt overgedragen naar een intern watersysteem. Het afgekoelde water in het interne systeem wordt direct gebruikt om het gebouw te koelen. Dit wordt passieve koeling genoemd.



Het water in het interne systeem warmt op in het gebouw, deze warmte wordt later weer afgestaan aan het grondwater in de platenwarmtewisselaar. Het opgewarmde grondwater wordt in de warmtebron gepompt, waar het zal worden opgeslagen voor de winter. Er is voor regulier gebruik geen verdere opwekking van koude nodig. Mocht er een pieklast zijn zou de warmtepomp kunnen worden ingezet als koelmachine.

### Verwarmen met wko



*Figuur 2 - Verwarmen met wko*

De situatie in de wintermaanden ligt complexer. Aan de kant van het grondwater zal het proces omgekeerd zijn ten opzichte van de zomersituatie: het water zal nu uit de warme bron gepompt worden. De warmte wordt op een intern watersysteem overgebracht door de platenwarmtewisselaar, echter zal deze warmte niet hoog genoeg zijn om het gebouw op te warmen.

Een warmtepomp zal de warmte in het interne watersysteem gebruiken om een tweede intern watersysteem op te warmen. Deze zal de warmte aan het afgiftesysteem afgeven om het gebouw te verwarmen. Tegelijkertijd koelt de warmtepomp het water uit het eerste interne systeem af. Deze koude wordt vervolgens afgegeven aan het grondwater, waar het wordt opgeslagen in de koudebron.

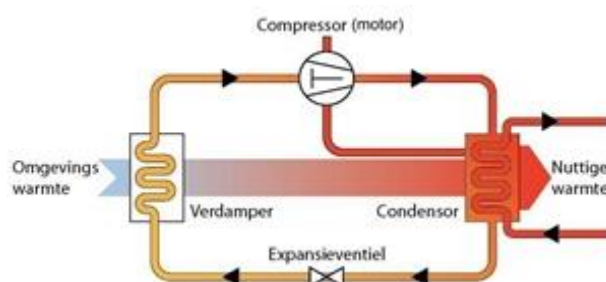


### 2.1.1. Wko componenten

Onder de term *wko* wordt vaak meer gerekend dan slechts het opslaan van de warmte en de koude. De warmtepomp, platenwisselaar en pompen worden veelal onder deze term geschaard; m technisch gezien werken deze mèt de wko. Deze componenten zullen in deze paragraaf kort toegelicht worden. Omdat in dit onderzoek de wko als constante wordt gezien (afgezien van de opwekkingsrendementen) is de exacte werking van deze onderdelen niet van belang, er zal hier niet diep op in worden gegaan.

#### **Warmtepomp**

Een warmtepomp is een machine die door middel van arbeid energie uit een bron met een lage temperatuur onttrekt en deze samen met de toegevoerde arbeidsenergie overdraagt aan een systeem met een hogere temperatuur. In Figuur 3 is de werking van een warmtepomp schematisch weergegeven.



*Figuur 3 - Werking warmtepomp (Wennekes, 2010)*

#### **Platenwarmtewisselaar**

De platenwarmtewisselaar zorgt bij een wko voor de overdracht van warmte of koude van het “vuile” grondwater naar het “schone” water in de interne watersysteem zonder dat het schone water vervuild wordt<sup>7</sup>. De platenwarmtewisselaar maakt gebruik van tegenstroomwarmtewisseling voor een efficiëntere warmteoverdracht.

#### **Circulatiepompen**

De circulatiepomp zorgt dat het water in het gebouw tussen de platenwarmtewisselaar en de afgiftesystemen wordt rondgepompt. Er zijn twee circulatiepompen bij wko. De eerste circulatiepomp is voor het pompen van warm water tussen de warmtepomp en warmtebatterij. De tweede circulatiepomp pompt gekoeld water tussen de platenwarmtewisselaar en de koelbatterij. Deze pomp wordt ook gebruikt tijdens het verwarmen, dan wordt er een klep omgezet en zal deze warm water van de platenwarmtewisselaar naar de warmtepomp pompen. In de berekeningen is hier rekening mee gehouden.

---

<sup>7</sup> (TVVL, 2015)



### 2.1.2. Bereik warmte-koudeopslag

Wko-installaties maken gebruik van twee bronnen, een warme bron en een koude bron. Wettelijk gezien moet het vermogen van deze twee bronnen gelijk zijn om energiebalans in de bodem te behouden<sup>8</sup>. Bij gelijke grootte van koude en warmtebronnen betekent dit dat de brontemperaturen voor beide bronnen evenveel moeten afwijken van de natuurlijke grondwatertemperatuur. De natuurlijke grondwatertemperatuur in Nederland is afhankelijk van de diepte van de bronnen. (BodemenergieNL, 2016) stelt dat deze bronnen tussen de 30 en 150 meter onder het maaiveld liggen. (Wennekes, 2010) geeft aan dat de natuurlijke grondwatertemperatuur tussen de 50 en 150 meter 11°C á 12 °C is.

#### **Temperatuurniveau koude**

Het water dat in de koude bron wordt geladen mag om bevrozing te voorkomen geen lagere temperatuur hebben dan 6°C. De koude wordt 's zomers geleverd als restproduct van de warmtepomp, zoals weergegeven in Figuur 2. Als de uitvoertemperatuur van de warmtepomp lager zou liggen dan 6°C, zal het circuliatiemedium in de verdamper van de warmtepomp bevriezen. (Wennekes, 2010)

In de praktijk ligt de temperatuur van de koudebron ongeveer 3 a 4°C onder de natuurlijke grondwatertemperatuur. Doordat het water circa een half jaar onder de grond wordt opgeslagen is en het weer omhoog gepompt moet worden, zal het de uitvoertemperatuur van het koude water circa 9 a 10°C zijn<sup>9</sup>. Bij veel koelbatterijen wordt dit als toevoertemperatuur genomen.

Er is ook een ontwikkeling waarbij koelbatterijen worden gedimensioneerd op een toevoertemperatuur van 12°C. In de zomer zal de hoeveelheid water in de koudebron steeds verder afnemen, bij een bovengemiddelde vraag zal de bron zelfs uitgeput kunnen raken. In dat geval zal er een koelmachine moeten worden ingezet die met veel een lagere efficiëntie koelt. Dit kan voorkomen worden door de koelbatterijen te dimensioneren op het natuurlijke temperatuurniveau van het grondwater, zodat er altijd voldoende koelwater aanwezig is.

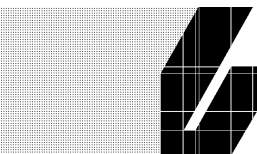
#### **Temperatuurniveau warmte**

In de warmtebron wordt om de energiebalans in de grond te bewaren warmte opgeslagen op 4 graden boven de natuurlijke grondwatertemperatuur. De intredetemperatuur van de warmtebatterijen wordt echter bepaald door de warmtepomp. De meeste warmtepompen kunnen water produceren tot circa 55°C (Gerritsen & Rodenburg-Vlot, 2010). De uitvoertemperatuur van een warmtepomp is afhankelijk van het gekozen temperatuurtraject van de warmtebatterij. De NEN 7120 geeft 30°C als de minimale uitvoertemperatuur voor de warmtepomp.

---

<sup>8</sup> (Verplak, 2010)

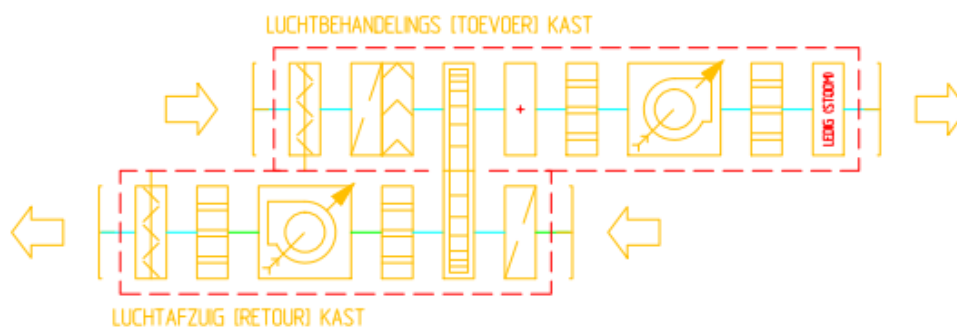
<sup>9</sup> (Verplak, 2010) De exacte verliezen echter zijn lastig te berekenen, in de praktijk blijkt dat er voor koelbatterijen met een minimale toevoertemperatuur van koelwater wordt gerekend van 10°C.



## 2.2. Luchtbehandelingskasten

Centraal in een klimaatinstallatie staat de luchtbehandelingskast (LBK). LBK's zijn installaties die centraal zorgen voor onder meer de toevoer, afvoer, koeling, verwarming, filtering en ont- en bevochtiging en van de lucht binnen een gebouw.

Ter illustratie is in Figuur 4 een voorbeeld van een typische lay-out van een LBK weergegeven. Het betreft hier een dubbele LBK, met een toevoer- en een retourkast. Dit duidt op mechanisch gebalanceerde ventilatie, dat betekend lucht in het gebouw mechanisch wordt toegevoerd en afgevoerd in gelijke hoeveelheden.



Figuur 4 - LBK met warmtewiel, toevoer- en retourkast

LBK's hebben een modulaire opbouw, waarbij een breed scala aan componenten beschikbaar is. Dit zorgt ervoor dat er voor bijna elk binnenklimaat een geschikte LBK ontworpen kan worden. De meest gebruikte<sup>10</sup> componenten in een LBK zijn omschreven in Tabel 1. Een ordegrootte van het luchtzijdige drukverlies en de schematische symbolen staan ook in deze tabel weergegeven.

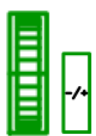
Tabel 1 - Componenten LBK

| Onderdeel     | Functie                                                                                                   | Ordegrootte<br>drukverlies <sup>11</sup><br>[Pa] | Symbool |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------|
| Kleppensectie | Kleppensecties dienen voor het onderbreken of regelen van een luchtstroom.                                | 20                                               |         |
| Filter        | Filters ontdoen de lucht van stof en andere vervuilingen, zodat de luchtkwaliteit kan worden gewaarborgd. | 150                                              |         |

<sup>10</sup> (Schalkoort, 2009)

<sup>11</sup> Bron: Holland Heating



|                     |                                                                                                                                                                                                                            |        |                                                                                       |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Druppelvanger       | De druppelvanger zorgt ervoor dat condensdruppels afkomstig uit de koeler of van buiten niet op ongewenste plekken kunnen komen, zoals de ventilatoren of de luchtkanalen.                                                 | 15     |    |
| Warmte-terugwinning | Warmteterugwinning wordt toegepast om warmte en vocht van het retoursysteem terug te winnen zodat er minder energie nodig is in het toevoersysteem. Ter illustratie zijn hier een warmtewiel en een twin-coil weergegeven. | 200    |    |
| Ventilator          | De ventilator zorgt voor de toevoer en afvoer van de lucht. Veelal zijn deze vraaggestuurd.                                                                                                                                | n.v.t. |    |
| Verwarmingsbatterij | De verwarmingsbatterij warmt de lucht op tot de gewenste inlaattemperatuur.                                                                                                                                                | 50     |  |
| Koelbatterij        | De koelbatterij koelt de lucht tot de gewenste inlaattemperatuur                                                                                                                                                           | 250    |  |
| Bevochtiger         | De bevochtiger bevochtigt de ingaande lucht tot de gevraagde relatieve vochtigheid.                                                                                                                                        | 15     |  |
| Geluidsdemper       | De geluidsdemper wordt toegepast om de geluidsoverlast binnen en buiten het gebouw te beperken. De geluidsdemper wordt gebruikelijk achteraan de toevoer- en retourkast geplaatst.                                         | 35     |  |

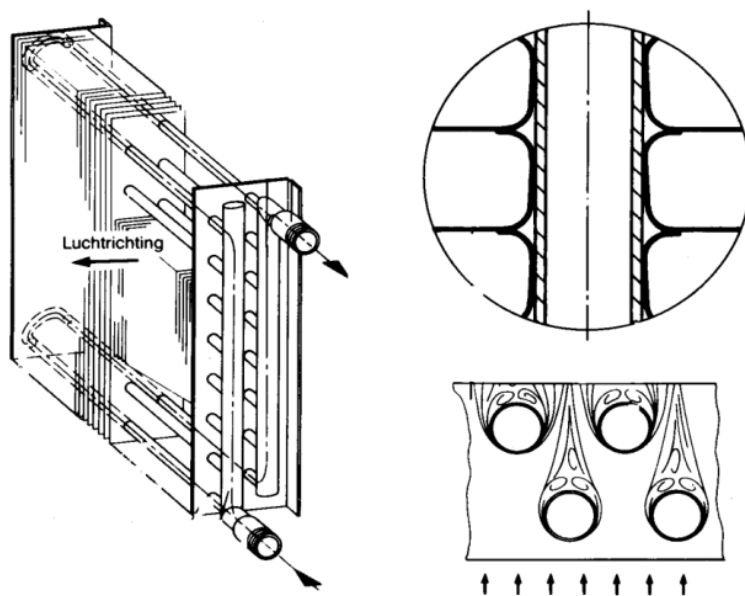
Van de componenten in de LBK zal er in dit onderzoek extra aandacht worden besteed aan de onderdelen die direct worden beïnvloed door de veranderingen in temperatuurniveau in de wko. In de LBK zijn koel- en verwarmingsbatterijen.

#### 2.2.1. Koel- en verwarmingsbatterijen

Koel- of verwarmingsbatterijen zijn de componenten die gebruikt worden om de opgewekte warmte of koude af te geven aan de lucht in de LBK. Normaliter worden er voor LBK's batterijen gebruikt waarin de warmte wordt afgegeven door meerdere rijen koperen buizen met aluminium lamellen. In Figuur 5 is te zien hoe een gebruikelijke batterij is opgebouwd<sup>12</sup>. Hier is op de links de lucht en waterstroom te zien, rechtsboven is de doorsnede van een buis met lamellen te zien en rechtsonder is de luchtstroom om de buizen te zien.

---

<sup>12</sup> (TVVL, 2015)



*Figuur 5 - Voorbeeld warmtebatterij (bron: (TVVL, 2015))*

De lamellen zijn toegevoegd om een groter warmtewisselingsoppervlakte te creëren. Bij batterijen wordt er gebruik gemaakt van het tegenstroomwarmtewisselaarprincipe, omdat deze minder oppervlakte nodig hebben voor warmteuitwisseling dan gelijkstroomwarmtewisselaars<sup>13</sup>. Voor een batterij geldt het principe dat de warmtestroom voor lucht gelijk staat aan de warmtestroom van water<sup>14</sup>.

### 2.3. Overige afgiftesystemen

Naast de batterijen in de LBK zijn er ook andere afgiftesystemen voor warmte en koude binnen een gebouw. Denk hier aan bijvoorbeeld radiatoren, fancoil-systemen of klimaatplafonds. Deze zijn ook aangesloten op de wko en worden veelal samen met de LBK gebruikt om het gebouw te verwarmen en te koelen.

Deze afgiftesystemen vallen onder klimaatinstallaties, maar er zal vanwege de beperkte tijd geen verdiepend onderzoek worden gedaan naar de verschillende type systemen. Om het meest geschikte afgiftesysteem per temperatuurtraject te vinden zou er een uitgebreid LCC-onderzoek uitgevoerd moeten worden.

Voor dit onderzoek wordt wel aangenomen dat het verbruik van de overige afgiftesystemen veranderd door het opwekkingsrendement, maar dat de grootte en het type niet worden beïnvloed.

---

<sup>13</sup> (Kreider, 2001)

<sup>14</sup> (Taal, 2011)

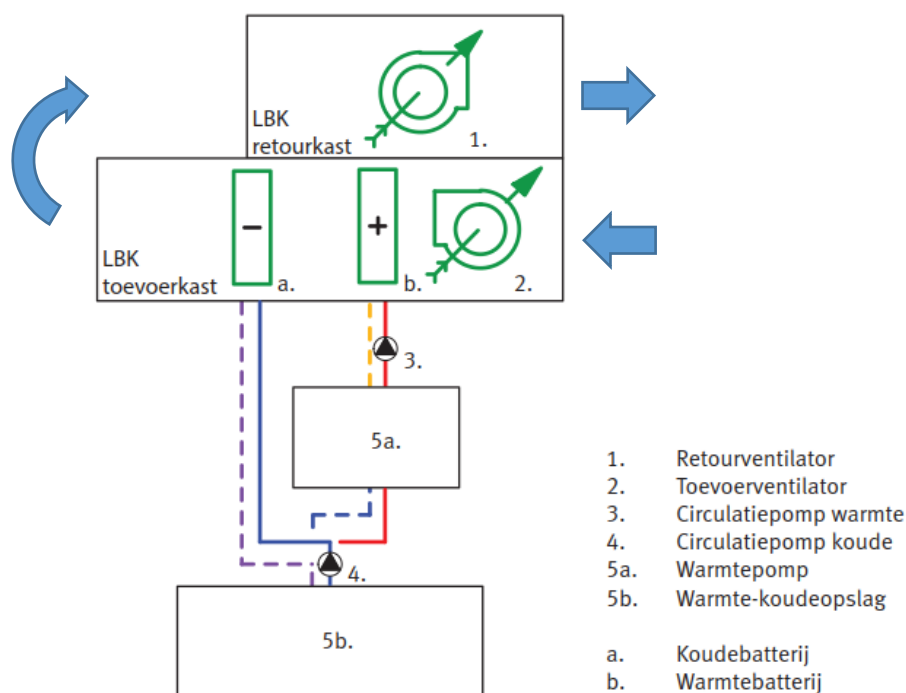


### 3. Formules klimaat en klimaatinstallaties

Om het energieverbruik van de klimaatinstallatie van een gebouw te berekenen is het belangrijk om correcte formules opgesteld te hebben voor het klimaat en de componenten van de klimaatinstallaties. Daarvoor moet eerst in beeld zijn welke energievragers er binnen de klimaatinstallatie vallen. In dit hoofdstuk zal eerst een overzicht worden gegeven van alle energievragers binnen een gebouw, vervolgens zijn er formules opgesteld waarmee uiteindelijk het totale energieverbruik van de gedefinieerde klimaatinstallatie berekend kan worden.

#### 3.1. Overzicht energievragers

In het klimaatsysteem zijn er een vijftal energievragers, de toevoer- en retourventilator, de circulatiepompen voor gekoeld- en verwarmingswater en de wko-installatie met de bijbehorende warmtepomp. De energievragers staan samen met de batterijen schematisch weergegeven in Figuur 6. De warmte-koudeopslag en de warmtepomp worden als 1 energievrager gezien. De luchtstromen zijn met blauwe pijlen aangegeven.



Figuur 6 - Energievragers klimaatinstallatie



### 3.2. Methode berekeningen

Voor dit onderzoek zal het totale energieverbruik van de gedefinieerde klimaatinstallatie uit 3.1 van een gebouw worden doorgerekend. Omdat er verbruiken van verschillende energievragers berekend moeten worden, is het belangrijk dat de methoden waarmee de verbruiken berekend worden op elkaar zijn afgestemd.

Energieverbruik is in essentie het gevraagde vermogen van een component vermenigvuldigd met de tijd dat dit vermogen gevraagd wordt ( $E = P * t$ ). Met het berekenen van het energieverbruik van klimaatinstallaties ligt dit lastiger. De gevraagde vermogens en aan-tijden zijn vaak vraaggestuurd, of afhankelijk van bijvoorbeeld de bezettingsgraad, buitentemperaturen en openingstijden. Deze factoren zullen op elkaar afgestemd moeten zijn.

Om ervoor te zorgen dat alle berekeningen omtrent energieverbruik op elkaar zijn afgestemd, is er gekozen om de berekeningen te baseren op de rekenmethode uit de NEN 7120. De NEN 7120 is een norm die normaliter gebruikt wordt om de Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC) te bepalen. De EPC geeft de mate van energiezuinigheid van gebouwen aan.

Om deze mate van energiezuinigheid te bepalen biedt de norm een methode aan waarin het energieverbruik van de warmte, koude, ventilatie<sup>15</sup> en hulpenergie (lees: circulatiepompen) kan worden berekend. Omdat alle componenten genoemd in 3.1 in de berekeningen van de NEN 7120 behandeld worden en omdat de resultaten van deze berekeningen onderling te vergelijken zijn, is deze methode gekozen om het energieverbruik van de klimaatinstallatie van een gebouw te berekenen. Bij de rekenmethode van de verbruiken wordt er in de NEN 7120 wel vaak uitgegaan van forfaitaire waarden of berekeningen. Deze forfaitaire waarden zullen gevalideerd moeten worden en waar nodig zal de rekenmethode moeten worden aangevuld met formules uit vakliteratuur.

---

<sup>15</sup> Voor de ventilatie verwijst de NEN 7120 naar de NEN 8088-1.



### 3.3. Koude

Voor koude zal er in dit onderzoek eerst het koelvermogen worden berekend, waarna de methode wordt opgesteld voor het berekenen van het energieverbruik van koudeopwekking.

#### 3.3.1. Berekening koelvermogen

Het koelvermogen wordt berekend om de grootte van de batterij te bepalen. Deze grootte is gebaseerd op het maximaal benodigde koelvermogen. Het koelvermogen wordt berekend door de massaastroom van het lucht-waterdampmengsel te vermenigvuldigen met het enthalpieverschil van de specifieke instroomenthalpie en de gewenste specifieke enthalpie.

$$P_{koeling} = \Phi_m \cdot \Delta h \quad [kW] \quad (1)$$

Waarbij:

$$\begin{array}{lll} \Phi_m & = \text{Massaastroom} & [kg/s] \\ h & = \text{Specifieke enthalpie} & [kJ/kg] \end{array}$$

#### Berekening specifieke enthalpie

Bij koude- of warmte berekeningen binnen de klimaattechnologie wordt er gebruik gemaakt van enthalpieberekeningen. De specifieke enthalpie (vanaf nu gerefereerd als *enthalpie*) van een stof is de som van de inwendige energie en de vermenigvuldiging van de druk en het volume van de stof. De eenheid voor enthalpie is in  $[kJ/kg]$ . Toegepast binnen de klimaattechniek geldt er voor de enthalpie dat er sprake is van een lucht-waterdampmengsel. De enthalpie van een luchtwaterdampmengsel is de som van de enthalpie van droge lucht en de enthalpie van de aanwezige waterdamp.<sup>16</sup>

De enthalpie van droge lucht kan berekend worden door de soortelijke warmte bij constante druk te vermenigvuldigen met de temperatuur.

$$h_l = c_{pl} \cdot \theta \quad [kJ/kg] \quad (2)$$

De enthalpie van de waterdamp kan worden berekend door het aantal gram waterdamp per kilogram lucht ( $x$ ) te vermenigvuldigen met de verdampingswaarde van water ( $r$ ) en de enthalpie van de waterdamp.

$$h_w = x \cdot (r + c_{pw} \cdot \theta) \quad [kJ/kg] \quad (3)$$

De enthalpie van een lucht-waterdampmengsel is dus:

$$h = c_{pl} \cdot \theta + x \cdot (r + c_{pw} \cdot \theta) \quad [kJ/kg] \quad (4)$$

Waarbij:

---

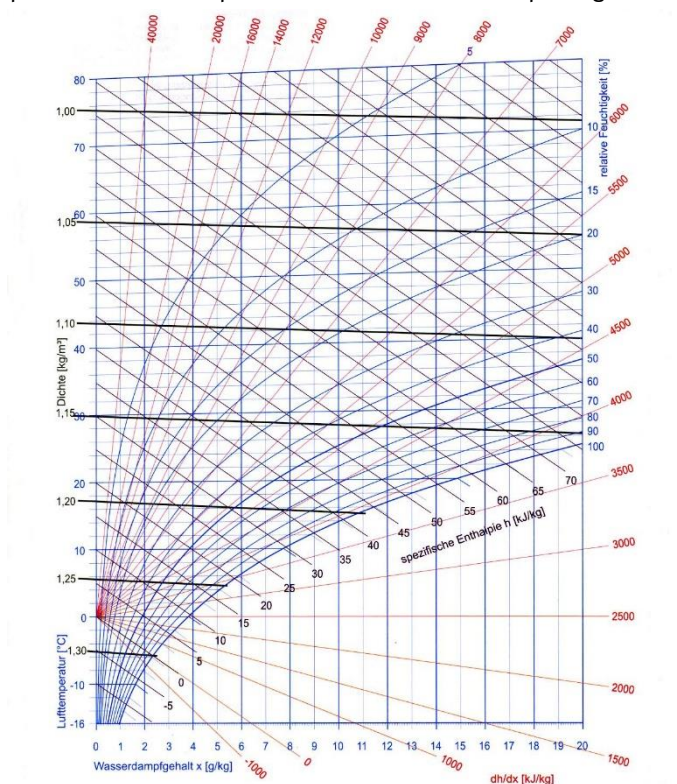
<sup>16</sup> (Knoll, Wagenaar, & Weele, 2002)



|          |                                |                 |
|----------|--------------------------------|-----------------|
| $c_{pl}$ | = Soortelijke warmte lucht,    | $[kJ/(kg * K)]$ |
| $r$      | = Verdampingswaarde water,     | $[kJ/kg]$       |
| $c_{pw}$ | = Soortelijke warmte waterdamp | $[kJ/(kg * K)]$ |
| $x$      | = g water per kg droge lucht   | $[g/kg]$        |

### Mollier diagram

Het Mollier  $h/x$  diagram is ontwikkeld door Richard Mollier om beter inzicht te krijgen in het berekenen van toestandsveranderingen van vochtige lucht. Het diagram is gebaseerd op de enthalpieformule<sup>17</sup>. Met het Mollier-diagram is het mogelijk om met de relatieve luchtvochtigheid en de luchttemperatuur de enthalpie van het lucht-waterdampmengsel te bepalen.



Figuur 7 – Mollier-diagram

Het Mollier-diagram is geldig bij:

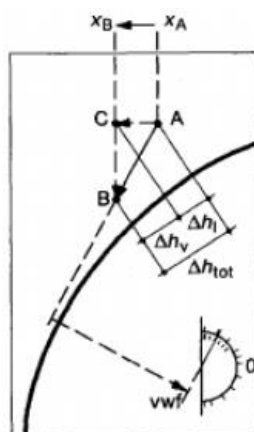
- 101.325 Pa
- -15 tot 40 °C
- 0 tot 0,020 kg water / kg droge lucht

<sup>17</sup> (Knoll, Wagenaar, & Weele, 2002)



### Latente en voelbare koeling

Bij een koelproces is er een verschil tussen latente en voelbare koeling (bij een verwarmingsproces latente en voelbare verwarming). Latente koeling wordt veroorzaakt door de condensatie van waterdamp, waarbij de temperatuur en druk constant zijn. Bij voelbare koeling blijft het vochtgehalte gelijk en neemt de enthalpie af door het dalen van de temperatuur.



Figuur 8 - Voelbare en latente koeling

$$\Delta h = \Delta h_{voel} + \Delta h_{lat} \quad [kW] \quad (5)$$

#### 3.3.2. Energieverbruik koudeopwekking

De jaarlijkse hoeveelheid energie om de koude op te wekken is berekend aan de hand hoofdstuk 17 van de NEN 7120.

De appendages gebruikt in deze norm zijn versimpeld om de leesbaarheid te vergroten. Ook zijn formules uit de NEN 7120 versimpeld of (deels) weggelaten indien deze irrelevant zijn voor dit onderzoek. Het totale energiegebruik voor de koeling kan worden berekend met formule (6).

$$E_{K,tot} = E_K + E_{K;hulp} \quad [MJ] \quad (6)$$

Waarbij:

$$E_K \quad = \text{De hoeveelheid energie voor koudeopwekking} \quad [MJ]$$

$$E_{K;hulp} \quad = \text{De hoeveelheid hulpenergie voor koeling} \quad [MJ]$$

Het betreft hier de niet-primaire energie, dit betekend dat het rendement van de opwekking van de elektriciteit niet is meegenomen. De niet-primaire energie is het absolute elektriciteitsverbruik.<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> Primaire energie wordt alleen berekend om energie afkomstig van verschillende bronnen te vergelijken, bijvoorbeeld gas en elektriciteit. Omdat er in dit onderzoek alleen elektriciteit wordt gebruikt zal dit niet meegenomen worden.



De hoeveelheid gebruikte energie voor de koudeopwekking kan worden berekend met formule (7).

$$E_K = \frac{Q_K \cdot F_{K;opw}}{\eta_{K;opw}} \quad [MJ] \quad (7)$$

Waarbij:

|                |                                                            |      |
|----------------|------------------------------------------------------------|------|
| $Q_K$          | = De jaarlijkse koudebehoefte                              | [MJ] |
| $F_{K;opw}$    | = De energiefractie voor koeling bij meerdere koelsystemen | [-]  |
| $\eta_{K;opw}$ | = Opwekkingsrendement toegepast koelsysteem                | [-]  |

De koudebehoefte van het gebouw  $Q_K$  zal niet worden berekend. Het is mogelijk om de exacte hoeveelheid energie nodig voor koeling te berekenen, echter valt het energieverbruik van een gebouw buiten het spectrum van dit onderzoek. Voor het bepalen van de energiebehoefte van de koeling zal voor dit onderzoek uitgegaan worden van de data uit de EPC-berekeningen uitgevoerd in de EPG-software "ENORM".

De waarde  $Q_K$  is een opsomming van de energievraag vanuit de luchtbehandelingskast en vanuit overige afgiftesystemen (zie 2.3). In de norm worden deze waarden apart berekend, echter worden ze weer bij elkaar opgeteld wanneer het energieverbruik van de opwekking wordt berekend. De verbruiken van de LBK en de overige afgiftesystemen zullen recht evenredig variëren vergeleken met het totale energieverbruik wanneer de opwekkingsrendementen worden gevarieerd. De waarden zullen dus niet apart bepaald worden.

### 3.3.3. Hulpenergie

De hoeveelheid hulpenergie voor koeling wordt berekend met formule (8). Dit is de hoeveelheid energie benodigd voor de circulatiepomp voor gekoeld water (tussen de platenwarmtewisselaar en koelbatterij voor koeling, tussen de platenwarmtewisselaar en de warmtepomp voor verwarming; zie Figuur 6).

$$E_{K;hulp} = f_K \cdot P_{K;circ} \cdot A_{rz} \cdot t_K \quad [MJ] \quad (8)$$

Waarbij:

|              |                                                          |                     |
|--------------|----------------------------------------------------------|---------------------|
| $f_K$        | = Factor bedrijfstijd en toerenregeling circulatiepompen | [-]                 |
| $P_{K;circ}$ | = Het vermogen van de circulatiepompen per $m^2$         | [W/m <sup>2</sup> ] |
| $A_{rz}$     | = De gebruiksoppervlakte van de rekenzone                | [m <sup>2</sup> ]   |
| $t_K$        | = De nominale aan-tijd van het koelsysteem               | [s]                 |



### 3.4. Warmte

#### 3.4.1. Verwarmingsvermogen

Met het verwarmen van de lucht wordt er geen vocht toegevoegd, waardoor de  $\Delta T$  zich recht evenredig verhoudt met de verandering in enthalpie, er is alleen sprake van voelbare verwarming (zie 3.3.1). Het verwarmingsvermogen kan worden berekend indien de massastroom en het benodigde verschil in specifieke enthalpie bekend zijn.

Het verwarmingsvermogen kan als volgt worden berekend:

$$P_{\text{verwarming}} = \Phi_m \cdot \Delta h \quad [kW] \quad (9)$$

Waarbij:

$$\Phi_m = \text{Massastroom} \quad [kg/s]$$

$$h = \text{Specifieke enthalpie} \quad [kJ/kg]$$

Met het verwarmingsvermogen kan de benodigde grootte van de verwarmingsbatterij worden bepaald.

#### 3.4.2. Energieverbruik warmteopwekking

De jaarlijkse hoeveelheid gebruikte energie voor de opwekking van warmte wordt berekend volgens hoofdstuk 14 van NEN 7120. De appendages gebruikt in deze norm zijn versimpeld om de leesbaarheid te vergroten. Ook zijn formules versimpeld of weggelaten indien deze irrelevant zijn voor dit onderzoek.

Het totale elektrische energiegebruik voor verwarming kan worden berekend met formule (10).

$$E_{w,tot} = E_W + E_{w;hulp} \quad [MJ] \quad (10)$$

Waarbij:

$$E_W = \text{De hoeveelheid energie voor warmteopwekking} \quad [MJ]$$

$$E_{w;hulp} = \text{De hoeveelheid hulpenergie voor verwarming} \quad [MJ]$$

De hoeveelheid energie voor warmteopwekking kan worden berekend met formule (11).

$$E_W = \frac{Q_W \cdot F_{W;opw}}{\eta_{W;opw}} \quad [MJ] \quad (11)$$

Waarbij:

$$Q_W = \text{De jaarlijkse warmtebehoefte van een gebouw} \quad [MJ]$$

$$F_{W;opw} = \text{Energiefractie ruimteverwarming bij meerdere opwekkers} \quad [-]$$

$$\eta_{W;opw} = \text{Opwekkingsrendement verwarmingssysteem} \quad [-]$$



De jaarlijkse warmtebehoefte van een gebouw  $Q_W$  zal niet worden berekend. Het is mogelijk om de exacte hoeveelheid energie nodig voor verwarming te berekenen, echter valt het energieverbruik van een gebouw buiten het spectrum van dit onderzoek. Voor het bepalen van de energiebehoefte van de koeling zal voor deze casus uitgegaan worden van de data uit de EPC-berekeningen uitgevoerd in de EPG-software "ENORM".

De waarde  $Q_W$  is een opsomming van de energievraag vanuit de luchtbehandelingskast en vanuit overige afgiftesystemen (zie 2.3). In de norm worden deze waarden apart berekend, echter worden ze weer bij elkaar opgeteld wanneer het energieverbruik van de opwekking wordt berekend. De verbruiken van de LBK en de overige afgiftesystemen zullen recht evenredig variëren vergeleken met het totale energieverbruik wanneer de opwekkingsrendementen worden gevarieerd. De waarden zullen dus niet apart bepaald worden.

### 3.4.3. Hulpenergie

De hoeveelheid gebruikte hulpenergie is de energie benodigd voor de circulatiepomp voor verwarmingswater (tussen de warmtepomp en de warmtebatterij; zie Figuur 6).

$$E_{W,hulp} = P_{W,hulp} \cdot t_{W,hulp} \quad [MJ] \quad (12)$$

Waarbij:

$$\begin{aligned} P_{W,hulp} &= \text{Het vermogen van de hoofd-circulatiepomp} & [W] \\ t_{W,hulp} &= \text{Rekenwaarde voor de totale aan-tijd} & [Ms] \end{aligned}$$

Het forfaitair vermogen van de circulatiepomp wordt berekend volgens formule (13).

$$P_{W,hulp} = P_{W,hulp;spec} \cdot A_g \quad [W] \quad (13)$$

Waarbij:

$$\begin{aligned} P_{W,hulp;spec} &= \text{Het specifieke vermogen van de circulatiepomp} & [W/m^2] \\ A_{rz} &= \text{Gebruiksoppervlakte rekenzones gebouw} & [m^2] \end{aligned}$$

De aan-tijd kan als volgt worden berekend:

$$t_{W,hulp} = t_{jr} \cdot f_{W,hulp} \quad [Ms] \quad (14)$$

Waarbij:

$$\begin{aligned} t_{jr} &= \text{Aantal seconden per jaar} & [Ms] \\ f_{W,hulp} &= \text{Weegfactor regelsysteem} & [-] \end{aligned}$$



### 3.5. Ventilatie

#### 3.5.1. Vermogen ventilator

Het asvermogen van de ventilator kan worden berekend met formule (15)<sup>19</sup>.

$$P_{as} = \frac{\Phi_v \cdot \Delta p}{\eta} \quad [W] \quad (15)$$

Waarbij:

|            |                        |                     |
|------------|------------------------|---------------------|
| $\Delta p$ | = Drukverlies          | [Pa]                |
| $\Phi_v$   | = Volumestroom         | [m <sup>3</sup> /s] |
| $\eta$     | = Rendement ventilator | [–]                 |

Het effectieve elektrisch vermogen kan worden berekend met formule (16).<sup>20</sup>

$$P_{eff} = 0,8 \cdot P_{nom} \quad [kW] \quad (16)$$

Waarbij:

|           |                                                              |      |
|-----------|--------------------------------------------------------------|------|
| 0,8       | = Reductiefactor voor overdimensionering van de elektromotor | [–]  |
| $P_{nom}$ | = Nominaal vermogen van elektromotor ventilator              | [kW] |

In de NEN 8088-1 wordt er hier ook gerekend met een reductiefactor voor de regeling van de ventilator, afhankelijk van het percentage terugregeling. Deze factor  $f_{reg}$  is een factor die wordt gebruikt om ventilatiecapaciteit te berekenen, echter is in dit onderzoek het debiet al bekend. Deze factor zal niet worden meegenomen. Het nominale ventilatorvermogen is:

$$P_{nom} = P_{as} / \eta_{elm} \quad [kW] \quad (17)$$

Waarbij:

|              |                                      |      |
|--------------|--------------------------------------|------|
| $P_{as}$     | = Het asvermogen van de elektromotor | [kW] |
| $\eta_{elm}$ | = Rendement elektromotor             | [–]  |

#### 3.5.2. Bepaling totaaldruk

Het drukverlies uit formule (15) is de opsomming van het interne statische drukverlies, het dynamische drukverlies en het externe statische drukverlies<sup>21</sup>. Omdat in (15) het asvermogen 1 op

---

<sup>19</sup> (J.Ouwehand, Papa, Post, & Taal, 2011)

<sup>20</sup> NEN 8088-1

<sup>21</sup> (TVVL, 2015)



1 afhankelijk is van de som van alle drukverliezen, is het mogelijk om per onderdeel in de LBK apart het specifieke benodigde ventilatorvermogen te berekenen.

De interne statische druk is het opgetelde drukverlies van verschillende componenten binnen de luchtbehandelingskast. In hoofdstuk 2.2 zijn voorbeelden van deze drukverliezen gegeven.

De dynamische druk is de kinetische energie die nodig is om de luchtstroom in stand te houden<sup>22</sup>. Omdat de dynamische druk kwadratisch toeneemt naarmate de lichtsnelheid toeneemt, is het meest rendabel voor LBK's om een zo laag mogelijke lichtsnelheid te hanteren.

Dynamische druk:

$$P_{dyn} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad [Pa] \quad (18)$$

De externe statische druk is de opsomming van het drukverlies van alle componenten buiten de LBK. Denk hier bijvoorbeeld aan luchtkanalen, bochten in luchtkanalen brandkleppen of roosters. Veelal is de totale te overwinnen druk weergegeven in de specificaties van de LBK.

### 3.5.3. Verbruik ventilatie

Het verbruik van de ventilatie is berekend met de methode uit de NEN 8088-1. Het elektrisch energieverbruik door ventilatoren per jaar is:

$$E_V = P_{eff} \cdot f_{T;bez} \cdot t_{jr} \quad [MJ] \quad (19)$$

Waarbij:

|             |                                                     |      |
|-------------|-----------------------------------------------------|------|
| $P_{eff}$   | = Effectief elektrisch vermogen van de ventilatoren | [kW] |
| $f_{T;bez}$ | = Dimensieloze correctiefactor voor bezettingstijd  | [–]  |
| $t_{jr}$    | = Tijd per jaar                                     | [Ms] |

#### **Bezettingstijd**

De bezettingstijd voor ventilatie wordt in dit onderzoek volgens de NEN 8088-1 berekend. De bezettingstijd wordt per ruimtelfunctie berekend. De correctiewaarde van de bezettingstijd zijn per gebruiksfunctie aangegeven in tabel 1 van de NEN 8088-1. Er wordt een gemiddelde berekend van de correctiewaarde van de gebruiksfuncties over de oppervlakte van het gebouw.

$$f_{T;bez} = \left( \sum_{functie\ i=1}^n A_{g;functie\ i} \cdot f_{T;functie\ i} \right) / A_{g;totaal} \quad [–] \quad (20)$$

Waarbij:

|     |                    |     |
|-----|--------------------|-----|
| $n$ | = Het aantal zones | [–] |
|-----|--------------------|-----|

---

<sup>22</sup> (VDL Klima, -)



|                    |                                                         |         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|---------|
| $A_{g;functie\ i}$ | = Oppervlakte voor gebruiksfunctie i.                   | $[m^2]$ |
| $f_{T;functie\ i}$ | = Correctiefactor voor de gebruiksfunctie i             | $[-]$   |
| $A_{g;totaal}$     | = Totale oppervlakte (som van alle $A_{g;functie\ i}$ ) | $[m^2]$ |

#### 3.5.4. Rekenmethode verbruik ventilatoren

De temperatuurtrajecten zullen invloed hebben op de grootte van de warmte- en koelbatterijen, waarmee deze invloed hebben op het vermogen en verbruik van de ventilatoren. Het berekenen van het vermogen van de ventilatoren is toegelicht in 3.5.1. Voor het uitrekenen van het verbruik zal een casus worden gebruikt, de bezettingstijd zal dus constant blijven.

Dit betekent dat het verbruik van de ventilatoren direct afhankelijk is van het vermogen van de ventilator. Dit vermogen is berekend door de som van alle drukverliezen op te tellen. Het is dus mogelijk om onderscheid te maken voor het benodigd ventilatievermogen per component. Dit maakt het mogelijk dat er per component het daarvoor relevante deel van het energieverbruik van de ventilator te berekenen.

#### 3.6. **Circulatiepomp**

Het benodigde pompvermogen van de circulatiepomp kan berekend worden met formule (21)<sup>23</sup>.

$$P_{circ} = \frac{p_{man} \cdot \Phi_V}{\eta} \quad [kW] \quad (21)$$

Waarbij:

|           |                               |           |
|-----------|-------------------------------|-----------|
| $p_{man}$ | = De manometrische opvoerdruk | $[Pa]$    |
| $\Phi_V$  | = De volumestroom             | $[m^3/s]$ |
| $\eta$    | = Pomprendement               | $[-]$     |

#### 3.7. **Opwekking**

##### 3.7.1. Prestaties wko

De prestaties van klimaatinstallaties worden weergegeven met opwekkingsrendementen; ook wel bekend als COP (Coefficient Of Performance). Het opwekkingsrendement is de verhouding van de afgegeven warmte ( $Q$ ) en vermogen benodigd om deze op te wekken ( $P$ ).

$$\eta_{opw} = \frac{Q}{P} \quad [-] \quad (22)$$

De opwekkingsrendementen van de opwekking zullen in dit verslag vanwege de beperkte hoeveelheid tijd niet worden berekend. Er zal voor de berekeningen uitgegaan worden van de opwekkingsrendementen gegeven in de NEN 7120. Er is hier onderscheid gemaakt tussen de

---

<sup>23</sup> (G. van der Linden, 1998)



warmte en koudelevering. De rendementen voor warmte- en koudeopwekking uit de NEN 7120 voor wko staan hieronder weergegeven. De complete tabel uit de NEN7120 staat in Bijlage D.

### Opwekkingsrendement warmte

Zoals besproken in 2.1.2 zijn er binnen een wko-installatie een reeks aan temperatuurniveaus mogelijk bij warmtelevering. Hiervoor zal bij het variëren van de intredetemperatuur van de batterijen het opwekkingsrendement van de warmtepomp veranderen. Naarmate de gevraagde temperatuur hoger wordt zal het rendement afnemen. De rendementen voor warmteopwekking door middel van wko zijn weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2 - Opwekkingsrendement van wko per temperatuurniveau (verwarming)<sup>24</sup>

| Bronnen            | Opwekkingsrendement $\eta_{W;opw}$      |                                             |                                             |                                             |                                             |                                             |
|--------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                    | Temperatuurniveaus van de warmtevragers |                                             |                                             |                                             |                                             |                                             |
|                    | $\theta_{sup} \leq 30^\circ C$          | $30^\circ C < \theta_{sup} \leq 35^\circ C$ | $35^\circ C < \theta_{sup} \leq 40^\circ C$ | $40^\circ C < \theta_{sup} \leq 45^\circ C$ | $45^\circ C < \theta_{sup} \leq 50^\circ C$ | $50^\circ C < \theta_{sup} \leq 55^\circ C$ |
| Grondwater/aquifer | 5,0                                     | 4,7                                         | 4,45                                        | 4,2                                         | 3,9                                         | 3,6                                         |

### Opwekkingsrendement koude

Het opwekkingsrendement is volgens de NEN 7120 niet variabel bij de koudeopwekking via een wko. De NEN 7120 geeft aan dat het opwekkingsrendement voor utiliteit altijd 12 is; er is hierin geen nuance in de aangeleverde temperatuur. De waarde voor  $Q_K$  (toegelicht in 3.3.2) zal dus niet veranderen bij het variëren van de temperatuurtrajecten. Het rendement voor koudeopwekking door middel van wko is weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 - Opwekkingsrendement van wko (koeling)<sup>25</sup>

| Koudeleverancier                                                                                                                 | $\eta_{K;opw}$                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Koudeopslag/ bodemkoeling (zonder inzet koelmachine) <ul style="list-style-type: none"><li>Voor utiliteit</li></ul>              | <ul style="list-style-type: none"><li>12</li></ul> |
| Het opwekkingsrendement betreft hier de verhouding tussen koudelevering en gebruik van elektrische hulpenergie voor de bronpomp. |                                                    |

<sup>24</sup> NEN 7120: 14.16

<sup>25</sup> NEN 7120: 17.6



### 3.7.2. Thermisch vermogen koudeopslag

Zoals in 3.7.1 is beschreven zal het verbruik van de opwekking van koude niet beïnvloed zijn door het temperatuurniveau. Aannemende dat in dit onderzoek de energievraag  $Q_K$  uit formule (7) constant blijft, zal het verbruik voor koeling ook constant blijven. Wel kan er bij de opwekking gevarieerd worden met factoren van het thermisch vermogen van de koudeopslag. De NEN 7120 geeft in 17.5.3.5 aan dat het thermisch vermogen van koudeopslag berekend kan worden met de volgende formule:

$$P_{K;opw} = c_w * \Delta T * \Phi_V \quad [kW] \quad (23)$$

Waarbij:

|            |                                                                |              |
|------------|----------------------------------------------------------------|--------------|
| $c_w$      | = Specifieke warmtecapaciteit water                            | $[kJ/m^3K]$  |
| $\Delta T$ | = Temperatuurverschil in- en uitvoertemperatuur afgiftesysteem | $[^\circ C]$ |
| $\Phi_V$   | = Volumestroom                                                 | $[m^3/s]$    |

Het vermogen van de koudeopslag ( $P_{K;opw}$ ) zelf zal niet veranderen, deze wordt geschaald op het benodigd koelvermogen. Hetgeen dat wel gevarieerd kan worden is de verhouding tussen  $\Delta T$  en  $\Phi_V$  van de bovenstaande formule. Het benodigde opwekkingsvermogen is als constant aangenomen, wat betekend dat de uitkomst van de vermenigvuldiging van deze twee factoren ook constant moet zijn.

De reden dat de verhouding  $\Delta T * \Phi_V$  zo interessant is, is omdat de grootte van de volumestroom direct effect heeft op het vermogen van de circulatiepomp<sup>26</sup>. Het vermogen van de circulatiepomp uit 3.3.3 is forfaitair berekend, echter wordt er hier geen rekening gehouden wanneer er met de verhouding  $\Delta T * \Phi_V$  wordt gevarieerd.

De grootte van het temperatuurverschil over de batterij zal bepalen hoe hoog het verbruik van de hulpenergie zal zijn. Formule (21) uit 3.6 wijst uit dat als de  $\Delta T$  groter en daarmee de  $\Phi_V$  kleiner wordt, de benodigde hoeveelheid hulpenergie lager zal zijn.

### 3.8. Koel en verwarmingsbatterijen

Om de grootte van een batterij te berekenen moet eerst de warmtestroom bekend zijn. De warmtestroom aan de waterzijde van de batterij is gelijk aan die van de luchtzijde<sup>27</sup>. De formule voor warmtestroom is:

$$\Phi_w = \Phi_m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [kW] \quad (24)$$

---

<sup>26</sup> Zie formule (21)

<sup>27</sup> Zie 2.2.1



Waarbij:

|            |                              |         |
|------------|------------------------------|---------|
| $\Phi_m$   | = Massastroom                | [kg/s]  |
| $c_p$      | = Soortelijke warmte         | [J/kgK] |
| $\Delta T$ | = Temperatuurstijging medium | [°C]    |

De warmtestroom van water kan gelijk gesteld worden aan de warmtestroom van de lucht.

$$\Phi_{m,l} \cdot c_{p,l} \cdot (T_{l,uit} - T_{l,in}) = \Phi_{m,w} \cdot c_{p,w} (T_{w,in} - T_{w,uit}) \quad [\text{kg/s}] \quad (25)$$

Als de warmtestroom bekend is kan het benodigde oppervlakte voor warmte-uitwisseling bij de batterij worden berekend (dit is de algemene formule voor een tegenstroomwarmtewisselaar).

$$A = \frac{\Phi_w}{U \cdot \Delta T_{gem}} \quad [m^2] \quad (26)$$

Waarbij:

|                  |                                              |                      |
|------------------|----------------------------------------------|----------------------|
| $U$              | = Warmtedoorgangscoefficiënt warmtewisselaar | [W/m <sup>2</sup> K] |
| $\Delta T_{gem}$ | = Het logaritmische temperatuurverschil      | [°C]                 |
| $\Phi_w$         | = Warmtestroom                               | [kW]                 |

Het logaritmische temperatuurverschil kan als volgt worden berekend:

$$\Delta T_{gem} = \Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \left( \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} \right)} \quad [^\circ\text{C}] \quad (27)$$

Waarbij:

|              |                                                                                                            |      |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| $\Delta T_a$ | = Het temperatuurverschil tussen het opwarmende en afkoelende fluïdum aan het begin van de warmtewisselaar | [°C] |
| $\Delta T_b$ | = Het temperatuurverschil tussen het opwarmende en afkoelende fluïdum aan het einde van de warmtewisselaar | [°C] |

De warmtedoorgangscoefficiënt  $U$  uit formule (26) is een variabele die van veel factoren afhankelijk is en per batterij sterk verschilt. Het is mogelijk om de  $U$  waarde te berekenen, deze waarde is onder meer afhankelijk van de stromingssnelheden van de lucht en van het water, de temperatuurverschillen tussen de lucht- en waterzijde van de batterij, en het gebruikte materiaal. De  $U$  waarde is echter ook sterk afhankelijk is van de geometrie van de batterij, waardoor de berekening hiervan zeer complex wordt. In de praktijk is de  $U$  waarde van batterijen experimenteel verkregen<sup>28</sup>. De benodigde oppervlakte van de batterijen zal niet berekend kunnen worden.

---

<sup>28</sup> (Knoll, Wagenaar, & Weele, 2002)



#### 4. **Omschrijving casus**

In dit onderzoek wordt er een casus gebruikt om de verschillen tussen varianten van klimaatinstallaties met elkaar te vergelijken. Het gebruiken van een casus heeft als bijkomend voordeel dat de in de casus toegepaste installatie kan dienen als validatie voor de berekende vermogens of verbruiken.

In dit hoofdstuk zullen eerst de eisen en wensen voor de casus worden opgesomd. Vervolgens wordt de casuskeuze toegelicht. De gekozen casus zal worden geanalyseerd, waarbij vooral focus ligt op de toegepaste klimaatinstallaties.

##### 4.1. **Eisen en wensen casus**

Het vinden van een bruikbare casus is van belang voor de totstandkoming van een betrouwbaar onderzoeksresultaat. Het doel van de casus is hierin het beperken van het aantal variabelen en om als validatie gebruikt te kunnen worden. De eisen aan het binnenklimaat van de gekozen casus zullen als uitgangspunt worden gebruikt voor het berekenen van het totale energieverbruik, waarbij verschillende situaties vergeleken zullen worden.

Eisen aan de casus zijn:

- Om voldoende data van het gebouw, de klimaatinstallaties en de klimaateisen te krijgen, zal er een casus gekozen worden waar TPA zelf advies geeft of gegeven heeft.
- Er moeten EPC-berekeningen gemaakt in EPG-software beschikbaar zijn om een uitgangspunt te hebben in het energieverbruik van de casus.
- In de klimaatinstallatie moet er gebruik gemaakt worden van mechanisch gebalanceerde luchtbehandeling, er moeten ventilatoren, koel- en warmtebatterijen aanwezig zijn.

Wensen aan de casus zijn:

- Het is wenselijk dat het klimaatsysteem van de casus niet te complex in elkaar zit. Voorkeur gaat uit naar een casus met 1 LBK waarbij niet te veel andere ventilatie-eenheden aanwezig zijn. Bij complexe systemen zijn er meer factoren om rekening mee te houden. Dit zou ervoor kunnen zorgen dat de resultaten van het onderzoek minder betrouwbaar kunnen zijn.

##### 4.2. **Casuskeuze**

Vanuit Techniplan zijn er twee casussen aangereikt die geschikt zijn voor dit onderzoek. De eerste mogelijke casus is die van het hoofdkantoor van Heerema in Leiden. Dit pand heeft een debiet van  $128.000\text{m}^3/\text{h}$  en maakt gebruik van een drietal LBK's. De tweede aangereikte casus is het nieuwe Plantronics kantoor in Hoofddorp. Dit pand heeft een debiet van  $23.000\text{m}^3/\text{h}$  en maakt gebruik van één LBK. De twee casussen zijn in Tabel 4 vergeleken<sup>29</sup>.

---

<sup>29</sup> Data afkomstig van interne gegevens TPA.



Tabel 4 - Vergelijking mogelijke casussen

| Aspect casus                      | Eenheid     | Heerema         | Plantronics              |
|-----------------------------------|-------------|-----------------|--------------------------|
| Debiet                            | [ $m^3/h$ ] | 128.000         | 23.000                   |
| Aantal LBK's                      | [–]         | 3               | 1                        |
| Type opwekking                    | [–]         | WKO-installatie | Gedeelde WKO-installatie |
| Bruto vloeroppervlakte            | [ $m^2$ ]   | 22800           | 3300                     |
| Verwarmingsvermogen               | [kW]        | 1056            | 265                      |
| Koelvermogen                      | [kW]        | 973             | 300                      |
| Temperatuurtraject warmtebatterij | [°C]        | 45 – 35         | 40 – 30                  |
| Temperatuurtraject koelbatterij   | [°C]        | 10 – 18         | 12 – 19                  |
| BREEAM-label <sup>30</sup>        | [–]         | Very Good       | Excellent                |
| Bouwjaar                          | [–]         | 2014            | 2016                     |

Beide casussen zijn vergelijkbaar qua type installaties. Het voornaamste verschil is het aantal LBK's en de grootte van de gebouwen en installaties. Daarnaast zijn er bij het gebouw van Plantronics strengere eisen gesteld wat betreft de duurzaamheid.

Omdat het onderzoek als aanleiding heeft dat de reglementen omtrent de duurzaamheid van gebouwen aangescherpt worden, ligt de voorkeur bij het gebouw van Plantronics. Daarnaast is het voor dit onderzoek wenselijk dat de casus niet te complex is. Bij de casus van Heerema zijn er 3 LBK's, dit zal ertoe leiden dat er van elk component in een LBK meerdere malen specifieke prestaties en waarden gezocht of berekend moeten worden. Ook bestaat er een kans dat het toepassen van 3 LBK's neveneffecten met zich meebrengt, wat voor minder nauwkeurigheid zou kunnen zorgen. Het Plantronics hoofdkantoor zal daarom als casus worden gebruikt.

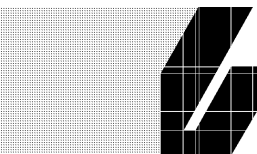
#### 4.3.

##### Analyse van het Plantronics hoofdkantoor

Op het ontwikkelingsgebied Park 20|20 is het nieuwbouwproject van het nieuwe Europese hoofdkantoor van Plantronics gerealiseerd. Het kantoorgebouw ligt aan de Scorpius te Hoofddorp en heeft een bruto vloeroppervlakte van circa 3.014  $m^2$  kantooroppervlak over drie bouwlagen. Ook is er een autostalling onder het pand van circa 2.100  $m^2$ . Het pand maakt gebruik van gedeelde wko-installatie aangelegd voor alle bebouwing op Park 20|20.

---

<sup>30</sup> De BREEAM-score is een certificaat dat aangeeft hoe duurzaam een gebouw is. De scores die behaald kunnen worden zijn oplopend in volgorde: Pass; Good; Very Good; Excellent; Outstanding.



*Figuur 9 - Het Europese hoofdkantoor van Plantronics (bron: Techniplan)*

#### 4.4. Analyse klimaatinstallatie

De eisen gesteld aan het binnenklimaat van dit pand zijn verkregen uit interne stukken van Techniplan. Er zal alleen naar de eisen van ventilatie, verwarming en koeling worden gekeken, de eisen aan bijvoorbeeld luchtfiltering of geluidseisen vallen buiten het spectrum van dit onderzoek. De eisen aan de klimaatinstallatie van het Plantronics gebouw staan in Tabel 5.

*Tabel 5 - Eisen klimaatinstallatie casus Plantronics*

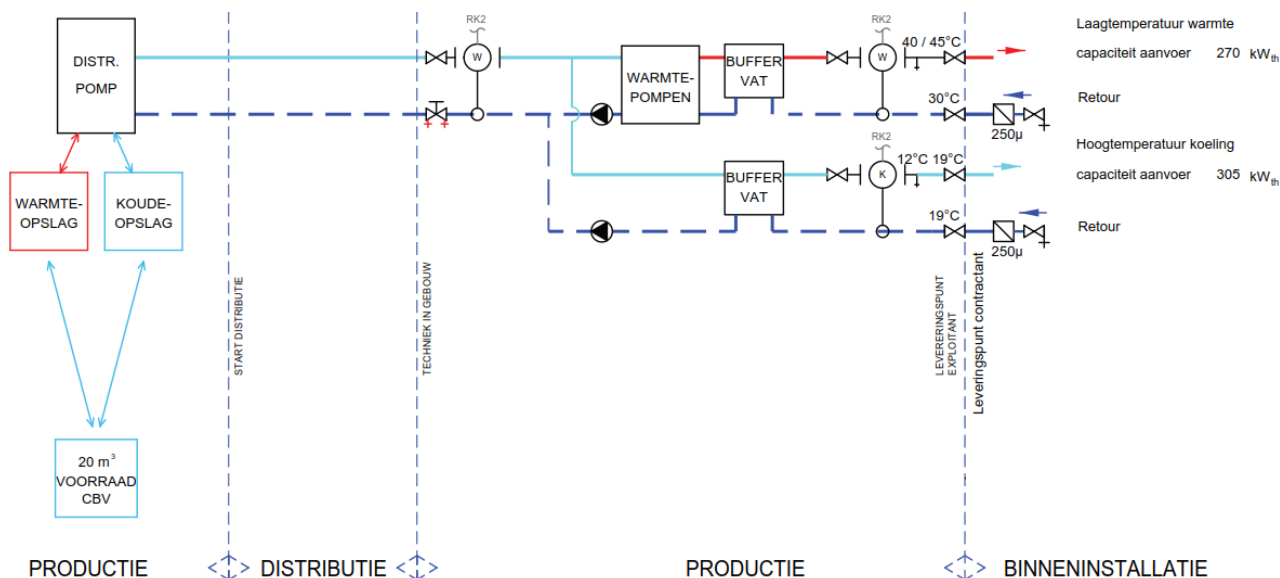
| Aspect                       | Eis                                                          |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Ventilatiecapaciteit         | 23000 m <sup>3</sup> /h; toe- en afvoer                      |
| Vermogen verwarmingsbatterij | Geschikt om lucht van 5°C naar 18°C te verwarmen.            |
| Vermogen koelbatterij        | Geschikt om lucht van 28°C/55% RV naar 15°C/95% RV te koelen |
| Bedrijfstijden               | Maandag tot en met vrijdag van 8:00 tot 20:00 uur.           |

##### 4.4.1. Analyse warmte-koudeopslag

Voor de levering van warmte en koude maakt het Plantronics hoofdkantoor gebruik van een wko-installatie. Een schematisch overzicht van deze installatie staat gegeven in Figuur 10<sup>31</sup>.

---

<sup>31</sup> Illustratie op basis van document DUBO-Techniek (beheerder betreffende wko-installatie).



Figuur 10 - Schematisch overzicht wko Plantronics

Uit dit schema en interne documenten zijn de volgende gegevens bekend voor de warmte en koudeopwekking:

#### Warmteopwekking

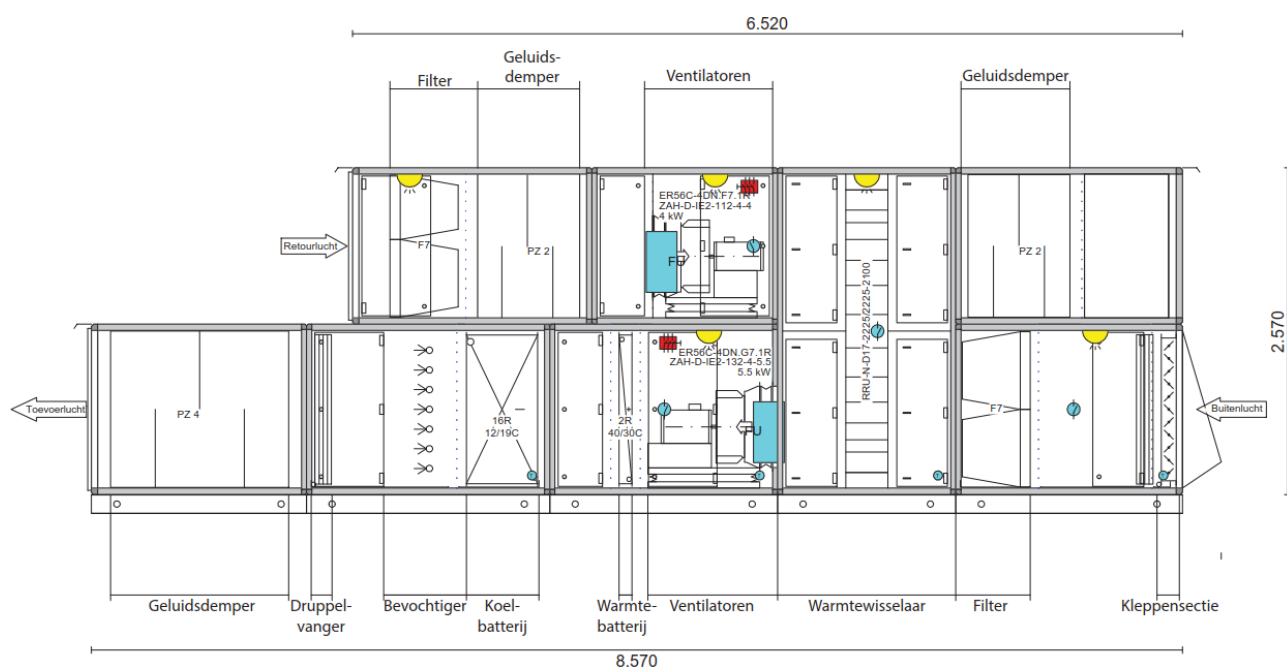
- De aangeleverde warmte uit de wko is 40°C tot 45°C
- De verwarmingsbatterij heeft een temperatuurtraject van 40°C–30°C.

#### Koudeopwekking

- De aangeleverde koude uit de wko is 12°C
- De verwarmingsbatterij heeft een temperatuurtraject van 12°C – 19°C.

#### 4.4.2. Analyse Luchtbehandelingskast

De luchtbehandelingskast in het Plantronics hoofdkantoor is geleverd door het bedrijf *Solid Air*. De kast zorgt voor de toe- en afvoer van de lucht, de filtering, verwarming en koeling van het gebouw. De bevochtiger is wel in de bouwtekening opgenomen, maar is in de praktijk niet geplaatst. De bevochtiging is in de berekeningen van de LBK-fabrikant en in de EPC ook niet meegenomen en zal niet worden behandeld in dit onderzoek. De lay-out van de geïnstalleerde LBK is te vinden in Figuur 11. De functie van de individuele secties zijn toegelicht in 2.2.



Figuur 11 - Lay-out luchtbehandelingskast Plantronics

Om het benodigd vermogen van de ventilatoren van de toevoerkast te berekenen moet het totale luchtzijdige drukverlies bekend zijn. De verwarmings- en koelbatterij zullen hierin apart vermeld worden omdat deze later gevarieerd zullen worden. De ventilatoren van de retourkast blijven gelijk. De drukverliezen van de toevoerkast staan weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 – Luchtzijdige drukverliezen toevoerkast

| Sectie                           | Drukverlies [ $Pa$ ] |
|----------------------------------|----------------------|
| Drukverlies intern               | 618                  |
| - Verwarmingsbatterij            | 38                   |
| - Koelbatterij                   | 233                  |
| Drukverlies extern               | 360                  |
| Drukverlies dynamisch            | 50                   |
| Totaal drukverlies               | 1.027                |
| Drukverlies exclusief batterijen | 756                  |

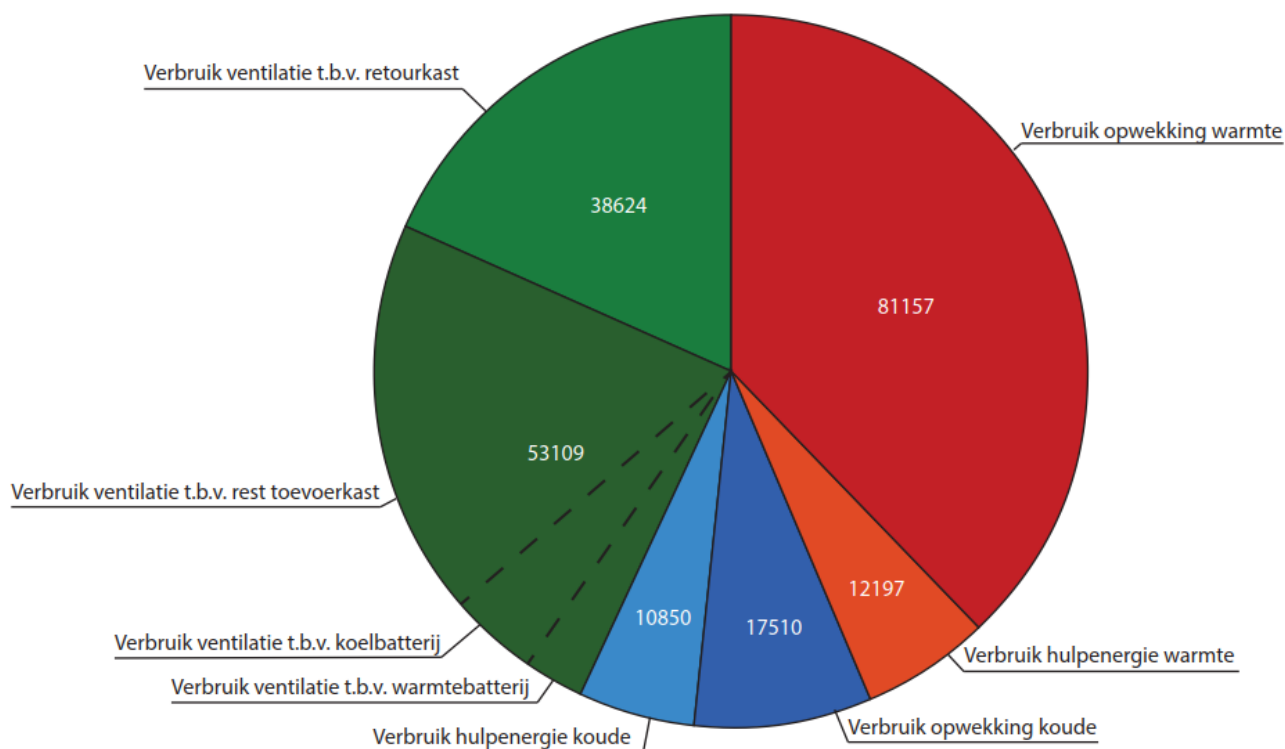


#### 4.5. Analyse energieverbruik casus

Om een beeld te schetsen van grootte van de energieverbruiken van de energievragers van de klimaatinstallatie in het Plantronics hoofdkantoor per jaar, zijn de gegevens van het energieverbruik van de klimaatinstallatie uit de EPG-software in grafiekvorm weergegeven in Figuur 12. Dit betreft niet-primaire energieverbruiken op jaarbasis.

Er is in de EPG-software geen rekening gehouden met hoe het ventilatieverbruik is opgedeeld. Voor deze grafiek is het onderscheid tussen het verbruik van de toevoer en de retourkast gemaakt door de verhouding van het nominaal vermogen van de ventilatoren in deze kasten toe te passen op het energieverbruik (11 kW voor de toevoerkast tegen 8 kW voor de retourkast). Het verbruik van ventilatie ten behoeve van de batterijen is vanuit de EPG-software niet bekend, deze zullen in de berekeningen deel uitmaken van het verbruik van de toevoerkast.

#### Energieverbruik casus aldus EPG [MJ]



Figuur 12 - Analyse energieverbruik casus



## 5. Bepaling van de te onderzoeken temperatuurtrajecten

Uit hoofdstuk 3 is gebleken dat het energieverbruik van de klimaatinstallatie van een gebouw de opsomming is van het energieverbruik van opwekking, de hulpenergie (circulatiepompen) en het ventilatorvermogen. In paragraaf 2.1.2 is omschreven wat het bereik is van de temperatuurniveaus van een wko. In paragraaf 3.7.1 is gegeven wat de opwekkingsrendementen zijn bij deze temperatuurniveaus. Met de formules gegeven in 3.4.2 en 3.3.2 is het mogelijk om het energieverbruik van de opwekking van de warmte en koude te berekenen.

Voor het berekenen van de hulpenergie en het ventilatorvermogen is er echter meer data nodig. Zo is er voor het berekenen van de hulpenergie de volumestroom van het water door de batterijen nodig. Deze is (in het specifiek voor de hulpenergie voor koudeopwekking) afhankelijk van de verhouding  $\Delta T * \Phi_v$ , zoals is vermeld in 3.7.2. Voor het bepalen van het ventilatorvermogen is de luchtweerstand van de batterijen nodig.

Om de benodigde hulpenergie en het ventilatorvermogen te berekenen is er data nodig van warmte- en koelbatterijen. Omdat het niet mogelijk is om de grootte van batterijen exact te berekenen<sup>32</sup>, is er gekozen een serie van batterijen bij een fabrikant aan te vragen, waarbij de temperatuurtrajecten zijn gebaseerd op het bereik van de temperatuurniveaus uit de wko uit 2.1.2.

In dit hoofdstuk is in paragraaf 5.1 toegelicht welke temperatuurtrajecten er onderzocht zullen worden. In paragraaf 5.2 zijn de aangevraagde batterijen verder toegelicht. Er is hier onderscheid gemaakt tussen verwarmingsbatterijen en koelbatterijen.

### 5.1. Temperatuurtrajecten

#### 5.1.1. Temperatuurtrajecten verwarmingsbatterijen

Bij de warmteopwekking in de wko is het mogelijk de temperatuurniveaus te variëren. Hierbij kan er gevarieerd worden tussen de 30°C en 55°C<sup>33</sup>. Voor de rendementen van de wko (in combinatie met de warmtepomp) is er uitgegaan van de rendementen gegeven in Tabel 2. Er is in deze tabel een ander rendement per 5°C aangegeven, in totaal 6 temperatuurniveaus. Er is voor gekozen om deze 6 temperatuurniveaus te gebruiken als intredetemperatuur voor de warmtebatterijen.

Om de temperatuurtrajecten te bepalen zijn ook de uittredetemperaturen van de warmtebatterijen nodig. Om het aantal variabelen te beperken is ervoor gekozen om het verschil tussen de intredetemperatuur en uittredetemperatuur gelijk te houden. Deze  $\Delta T$  over de warmtebatterij zal gelijk gesteld worden aan de  $\Delta T$  van de warmtebatterij toegepast in de casus. Deze heeft een temperatuurtraject van 40°C naar 30°C, de  $\Delta T$  is 10°C.

De temperatuurtrajecten afgeleid van temperatuurniveaus van de wko zijn weergegeven in Tabel 7.

---

<sup>32</sup> Zie 3.8.

<sup>33</sup> Zie 2.1.2.



*Tabel 7 - Aangevraagde temperatuurtrajecten verwarmingsbatterijen*

| Situatie   | Temperatuurniveau wko/<br>intredetemperatuur warmtebatterij [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Uittredetemperatuur warmtebatterij<br>[ $^{\circ}\text{C}$ ] |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $W_1$      | 30                                                                                 | 20                                                           |
| $W_2$      | 35                                                                                 | 25                                                           |
| $W_3^{34}$ | 40                                                                                 | 30                                                           |
| $W_4$      | 45                                                                                 | 35                                                           |
| $W_5$      | 50                                                                                 | 40                                                           |
| $W_6$      | 55                                                                                 | 45                                                           |

#### 5.1.2. Temperatuurtrajecten koelbatterijen

##### **Eerste variabele: Verschil in intredetemperatuur; variabele $\Delta T$**

Zoals in paragraaf 2.1.2 is toegelicht, is het lastig om te variëren met de intredetemperaturen voor koude, geleverd door de wko. Er kan koude van  $10^{\circ}\text{C}$  geleverd worden door wko, echter wordt er soms gekozen voor een temperatuurniveau van  $12^{\circ}\text{C}$ .

Om de effecten van een verandering van temperatuurniveau van  $10^{\circ}\text{C}$  naar  $12^{\circ}\text{C}$  in beeld te krijgen zijn er twee reeksen van temperatuurtrajecten aangevraagd. Voor het onderzoek zal de uittredetemperatuur van de koelbatterij gevarieerd worden van  $18^{\circ}\text{C}$  tot  $20^{\circ}\text{C}$ . Dit levert de volgende temperatuurtrajecten op:

*Tabel 8 - Temperatuurtrajecten koelbatterij voor  $10^{\circ}\text{C}$  en  $12^{\circ}\text{C}$*

| Intredetemperatuur koelbatterij [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Uittredetemperatuur koelbatterij [ $^{\circ}\text{C}$ ] | $\Delta T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 10                                                     | 18                                                      | 8                                 |
| 10                                                     | 19                                                      | 9                                 |
| 10                                                     | 20                                                      | 10                                |
| 12                                                     | 18                                                      | 6                                 |
| 12                                                     | 19                                                      | 7                                 |
| 12                                                     | 20                                                      | 8                                 |

---

<sup>34</sup> Referentiesituatie



### **Tweede variabele: Verschil in intredetemperatuur; constante $\Delta T$**

Een ander nadeel van een stijging in temperatuurniveau van 10°C naar 12°C is dat de  $\Delta T$  tussen het koelwater en de te koelen lucht in de koelbatterij ook kleiner wordt. Dit is uitgelegd in het onderstaande voorbeeld:

*Voorbeeld:*

*Een veelgebruikt temperatuurtraject voor de waterzijde van koelbatterijen is 10°C tot 18°C (zie Bijlage E). Als dit temperatuurtraject 2°C zal worden opschuiven naar 12°C tot 20°C bij gelijke eisen voor koelvermogen zal de benodigde oppervlakte van de batterij groter worden. Dit kan worden bewezen door formule (27). Het temperatuurtraject van de lucht in de koelbatterij wordt hier aangenomen als 28°C tot 15°C.*

*Batterij 10-18°C:*

$$\Delta T_a = 28 - 18 = 10^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_b = 15 - 10 = 5^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{gem} = \Delta T_{ln} = \frac{10 - 5}{\ln\left(\frac{10}{5}\right)} = 7,213^\circ\text{C}$$

*Batterij 12-20°C:*

$$\Delta T_a = 28 - 20 = 8^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_b = 15 - 12 = 3^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{gem} = \Delta T_{ln} = \frac{8 - 3}{\ln\left(\frac{8}{3}\right)} = 5,098^\circ\text{C}$$

*Deze lagere  $\Delta T_{gem}$  leidt tot een hoger benodigd oppervlakte in formule (26).*

Voor temperatuurtrajecten met een constante  $\Delta T$  is er gekozen om het veelgebruikte temperatuurtraject van 10°C tot 18°C uit te gaan. De  $\Delta T$  van 8°C van dit temperatuurtraject is vervolgens toegepast bij de intredetemperaturen van 11°C en 12°C. De drie temperatuurtrajecten staan weergegeven in Tabel 9.

*Tabel 9 - Temperatuurtrajecten koelbatterij bij constante  $\Delta T$*

| $\Delta T$ [°C] | Intredetemperatuur koelbatterij [°C] | Uittredetemperatuur koelbatterij [°C] |
|-----------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 8               | 10                                   | 18                                    |
| 8               | 11                                   | 19                                    |
| 8               | 12                                   | 20                                    |



Alle aangevraagde temperatuurtrajecten voor de koelbatterij, gesorteerd naar  $\Delta T$ , zijn:

*Tabel 10 - Temperatuurtrajecten koelbatterijen*

| Situatie   | Temperatuurtraject [ $^{\circ}\text{C}$ ] | $\Delta T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] |
|------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|
| $K_1$      | 10 – 20                                   | 10                                |
| $K_2$      | 10 – 19                                   | 9                                 |
| $K_3$      | 10 – 18                                   | 8                                 |
| $K_4$      | 11 – 19                                   | 8                                 |
| $K_5$      | 12 – 20                                   | 8                                 |
| $K_6^{35}$ | 12 – 19                                   | 7                                 |
| $K_7$      | 12 – 18                                   | 6                                 |

## 5.2. Aanvraag batterijen

De waarden waarop de batterijen zijn gekozen, zijn gebaseerd op de klimaateisen gesteld aan de casus. Deze zijn kort samengevat in Tabel 11.

*Tabel 11 - Standaardwaarden batterijen*

| Gevraagd:              | Eenheid:              | Waarde koelen: | Waarde verwarmen: |
|------------------------|-----------------------|----------------|-------------------|
| Gewenste luchtconditie | $^{\circ}\text{C}$    | 15             | 18                |
|                        | % RV                  | 95             | —                 |
| Intredeconditie        | $^{\circ}\text{C}$    | 28             | 5                 |
|                        | % RV                  | 55             | —                 |
| Debiet                 | $\text{m}^3/\text{h}$ | 23.000         |                   |
| Doorsnede LBK          | $\text{m}$            | 1,275 * 2,785  |                   |
| Luchtsnelheid          | $\text{m/s}$          | 2,0            |                   |

Alle batterijen zijn aangevraagd bij de firma *Recupair Nederland B. V.* te Oosterhout. Zij zijn de Nederlandse importeur van *FACO* warmtewisselaars, een Italiaanse warmtewisselaarfabrikant.

---

<sup>35</sup> Referentiesituatie

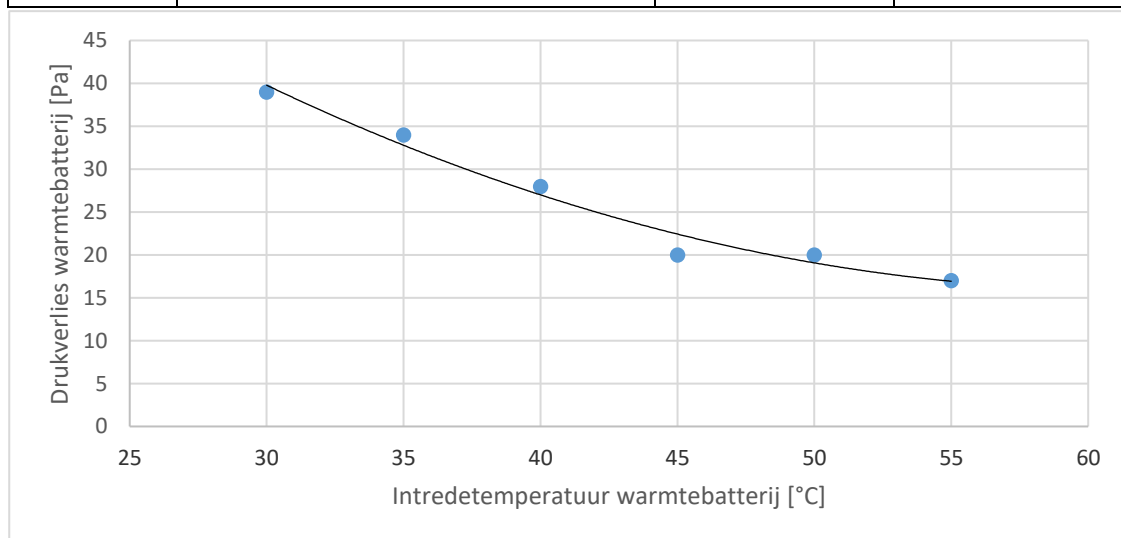


### Verkregen data warmtebatterijen

De data van de aangevraagde warmtebatterijen staat in Bijlage C.1. Een overzicht van de belangrijkste data per situatie staat hieronder in Tabel 12. Het drukverlies door de warmtebatterij is in Figuur 13 uitgezet tegen de intredetemperatuur.

Tabel 12 – Data aangevraagde warmtebatterijen

| Situatie nr. | Temperatuurtraject batterij [ $^{\circ}\text{C}$ ] | $\Delta T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Drukverlies [ $\text{Pa}$ ] |
|--------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| $W_1$        | 30 – 20                                            | 10                                | 39                          |
| $W_2$        | 35 – 25                                            | 10                                | 34                          |
| $W_3$        | 40 – 30                                            | 10                                | 28                          |
| $W_4$        | 45 – 35                                            | 10                                | 20                          |
| $W_5$        | 50 – 40                                            | 10                                | 20                          |
| $W_6$        | 55 – 45                                            | 10                                | 17                          |



Figuur 13 - Drukverlies warmtebatterijen per intredetemperatuur

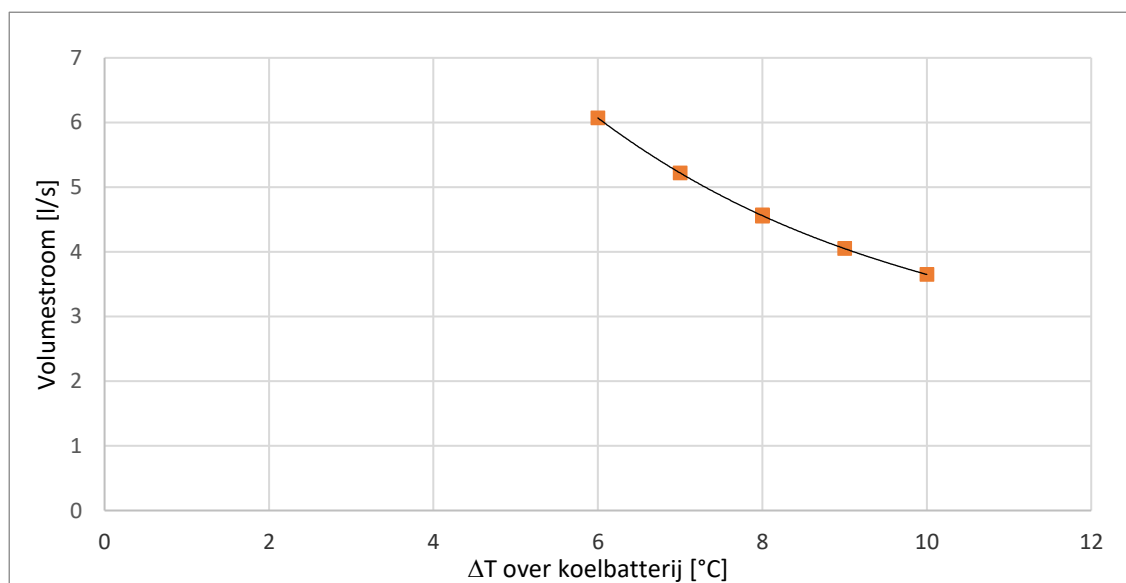
### Verkregen data koelbatterijen

De data van de aangevraagde koelbatterijen staat in Bijlage C.2. Een overzicht van de belangrijkste data per situatie staat in Tabel 13. In Figuur 14 is het effect van de  $\Delta T$  op de volumestoom weergegeven. In Figuur 15 is het luchtzijdig drukverlies weergegeven, er is hierbij onderscheid gemaakt tussen verschillende intredetemperaturen.

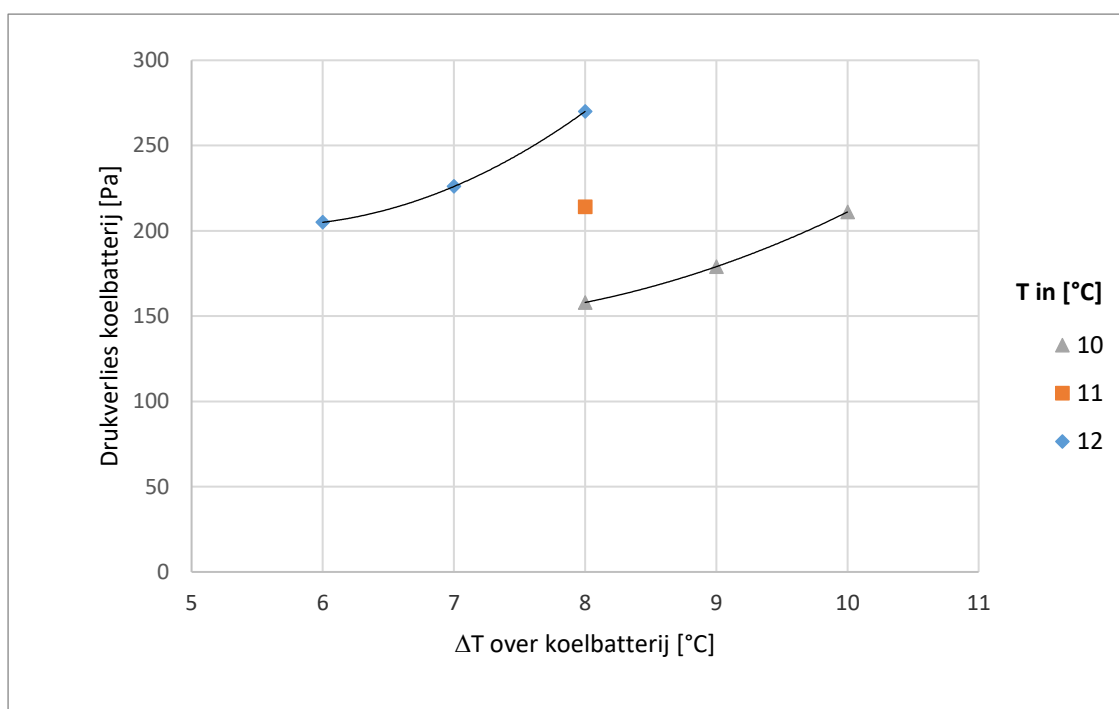
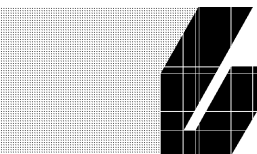


Tabel 13 – Data aangevraagde koelbatterijen

| Situatie   | Temperatuurtraject [°C] | $\Delta T$ [°C] | Drukverlies lucht [Pa] | Volumestroom [l/s] |
|------------|-------------------------|-----------------|------------------------|--------------------|
| $K_1$      | 10 – 20                 | 10              | 211                    | 3,65               |
| $K_2$      | 10 – 19                 | 9               | 179                    | 4,05               |
| $K_3$      | 10 – 18                 | 8               | 158                    | 4,57               |
| $K_4$      | 11 – 19                 | 8               | 214                    | 4,56               |
| $K_5$      | 12 – 20                 | 8               | 270                    | 4,55               |
| $K_6^{36}$ | 12 – 19                 | 7               | 226                    | 5,22               |
| $K_7$      | 12 – 18                 | 6               | 205                    | 6,07               |



Figuur 14 - Volumestroom per  $\Delta T$



*Figuur 15 – Luchtzijdig drukverlies koelbatterijen per  $\Delta T$*



## 6. Vergelijkingen energieverbruik klimaatinstallatie

De berekeningen op basis van de opgestelde situaties in hoofdstuk 5 zijn uitgevoerd in Bijlage A. Er zijn berekeningen gedaan voor energieverbruik in de categorieën warmte, koude en ventilatie. Deze drie categorieën zijn onder te verdelen in de verbruiken van verschillende energievragers, waarvan sommige variabel zijn en sommige constant blijven voor alle onderzochte situaties.

*Tabel 14 - Energieverbruikers klimaatinstallatie*

| Categorie  | Verbruiker                                                                                                                                                            | Variabel/ constant                             |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Warmte     | <ul style="list-style-type: none"><li>Opwekking</li><li>Hulpenergie</li></ul>                                                                                         | <i>Variabel</i><br>Constant                    |
| Koude      | <ul style="list-style-type: none"><li>Opwekking</li><li>Hulpenergie</li></ul>                                                                                         | Constant<br><i>Variabel</i>                    |
| Ventilatie | <ul style="list-style-type: none"><li>T.b.v. drukverlies warmtebatterij</li><li>T.b.v. drukverlies koelbatterij</li><li>T.b.v. de rest van de drukverliezen</li></ul> | <i>Variabel</i><br><i>Variabel</i><br>Constant |

Voor het bepalen van de situatie met het minste verbruik voor de categorieën warmte en koude zullen de energieverbruiken van de variabele verbruikers per situatie bij elkaar opgeteld worden. Voor de categorie warmte gebeurt dit paragraaf 6.1. Voor de categorie koude gebeurt dit in paragraaf 6.2. In paragraaf 6.3 zal het energieverbruik van de constante verbruikers worden opgesomd.

### 6.1. Vergelijking verbruik warmte

Bij de vergelijking voor het energieverbruik voor warmte verandert het energieverbruik van de opwekking en het ventilatievermogen ten gevolge van de variaties in temperatuurtraject van de warmtebatterij. Omdat het waterzijdig debiet constant is voor de warmtebatterijen, zal de hulpenergie per situatie constant blijven.

De hoogte van het temperatuurtraject heeft wel invloed op het rendement van de opwekking (zie 3.7.1 voor de rendementen per temperatuurniveau). In A.1.2 wordt per situatie het energieverbruik berekend. Het temperatuurtraject heeft ook invloed op de grootte van de warmtebatterij (zie 5.1.1), waarvan het drukverlies voor een deel van invloed is op het ventilatorvermogen en verbruik). Omdat het verbruik van de ventilatie per component te berekenen is, zal hier het verbruik ten behoeve van de warmtebatterij worden vergeleken (zie 3.5. voor de theorie en A.3.2.2 voor de berekeningen).

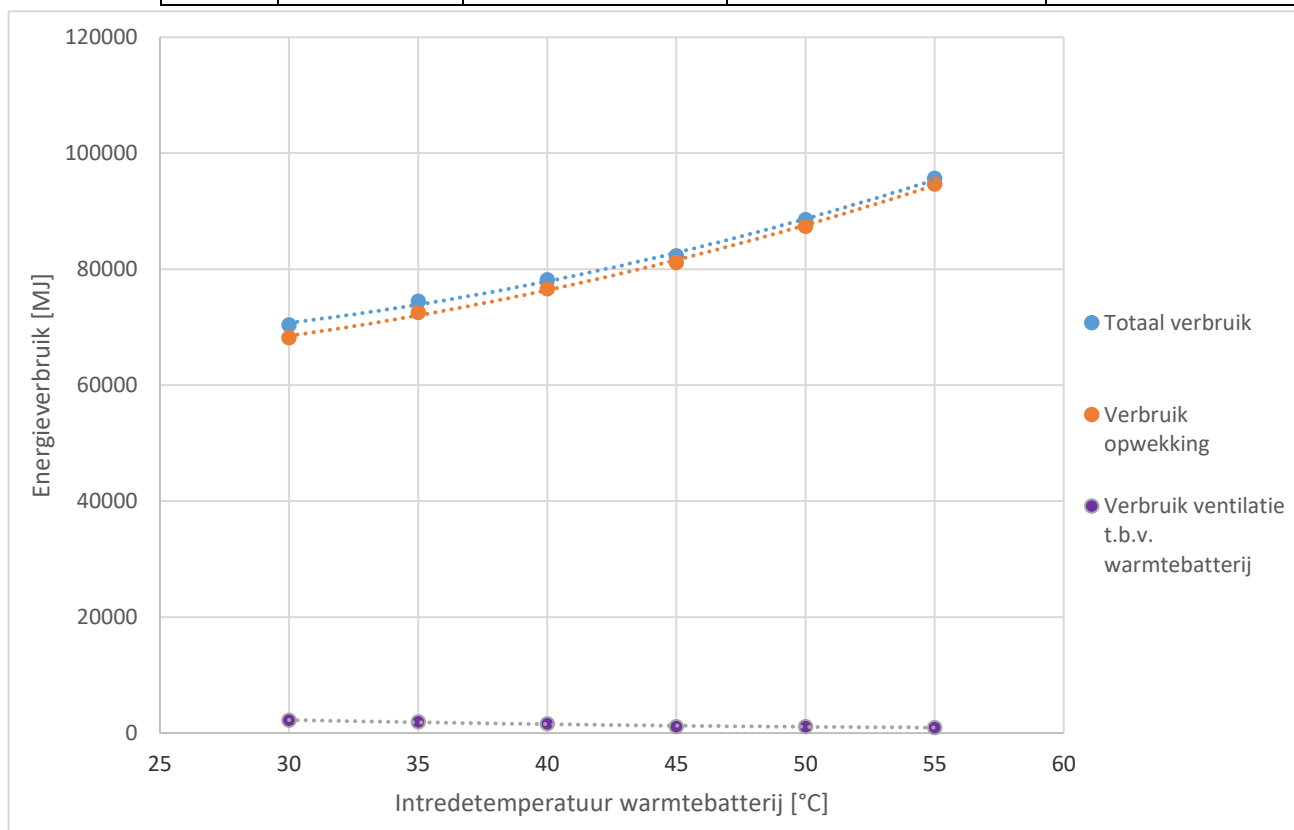
Uit A.1.2 blijkt dat voor het opwekken van warmte er bij een warmer temperatuurtraject, een hoger energieverbruik is. Uit A.3.2.2 blijkt dat dat voor het ventilatievermogen ten behoeve van de warmtebatterij het laagste energieverbruik bij de warmste temperaturen is. Het hogere ventilatievermogen weegt echter niet op tegen het lagere energieverbruik van de opwekking.

Situatie  $W_1$  met het temperatuurtraject 30-20°C verbruikt het minste energie.



Tabel 15 - Vergelijking energieverbruik warmte (niet-primaire energie)

| Situatie | Temperatuur-traject [°C] | Verbruik opwekking [MJ] | Verbruik ventilatie t.b.v. warmtebatterij [MJ] | Verbruik totaal [MJ] |
|----------|--------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|----------------------|
| $W_1$    | 30 – 20                  | 68172                   | 2202                                           | 70374                |
| $W_2$    | 35 – 25                  | 72524                   | 1927                                           | 74451                |
| $W_3$    | 40 – 30                  | 76598                   | 1581                                           | 78179                |
| $W_4$    | 45 – 35                  | 81157                   | 1129                                           | 82286                |
| $W_5$    | 50 – 40                  | 87400                   | 1129                                           | 88529                |
| $W_6$    | 55 – 45                  | 94684                   | 960                                            | 95644                |



Figuur 16 - Vergelijking energieverbruik warmte

## 6.2. Vergelijking verbruik koude

Voor de vergelijking van het energieverbruik voor de koude is er gevarieerd met de hoogte van de temperatuurtrajecten en met het temperatuurverschil tussen de in- en uitredetemperatuur van de



temperatuurtrajecten. Door de verandering in  $\Delta T$  bij het temperatuurtraject verandert het waterzijdige debiet per situatie, en daarmee het verbruik van de hulpenergie voor koude (A.2.3).

De grootte van de koelbatterij verandert ook per situatie, waarmee het luchtzijdig drukverlies per situatie anders is. Omdat het verbruik van de ventilatie per component te berekenen is, zal hier het verbruik ten behoeve van de warmtebatterij worden vergeleken (zie 3.5. voor de theorie en A.3.2.2 voor de berekeningen).

Omdat in dit onderzoek het opwekkingsrendement voor koudeopwekking als constant is aangenomen, zal het energieverbruik voor koudeopwekking voor elke situatie gelijk blijven.

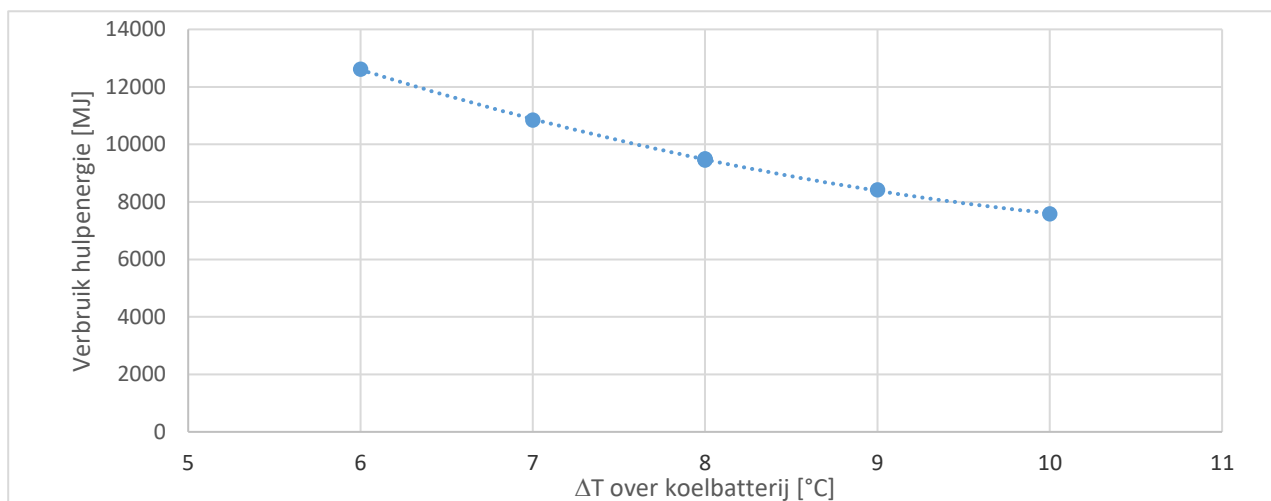
De opsomming van het verbruik voor hulpenergie en voor ventilatorverbruik ten behoeve van de koelbatterij per situatie staat in Tabel 16. Hieruit blijkt dat het energieverbruik het laagst is bij situatie  $K_3$ , met een temperatuurtraject van  $10 - 18^\circ\text{C}$ .

*Tabel 16 - Vergelijking energieverbruik koude*

| Situatie | Temperatuurtraject [ $^\circ\text{C}$ ] | $\Delta T$ [ $^\circ\text{C}$ ] | Verbruik hulpenergie [ $\text{MJ}$ ] | Verbruik ventilatie t.b.v. koelbatterij [ $\text{MJ}$ ] | Verbruik totaal [ $\text{MJ}$ ] |
|----------|-----------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------|
| $K_1$    | 10 – 20                                 | 10                              | 7586,0                               | 11935                                                   | 19521                           |
| $K_2$    | 10 – 19                                 | 9                               | 8417,3                               | 10128                                                   | 18545                           |
| $K_3$    | 10 – 18                                 | 8                               | 9498,1                               | 8942                                                    | 18440                           |
| $K_4$    | 11 – 19                                 | 8                               | 9477,3                               | 12112                                                   | 21589                           |
| $K_5$    | 12 – 20                                 | 8                               | 9456,5                               | 15281                                                   | 24738                           |
| $K_6$    | 12 – 19                                 | 7                               | 10850                                | 12789                                                   | 23639                           |
| $K_7$    | 12 – 18                                 | 6                               | 12616                                | 11596                                                   | 24212                           |

#### Effect $\Delta T$ op hulpenergie koude

Naarmate het verschil tussen  $T_{in}$  en  $T_{uit}$  kleiner wordt zal het benodigde hulpvermogen bij gelijke warmtestroom stijgen. Omdat de warmtestroom de massastroom maal het temperatuurverschil is, zal bij een lagere  $\Delta T$  de massastroom hoger worden. Een hogere massastroom leidt tot een groter volume dat per tijdseenheid gepompt moet worden. Een lagere  $\Delta T$  leidt dus tot een hoger benodigd vermogen voor de circulatiepomp, wat volgens formule (21) leidt tot een hoger energieverbruik. In Figuur 17 is het energieverbruik voor hulpenergie per  $\Delta T$  weergegeven.

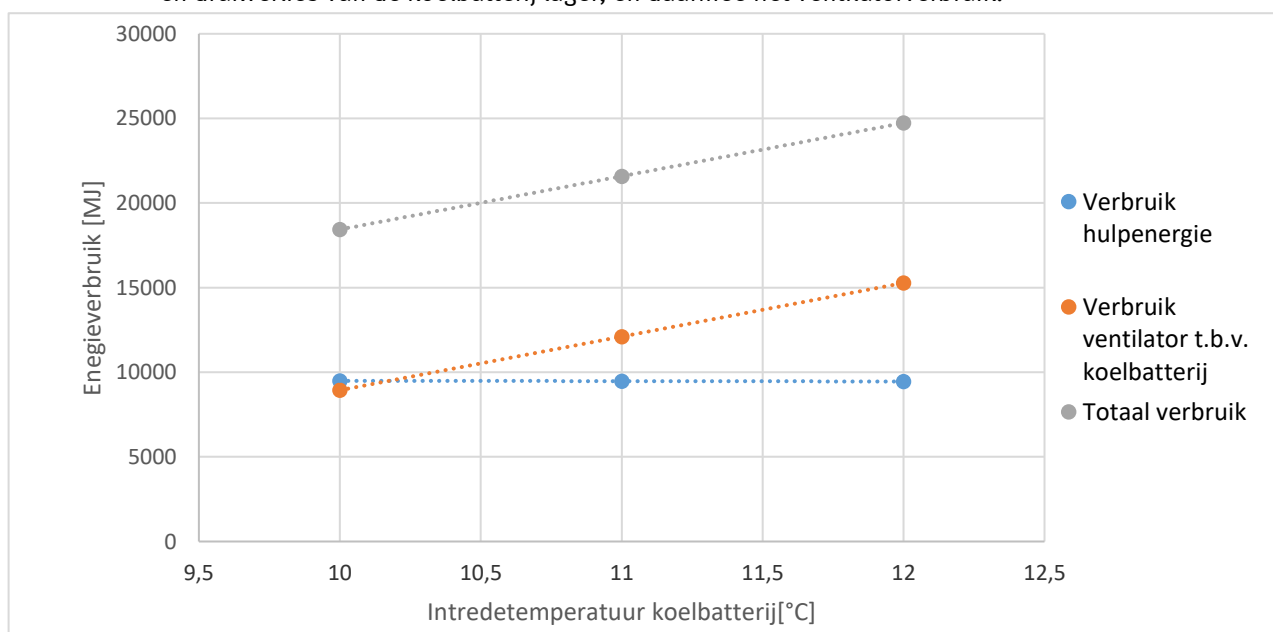


Figuur 17 - Energieverbruik hulpenergie bij variabele  $\Delta T$

#### Energieverbruik bij constante $\Delta T$

Het verschil tussen de  $T_{in}$  en  $T_{uit}$  is constant ( $\Delta T = 8^\circ\text{C}$ ), de  $T_{in}$  is gevarieerd van  $10^\circ\text{C}$  tot  $12^\circ\text{C}$ . Het verbruik voor hulpenergie blijft bij door de constante temperatuur ook constant (zie Figuur 18).

Uit Tabel 16 blijkt dat een lagere  $T_{in}$  leidt tot een lagere luchtzijdige weerstand en dus een lager verbruik voor ventilatie. Dit komt omdat de lagere watertemperaturen zorgen voor een groter temperatuurverschil in de koelbatterij (zie formule (27)). Hierdoor wordt het benodigd oppervlakte en drukverlies van de koelbatterij lager, en daarmee het ventilatorverbruik.

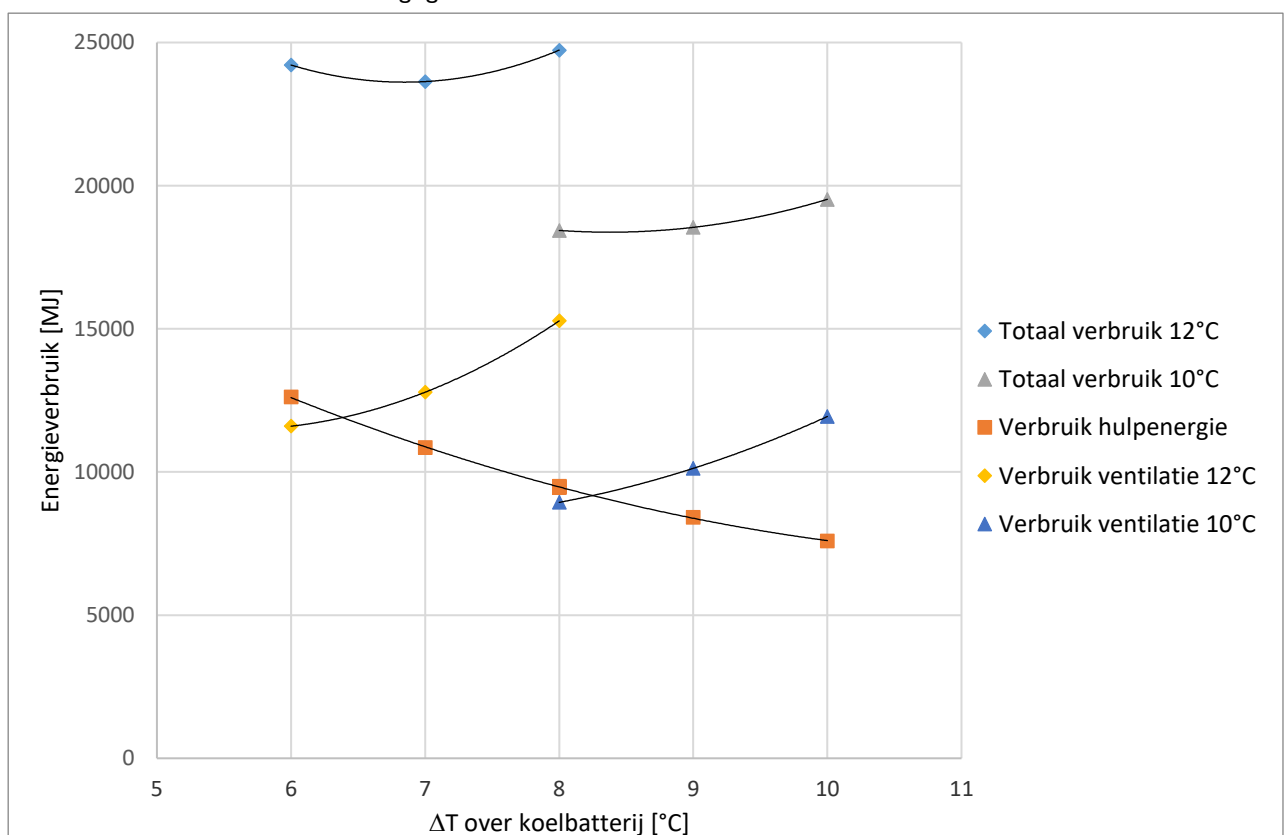


Figuur 18 - Energieverbruik bij  $\Delta T=8$  en variabele  $T_{in}$



### Energieverbruik bij verschillende $T_{in}$

Er is gekeken naar de verschillen in verbruik als de intredetemperatuur  $10^{\circ}\text{C}$  of  $12^{\circ}\text{C}$  is. De uittredetemperaturen zijn hier voor beide gevallen 18, 19 en  $20^{\circ}\text{C}$ . In Figuur 19 is het verbruik van de hulpenergie, het verbruik van de ventilatie ten behoeve van de koelbatterijen en de som van deze verbruiken weergegeven.



Figuur 19 - Vergelijking energieverbruik koude bij  $T_{in}$  is  $10^{\circ}\text{C}$  en  $12^{\circ}\text{C}$

Uit Figuur 19 is te bepalen dat voor  $T_{in} = 10^{\circ}\text{C}$  het gezamenlijk energieverbruik het laagst is bij een  $\Delta T$  tussen de  $8^{\circ}\text{C}$  en  $9^{\circ}\text{C}$ . Het optimum in  $\Delta T$  voor  $T_{in} = 12^{\circ}\text{C}$  ligt nabij de  $7^{\circ}\text{C}$ .

### 6.3. Constante verbruikers

Zoals in de inleiding van dit hoofdstuk is besproken zijn er binnen de klimaatinstallatie voor dit onderzoek 4 verbruikers waar het energieverbruik per situatie gelijk blijft.

- Het verbruik van de hulpenergie voor warmte (circulatiepomp) blijft constant omdat de  $\Delta T$  en dus de volumestroom voor warmte constant blijft. In A.1.3 is dit energieverbruik berekend.



- Het verbruik van de opwekking van koude blijft constant omdat het opwekkingsrendement voor de opwekking van koude als constant is aangenomen. In A.2.2 is het verbruik voor de opwekking van koude berekend.
- Zoals uitgelegd in 3.5.4 kan het verbruik van de ventilator worden opgedeeld. Het ventilatieverbruik van de rest van de toevoerkast<sup>37</sup> is berekend in A.3.2.2.
- Het drukverlies van de retourkast staat los van de veranderingen in de toevoerkast. Het energieverbruik is berekend in A.3.2.2.

In Tabel 17 is een overzicht van alle constante verbruikers.

Tabel 17 - *Energieverbruik constante verbruikers*

| Omschrijving                        | Afkorting        | Verbruik [MJ] |
|-------------------------------------|------------------|---------------|
| Verbruik hulpenergie warmte         | $E_{W;hulp}$     | 8486,6        |
| Verbruik opwekking koude            | $E_{K;opw}$      | 17510         |
| Ventilatieverbruik rest toevoerkast | $E_{V;toe;rest}$ | 42771         |
| Ventilatieverbruik retourkast       | $E_{V;kast;af}$  | 42115         |

#### 6.4. Totaal energieverbruik klimaatinstallatie

Het totale energieverbruik van de klimaatinstallatie is een opsomming van de verbruiken genoemd in paragrafen 6.1, 6.2 en 6.3. In Tabel 18 is een vergelijking waar de meest energiezuinige situatie, de referentiesituatie en de minst energiezuinige situatie zijn weergegeven. Deze energieverbruiken zijn gevisualiseerd in figuren 19, 20 en 21.

Tabel 18 - *Totaalverbruik klimaatinstallatie*

| Omschrijving                                    | Meest zuinig | Referentie | Minst zuinig |
|-------------------------------------------------|--------------|------------|--------------|
| Temperatuurtraject warmte                       | 30 – 20°C    | 40 – 30°C  | 55 – 45°C    |
| Temperatuurtraject koude                        | 10 – 18°C    | 12 – 19°C  | 12 – 20°C    |
| <i>Verbruiken opwekking en hulpenergie [MJ]</i> |              |            |              |
| Verbruik opwekking warmte                       | 68172        | 76598      | 94684        |
| Verbruik hulpenergie warmte                     | 8487         | 8487       | 8487         |
| Verbruik opwekking koude                        | 17510        | 17510      | 17510        |

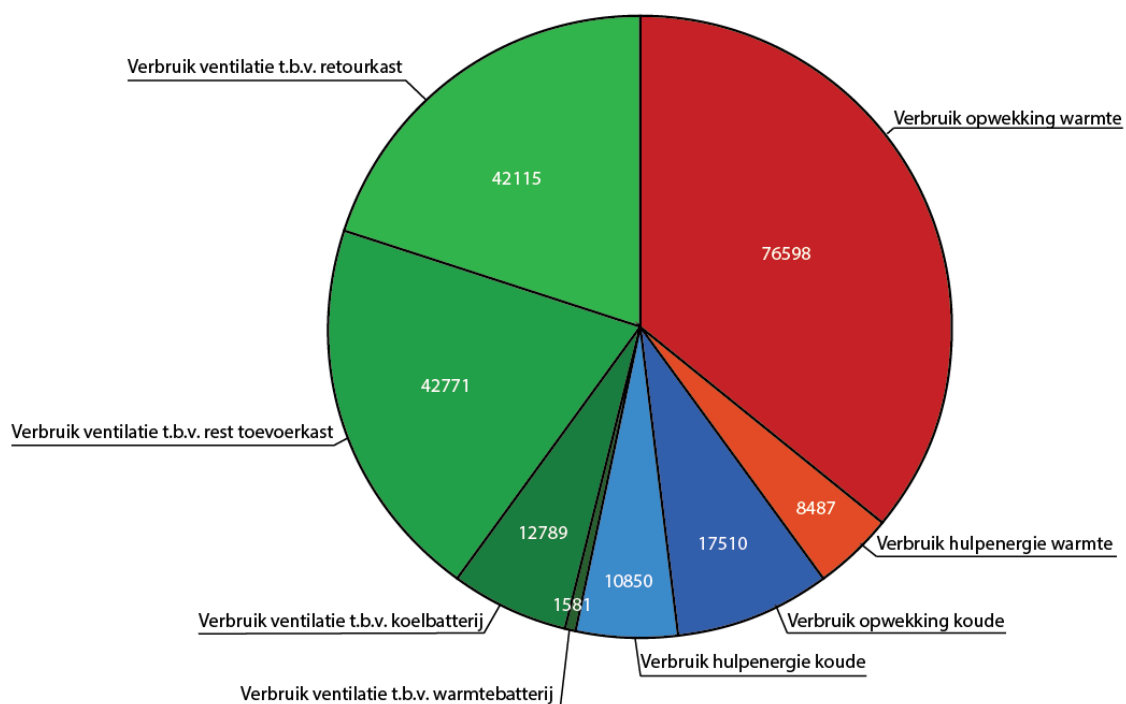
---

<sup>37</sup> Opsomming van het intern, dynamische en extern drukverlies van de toevoerkast exclusief de batterijen.



|                                           |               |               |               |
|-------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Verbruik hulpenergie koude                | 9498          | 10850         | 9457          |
| <i>Verbruiken ventilatie [MJ]</i>         |               |               |               |
| T.b.v. warmtebatterij                     | 2202          | 1581          | 960           |
| T.b.v. koelbatterij                       | 8942          | 12789         | 15281         |
| Rest toevoerkast                          | 42771         | 42771         | 42771         |
| Retourkast                                | 42115         | 42115         | 42115         |
| <b>Energieverbruik/jaar: [MJ]</b>         | <b>199697</b> | <b>212701</b> | <b>231265</b> |
| <b>Verbruik t.o.v. referentiesituatie</b> | <b>-6,1%</b>  | <b>-</b>      | <b>+8,7%</b>  |

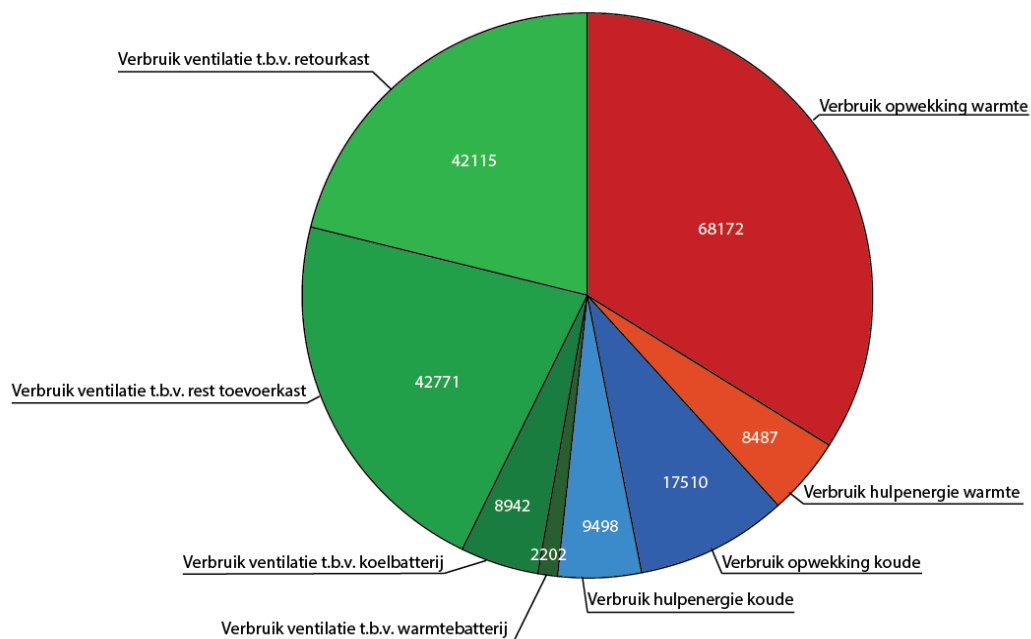
### Energieverbruik referentiesituatie [MJ]



Figuur 20 - Totaal energieverbruik referentiesituatie

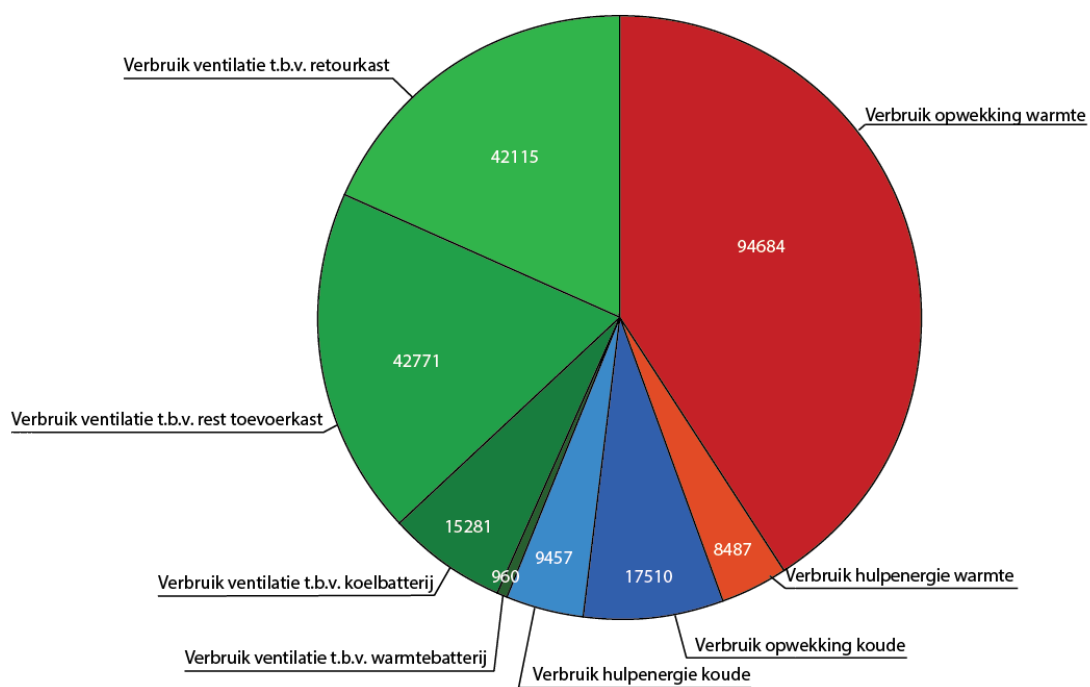


### Energieverbruik meest zuinig [MJ]



Figuur 21 - Totaal energieverbruik meest zuinige situatie

### Energieverbruik minst zuinig[MJ]



Figuur 22 - Energieverbruik minst zuinige situatie



## 7. Kostenberekening

Het is nu bekend wat op energetisch vlak de meest optimale temperatuurtrajecten zijn. Echter zullen in de installatietechniek niet alleen de energieverbruiken worden meegenomen. De extra kosten die gemaakt moeten worden voor een hogere efficiëntie moeten wel binnen een aanzienlijke tijd worden terugverdiend. Een vuistregel voor de installatietechniek is dat de levensduur van klimaatinstallaties circa 15 jaar is<sup>38</sup>, binnen deze tijd zou de extra investering zich dus moeten hebben terugverdiend. De berekeningen van de kosten zijn weergegeven in Bijlage B. Hieronder zijn voor warmte en koude een kostenoverzicht gegeven.

### Overzicht kosten warmte

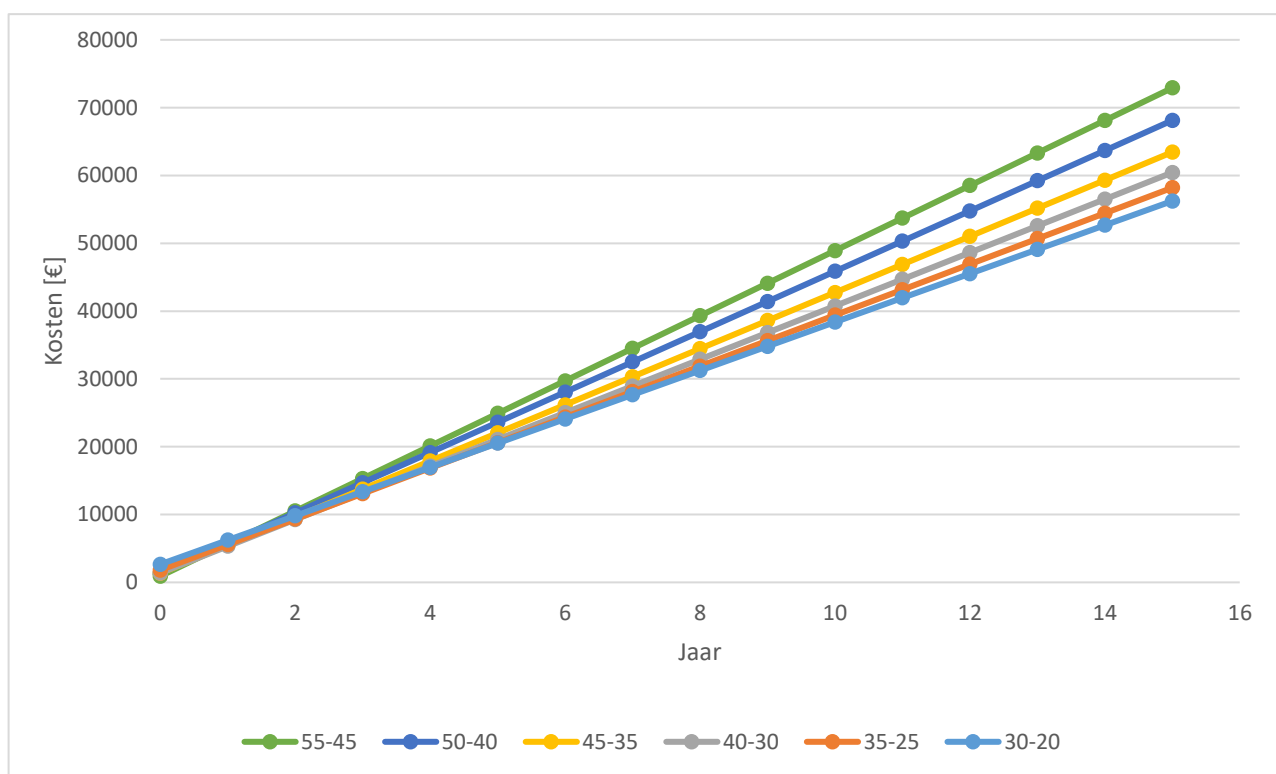
Aan de kant van de warmte heeft de meest energiezuinige situatie ( $W_1$ ) de hoogste investeringskosten. Deze zijn volledig afhankelijk van de warmtebatterij. Deze investeringskosten zijn na 5 jaar terugverdiend, waarna situatie  $W_1$  (temperatuurtraject:  $30^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}$ ) het goedkoopst is. Een overzicht van de kosten staat weergegeven in Tabel 19 en Figuur 23.

*Tabel 19 - Kosten voor de functie verwarmen*

| Situatie | Investeringskosten<br>[€] | Onderhoud/jr.<br>[€] | Energiekosten/jr.<br>[€] | Kosten na 15<br>jaar [€] |
|----------|---------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| $W_1$    | 2655,80                   | 53,10                | 3518,71                  | 56233, –                 |
| $W_2$    | 1808,80                   | 36,20                | 3722,53                  | 58189, –                 |
| $W_3$    | 1386, –                   | 27,70                | 3908,95                  | 60436, –                 |
| $W_4$    | 1328,60                   | 26,60                | 4114,32                  | 63442, –                 |
| $W_5$    | 1328,60                   | 26,60                | 4426,47                  | 68124, –                 |
| $W_6$    | 904,40                    | 18,10                | 4782,18                  | 72908, –                 |

---

<sup>38</sup> (Knoll, Wagenaar, & Weele, 2002)



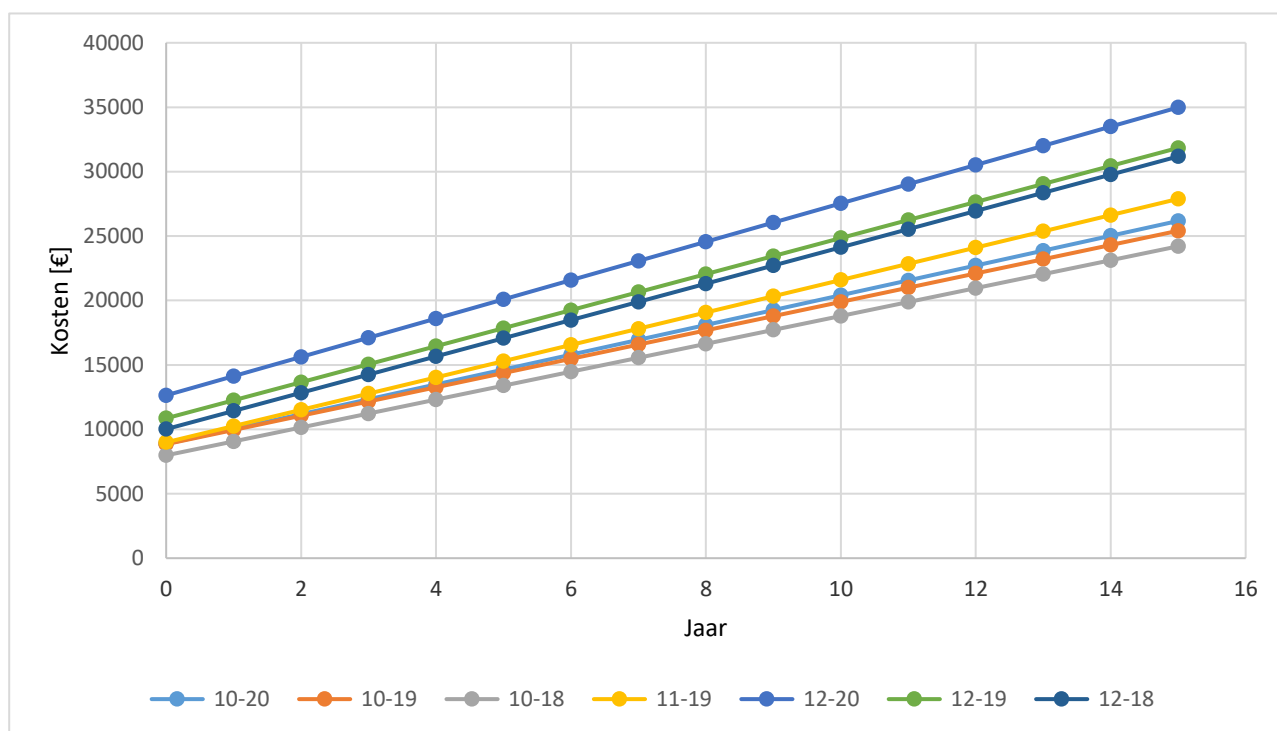
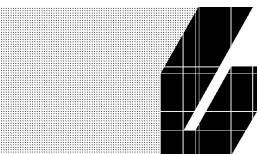
Figuur 23 - Kosten voor functie verwarmen over 15 jaar

#### Overzicht kosten koude

Voor koelen variëren de kosten van de koelbatterij en de circulatiepomp. Zowel de initiële kosten als het verbruik zijn voor situatie  $K_3$  (temperatuurtraject: 10 – 18°C) het laagst. Een overzicht van de kosten staat weergegeven in Tabel 20 en Figuur 24.

Tabel 20 – Kosten voor de functie koelen

| Situatie | Investeringskosten<br>[€] | Onderhoud/jr.<br>[€] | Energiekosten/jr.<br>[€] | Kosten na 15<br>jaar [€] |
|----------|---------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| $K_1$    | 8873, –                   | 177,50               | 976,05                   | 26176, –                 |
| $K_2$    | 8848, –                   | 177, –               | 927,25                   | 25411, –                 |
| $K_3$    | 7982, –                   | 159,60               | 922,00                   | 24207, –                 |
| $K_4$    | 8995, –                   | 179,90               | 1079,45                  | 27885, –                 |
| $K_5$    | 12641, –                  | 252,80               | 1236,90                  | 34987, –                 |
| $K_6$    | 10857, –                  | 217,10               | 1181,95                  | 31843, –                 |
| $K_7$    | 10017, –                  | 200,30               | 1210,60                  | 31181, –                 |



Figuur 24 - Kosten voor functie koelen over 15 jaar

### Discussie uitputting koudebron

Voor koude valt op dat de kosten voor de temperatuurtrajecten met een intredetemperatuur van 10°C zowel qua aanschafwaarde als qua verbruik minder kosten. Na 15 jaar heeft de voordeligste situatie met 10°C als intredetemperatuur ongeveer 24200 euro gekost in totaal, terwijl de voordeligste situatie met 12°C als intredetemperatuur ongeveer 31200 euro in totaal heeft gekost. Bij 12°C zijn de kosten 28,9% hoger over een periode van 15 jaar.

Zoals in 2.1.2 is toegelicht wordt er tegenwoordig soms gekozen voor een intredetemperatuur van een koelbatterij van 12°C (grondwatertemperatuur) voor het geval dat de koudebron niet voldoende capaciteit zou hebben. Hiermee wordt voorkomen dat de reeds aanwezige warmtepomp moet worden ingezet als koelmachine.

In B.3.1 is uitgerekend dat er een jaarlijkse overschrijding van in de koudevraag door uitputting van de koudebron 13,3% moet zijn voordat het gebruik van een temperatuurtraject met een intredetemperatuur van 12°C voordeliger is dan het inzetten van een koelmachine.



## 8. Conclusies, aanbevelingen en discussie

### 8.1. Conclusies

Vanwege de strengere eisen aan het energieverbruik van gebouwen is er onderzocht bij welke temperatuurtrajecten van de koel- en verwarmingsbatterijen, het energieverbruik van de klimaatinstallatie van een gebouw het laagst is.

Het variëren van temperatuurtrajecten heeft invloed op het opwekkingsrendement van warmte- en koudeopwekking, op de grootte en daarmee het luchtzijdig drukverlies van de batterijen in de LBK en op het verbruik van de circulatiepomp. De verwachting was dat deze componenten bij verschillende temperaturen optimaal presteren, daarom is er voor zowel de koelbatterij en verwarmingsbatterij een temperatuurtraject gezocht waarbij het totale energieverbruik van de klimaatinstallatie het laagst is.

Voor het verwarmen met wko heeft het variëren van temperatuurtrajecten invloed op het opwekkingsrendement en de luchtzijdige drukverliezen van de warmtebatterijen. Omdat het temperatuurverschil tussen de in- en uittredetemperatuur van de batterij constant is gehouden, is er geen variatie in waterzijdige volumestromen van de warmtebatterij.

De intredetemperaturen van de temperatuurtrajecten van de warmtebatterij zijn gevarieerd van 30°C tot 55°C, in stappen van 5°C. De uittredetemperatuur lag hier telkens 10°C onder de intredetemperatuur. Naarmate de intredetemperatuur lager wordt, stijgt het opwekkingsrendement van de warmtepomp. De lagere temperaturen zorgen ook een slechtere warmteoverdracht van het water naar de lucht, waardoor er grotere warmtebatterijen nodig zijn. Hierdoor stijgt ook het verbruik van de ventilatoren. Het hogere ventilatorverbruik weegt echter niet op tegen de energiewinst in de warmteopwekking bij lage temperaturen. Een zo laag mogelijk temperatuurtraject levert het laagste energieverbruik op. Voor dit onderzoek is het temperatuurtraject voor de warmtebatterij waarbij het energieverbruik het laagst is 30°C – 20°C.

Voor het koelen met wko heeft het variëren met temperatuurtrajecten geen effect op het opwekkingsrendement. Wel leidden verschillende temperatuurtrajecten van koelbatterijen tot verschillen in luchtzijdige drukverliezen en waterzijdige volumestromen van de koelbatterij.

Voor koelbatterijen is onderzocht wat er zou gebeuren met het energieverbruik bij een variatie in intredetemperatuur, met een constant temperatuurverschil tussen de in- en uittredetemperatuur. Doordat de  $\Delta T$  constant is, blijft het verbruik van de circulatiepomp (de hulpenergie) ook constant. Uit dit deelonderzoek blijkt dat lagere temperaturen van koelwater leiden tot een grotere warmteoverdracht, welke leidt tot kleinere batterijen en dus een lager benodigd ventilatorvermogen.

De grootte van het temperatuurverschil tussen de in- en uittredetemperatuur van de koelbatterij leidt tot verschil in de waterzijdige volumestroom. Hierbij leidt een groter temperatuurverschil tot een kleinere volumestroom en daarmee een lager benodigd vermogen en verbruik van de circulatiepomp (de hulpenergie).



Er is voor koelbatterijen ook onderzoek gedaan naar de verschillen tussen een intredetemperatuur van 10°C en 12°C. Deze twee intredetemperaturen zijn doorerekend bij uittredetemperaturen van 18, 19 en 20°C. Uit deze vergelijking bleek dat een groter temperatuurverschil over koelbatterijen leidt tot een hoger luchtzijdig drukverlies. Omdat een grotere  $\Delta T$  ook leidt tot een lager energieverbruik van de circulatiepomp, is er een optimum te bepalen waar het opgesomde energieverbruik van de ventilator en de circulatiepomp het laagst is. Voor de onderzochte temperatuurtrajecten is bij een intredetemperatuur van 10°C het optimale temperatuurtraject 10°C – 18°C. Bij een intredetemperatuur van 12°C is het optimale temperatuurtraject 12°C – 19°C.

Om het energieverbruik van de klimaatinstallatie te minimaliseren, kan men met wko het beste met een zo laag mogelijke temperatuur verwarmen. Voor koeling met wko is het qua energieverbruik belangrijk dat de intredetemperatuur van de koelbatterij zo laag mogelijk is, waarna de uittredetemperatuur gevonden kan worden door het optimum te vinden tussen het energieverbruik van de circulatiepomp en de ventilator.

Als het kostenaspect wordt meegenomen veranderd er weinig aan de bovenstaande conclusies. Op termijn is het verwarmen met een zo laag mogelijke temperatuur het voordeligst. Voor koelen is de meest energiezuinige situatie zelfs het goedkoopst in aanschaf als qua exploitatiekosten. Als er rekening wordt gehouden met mogelijke uitputting van de koudebron, kan er gekozen worden voor het koelen met een temperatuurniveau gelijk aan die van het grondwater. In deze casus is dit rendabel bij een verwacht jaarlijks tekort aan capaciteit van de koudebron door uitputting van 13,3%.

## 8.2. Aanbevelingen

Voor een vervolgonderzoek is het aan te raden om de kans op uitputting van de koudebron te onderzoeken. Hoewel er veel energie en geld bespaard kan worden door te koelen met water van 10°C, leiden de energiekosten bij uitputting van de koudebron al snel tot een mogelijk hoger energieverbruik, vanwege het moeten inzetten van een koelmachine. Als er getwijfeld wordt over de capaciteit van de bron, is het waarschijnlijk beter om te koelen met water met hetzelfde temperatuurniveau als het grondwater. Klimaatverandering zou ook kunnen leiden tot een tekort aan capaciteit door een mogelijke grotere koudebehoefte. Dit zou een reden kunnen zijn om bij al bestaande wko's, met bijvoorbeeld te weinig capaciteit, te koelen met water met hetzelfde temperatuurniveau als het grondwater.

In dit onderzoek is de wko als constant aangenomen. Voor een vervolgonderzoek kan het interessant zijn om de invloed van de temperatuurtrajecten op het grondwaterdebiet te onderzoeken. Uit onderzoek bleek dat een verschil in  $\Delta T$  in de temperatuurtrajecten van invloed was op de volumestroom en de energievraag van de circulatiepompen. Deze veranderingen in volumestromen zouden mogelijk ook kunnen leiden tot grotere benodigde volumestromen in de wko, waardoor er een groter vermogen voor de grondwaterpomp nodig zou zijn.

Omdat voor koudeopwekking het opwekkingsrendement grotendeels gebaseerd is op de grondwaterpomp, zouden grotere volumes hier direct tot een groter benodigd pompvermogen, en



dus tot een lager opwekkingsrendement, kunnen leiden. Voor warmte is het opwekkingrendement vooral afhankelijk van de warmtepomp, een verandering in volumestroom zal waarschijnlijk minder invloed hebben op het opwekkingsrendement.

In dit onderzoek is er geen aandacht besteed aan de vorm van de overige afgiftesystemen naast de batterijen (denk aan radiatoren, klimaatplafonds of convectoren). In de praktijk zal de keuze van het meest geschikte afgiftesystemen afhankelijk zijn van de temperatuurtrajecten. Het energieverbruik, maar vooral de kosten van verschillende afgiftesystemen zullen per temperatuurtraject anders zijn. Mogelijk hebben deze zelfs invloed op het selecteren van de meest geschikte temperatuurtrajecten. Een verdiepend onderzoek met focus op Life Cycle costs zal hier meer inzicht in kunnen bieden.

### 8.3. Discussie

Voor de warmtevraag, koudevraag en de hulpenergie van de casus zijn veel aannames gedaan, gebaseerd op data uit de EPG-software. De energievragen van de casus zullen in de praktijk hoogstwaarschijnlijk afwijken van de gebruikte waarden in dit onderzoek. Toch zullen andere verbruikswaarden de conclusies van dit onderzoek niet beïnvloeden. Dit komt omdat de energievragen het uitgangspunt zijn voor de berekeningen van verschillende onderzochte situaties.

Dit betekent dat bij een verandering in energievraag, de energieverbruiken van situaties ten opzichte van de andere situaties evenveel zullen verschillen. Zo zal bijvoorbeeld bij een verandering in warmtevraag, het verbruik voor opwekking bij situatie  $W_1$  percentueel altijd evenveel verschillen van situatie  $W_2$ . Wel is het mogelijk dat bijvoorbeeld de energievraag van een specifiek component hoger uitvalt waardoor het optimale temperatuurtraject licht zou kunnen afwijken.

Om het energieverbruik van gebouwen exacter te voorspellen zal er vooral onderzoek gedaan moeten worden naar de gebruikstijden van verschillende componenten. Omdat de componenten veelal vraaggestuurd draaien is het toepassen van de openingstijden op een klimaatbestand niet toereikend. De NEN 7120 rekent voor componenten die niet continue draaien vaak met reductiefactoren. Deze zijn soms realistisch, echter zijn er ook veel waarden te eenvoudig versimpeld. Zo is bijvoorbeeld in de NEN 7120 de reductiefactor voor een vraaggestuurde circulatiepomp voor verwarmingswater een half maal de tijd in een jaar. Deze waarde zou preciezer te bepalen moeten zijn. Dit zou bijvoorbeeld mogelijk moeten zijn door de gebruikstijd te linken aan de energievraag voor warmte, een waarde die ook in deze norm wordt berekend.



## 9. Literatuur

- Bakema, G., Mathijssen, H., & Veld, W. H. (2010). *Bodemenergie als duurzame techniek*. Eindhoven: Euroforum uitgeverij BV.
- BodemenergieNL. (2016, 11 30). *Opslagconcepten*. Opgehaald van BodemenergieNL: <http://www.bodemenergienl.nl/Bodemenergie/Opslagconcepten>
- De Europese Commissie. (2014). *Verordening (EU) Re. 1253/2014 van de Commissie*. Brussel: De Europese Commissie.
- G. van der Linden, P. v. (1998). *Toegepaste Thermodynamica*. Baarn: HBuitgevers.
- Genootschap Onze Taal. (2011, augustus 2011). *Warmtekoudeopslag / warmte-koude-opslag / warmte/koude opslag*. Opgehaald van Genootschap Onze Taal: <https://onzetaal.nl/taaladvies/warmtekoudeopslag-warmte-koude-opslag-warmte-koude-opslag>
- Gerritsen, E., & Rodenburg-Vlot, M. (2010). *Bodemenergie les 3: Gebouwinstallaties*. Uitgeverij Euroforum .
- Grimm, N. R., & Rosaler, R. C. (1990). *Handbook of HVAC Design*. New York: McGraw-Hill.
- J.Ouwehand, Papa, T., Post, E., & Taal, A. (2011). *Toegepaste Energietechniek*. Den Haag: Sdu Uitgevers bv. .
- Knoll, W., Wagenaar, E., & Weele, A. v. (2002). *Handboek installatietechniek*. Rotterdam: Stichting Isso.
- Kreider, J. F. (2001). *Handbook of heating, ventilation and air conditioning*. London: CRC Press LCC.
- NEN. (2011). *NEN 7120: Energieprestatie van gebouwen - Bepalingsmethode*. Delft: Nederland Normalisatie-instituut.
- Schalkoort, T. (2009). *Klimaatinstallaties: Integratie van gebouw en installaties & overige gebouwinstallaties*. Delft: TU Delft .
- Taal, A. (2011). *Toegepaste energieleer*. Den Haag: Sdu Uitgevers bv.
- Taskforce WKO. (2009). *Groen licht voor bodemenergie*. Den Haag: Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.
- TVVL. (2015). *TVVL cursus Luchtbehandelingstechniek* . Woerden: Nederlandse technische vereniging voor installaties in gebouwen TVVL.
- VDL Klima. (-). *VDL Handboek installatietechniek*. Eindhoven: VDL Klima bv.
- Verplak, C. (2010). *Bodemenergie les 4: Grondwatersystemen*. Eindhoven: Euroforum uitgeverij bv.
- VLA. (2015). Voldoen aan eisen nieuwe ErP-verordening is wettelijke verplichting. *De Vereniging Leveranciers van Luchttechnische Apparaten*, 16-17.
- Wennekes, R. (2010). *Bodemenergie les 5: Bodemwarmtewisselaars*. Eindhoven: Euroforum Uitgeverij bv.
- Ziehl-Abegg AG. (2008). *High-performance centrifugal fans without scroll* . Kuenzelsau: Ziehl Abegg AG.



## Bijlage A. Berekeningen

### A.1. Warmte

#### A.1.1. Berekenen warmtebehoefte

Met het verwarmen van de lucht wordt er geen vocht toegevoegd, waardoor de  $\Delta T$  recht evenredig stijgt ten opzichte van de  $\Delta h$ . Er zal gerekend worden met de temperatuureisen gegeven in 4.4.

Het benodigd verwarmingsvermogen van de warmtebatterij wordt berekend met formule (9).

$$P_{\text{verwarming}} = \Phi_m \cdot \Delta h \quad [kW]$$

Waarbij:

$$\Phi_m = q \cdot \rho = \frac{23.000}{3600} \cdot 1,2 = 7,67 \frac{kg}{s}$$

Omdat er geen sprake is van verandering in relatieve luchtvochtigheid staat het enthalpieverschil gelijk aan het temperatuurverschil.

$$T_{\text{wens}} = 18^\circ C$$

$$T_{\text{dimensionering}} = 5^\circ C$$

Wat resulteert in:

$$P_W = 7,67 \cdot (18 - 5) = 99,67 \text{ kW}$$

#### A.1.2. Berekenen energieverbruik warmteopwekking

Er zal zoals eerder aangegeven in dit onderzoek gerekend worden aan de hand van de methode van de EPC-berekeningen. De rekenmethode van de NEN 7120 biedt de mogelijkheid om de energiebehoefte voor warmte te berekenen, echter is er dusdanig specifieke data nodig dat er besloten is een aanname te doen hiervoor. Voor het energieverbruik van de verwarming zal daarom uitgegaan worden van de gegevens uit de EPC-berekeningen uitgevoerd in de EPG-software *ENORM*.

In *ENORM* is reeds het hele gebouw bouwkundig ingevoerd, de toegepaste installaties en de gebruikerspatronen zijn ook ingevuld. De ingevulde waarden zijn doorgerekend om het Plantronics-pand goedgekeurd te krijgen voor de EPC-eisen.

Het energieverbruik voor de warmteopwekking kan worden berekend met formule 3.

$$E_W = \frac{Q_W \cdot F_{W;opw}}{\eta_{W;opw}} [MJ]$$

In *ENORM* is berekend dat de hoeveelheid gevraagde energie ten behoeve van warmte ( $Q_W$ ):

$$Q_W = 340.861 \text{ MJ}$$



Het opwekkingsrendement voor ruimteverwarming is volgens paragraaf 14.6 van de NEN 7120:

$$F_{W;opw} = 1,0$$

De opwekkingsrendementen  $\eta_{W;opw}$  zoals gegeven in 3.4.2 die gepaard gaan met de intredetemperaturen van de warmtebatterijen zoals genoemd in 5.1.1 zijn weergegeven in Tabel 21.

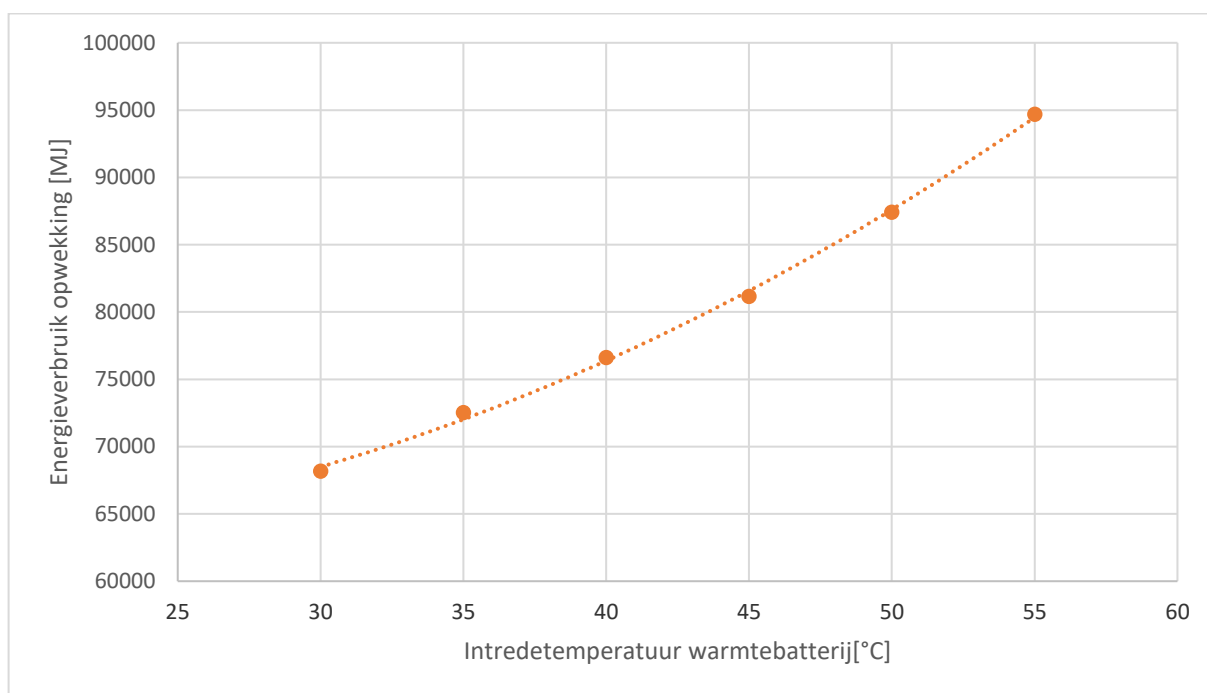
*Tabel 21 - Opwekkingrendementen gepaard met temperatuurtrajecten*

| Situatie nr. | Temperatuurtraject batterij               | Opwekkingsrendement |
|--------------|-------------------------------------------|---------------------|
| $W_1$        | $30^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$ | 5,0                 |
| $W_2$        | $35^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$ | 4,7                 |
| $W_3$        | $40^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ | 4,45                |
| $W_4$        | $45^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$ | 4,2                 |
| $W_5$        | $50^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$ | 3,9                 |
| $W_6$        | $55^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}$ | 3,6                 |

Per situatie kan vervolgens het energieverbruik voor de warmteopwekking worden berekend. Het energieverbruik  $E_W$  per intredetemperatuur is weergegeven in Tabel 22 en Figuur 25.

*Tabel 22 - Energieverbruik warmteopwekking per situatie*

| Situatie nr. | Temperatuurtraject batterij               | Energieverbruik $E_{W;i}$                                        |
|--------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| $W_1$        | $30^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$ | $E_{W;1} = \frac{340.861 \cdot 1,0}{5,0} = 68.172,2 \text{ MJ}$  |
| $W_2$        | $35^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$ | $E_{W;2} = \frac{340.861 \cdot 1,0}{4,7} = 72.523,6 \text{ MJ}$  |
| $W_3$        | $40^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ | $E_{W;3} = \frac{340.861 \cdot 1,0}{4,45} = 76.598,0 \text{ MJ}$ |
| $W_4$        | $45^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$ | $E_{W;4} = \frac{340.861 \cdot 1,0}{4,2} = 81.157,4 \text{ MJ}$  |
| $W_5$        | $50^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$ | $E_{W;5} = \frac{340.861 \cdot 1,0}{3,9} = 87.400,3 \text{ MJ}$  |
| $W_6$        | $55^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}$ | $E_{W;6} = \frac{340.861 \cdot 1,0}{3,6} = 94.683,6 \text{ MJ}$  |



Figuur 25 - Energieverbruik verwarmen per temperatuurniveau

### A.1.3. Hulpenergie

De hoeveelheid hulpenergie wordt bepaald aan de hand van formule 5. De in te vullen waarden zijn genoemd in NEN 7120: 14.7.2.3.

$$E_{W,hulp} = P_{W,hulp} \cdot t_{w,hulp} [MJ]$$

$P_{W,hulp}$  kan worden berekend met formule (12). De gebruiksoppervlakte is  $3.014 \text{ m}^2$ , het specifieke vermogen voor de circulatiepomp is  $0,25 \text{ W/m}^2$  volgens NEN 7120: 14.7.2.3

$$P_{W,hulp} = P_{W,hulp;spec} \cdot A_g = 0,25 \cdot 3.014 = 753,5 \text{ W}$$

De aantijd is berekend met formule (14):

$$t_{w,hulp} = t_{jr} \cdot f_{w,hulp} [Ms]$$

Er zitten  $31,536 \text{ Ms}$  in een jaar. NEN 7120: 14.7.2.3 geeft aan dat de waarde voor  $f_{w,hulp}$   $0,5$  is vanwege de toerenregeling in de installatie. De norm geeft aan dat deze waarde gekozen is met het oog op eenvoud. In de praktijk zal deze waarde lager zijn. Het pand is zoals vermeld in 4.4 inderdaad 12 uur per dag open, echter is het moet deze waarde vermenigvuldigd worden met een factor  $5/7$  omdat het pand in het weekend gesloten is. Feestdagen zijn niet meegenomen.

$$t_{w,hulp} = 31,536 \cdot 0,5 \cdot \frac{5}{7} = 11.262,9 \text{ Ms}$$



De totale hoeveelheid hulpenergie is vervolgens te berekenen met formule 5. Deze waarde is geldig voor alle zes de situaties omdat de volumestroom door de warmtebatterij constant is.

$$E_{W;hulp} = P_{W;hulp} \cdot t_{W;hulp} = 753,5 \cdot 11.262,9 = 8.486,6 \text{ MJ}$$

## A.2. Koude

### A.2.1. Berekenen koudebehoefte

Om de benodigde capaciteit van de koelbatterijen te berekenen zullen de dimensioneringswaarden van de casus gebruikt worden. Het koelelement moet de ontwerpbuitencondities 28°C/ 55% RV kunnen koelen naar 15°C/95% RV. Het benodigde koelvermogen wordt berekend met de hulp van formule (1).

$$P_{koeling} = \Phi_m \cdot \Delta h$$

Waarbij:

$$\Phi_m = \frac{q}{3600} \cdot \rho_{lucht} = \frac{23.000}{3600} \cdot 1,2 = 7,67 \text{ kg/s}$$
$$\Delta h = h_{in} - h_{wens} \text{ [kJ/kg]}$$

De individuele specifieke enthalpiën worden berekend met formule (4). Knoll et al. (2002) geven aan dat deze als volgt ingevuld kan worden:

$$h = 1,006\theta + x \cdot (2491 + 1,926\theta) \text{ [kJ/kg]}$$

Waarbij:

$$\theta = \text{Temperatuur} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$x = \text{g water per kg droge lucht; bepaald door Mollier diagram} \text{ [g/kg]}$$

De hoeveelheid water per kg droge lucht voor beide situaties zijn bepaald met behulp van het Mollier Diagram. Hieruit blijkt dat voor 28°C/ 55% RV en 15°C/95% RV de x waarden respectievelijk 13,1 en 10,1 g/kg zijn.

De enthalpiën zijn vervolgens:

$$h_{in} = 1,006(28) + 0,0131 \cdot (2491 + 1,926 \cdot (28)) = 61,51 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{wens} = 1,006(15) + 0,0101 \cdot (2491 + 1,926 \cdot (15)) = 40,54 \text{ kJ/kg}$$

Hieruit volgt:

$$P_k = 7,67 \cdot (61,51 - 40,54) = 160,77 \text{ kW}$$

### A.2.2. Berekenen energieverbruik koudeopwekking

Voor de koeling wordt een vergelijkbare methode gebruikt als bij het berekenen van het energieverbruik van warmteopwekking. Er zal wederom data uit de EPG-software worden gehaald.



Het energieverbruik voor koudeopwekking kan worden berekend met formule (6).

$$E_K = \frac{Q_K \cdot F_{K;opw}}{\eta_{K;opw}} [MJ]$$

In *ENORM* is berekend dat de hoeveelheid gevraagde energie ten behoeve van koude ( $Q_K$ ):

$$Q_K = 210.115 \text{ MJ}$$

Het opwekkingsrendement voor ruimtekoeling is volgens paragraaf 17.5.3 van de NEN 7120:

$$F_{K;opw} = 1,0$$

Het energieverbruik ten behoeve van koude wordt berekend met de formules opgesteld in 3.3.2. Voor alle situaties geldt:

$$E_K = \frac{Q_K \cdot F_{K;opw}}{\eta_{K;opw}} = \frac{210.115 \cdot 1,0}{12} = 17.510 \text{ MJ}$$

### A.2.3. Hulpenergie

De hulpenergie van de referentiesituatie kan forfaitair berekend worden met formule (8). Zoals in 3.7.1 is toegelicht is zal dit bij de variatie in temperatuurverschil en volumestroom niet toereikend zijn. Daarom zal de forfaitaire waarde van de circulatiepomp worden vervangen door de formule gegeven in 3.6. De hoeveelheid hulpenergie voor koeling wordt berekend met formule (28).

$$E_{K;hulp} = f_K \cdot P_{circ} \cdot t_K \quad [MJ] \quad (28)$$

Waarbij:

|            |                                                                        |        |
|------------|------------------------------------------------------------------------|--------|
| $f_K$      | = Factor voor bedrijfstijd, en toerenregeling voor de circulatiepompen | $[-]$  |
| $P_{circ}$ | = Het vermogen van de circulatiepomp                                   | $[kW]$ |
| $t_K$      | = De nominale aan-tijd van het koelsysteem                             | $[s]$  |

Door op deze wijze de hulpenergie te berekenen zal het mogelijk zijn de effecten van het verschil in grootte van temperatuurtrajecten te berekenen. Het nadeel in dit specifieke onderzoek is dat het vermogen van de circulatiepomp niet berekend kan worden voor deze casus. De manometrische opvoerdruk is niet bekend, evenals het rendement.

#### **Bepaling referentiewaarde vermogen circulatiepomp**

Omdat er geen data beschikbaar is omtrent het leidingsysteem, is er gekozen om door middel van terugrekenen deze manometrische opvoerdruk te bepalen. Voor het rendement zal ook een aanname worden gedaan. Om  $P_{circ}$  te bepalen zullen  $E_{K;hulp}$  en  $t_K$  bekend moeten zijn. De toegepaste methode zal niet exact zijn in de absolute zin, maar de verschillen tussen situaties zullen relatief gelijk blijven. De referentiewaarde voor  $E_{K;hulp}$  zal uit de EPG-software worden gehaald.



$$E_{K;hulp;ref} = 10850 \text{ MJ}$$

De referentiesituatie gaat uit van de situatie zoals bij casus en dus van een temperatuurtraject van 12°C-19°C.

### Bepaling van de aan-tijd hulpenergie

De waarde voor  $t_K$  wordt in de NEN 7120 forfaitair berekend met formule (29).

$$t_K = \frac{Q_K}{1.000 \cdot P_{K;opw}} \quad [Ms] \quad (29)$$

Waarbij:

$Q_K$  = Gevraagde hoeveelheid energie voor koude. [MJ]

$P_{K;opw}$  = Thermisch vermogen koudeopslag [kW]

Deze methode gaat er echter van uit dat er alleen op maximaal vermogen wordt gepompt, wat in de realiteit niet het geval is. Er is daarom gekozen om voor het bepalen van  $t_K$  gebruik te maken van het interne rekenmodel "Jaarvermogens luchtbehandeling RM004C" van Techniplan.

Dit is een document waarmee de vermogens en het verbruik van klimaatinstallaties berekend kan worden. In dit document kunnen de warmte en koude eisen worden ingevuld waarna het vermogen wordt berekend. De gebruikstijden en dagen kunnen ook worden ingevuld, waarna het jaarlijks energieverbruik wordt uitgerekend. Dit wordt berekend aan de hand van een klimaatbestand.

Dit klimaatbestand is een lijst met het aantal uur per jaar het een bepaalde buitentemperatuur is. In het document zijn er drie keuzes in klimaatdata, namelijk '64/65', '71/80' en de RA2008EN. Er is gekozen voor de RA2008EN. Dit is een samenstelling van diverse maanden tussen 1986 en 2004, afkomstig van de NEN 5060. Dit is een model met het oog op klimaatverandering, gemaakt voor de toekomst.

Wanneer de openingstijden van het gebouw en de vereiste temperaturen zoals aangegeven in Tabel 11 zijn ingevuld geeft het bestand aan dat het aantal uur dat de koelinstallatie aanstaat 1.059 uur is. Dit is gelijk aan 3,812 Ms. Ergo:

$$t_K = 3,812 \text{ Ms}$$

### Bepaling referentievermogen circulatiepomp

Met formule (28) kan het vermogen van de circulatiepomp worden berekend. De in te vullen waarden voor de bedrijfstijdfactor is te vinden in NEN 7120: 17.6.

$$f_K = 1,0$$

Het omschrijven en vervolgens invullen van formule (28) geeft een referentievermogen voor de circulatiepomp:

$$P_{circ;ref} = \frac{E_{K;hulp;ref}}{f_K \cdot t_K} = \frac{10.850}{1,0 \cdot 3,812} = 2.846 \text{ W}$$



### Bepalen referentie-manometrische opvoerdruk

Bij de referentiesituatie is het temperatuurtraject  $12^{\circ}\text{C} - 19^{\circ}\text{C}$ . De volumestroom is hier 5,22 l/s (zie bijlage C.2). Voor het rendement is een aanname gedaan van 75%. Na het herschrijven en invullen van formule (21) kan de referentie-manometrische opvoerdruk worden berekend.

$$p_{man;ref} = \frac{P_{circ;ref} \cdot \eta}{\Phi_V} = \frac{2.846 \cdot 0,75}{0,00522} = 408,91 \text{ kPa}$$

Deze druk is geldig voor alle situaties aangezien het drukverlies van de waterzijde gelijk blijft bij de verschillende batterijen (zie bijlage C.2).

Voor de referentiesituatie van koude gelden nu de volgende gegevens:

*Tabel 23 - Gegevens referentiesituatie koude*

|                    |                                           |
|--------------------|-------------------------------------------|
| Temperatuurtraject | $12^{\circ}\text{C} - 19^{\circ}\text{C}$ |
| $\Delta T$         | $7^{\circ}\text{C}$                       |
| $P_{circ}$         | 2,846 kW                                  |
| $E_{K;hulp}$       | 10850 MJ                                  |

### Berekening hulpenergie per situatie

In totaal worden er 7 situaties doorgerekend. De volumestroom per situatie gegeven in bijlage C.2 staan weergegeven in Tabel 24.

*Tabel 24 - Volumestroom per situatie*

| Situatie   | Temperatuurtraject [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Volumestroom [l/s] |
|------------|-------------------------------------------|--------------------|
| $K_1$      | 10 – 20                                   | 3,65               |
| $K_2$      | 10 – 19                                   | 4,05               |
| $K_3$      | 10 – 18                                   | 4,57               |
| $K_4$      | 11 – 19                                   | 4,56               |
| $K_5$      | 12 – 20                                   | 4,55               |
| $K_6^{39}$ | 12 – 19                                   | 5,22               |
| $K_7$      | 12 – 18                                   | 6,07               |

---

<sup>39</sup> Referentiesituatie



Als eerst zal het vermogen van de circulatiepomp per situatie worden doorgerekend met formule (21).

Tabel 25 - Berekeningen vermogen circulatiepomp per situatie

| Situatie nr. | Temperatuurtraject [°C] | Vermogen circulatiepomp ( $P_{circ;i}$ )                           |
|--------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| $K_1$        | 10 – 20                 | $P_{circ;1} = \frac{408,91 \cdot 0,00365}{0,75} = 1,99 \text{ kW}$ |
| $K_2$        | 10 – 19                 | $P_{circ;2} = \frac{408,91 \cdot 0,00405}{0,75} = 2,21 \text{ kW}$ |
| $K_3$        | 10 – 18                 | $P_{circ;3} = \frac{408,91 \cdot 0,00457}{0,75} = 2,49 \text{ kW}$ |
| $K_4$        | 11 – 19                 | $P_{circ;4} = \frac{408,91 \cdot 0,00456}{0,75} = 2,49 \text{ kW}$ |
| $K_5$        | 12 – 20                 | $P_{circ;5} = \frac{408,91 \cdot 0,00455}{0,75} = 2,48 \text{ kW}$ |
| $K_6$        | 12 – 19                 | $P_{circ;6} = \frac{408,91 \cdot 0,00522}{0,75} = 2,85 \text{ kW}$ |
| $K_7$        | 12 – 18                 | $P_{circ;7} = \frac{408,91 \cdot 0,00607}{0,75} = 3,31 \text{ kW}$ |

Vervolgens zal het jaarlijks energieverbruik van hulpenergie per situatie worden berekend aan de hand van formule (28).

Tabel 26 - Berekeningen hulpenergie per situatie<sup>40</sup>

| Situatie nr. | Temperatuurtraject [°C] | Hulpenergie $E_{K;hulp;i}$                                                  |
|--------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $K_1$        | 10 – 20                 | $E_{K;hulp;1} = 1,0 \cdot 1,99 \cdot 10^3 \cdot 3,812 = 7.586,0 \text{ MJ}$ |
| $K_2$        | 10 – 19                 | $E_{K;hulp;2} = 1,0 \cdot 2,21 \cdot 10^3 \cdot 3,812 = 8.417,3 \text{ MJ}$ |
| $K_3$        | 10 – 18                 | $E_{K;hulp;3} = 1,0 \cdot 2,49 \cdot 10^3 \cdot 3,812 = 9.498,1 \text{ MJ}$ |
| $K_4$        | 11 – 19                 | $E_{K;hulp;4} = 1,0 \cdot 2,49 \cdot 10^3 \cdot 3,812 = 9.477,3 \text{ MJ}$ |
| $K_5$        | 12 – 20                 | $E_{K;hulp;5} = 1,0 \cdot 2,48 \cdot 10^3 \cdot 3,812 = 9.456,5 \text{ MJ}$ |
| $K_6$        | 12 – 19                 | $E_{K;hulp;6} = 1,0 \cdot 2,85 \cdot 10^3 \cdot 3,812 = 10.850 \text{ MJ}$  |
| $K_7$        | 12 – 18                 | $E_{K;hulp;7} = 1,0 \cdot 3,31 \cdot 10^3 \cdot 3,812 = 12.616 \text{ MJ}$  |

<sup>40</sup> Berekeningen zijn hier tussentijds afgerond weergegeven, voor tussenberekeningen is niet afgerond.



### A.3. Ventilatie

Voor het berekenen van het verbruik van de ventilatie is eerst het asvermogen worden berekend. Er is onderscheid gemaakt in het benodigd ventilatievermogen voor de warmtebatterijen en koelbatterijen.

#### A.3.1. Asvermogen ventilator

Voor de warmtebatterijen en koelbatterijen zijn de drukverliezen bekend (zie 5.1). Het asvermogen van de ventilator kan worden berekend met formule (15). Het luchtzijdig debiet en het ventilatorrendement zijn hier constant, het drukverlies is de enige variabele in de vermogensberekening. Dit maakt het mogelijk om het specifiek benodigd ventilatorvermogen per batterij te berekenen om de invloed van de temperatuurtrajecten onderling te vergelijken.

Het asvermogen van de ventilatoren is in drie stukken berekend. Eerst is het vermogen benodigd voor het drukverlies van de toevoerkast zonder batterijen berekend. Daarna is het benodigd asvermogen voor de koude en warmtebatterijen per situatie berekend. Het verbruik van de retourkast is constant, er zijn alleen asvermogens berekend voor de toevoerkast.

##### A.3.1.1. Asvermogen toevoer en retourkast

De theoretische asvermogens van de ventilatoren in de toevoerkast kunnen berekend worden met formule (15). Het volume wordt aangenomen op  $6.388 \text{ m}^3/\text{s}$  en het rendement<sup>41</sup> op 0,75. In deze casus is het asvermogen oorspronkelijk over twee parallelle ventilatoren verdeeld, dit is echter niet relevant voor dit onderzoek. Er zal alleen met het totaal asvermogen gerekend worden. Zoals in 4.4.2 is berekend, is het interne en externe drukverlies van de toevoerkast exclusief warmte- en koelbatterij  $756 [Pa]$ . Het asvermogen benodigd voor de toevoerkast exclusief batterijen is:

$$P_{as;kast;toe;rest} = \frac{6,388 \cdot 756}{0.75} = 6,439 \text{ kW}$$

De retourventilatoren worden niet beïnvloed en zullen constant blijven met een asvermogen van  $3,17 \text{ kW}$  per ventilator.<sup>42</sup>

$$P_{as;kast;af} = 2 \cdot 3,17 = 6,340 \text{ kW}$$

##### A.3.1.2. Asvermogen koelbatterij

Voor de koelbatterij zal het asvermogen per situatie worden berekend. De drukverliezen per situatie staan weergegeven in Tabel 27. Vervolgens is in

---

<sup>41</sup> Gebaseerd op de rendementen van de gebruikte ventilatoren in de LBK uit de casus.

<sup>42</sup> Gebaseerd op data casus



Tabel 28 per situatie het benodigd asvermogen om het drukverlies van de koelbatterijen te overkomen berekend.

*Tabel 27 - Drukverliezen koelbatterijen*

| Situatie nr. | Temperatuurtraject batterij [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Drukverlies [ $\text{Pa}$ ] |
|--------------|----------------------------------------------------|-----------------------------|
| $K_1$        | 10 – 20                                            | 211                         |
| $K_2$        | 10 – 19                                            | 179                         |
| $K_3$        | 10 – 18                                            | 158                         |
| $K_4$        | 11 – 19                                            | 214                         |
| $K_5$        | 12 – 20                                            | 270                         |
| $K_6$        | 12 – 19                                            | 226                         |
| $K_7$        | 12 – 18                                            | 205                         |

*Tabel 28 – Asvermogen ten behoeve van koelbatterijen per situatie*

| Situatie nr. | Temperatuurtraject [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Drukverlies [ $\text{Pa}$ ] | $P_{as;K;i}$                                                   |
|--------------|-------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------|
| $K_1$        | 10 – 20                                   | 211                         | $P_{as;K;1} = \frac{6,388 \cdot 211}{0.75} = 1,797 \text{ kW}$ |
| $K_2$        | 10 – 19                                   | 179                         | $P_{as;K;2} = \frac{6,388 \cdot 179}{0.75} = 1,525 \text{ kW}$ |
| $K_3$        | 10 – 18                                   | 158                         | $P_{as;K;3} = \frac{6,388 \cdot 158}{0.75} = 1,346 \text{ kW}$ |
| $K_4$        | 11 – 19                                   | 214                         | $P_{as;K;4} = \frac{6,388 \cdot 214}{0.75} = 1,823 \text{ kW}$ |
| $K_5$        | 12 – 20                                   | 270                         | $P_{as;K;5} = \frac{6,388 \cdot 270}{0.75} = 2,300 \text{ kW}$ |
| $K_6$        | 12 – 19                                   | 226                         | $P_{as;K;6} = \frac{6,388 \cdot 226}{0.75} = 1,925 \text{ kW}$ |
| $K_7$        | 12 – 18                                   | 205                         | $P_{as;K;7} = \frac{6,388 \cdot 205}{0.75} = 1,746 \text{ kW}$ |



### A.3.1.3. Asvermogen warmtebatterijen

Voor de warmtebatterij zal het asvermogen ook per situatie worden berekend. De drukverliezen per situatie staan weergegeven in Tabel 29. Vervolgens is in Tabel 30 per situatie het benodigd asvermogen om het drukverlies van de warmtebatterijen te overkomen berekend.

*Tabel 29 - Drukverliezen warmtebatterijen*

| Situatie nr. | Temperatuurtraject batterij [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Drukverlies [ $\text{Pa}$ ] |
|--------------|----------------------------------------------------|-----------------------------|
| $W_1$        | 30 – 20                                            | 39                          |
| $W_2$        | 35 – 25                                            | 34                          |
| $W_3$        | 40 – 30                                            | 28                          |
| $W_4$        | 45 – 35                                            | 20                          |
| $W_5$        | 50 – 40                                            | 20                          |
| $W_6$        | 55 – 45                                            | 17                          |

*Tabel 30 – Asvermogen ten behoeve van warmtebatterijen per situatie*

| Situatie nr. | Temperatuurtraject [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Drukverlies [ $\text{Pa}$ ] | $P_{as;W;i}$                                                  |
|--------------|-------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|
| $W_1$        | 30 – 20                                   | 39                          | $P_{as;W;1} = \frac{6,388 \cdot 39}{0,75} = 0,332 \text{ kW}$ |
| $W_2$        | 35 – 25                                   | 34                          | $P_{as;W;2} = \frac{6,388 \cdot 34}{0,75} = 0,290 \text{ kW}$ |
| $W_3$        | 40 – 30                                   | 28                          | $P_{as;W;3} = \frac{6,388 \cdot 28}{0,75} = 0,238 \text{ kW}$ |
| $W_4$        | 45 – 35                                   | 20                          | $P_{as;W;4} = \frac{6,388 \cdot 20}{0,75} = 0,170 \text{ kW}$ |
| $W_5$        | 50 – 40                                   | 20                          | $P_{as;W;5} = \frac{6,388 \cdot 20}{0,75} = 0,170 \text{ kW}$ |
| $W_6$        | 55 – 45                                   | 17                          | $P_{as;W;6} = \frac{6,388 \cdot 17}{0,75} = 0,145 \text{ kW}$ |



#### A.3.1.4. Berekening effectief elektrisch vermogen ventilatoren

Het effectieve elektrisch vermogen kan worden berekend met formule (16).

$$P_{eff} = 0,8 \cdot P_{nom}$$

Hierbij is 0,8 de reductiefactor voor overdimensionering van de elektromotor.  $P_{nom}$  wordt berekend met formule (17).

$$P_{nom} = P_{as} / \eta_{elm}$$

Het rendement van de elektromotoren heeft volgens NEN 8088-1: Tabel 18 een forfaitaire waarde van 85%, indien  $4\,000 \leq P_{as} < 10\,000$ . Aan deze voorwaarde voldoen alle situaties.

*Validatie:*

*Het rendement van de ventilatoren uit de casus is 88%, de waarde uit de NEN 8088-1 is dus een realistisch aanneembare waarde.*

Het combineren van formules (16) en (17) geeft formule (30):

$$P_{eff} = 0,8 \cdot P_{as} / \eta_{elm} \quad [kW] \quad (30)$$

De effectieve vermogens benodigd voor het drukverlies van de batterijen zijn per situatie berekend, in Tabel 31 voor de warmtebatterijen en in Tabel 32 voor de koelbatterijen.

*Tabel 31 - Effectieve vermogens warmtebatterijen*

| Situatie nr. | Temperatuur-traject [ $^{\circ}C$ ] | $P_{as;w,i}$ [kW] | $P_{eff;w,i}$ [kW]                                   |
|--------------|-------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------|
| $W_1$        | 30 – 20                             | 0,332             | $P_{eff;w;1} = 0,8 \cdot \frac{0,332}{0,85} = 0,312$ |
| $W_2$        | 35 – 25                             | 0,290             | $P_{eff;w;2} = 0,8 \cdot \frac{0,290}{0,85} = 0,273$ |
| $W_3$        | 40 – 30                             | 0,238             | $P_{eff;w;3} = 0,8 \cdot \frac{0,238}{0,85} = 0,224$ |
| $W_4$        | 45 – 35                             | 0,170             | $P_{eff;w;4} = 0,8 \cdot \frac{0,170}{0,85} = 0,160$ |
| $W_5$        | 50 – 40                             | 0,170             | $P_{eff;w;5} = 0,8 \cdot \frac{0,170}{0,85} = 0,160$ |
| $W_6$        | 55 – 45                             | 0,145             | $P_{eff;w;6} = 0,8 \cdot \frac{0,145}{0,85} = 0,136$ |



Tabel 32 - Effectieve vermogens koelbatterijen

| Situatie nr. | Temperatuur-traject [ $^{\circ}\text{C}$ ] | $P_{as;K;i}$ [kW] | $P_{eff;K;i}$ [kW]                                   |
|--------------|--------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------|
| $K_1$        | 10 – 20                                    | 1,797             | $P_{eff;K;1} = 0,8 \cdot \frac{1,797}{0,85} = 1,691$ |
| $K_2$        | 10 – 19                                    | 1,525             | $P_{eff;K;2} = 0,8 \cdot \frac{1,525}{0,85} = 1,435$ |
| $K_3$        | 10 – 18                                    | 1,346             | $P_{eff;K;3} = 0,8 \cdot \frac{1,346}{0,85} = 1,267$ |
| $K_4$        | 11 – 19                                    | 1,823             | $P_{eff;K;4} = 0,8 \cdot \frac{1,823}{0,85} = 1,716$ |
| $K_5$        | 12 – 20                                    | 2,300             | $P_{eff;K;5} = 0,8 \cdot \frac{2,300}{0,85} = 2,165$ |
| $K_6$        | 12 – 19                                    | 1,925             | $P_{eff;K;6} = 0,8 \cdot \frac{1,925}{0,85} = 1,812$ |
| $K_7$        | 12 – 18                                    | 1,746             | $P_{eff;K;7} = 0,8 \cdot \frac{1,746}{0,85} = 1,643$ |

Het effectieve vermogen voor het overkomen van het drukverlies van de rest van de toevoerkast, gebaseerd op  $P_{as;kast;toe;rest}$  is:

$$P_{eff;kast;toe;rest} = 0,8 \cdot \frac{6,439}{0,85} = 6,060 \text{ kW}$$

Het effectieve vermogen voor het overkomen van het drukverlies van de retourkast, gebaseerd op  $P_{as;kast;af}$  is:

$$P_{eff;kast;af} = 0,8 \cdot \frac{6,340}{0,85} = 5,967 \text{ kW}$$

### A.3.2. Berekening verbruik ventilatoren

Met de formules gegeven in paragraaf 3.5.3 is het jaarlijkse energieverbruik van de ventilatoren te berekenen. Als eerste zal de dimensieloze correctiefactor voor de bezettingstijd berekend worden, deze is gebouwgebonden en voor alle situaties gelijk.

#### A.3.2.1. Bezettingstijd

Er zijn in deze casus 2 zones gedefinieerd. De eerste zone heeft een kantoorfunctie met een oppervlakte van  $1482 \text{ m}^2$ . De tweede zone heeft een bijeenkomstfunctie met een oppervlakte van



$1532 \text{ m}^2$ . De correctiefactoren per gebruiksfunctie zijn 0,3 voor de kantoorfunctie en 0,15 voor de bijeenkomstfunctie<sup>43</sup>. Ingevuld in formule (20) geeft dit:

$$f_{T;bez} = \frac{1482 \cdot 0,3 + 1532 \cdot 0,15}{3014} = 0,2238$$

Het aantal seconden in een jaar is:

$$t_{jr} = 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 31536000 \text{ s} = 31,536 \text{ Ms}$$

Vermenigvuldigd met de dimensieloze correctiefactor geeft dit de bezettingstijd per jaar:

$$t_{bez} = 0,2238 \cdot 31,536 = 7,058 \text{ Ms/jr}$$

#### *Validatie*

Dit getal lijkt aan de lage kant, maar het vermogen is berekend voor maximale bezetting, bovendien wordt er vraaggestuurd geventileerd d.m.v. CO<sub>2</sub> detectie in de casus. Aannemende dat het kantoor nooit 100% bezet is, plus aannemende dat degene die aanwezig zijn gemiddeld ongeveer 8 uur per dag aanwezig zijn, zal de bezetting nooit maximaal zijn. Een simpele berekening wijst uit dat de uitgerekende waarde waarheidsgetrouw is.

Er wordt uitgegaan dat het gebouw 5 dagen per week open is, voor 12 uur per geopende dag. Daarnaast is de aanname gedaan dat het personeel gemiddeld 8 uur per dag aanwezig is.

$$f_{T;bez;validatie} = \frac{5}{7} \cdot \frac{12}{24} \cdot \frac{8}{12} = 0,2381$$

$$t_{bez;validatie} = 0,2381 \cdot 31,536 = 7,509 \text{ Ms/jr}$$

Hierbij is aangenomen dat het maximaal vermogen berekend is voor maximale bezetting van het pand. In werkelijkheid zal dit getal dus nog lager zijn. Dit is enerzijds omdat het pand nooit geheel bezet is en anderzijds omdat de bijeenkomstfuncties niet 8 uur per dag bezet zullen zijn. Voor verdere berekeningen zal de waarde  $t_{bez}$  berekend met formule (20) worden gebruikt.

#### **A.3.2.2. Berekening energieverbruik**

Het verbruik van de ventilatie is berekend met formule (19). De bezettingstijd berekend in A.3.2.1 is voor deze casus 7,058 Ms per jaar. Het energieverbruik benodigd voor het drukverlies van de batterijen is per situatie berekend, Deze zijn weergegeven in Tabel 33 voor de warmtebatterijen en in Tabel 34 voor de koelbatterijen.

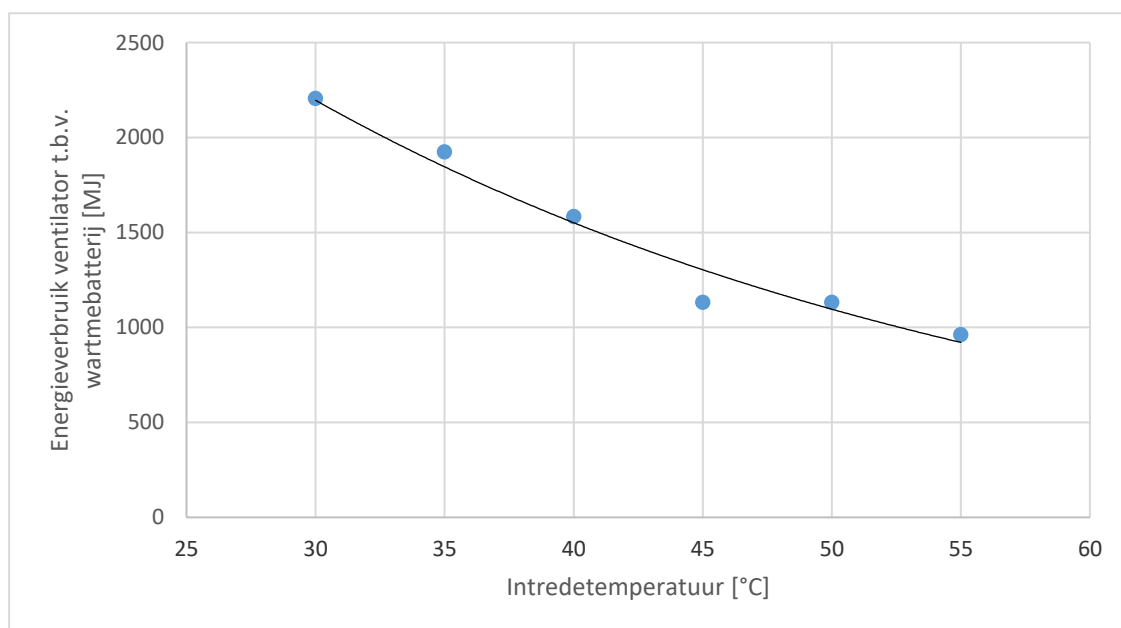
---

<sup>43</sup> NEN 8088-1: Tabel 1



Tabel 33 - Energieverbruik ventilatoren voor drukverlies warmtebatterijen per situatie

| Situatie nr. | Temperatuur-traject [ $^{\circ}\text{C}$ ] | $P_{eff;W;i}$ [W] | $E_{V;W;i}$ [MJ]                     |
|--------------|--------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| $W_1$        | 30 – 20                                    | 312               | $E_{V;W;1} = 312 \cdot 7,058 = 2202$ |
| $W_2$        | 35 – 25                                    | 273               | $E_{V;W;2} = 273 \cdot 7,058 = 1927$ |
| $W_3$        | 40 – 30                                    | 224               | $E_{V;W;3} = 224 \cdot 7,058 = 1581$ |
| $W_4$        | 45 – 35                                    | 160               | $E_{V;W;4} = 160 \cdot 7,058 = 1129$ |
| $W_5$        | 50 – 40                                    | 160               | $E_{V;W;5} = 160 \cdot 7,058 = 1129$ |
| $W_6$        | 55 – 45                                    | 136               | $E_{V;W;6} = 136 \cdot 7,058 = 960$  |

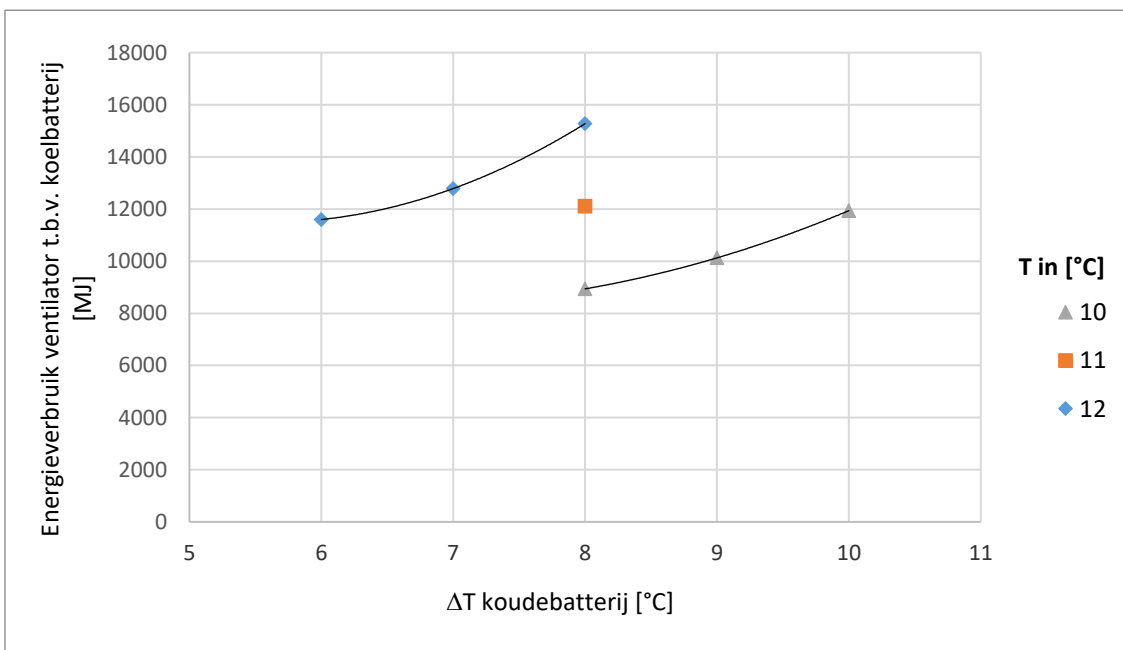


Figuur 26 - Energieverbruik ventilatie voor drukverlies warmtebatterijen.

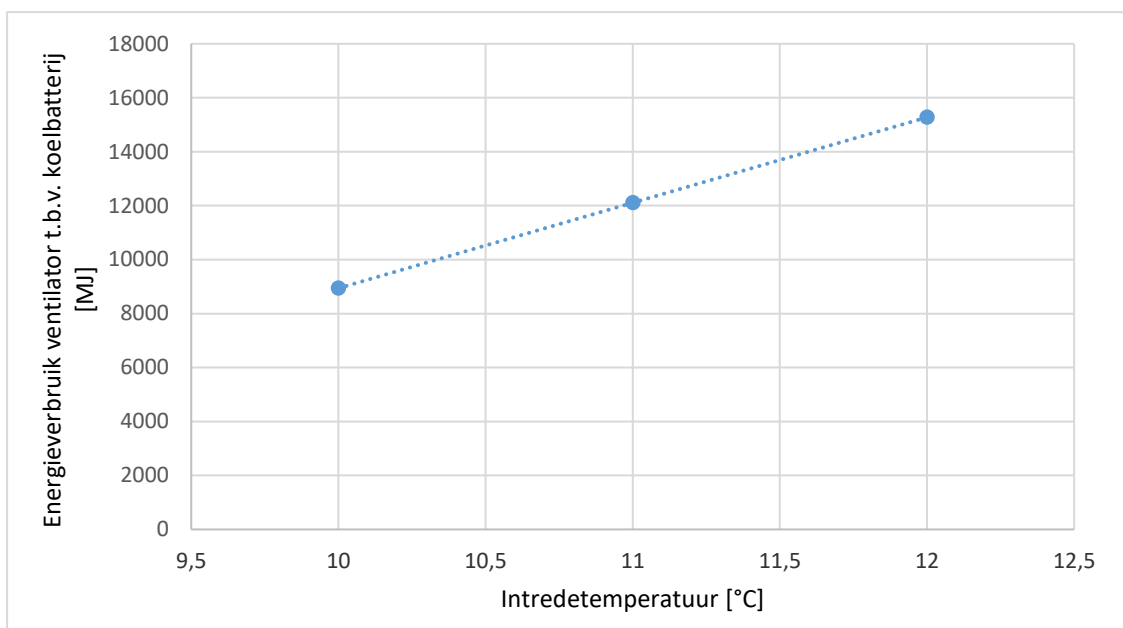
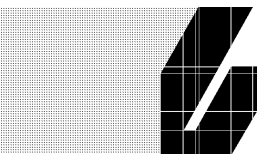


Tabel 34 - Energieverbruik ventilatoren voor drukverlies koelbatterijen per situatie

| Situatie nr. | Temperatuur-traject [ $^{\circ}\text{C}$ ] | $P_{eff,K;i}$ [W] | $E_{V;K;i}$ [MJ]                        |
|--------------|--------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|
| $K_1$        | 10 – 20                                    | 1691              | $E_{V;K;1} = 1.691 \cdot 7,058 = 11935$ |
| $K_2$        | 10 – 19                                    | 1435              | $E_{V;K;2} = 1.435 \cdot 7,058 = 10128$ |
| $K_3$        | 10 – 18                                    | 1267              | $E_{V;K;3} = 1.267 \cdot 7,058 = 8942$  |
| $K_4$        | 11 – 19                                    | 1716              | $E_{V;K;4} = 1.716 \cdot 7,058 = 12112$ |
| $K_5$        | 12 – 20                                    | 2165              | $E_{V;K;5} = 2.165 \cdot 7,058 = 15281$ |
| $K_6$        | 12 – 19                                    | 1812              | $E_{V;K;6} = 1.812 \cdot 7,058 = 12789$ |
| $K_7$        | 12 – 18                                    | 1643              | $E_{V;K;7} = 1.643 \cdot 7,058 = 11596$ |



Figuur 27 - Energieverbruik ventilatie voor drukverlies koelbatterijen



*Figuur 28 - Energieverbruik ventilatie voor koelbatterijen bij constante  $\Delta T$*

Het energieverbruik voor het overkomen van het drukverlies van de rest van de toevoerkast, gebaseerd op  $P_{eff;kast;toe;rest}$  is:

$$E_{V;toe;rest} = 6060 \cdot 7,058 = 42771 \text{ MJ}$$

Het energieverbruik voor het overkomen van het drukverlies van de retourkast, gebaseerd op  $P_{eff;kast;af}$  is:

$$E_{V;kast;af} = 5967 \cdot 7,058 = 42115 \text{ MJ}$$



## Bijlage B. Berekening kosten

Voor alle situaties zijn de investeringskosten, onderhoudskosten per jaar en energiekosten per jaar berekend. Deze kosten worden doorgerekend over een periode van 15 jaar, waarna de meest gunstige situatie bepaald zal worden.

### B.1. Investeringskosten

#### Pompen

Kentallen voor pompen worden uitgedrukt in kW. (Kreider, 2001) vermeld dat voor pompen van 1 tot 23 kW de volgende formule geldt voor de aanschafwaarde:

$$C = 2500 \cdot (P/10)^{0,39}$$

Voor warmte zullen de kosten voor de circulatiepomp niet variëren. Voor koude zijn de kosten:

*Tabel 35 - Kosten circulatiepompen koude*

| Situatie nr. | Vermogen circulatiepomp [kW] | Kosten [€] |
|--------------|------------------------------|------------|
| $K_1$        | 1,99                         | 1332, –    |
| $K_2$        | 2,21                         | 1387,60    |
| $K_3$        | 2,49                         | 1453,60    |
| $K_4$        | 2,49                         | 1453,60    |
| $K_5$        | 2,48                         | 1451,40    |
| $K_6$        | 2,85                         | 1532,20    |
| $K_7$        | 3,31                         | 1624,30    |

#### Ventilatoren

Voor de kosten van ventilatoren gaan de kentallen uit van een aantal m<sup>3</sup>/h. Het debiet blijft in dit onderzoek constant, dus de kosten voor de ventilatoren zullen ook niet variëren. Bovendien zijn de verschillen in asvermogen (zie Bijlage A.3.1) dusdanig klein (het verschil tussen het grootste en kleinste ventilatorvermogen is circa 1 kW) dat deze waarschijnlijk binnen het bereik van de huidige ventilator valt.

*Validatie: Voor de toevoerkast van de LBK worden in de casus twee ventilatoren gebruikt van ieder 5,5 kW (nominaal vermogen). Dit betreft de ER63C-4DN.G7.1R van Ziehl-Abegg. In dezelfde reeks is een ventilator verkrijgbaar met een vermogen van 7,5kW. Zie Figuur 29.*

| Ventilator-Typ<br>Fan type | Artikel-Nr.<br>Article no. | kg  | Motor-Baugr.<br>Motor size | P <sub>N</sub><br>(kW) |
|----------------------------|----------------------------|-----|----------------------------|------------------------|
| ER63C-4DN.G7.1R            | 130564/Z01                 | 114 | 132                        | 5,5                    |
| ER63C-4DN.H7.1R            | 130565/Z01                 | 123 | 132                        | 7,5                    |

*Figuur 29 - Ventilator LBK en ventilator uit dezelfde reeks met meer vermogen (bron: Ziehl-Abegg)*



*De kosten van deze twee ventilatoren zijn gegeven in Figuur 30.*

| Type            | Artikelnr.  | PN (kW) | kr./stk.  |
|-----------------|-------------|---------|-----------|
| ER63C-4DN.G7.1R | 130564/OF01 | 5,50    | 14.465,00 |
| ER63C-4DN.H7.1R | 130565/OF01 | 7,50    | 14.735,00 |

*Figuur 30 - Prijzen ventilatoren Ziehl-Abegg uit Figuur 29 in DKK (2010)*

*Teruggerekend naar Euro met een wisselkoers (december 2015) van 1 Euro = 0,1344466 DKK geeft dit:*

- 5,5 kW:  $14465 \cdot 0,1344466 = \text{€}1944,77$
- 7,5 kW:  $14735 \cdot 0,1344466 = \text{€}1981,07$

*Dit prijsverschil is op een LBK van circa €40.000,-<sup>44</sup> ongeveer 0,001% en is verwaarloosbaar.*

### Warmtebatterijen

Voor warmtebatterijen wordt er uitgegaan van een prijs van ongeveer 14 euro per  $\text{m}^2$  (bron: Recupair B.V.). De kosten van de koelbatterijen staan per situatie weergegeven in Tabel 36.

*Tabel 36 - Kosten verwarmingsbatterijen*

| Situatie | Temperatuurtraject [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Oppervlakte [ $\text{m}^2$ ] | Kostenschatting [€] |
|----------|-------------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| $W_1$    | 30 – 20                                   | 189,7                        | 2655,80             |
| $W_2$    | 35 – 25                                   | 129,2                        | 1808,80             |
| $W_3$    | 40 – 30                                   | 99                           | 1386, –             |
| $W_4$    | 45 – 35                                   | 94,9                         | 1328,60             |
| $W_5$    | 50 – 40                                   | 94,9                         | 1328,60             |
| $W_6$    | 55 – 45                                   | 64,6                         | 904,40              |

*Validatie: Systemair B.V. vermeldt dat een LBK circa 2 euro per  $\text{m}^3/\text{h}$  kost. Zij melden hierbij dat de verwarmingsbatterij ongeveer 3,75% van de kosten van een LBK op zich neemt. Bij deze casus is er een debiet van  $23.000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dit resulteert in de kosten van een batterij van:*

$$2 * 23000 \cdot 0,0375 = \text{€}1725, -$$

*Deze waarde valt binnen het spectrum van Tabel 36.*

### Koelbatterijen

Voor koelbatterijen wordt er uitgegaan van een prijs van ongeveer 10 euro per  $\text{m}^2$  (Bron: Recupair B.V.). De kosten van de koelbatterijen staan per situatie weergegeven in Tabel 37.

---

<sup>44</sup> Bron: Interne documenten Techniplan



Tabel 37 - Kosten koelbatterijen

| Situatie       | Temperatuurtraject [°C] | Oppervlakte [m <sup>2</sup> ] | Kostenschatting [€] |
|----------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------|
| K <sub>1</sub> | 10 – 20                 | 754,1                         | 7541, –             |
| K <sub>2</sub> | 10 – 19                 | 746,0                         | 7460, –             |
| K <sub>3</sub> | 10 – 18                 | 652,8                         | 6528, –             |
| K <sub>4</sub> | 11 – 19                 | 754,1                         | 7541, –             |
| K <sub>5</sub> | 12 – 20                 | 1119                          | 11190, –            |
| K <sub>6</sub> | 12 – 19                 | 932,5                         | 9325, –             |
| K <sub>7</sub> | 12 – 18                 | 839,3                         | 8393, –             |

Validatie: Systemair B.V. vermeldt dat een LBK circa 2 euro per m<sup>3</sup>/h kost. Zij melden hierbij dat de koelbatterij met een temperatuurtraject van 10 – 18°C circa 13% van de kosten van een LBK op zich neemt. Bij deze casus is er een debiet van 23.000 m<sup>3</sup>/h. Dit resulteert in de kosten van een batterij van:

$$2 * 23000 * 0,13 = \text{€}5980, -$$

Dit is vergelijkbaar met de berekende waarde voor situatie K<sub>3</sub>, die ook een temperatuurtraject van 10°C – 18°C heeft (€6528, –).

Voor verwarming zijn de investeringskosten gelijk aan die in Tabel 36. Voor koude zijn de totale kosten<sup>45</sup> weergegeven in Tabel 38.

Tabel 38 - Totale kosten koude

| Situatie       | Circulatiepomp [€] | Koelbatterij [€] | Kosten [€] |
|----------------|--------------------|------------------|------------|
| K <sub>1</sub> | 1332, –            | 7541, –          | 8873, –    |
| K <sub>2</sub> | 1387,60            | 7460, –          | 8848, –    |
| K <sub>3</sub> | 1453,60            | 6528, –          | 7982, –    |
| K <sub>4</sub> | 1453,60            | 7541, –          | 8995, –    |
| K <sub>5</sub> | 1451,40            | 11190, –         | 12641, –   |
| K <sub>6</sub> | 1532,20            | 9325, –          | 10857, –   |
| K <sub>7</sub> | 1624,30            | 8393, –          | 10017, –   |

---

<sup>45</sup> Pompen + koelbatterij



### B.1.1. Kosten overige installaties

Naast de kosten van de pompen, batterijen en ventilatoren zullen er door het veranderen van de temperatuurtrajecten ook veranderingen plaatsvinden aan de keuze van de overige afgiftesystemen in het gebouw (zie 2.3), het daaraan verbonden leidingwerk en de wko. Dit onderzoek heeft als uitgangspunt dat er al deze componenten constant blijven. Omdat er in dit onderzoek geen aandacht besteed is aan variaties in deze componenten, zullen deze ook niet mee worden genomen in de kostenberekeningen.

### B.2. Exploitatiekosten

Voor exploitatiekosten wordt er rekening gehouden met onderhoudskosten en energiekosten.

#### Onderhoudskosten

Voor onderhoud wordt er uitgegaan van jaarlijkse kosten van 2% van de aanschafwaarde<sup>46</sup>.

*Tabel 39 - Onderhoudskosten koude*

| Situatie | Aanschafwaarde [€] | Onderhoudskosten per jaar [€] |
|----------|--------------------|-------------------------------|
| $K_1$    | 8873, –            | 177,50                        |
| $K_2$    | 8848, –            | 177, –                        |
| $K_3$    | 7982, –            | 159,60                        |
| $K_4$    | 8995, –            | 179,90                        |
| $K_5$    | 12641, –           | 252,80                        |
| $K_6$    | 10857, –           | 217,10                        |
| $K_7$    | 10017, –           | 200,30                        |

*Tabel 40 - Onderhoudskosten warmte*

| Situatie | Aanschafwaarde [€] | Onderhoudskosten per jaar [€] |
|----------|--------------------|-------------------------------|
| $W_1$    | 2655,80            | 53,10                         |
| $W_2$    | 1808,80            | 36,20                         |
| $W_3$    | 1386, –            | 27,70                         |
| $W_4$    | 1328,60            | 26,60                         |
| $W_5$    | 1328,60            | 26,60                         |

---

<sup>46</sup> (Knoll, Wagenaar, & Weele, 2002)



|       |        |       |
|-------|--------|-------|
| $W_6$ | 904,40 | 18,10 |
|-------|--------|-------|

#### Energiekosten

Voor energiekosten wordt er uitgegaan van een tarief van 0,18 euro per kWh. Dat komt neer op 0,05 euro per MJ.

*Tabel 41 - Energiekosten koude (verbruik circulatiepomp + ventilatorvermogen koude)*

| Situatie | Verbruik [MJ] | Energiekosten per jaar [€] |
|----------|---------------|----------------------------|
| $K_1$    | 19521         | 976,05                     |
| $K_2$    | 18545         | 927,25                     |
| $K_3$    | 18440         | 922,00                     |
| $K_4$    | 21589         | 1079,45                    |
| $K_5$    | 24738         | 1236,90                    |
| $K_6$    | 23639         | 1181,95                    |
| $K_7$    | 24212         | 1210,60                    |

*Tabel 42 - Energiekosten warmte (verbruik opwekking en ventilatorvermogen warmte)*

| Situatie | Verbruik [MJ] | Energiekosten per jaar [€] |
|----------|---------------|----------------------------|
| $W_1$    | 70374,2       | 3518,71                    |
| $W_2$    | 74450,6       | 3722,53                    |
| $W_3$    | 78179,0       | 3908,95                    |
| $W_4$    | 82286,4       | 4114,32                    |
| $W_5$    | 88529,3       | 4426,47                    |
| $W_6$    | 95643,6       | 4782,18                    |

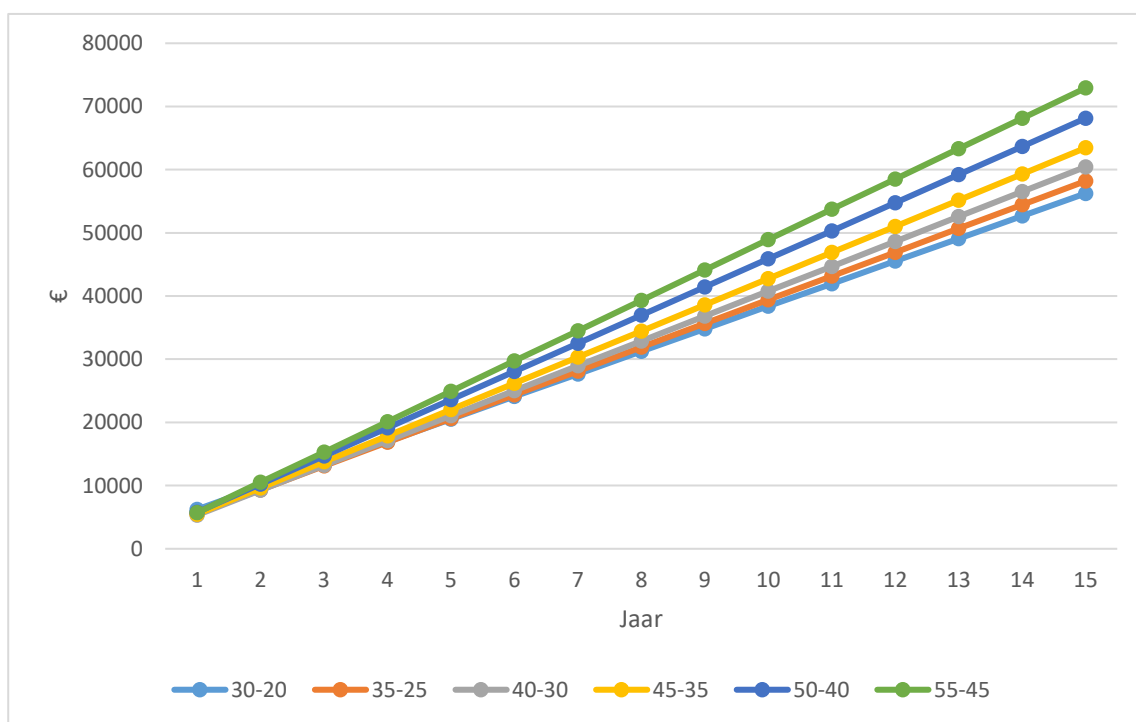


### B.3. Overzicht kosten

In Tabel 43 is een overzicht van alle variabele kosten voor de functie verwarmen. In Figuur 31 zijn de kosten over 15 jaar geprojecteerd. Hieruit blijkt dat situatie  $W_1$  (temperatuurtraject: 30-20°C) op termijn het goedkoopst is.

Tabel 43 - Overzicht kosten warmte

| Situatie | Investeringskosten [€] | Onderhoud/jr. [€] | Energiekosten/jr. [€] |
|----------|------------------------|-------------------|-----------------------|
| $W_1$    | 2655,80                | 53,10             | 3518,71               |
| $W_2$    | 1808,80                | 36,20             | 3722,53               |
| $W_3$    | 1386, –                | 27,70             | 3908,95               |
| $W_4$    | 1328,60                | 26,60             | 4114,32               |
| $W_5$    | 1328,60                | 26,60             | 4426,47               |
| $W_6$    | 904,40                 | 18,10             | 4782,18               |



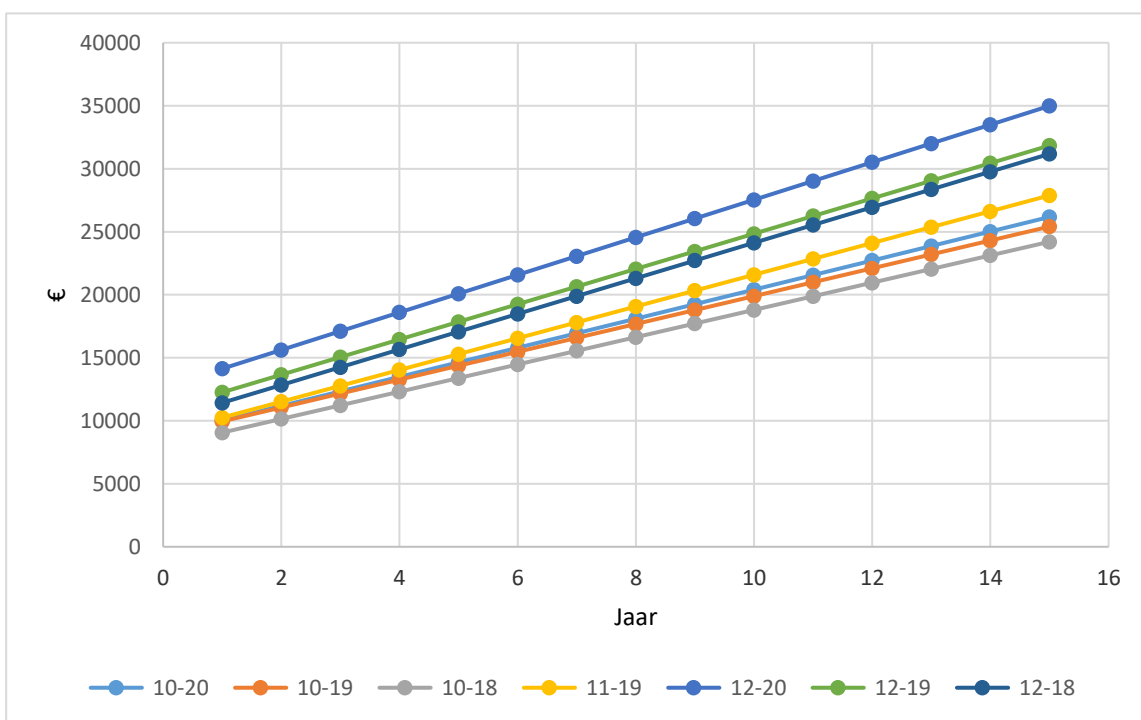
Figuur 31 - Kosten voor functie verwarmen over 15 jaar



In Tabel 44 is een overzicht van alle variabele kosten voor de functie koelen. In Figuur 32 zijn de kosten over 15 jaar geprojecteerd. Hieruit blijkt dat situatie  $K_3$  (temperatuurtraject: 10-18°C) zowel qua investeringskosten als op termijn het goedkoopst is.

Tabel 44 - Overzicht kosten koude

| Situatie | Investeringskosten [€] | Onderhoud/jr. [€] | Energiekosten/jr. [€] |
|----------|------------------------|-------------------|-----------------------|
| $K_1$    | 8873, –                | 177,50            | 976,05                |
| $K_2$    | 8848, –                | 177, –            | 927,25                |
| $K_3$    | 7982, –                | 159,60            | 922,00                |
| $K_4$    | 8995, –                | 179,90            | 1079,45               |
| $K_5$    | 12641, –               | 252,80            | 1236,90               |
| $K_6$    | 10857, –               | 217,10            | 1181,95               |
| $K_7$    | 10017, –               | 200,30            | 1210,60               |



Figuur 32 - Kosten voor functie koelen over 15 jaar



### B.3.1. Discussie

Voor koude valt op dat de kosten voor de temperatuurtrajecten met een intredetemperatuur van 10°C zowel qua aanschafwaarde als qua verbruik aanzienlijk voordeliger zijn. Na 15 jaar heeft de voordeligste situatie met 10°C als intredetemperatuur ongeveer 24200 euro gekost in totaal, terwijl de voordeligste situatie met 12°C als intredetemperatuur ongeveer 31200 euro in totaal heeft gekost. Bij 12°C zijn de kosten 28,9% hoger over een periode van 15 jaar.

Zoals in 2.1.2 is toegelicht wordt er tegenwoordig gekozen voor 12°C (grondwatertemperatuur) voor het geval dat de koudebron niet voldoende capaciteit zou hebben. Hiermee wordt voorkomen dat de reeds aanwezige warmtepomp moet worden ingezet als koelmachine. De NEN 7120 gaat voor een koelmachine uit van een opwekkingsrendement van 3.

In bijlage B is geredeneerd dat 1 MJ aan elektriciteit ongeveer 0,05 euro kost. Het verschil in kosten tussen de voordeligste situatie met 10°C en de voordeligste situatie met 12°C is 7000 euro.

$$\frac{\frac{7000}{15}}{0,05} = 9333,3 \text{ MJ}$$

Om de extra investering voor een klimaatinstallatie met een intredetemperatuur van de koudebatterij van 12°C te bekostigen zal er over een periode van 15 jaar zal er 9333,3 MJ aan energie per jaar extra verbruikt moeten worden voor de opwekking van koude. Met het om schrijven van formule (7), waarbij een koelmachine een opwekkingrendement van 3 heeft, komt dit neer op een extra koudevraag van:

$$Q_{K,extra} * 1,0 = 9333,3 * 3$$

Dit geeft dat voor deze casus de energievraag per jaar buiten de wko om, die nodig om een temperatuurtraject met een ingangstemperatuur van 12°C te verantwoorden is:

$$Q_{K,extra} = 28000 \text{ MJ/jaar}$$

De jaarlijkse koudevraag voor de casus  $Q_k$  is 210115 MJ per jaar<sup>47</sup>. Het percentage uitputting die per jaar die nodig is om een temperatuurtraject met een ingangstemperatuur van 12°C te verantwoorden is 13,3%:

$$\frac{28000}{210115} = 0,133$$

---

<sup>47</sup> Zie A.2.2



Eindrapport  
21 december 2016  
blad 85 van 90

## Bijlage C. Gegevens batterijen

### C.1. Gegevens warmtebatterijen

F A C O SpA

Offerte 1724-16  
Date: 16/11/16  
DATA SHEET1 867(--N-10)

CUSTOMER: Bas Vos

Ref: Batterij 1

| 410/C             |       | THERMODYNAMIC DATA |                  | NL/1/4/356/0101 |         |
|-------------------|-------|--------------------|------------------|-----------------|---------|
| FIN SIDE          | Reqrd | Calcul.            | TUBE SIDE        | Reqrd           | Calcul. |
| Fluid: air        |       |                    | Fluid: WATER     |                 |         |
| Quantity          | m3/h  | 23000              | Quantity         | l/s             | 2,45    |
| Dry air           | kg/s  | 7,826              | Inlet temp.      | °C              | 30      |
| Specific gravity  | kg/m3 | 1,2250             | Outlet temp.     | °C              | 20      |
| Inlet temp.       | °C    | 5                  | Specific mass    | kg/dm3          | 0,997   |
| Outlet temp.      | °C    | 18                 | Specific heat    | kJ/kg°C         | 4,180   |
| Face velocity     | m/s   | 2,0                | Thermal conduct. | W/m°C           | 0,606   |
| Pressure drop     | Pa    | 39                 | Viscosity        | mPa s           | 0,884   |
| Capacity          | kW    | 102,22             | Velocity         | m/s             | 1,27    |
|                   |       |                    | Pressure drop    | kPa             | 40      |
| COIL DATA         |       |                    |                  |                 |         |
| Overall length    | mm    | 2785               | Tube diameter    | mm              | 16,50   |
| Overall height    | mm    | 1275               | Tube thickness   | mm              | 0,40    |
| Row number        |       | 1,89               | Fin thickness    | mm              | 0,13    |
| Est.td empty mass | kg    | 102                | Surface          | m2              | 189,7   |
| Fluid content     | dm3   | 36,1               |                  |                 |         |

COIL MODEL: P40-16 AC 2R-30T-2605A-2,0Pa Cu/Al

F A C O SpA

Offerte 1724-16  
Date: 16/11/16  
DATA SHEET3 869(--N-10)

CUSTOMER: Bas Vos

Ref: Batterij 3

| 410/C             |       | THERMODYNAMIC DATA |                  | NL/1/4/356/0101 |         |
|-------------------|-------|--------------------|------------------|-----------------|---------|
| FIN SIDE          | Reqrd | Calcul.            | TUBE SIDE        | Reqrd           | Calcul. |
| Fluid: air        |       |                    | Fluid: WATER     |                 |         |
| Quantity          | m3/h  | 23000              | Quantity         | l/s             | 2,46    |
| Dry air           | kg/s  | 7,826              | Inlet temp.      | °C              | 40      |
| Specific gravity  | kg/m3 | 1,2250             | Outlet temp.     | °C              | 30      |
| Inlet temp.       | °C    | 5                  | Specific mass    | kg/dm3          | 0,994   |
| Outlet temp.      | °C    | 18                 | Specific heat    | kJ/kg°C         | 4,178   |
| Face velocity     | m/s   | 2,0                | Thermal conduct. | W/m°C           | 0,623   |
| Pressure drop     | Pa    | 28                 | Viscosity        | mPa s           | 0,716   |
| Capacity          | kW    | 102,22             | Velocity         | m/s             | 1,27    |
|                   |       |                    | Pressure drop    | kPa             | 40      |
| COIL DATA         |       |                    |                  |                 |         |
| Finned length     | mm    | 2605               | Tube diameter    | mm              | 16,50   |
| Finned height     | mm    | 1200               | Tube thickness   | mm              | 0,40    |
| Row number        |       | 1,88               | Fin thickness    | mm              | 0,13    |
| Est.td empty mass | kg    | 81                 | Surface          | m2              | 99,0    |
| Fluid content     | dm3   | 36,1               |                  |                 |         |

COIL MODEL: P40-16 AC 2R-30T-2605A-4,0Pa Cu/Al

F A C O SpA

Offerte 1724-16  
Date: 16/11/16  
DATA SHEET5 871(--N-7)

CUSTOMER: Bas Vos

Ref: Batterij 5

| 410/C             |       | THERMODYNAMIC DATA |                  | NL/1/4/356/0101 |         |
|-------------------|-------|--------------------|------------------|-----------------|---------|
| FIN SIDE          | Reqrd | Calcul.            | TUBE SIDE        | Reqrd           | Calcul. |
| Fluid: air        |       |                    | Fluid: WATER     |                 |         |
| Quantity          | m3/h  | 23000              | Quantity         | l/s             | 2,47    |
| Dry air           | kg/s  | 7,826              | Inlet temp.      | °C              | 50      |
| Specific gravity  | kg/m3 | 1,2250             | Outlet temp.     | °C              | 40      |
| Inlet temp.       | °C    | 5                  | Specific mass    | kg/dm3          | 0,990   |
| Outlet temp.      | °C    | 18                 | Specific heat    | kJ/kg°C         | 4,181   |
| Face velocity     | m/s   | 2,0                | Thermal conduct. | W/m°C           | 0,638   |
| Pressure drop     | Pa    | 20                 | Viscosity        | mPa s           | 0,596   |
| Capacity          | kW    | 102,22             | Velocity         | m/s             | 1,83    |
|                   |       |                    | Pressure drop    | kPa             | 40      |
| COIL DATA         |       |                    |                  |                 |         |
| Finned length     | mm    | 2605               | Tube diameter    | mm              | 16,50   |
| Finned height     | mm    | 1200               | Tube thickness   | mm              | 0,40    |
| Row number        |       | 0,77               | Fin thickness    | mm              | 0,13    |
| Est.td empty mass | kg    | 66                 | Surface          | m2              | 94,9    |
| Fluid content     | dm3   | 20,4               |                  |                 |         |

COIL MODEL: P40-16 AC 1R-30T-2605A-2,0Pa Cu/Al

F A C O SpA

Offerte 1724-16  
Date: 16/11/16  
DATA SHEET2 868(--N-10)

CUSTOMER: Bas Vos

Ref: Batterij 2

| 410/C             |       | THERMODYNAMIC DATA |                  | NL/1/4/356/0101 |         |
|-------------------|-------|--------------------|------------------|-----------------|---------|
| FIN SIDE          | Reqrd | Calcul.            | TUBE SIDE        | Reqrd           | Calcul. |
| Fluid: air        |       |                    | Fluid: WATER     |                 |         |
| Quantity          | m3/h  | 23000              | Quantity         | l/s             | 2,46    |
| Dry air           | kg/s  | 7,826              | Inlet temp.      | °C              | 35      |
| Specific gravity  | kg/m3 | 1,2250             | Outlet temp.     | °C              | 25      |
| Inlet temp.       | °C    | 5                  | Specific mass    | kg/dm3          | 0,996   |
| Outlet temp.      | °C    | 18                 | Specific heat    | kJ/kg°C         | 4,178   |
| Face velocity     | m/s   | 2,0                | Thermal conduct. | W/m°C           | 0,614   |
| Pressure drop     | Pa    | 34                 | Viscosity        | mPa s           | 0,792   |
| Capacity          | kW    | 102,22             | Velocity         | m/s             | 1,27    |
|                   |       |                    | Pressure drop    | kPa             | 40      |
| COIL DATA         |       |                    |                  |                 |         |
| Finned length     | mm    | 2605               | Tube diameter    | mm              | 16,50   |
| Finned height     | mm    | 1200               | Tube thickness   | mm              | 0,40    |
| Row number        |       | 1,89               | Fin thickness    | mm              | 0,13    |
| Est.td empty mass | kg    | 88                 | Surface          | m2              | 129,2   |
| Fluid content     | dm3   | 36,1               |                  |                 |         |

COIL MODEL: P40-16 AC 2R-30T-2605A-3,0Pa Cu/Al

F A C O SpA

Offerte 1724-16  
Date: 16/11/16  
DATA SHEET4 870(--N-7)

CUSTOMER: Bas Vos

Ref: Batterij 4

| 410/C             |       | THERMODYNAMIC DATA |                  | NL/1/4/356/0101 |         |
|-------------------|-------|--------------------|------------------|-----------------|---------|
| FIN SIDE          | Reqrd | Calcul.            | TUBE SIDE        | Reqrd           | Calcul. |
| Fluid: air        |       |                    | Fluid: WATER     |                 |         |
| Quantity          | m3/h  | 23000              | Quantity         | l/s             | 2,46    |
| Dry air           | kg/s  | 7,826              | Inlet temp.      | °C              | 45      |
| Specific gravity  | kg/m3 | 1,2250             | Outlet temp.     | °C              | 35      |
| Inlet temp.       | °C    | 5                  | Specific mass    | kg/dm3          | 0,992   |
| Outlet temp.      | °C    | 18                 | Specific heat    | kJ/kg°C         | 4,181   |
| Face velocity     | m/s   | 2,0                | Thermal conduct. | W/m°C           | 0,631   |
| Pressure drop     | Pa    | 20                 | Viscosity        | mPa s           | 0,655   |
| Capacity          | kW    | 102,22             | Velocity         | m/s             | 1,82    |
|                   |       |                    | Pressure drop    | kPa             | 40      |
| COIL DATA         |       |                    |                  |                 |         |
| Finned length     | mm    | 2605               | Tube diameter    | mm              | 16,50   |
| Finned height     | mm    | 1200               | Tube thickness   | mm              | 0,40    |
| Row number        |       | 0,91               | Fin thickness    | mm              | 0,13    |
| Est.td empty mass | kg    | 66                 | Surface          | m2              | 94,9    |
| Fluid content     | dm3   | 20,4               |                  |                 |         |

COIL MODEL: P40-16 AC 1R-30T-2605A-2,0Pa Cu/Al

F A C O SpA

Offerte 1724-16  
Date: 16/11/16  
DATA SHEET6 872(--N-7)

CUSTOMER: Bas Vos

Ref: Batterij 6

| 410/C             |       | THERMODYNAMIC DATA |                  | NL/1/4/356/0101 |         |
|-------------------|-------|--------------------|------------------|-----------------|---------|
| FIN SIDE          | Reqrd | Calcul.            | TUBE SIDE        | Reqrd           | Calcul. |
| Fluid: air        |       |                    | Fluid: WATER     |                 |         |
| Quantity          | m3/h  | 23000              | Quantity         | l/s             | 2,47    |
| Dry air           | kg/s  | 7,826              | Inlet temp.      | °C              | 55      |
| Specific gravity  | kg/m3 | 1,2250             | Outlet temp.     | °C              | 45      |
| Inlet temp.       | °C    | 5                  | Specific mass    | kg/dm3          | 0,988   |
| Outlet temp.      | °C    | 18                 | Specific heat    | kJ/kg°C         | 4,182   |
| Face velocity     | m/s   | 2,0                | Thermal conduct. | W/m°C           | 0,644   |
| Pressure drop     | Pa    | 17                 | Viscosity        | mPa s           | 0,545   |
| Capacity          | kW    | 102,22             | Velocity         | m/s             | 1,83    |
|                   |       |                    | Pressure drop    | kPa             | 40      |
| COIL DATA         |       |                    |                  |                 |         |
| Finned length     | mm    | 2605               | Tube diameter    | mm              | 16,50   |
| Finned height     | mm    | 1200               | Tube thickness   | mm              | 0,40    |
| Row number        |       | 0,95               | Fin thickness    | mm              | 0,13    |
| Est.td empty mass | kg    | 59                 | Surface          | m2              | 64,6    |
| Fluid content     | dm3   | 20,4               |                  |                 |         |

COIL MODEL: P40-16 AC 1R-30T-2605A-3,0Pa Cu/Al



Eindrapport  
21 december 2016  
blad 86 van 90

## C.2. Gegevens koelbatterijen

Offerte 1724-16  
Date: 16/11/16  
F A C O SpA  
DATA SHEET5 877(--N-21)

CUSTOMER: Bas Vos

Ref: Batterij 5-koud

| 410/C                   |       | THERMODYNAMIC DATA |         | NL/1/4/356/0101  |         |
|-------------------------|-------|--------------------|---------|------------------|---------|
| FIN SIDE                |       | Reqrd              | Calcul. | TUBE SIDE        |         |
| Fluid: air              |       |                    |         | Fluid: WATER     |         |
| Quantity                | m3/h  | 23000              | 23000   | Quantity         | l/s     |
| Dry air                 | kg/s  |                    | 7,826   | Inlet temp.      | °C      |
| Specific gravity        | kg/m3 |                    | 1,2250  | Outlet temp.     | °C      |
| Inlet temp.             | °C    | 28                 | 28,0    | Specific mass    | kg/dm3  |
| Relative humid.         | %     | 55                 | 55      | Specific heat    | kJ/kg°C |
| Outlet temp.            | °C    | 15                 | 15,0    | Thermal conduct. | W/m°C   |
| Wet bulb                | °C    |                    | 15,0    | Viscosity        | mPa s   |
| Relative humid.         | %     |                    | 100     | Velocity         | m/s     |
| Sensible heat ratio     |       |                    | 0,686   | Pressure drop    | kPa     |
| Condensed water         | kg/h  |                    | 68,2    |                  |         |
| Face velocity           | m/s   |                    | 2,1     |                  |         |
| Pressure drop (wet/dry) | Pa    |                    | 211/181 |                  |         |
| Capacity                | kW    |                    | 152,75  |                  |         |

### COIL DATA

|                   |     |      |       |                |    |       |
|-------------------|-----|------|-------|----------------|----|-------|
| Finned length     | mm  | 2560 | 2560  | Tube diameter  | mm | 16,50 |
| Finned height     | mm  | 1200 | 1200  | Tube thickness | mm | 0,40  |
| Row number        |     |      | 9,66  | Fin thickness  | mm | 0,13  |
| Est.td empty mass | kg  |      | 386   | Surface        | m2 | 754,1 |
| Fluid content     | dm3 |      | 161,8 |                |    |       |

COIL MODEL: P40-16 AR 10R-30T-2560A-2,5Pa Cu/AluVer

Offerte 1724-16  
Date: 16/11/16  
F A C O SpA  
DATA SHEET3 875(--N-21)

CUSTOMER: Bas Vos

Ref: Batterij 3-koud

| 410/C                   |       | THERMODYNAMIC DATA |         | NL/1/4/356/0101  |         |
|-------------------------|-------|--------------------|---------|------------------|---------|
| FIN SIDE                |       | Reqrd              | Calcul. | TUBE SIDE        |         |
| Fluid: air              |       |                    |         | Fluid: WATER     |         |
| Quantity                | m3/h  | 23000              | 23000   | Quantity         | l/s     |
| Dry air                 | kg/s  |                    | 7,826   | Inlet temp.      | °C      |
| Specific gravity        | kg/m3 |                    | 1,2250  | Outlet temp.     | °C      |
| Inlet temp.             | °C    | 28                 | 28,0    | Specific mass    | kg/dm3  |
| Relative humid.         | %     | 55                 | 55      | Specific heat    | kJ/kg°C |
| Outlet temp.            | °C    | 15                 | 15,0    | Thermal conduct. | W/m°C   |
| Wet bulb                | °C    |                    | 15,0    | Viscosity        | mPa s   |
| Relative humid.         | %     |                    | 100     | Velocity         | m/s     |
| Sensible heat ratio     |       |                    | 0,685   | Pressure drop    | kPa     |
| Condensed water         | kg/h  |                    | 68,2    |                  |         |
| Face velocity           | m/s   |                    | 2,1     |                  |         |
| Pressure drop (wet/dry) | Pa    |                    | 158/135 |                  |         |
| Capacity                | kW    |                    | 153,14  |                  |         |

### COIL DATA

|                   |     |      |       |                |    |       |
|-------------------|-----|------|-------|----------------|----|-------|
| Finned length     | mm  | 2560 | 2560  | Tube diameter  | mm | 16,50 |
| Finned height     | mm  | 1200 | 1200  | Tube thickness | mm | 0,40  |
| Row number        |     |      | 6,81  | Fin thickness  | mm | 0,13  |
| Est.td empty mass | kg  |      | 307   | Surface        | m2 | 652,8 |
| Fluid content     | dm3 |      | 115,4 |                |    |       |

COIL MODEL: P40-16 AR 7R-30T-2560A-2,0Pa Cu/AluVer

Offerte 1724-16  
Date: 16/11/16  
F A C O SpA  
DATA SHEET4 876(--N-20)

CUSTOMER: Bas Vos

Ref: Batterij 4-koud

| 410/C                   |       | THERMODYNAMIC DATA |         | NL/1/4/356/0101  |         |
|-------------------------|-------|--------------------|---------|------------------|---------|
| FIN SIDE                |       | Reqrd              | Calcul. | TUBE SIDE        |         |
| Fluid: air              |       |                    |         | Fluid: WATER     |         |
| Quantity                | m3/h  | 23000              | 23000   | Quantity         | l/s     |
| Dry air                 | kg/s  |                    | 7,826   | Inlet temp.      | °C      |
| Specific gravity        | kg/m3 |                    | 1,2250  | Outlet temp.     | °C      |
| Inlet temp.             | °C    | 28                 | 28,0    | Specific mass    | kg/dm3  |
| Relative humid.         | %     | 55                 | 55      | Specific heat    | kJ/kg°C |
| Outlet temp.            | °C    | 15                 | 15,0    | Thermal conduct. | W/m°C   |
| Wet bulb                | °C    |                    | 15,0    | Viscosity        | mPa s   |
| Relative humid.         | %     |                    | 100     | Velocity         | m/s     |
| Sensible heat ratio     |       |                    | 0,686   | Pressure drop    | kPa     |
| Condensed water         | kg/h  |                    | 68,2    |                  |         |
| Face velocity           | m/s   |                    | 2,1     |                  |         |
| Pressure drop (wet/dry) | Pa    |                    | 179/154 |                  |         |
| Capacity                | kW    |                    | 152,79  |                  |         |

### COIL DATA

|                   |     |      |       |                |    |       |
|-------------------|-----|------|-------|----------------|----|-------|
| Finned length     | mm  | 2560 | 2560  | Tube diameter  | mm | 16,50 |
| Finned height     | mm  | 1200 | 1200  | Tube thickness | mm | 0,40  |
| Row number        |     |      | 7,52  | Fin thickness  | mm | 0,13  |
| Est.td empty mass | kg  |      | 348   | Surface        | m2 | 746,0 |
| Fluid content     | dm3 |      | 130,9 |                |    |       |

COIL MODEL: P40-16 AR 8R-30T-2560A-2,0Pa Cu/AluVer

Offerte 1724-16  
Date: 16/11/16  
F A C O SpA  
DATA SHEET6 878(--N-25)

CUSTOMER: Bas Vos

Ref: Batterij 6-koud

| 410/C                   |       | THERMODYNAMIC DATA |         | NL/1/4/356/0101  |         |
|-------------------------|-------|--------------------|---------|------------------|---------|
| FIN SIDE                |       | Reqrd              | Calcul. | TUBE SIDE        |         |
| Fluid: air              |       |                    |         | Fluid: WATER     |         |
| Quantity                | m3/h  | 23000              | 23000   | Quantity         | l/s     |
| Dry air                 | kg/s  |                    | 7,826   | Inlet temp.      | °C      |
| Specific gravity        | kg/m3 |                    | 1,2250  | Outlet temp.     | °C      |
| Inlet temp.             | °C    | 28                 | 28,0    | Specific mass    | kg/dm3  |
| Relative humid.         | %     | 55                 | 55      | Specific heat    | kJ/kg°C |
| Outlet temp.            | °C    | 15                 | 15,0    | Thermal conduct. | W/m°C   |
| Wet bulb                | °C    |                    | 15,0    | Viscosity        | mPa s   |
| Relative humid.         | %     |                    | 100     | Velocity         | m/s     |
| Sensible heat ratio     |       |                    | 0,687   | Pressure drop    | kPa     |
| Condensed water         | kg/h  |                    | 68,0    |                  |         |
| Face velocity           | m/s   |                    | 2,1     |                  |         |
| Pressure drop (wet/dry) | Pa    |                    | 214/181 |                  |         |
| Capacity                | kW    |                    | 152,64  |                  |         |

### COIL DATA

|                   |     |      |       |                |    |       |
|-------------------|-----|------|-------|----------------|----|-------|
| Finned length     | mm  | 2560 | 2560  | Tube diameter  | mm | 16,50 |
| Finned height     | mm  | 1200 | 1200  | Tube thickness | mm | 0,40  |
| Row number        |     |      | 9,77  | Fin thickness  | mm | 0,13  |
| Est.td empty mass | kg  |      | 390   | Surface        | m2 | 754,1 |
| Fluid content     | dm3 |      | 166,2 |                |    |       |

COIL MODEL: P40-16 AR 10R-30T-2560A-2,5Pa Cu/AluVer



Eindrapport  
21 december 2016  
blad 87 van 90

F A C O SpA  
Offerte 1724-16  
Date: 16/11/16  
DATA SHEET2 874(--N-26)

CUSTOMER: Bas Vos

Ref: Batterij 2-koud

| 410/C THERMODYNAMIC DATA NL/1/4/356/0101 |                   |       |         |
|------------------------------------------|-------------------|-------|---------|
| FIN SIDE                                 |                   | Reqrd | Calcul. |
| Fluid: air                               |                   |       |         |
| Quantity                                 | m <sup>3</sup> /h | 23000 | 23000   |
| Dry air                                  | kg/s              |       | 7,826   |
| Specific gravity                         | kg/m <sup>3</sup> |       | 1,2250  |
| Inlet temp.                              | °C                | 28    | 28,0    |
| Relative humid.                          | %                 | 55    | 55      |
| Outlet temp.                             | °C                | 15    | 15,0    |
| Wet bulb                                 | °C                |       | 15,0    |
| Relative humid.                          | %                 |       | 100     |
| Sensible heat ratio                      |                   |       | 0,688   |
| Condensed water                          | kg/h              |       | 67,5    |
| Face velocity                            | m/s               |       | 2,1     |
| Pressure drop (wet/dry)                  | Pa                |       | 270/232 |
| Capacity                                 | kW                |       | 152,28  |

| COIL DATA         |                    |      |       |
|-------------------|--------------------|------|-------|
| Finned length     | mm                 | 2560 | 2560  |
| Finned height     | mm                 | 1200 | 1200  |
| Row number        |                    |      | 11,50 |
| Est.td empty mass | kg                 |      | 515   |
| Fluid content     | dm <sup>3</sup>    |      | 197,1 |
| TUBE SIDE         |                    |      |       |
| Fluid: WATER      |                    |      |       |
| Quantity          | l/s                |      | 4,55  |
| Inlet temp.       | °C                 | 12   | 12,0  |
| Outlet temp.      | °C                 | 20   | 20,0  |
| Specific mass     | kg/dm <sup>3</sup> |      | 0,999 |
| Specific heat     | kJ/kg°C            |      | 4,190 |
| Thermal conduct.  | W/m°C              |      | 0,591 |
| Viscosity         | mPa s              |      | 1,108 |
| Velocity          | m/s                |      | 0,91  |
| Pressure drop     | kPa                | 40   | 37,3  |

COIL MODEL: P40-16 AR 12R-30T-2560A-2,0Pa Cu/AluVer

F A C O SpA  
Offerte 1724-16  
Date: 16/11/16  
DATA SHEET1 873(--N-27)

CUSTOMER: Bas Vos

Ref: Batterij 1-koud

| 410/C THERMODYNAMIC DATA NL/1/4/356/0101 |                   |       |         |
|------------------------------------------|-------------------|-------|---------|
| FIN SIDE                                 |                   | Reqrd | Calcul. |
| Fluid: air                               |                   |       |         |
| Quantity                                 | m <sup>3</sup> /h | 23000 | 23000   |
| Dry air                                  | kg/s              |       | 7,826   |
| Specific gravity                         | kg/m <sup>3</sup> |       | 1,2250  |
| Inlet temp.                              | °C                | 28    | 28,0    |
| Relative humid.                          | %                 | 55    | 55      |
| Outlet temp.                             | °C                | 15    | 15,0    |
| Wet bulb                                 | °C                |       | 15,0    |
| Relative humid.                          | %                 |       | 100     |
| Sensible heat ratio                      |                   |       | 0,687   |
| Condensed water                          | kg/h              |       | 67,9    |
| Face velocity                            | m/s               |       | 2,1     |
| Pressure drop (wet/dry)                  | Pa                |       | 205/174 |
| Capacity                                 | kW                |       | 152,58  |

| COIL DATA         |                    |      |       |
|-------------------|--------------------|------|-------|
| Overall length    | mm                 | 2765 | 2765  |
| Overall height    | mm                 | 1275 | 1275  |
| Row number        |                    |      | 8,73  |
| Est.td empty mass | kg                 |      | 395   |
| Fluid content     | dm <sup>3</sup>    |      | 150,8 |
| TUBE SIDE         |                    |      |       |
| Fluid: WATER      |                    |      |       |
| Quantity          | l/s                |      | 6,07  |
| Inlet temp.       | °C                 | 12   | 12,0  |
| Outlet temp.      | °C                 | 18   | 18,0  |
| Specific mass     | kg/dm <sup>3</sup> |      | 0,999 |
| Specific heat     | kJ/kg°C            |      | 4,192 |
| Thermal conduct.  | W/m°C              |      | 0,590 |
| Viscosity         | mPa s              |      | 1,139 |
| Velocity          | m/s                |      | 1,16  |
| Pressure drop     | kPa                | 40   | 44,9  |

COIL MODEL: P40-16 AR 9R-30T-2560A-2,0Pa Cu/AluVer

F A C O SpA  
Project 1585-16  
Date: 18/10/16  
DATA SHEET1 829(--N-25)

CUSTOMER: Bas Vos

Ref: Koelen duurzaam

| 410/C THERMODYNAMIC DATA NL/1/4/356/0101 |                   |       |         |
|------------------------------------------|-------------------|-------|---------|
| FIN SIDE                                 |                   | Reqrd | Calcul. |
| Fluid: air                               |                   |       |         |
| Quantity                                 | m <sup>3</sup> /h | 23000 | 23000   |
| Dry air                                  | kg/s              |       | 7,826   |
| Specific gravity                         | kg/m <sup>3</sup> |       | 1,2250  |
| Inlet temp.                              | °C                | 28    | 28,0    |
| Relative humid.                          | %                 | 55    | 55      |
| Outlet temp.                             | °C                |       | 15,0    |
| Wet bulb                                 | °C                |       | 15,0    |
| Relative humid.                          | %                 |       | 100     |
| Sensible heat ratio                      |                   |       | 0,686   |
| Condensed water                          | kg/h              |       | 68,3    |
| Face velocity                            | m/s               |       | 2,1     |
| Pressure drop (wet/dry)                  | Pa                |       | 226/193 |
| Capacity                                 | kW                | 153,1 | 153,10  |

| COIL DATA         |                    |      |       |
|-------------------|--------------------|------|-------|
| Overall length    | mm                 | 2765 | 2765  |
| Overall height    | mm                 | 1275 | 1275  |
| Row number        |                    |      | 9,92  |
| Est.td empty mass | kg                 |      | 435   |
| Fluid content     | dm <sup>3</sup>    |      | 166,2 |
| TUBE SIDE         |                    |      |       |
| Fluid: WATER      |                    |      |       |
| Quantity          | l/s                |      | 5,22  |
| Inlet temp.       | °C                 | 12   | 12,0  |
| Outlet temp.      | °C                 | 19   | 19,0  |
| Specific mass     | kg/dm <sup>3</sup> |      | 0,999 |
| Specific heat     | kJ/kg°C            |      | 4,191 |
| Thermal conduct.  | W/m°C              |      | 0,591 |
| Viscosity         | mPa s              |      | 1,123 |
| Velocity          | m/s                |      | 1,08  |
| Pressure drop     | kPa                | 40   | 45,1  |

COIL MODEL: P40-16 AR 10R-30T-2560A-2,0Pa Cu/AluVer



## Bijlage D. Tabellen opwekkingsrendementen

Tabel 45 - Opwekkingsrendement koeling<sup>48</sup>

| Koudeleverancier                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $\eta_{C;gen}$                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Elektrisch aangedreven compressiekoelmachine <sup>a</sup> <ul style="list-style-type: none"><li>• Zonder verdere specificaties</li><li>• HT-afgiftesysteem <sup>b</sup></li><li>• Verdampingscondensor of natte koeltoren <sup>c</sup></li><li>• HT-afgiftesysteem én verdampingscondensor of natte koeltoren <sup>b, c</sup></li><li>• Lage temperatuur koudebron <sup>d</sup></li><li>• HT-afgiftesysteem én lage temperatuur koudebron <sup>b, d</sup></li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"><li>• 3</li><li>• 4</li><li>• 4</li><li>• 5</li><li>• 6</li><li>• 8</li></ul> |
| Koudeopslag/ bodemkoeling (zonder inzet koelmachine) <ul style="list-style-type: none"><li>• Voor woningen en woongebouwen e.d. <sup>e</sup></li><li>• Voor utiliteit <sup>e</sup></li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"><li>• 10</li><li>• 12</li></ul>                                               |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Dauwpuntkoeling <sup>f</sup></li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"><li>• 11</li></ul>                                                            |
| <p><sup>a</sup> : Dit betreft alle typen compressiekoeling, waaronder splitsystemen</p> <p><sup>b</sup> : HT-afgiftesysteem – afgiftesysteem dat op 12°C – 18 °C of hoger is ontworpen en bedreven. HT-afgiftesystemen zijn: betonkernactivering, koeling via vloerverwarming en koeling via klimaatplafonds. Koelsystemen die de koude direct aan de binnenlucht afgeven zijn eveneens HT-afgiftesystemen.</p> <p><sup>c</sup> : Verdampingscondensor of natte koeltoren.</p> <p><sup>d</sup> : Lage temperatuur koudebron: brontemperatuur onder 15 °C zoals grondwater en bodemwarmtewisselaars (energiepalen).</p> <p><sup>e</sup> : Het opwekkingsrendement betreft hier de verhouding tussen koudelevering en gebruik van elektrische hulpenergie voor de bronpomp.</p> <p><sup>f</sup> : Het opwekkingsrendement betreft hier de verhouding tussen koudelevering en gebruik van elektrische hulpenergie.</p> |                                                                                                                 |

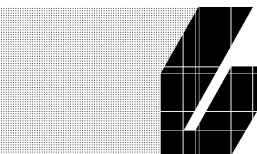
<sup>48</sup> NEN 7120: 17.6



Tabel 46 - Opwekkingsrendement van warmtepompen (verwarming)<sup>49</sup>

| Bronnen                        | Opwekkingsrendement $\eta_{H:gen}$      |                                               |                                               |                                               |                                               |                                               |
|--------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                                | Temperatuurniveaus van de warmtevragers |                                               |                                               |                                               |                                               |                                               |
|                                | $\theta_{sup} \leq 30^{\circ}C$         | $30^{\circ}C < \theta_{sup} \leq 35^{\circ}C$ | $35^{\circ}C < \theta_{sup} \leq 40^{\circ}C$ | $40^{\circ}C < \theta_{sup} \leq 45^{\circ}C$ | $50^{\circ}C < \theta_{sup} \leq 55^{\circ}C$ | $55^{\circ}C < \theta_{sup} \leq 60^{\circ}C$ |
| <b>Electrische-WP:</b>         |                                         |                                               |                                               |                                               |                                               |                                               |
| Bodem/buitenlucht              | 3,55                                    | 3,4                                           | 3,25                                          | 3,1                                           | 2,95                                          | 2,8                                           |
| Warmte uit retour-/afvoerlucht | 6,6                                     | 6,1                                           | 5,6                                           | 5,1                                           | 4,7                                           | 4,4                                           |
| Grondwater/aquifer             | 5,0                                     | 4,7                                           | 4,45                                          | 4,2                                           | 3,9                                           | 3,6                                           |
| Oppervlaktewater               | 4,3                                     | 4,1                                           | 3,9                                           | 3,7                                           | 3,5                                           | 3,3                                           |
| <b>Gas-WP</b>                  |                                         |                                               |                                               |                                               |                                               |                                               |
| Bodem/buitenlucht              | 1,65                                    | 1,6                                           | 1,55                                          | 1,5                                           | 1,45                                          | 1,4                                           |
| Warmte uit retour-/afvoerlucht | 2,7                                     | 2,6                                           | 2,4                                           | 2,2                                           | 2,1                                           | 2,0                                           |
| Grondwater/aquifer             | 2,2                                     | 2,1                                           | 2,0                                           | 1,9                                           | 1,85                                          | 1,8                                           |
| Oppervlaktewater               | 1,95                                    | 1,9                                           | 1,85                                          | 1,8                                           | 1,75                                          | 1,7                                           |

<sup>49</sup> NEN7120: 14.16



#### **Bijlage E. Onderzoek temperatuurniveaus koeling wko Techniplan**

Een reeks aan interne technische documenten van luchtbehandelingskasten bij is bekeken, per toegepast temperatuurtraject van de koelbatterij is er geturfd. Circa tweederde van de koelbatterijen heeft een temperatuurtraject van 10-18°C.

| Temperatuurtraject [°C] | $\Delta T$ | Aantal |
|-------------------------|------------|--------|
| 10-18                   | 8          | 12     |
| 11-19                   | 8          | 3      |
| 12-18                   | 6          | 1      |
| 12-19                   | 7          | 1      |
| 10-16                   | 6          | 1      |