

UNIVERSITEIT ANTWERPEN

Academiejaar 2021-2022

Faculteit Toegepaste Ingenieurswetenschappen

# **Geokoeling met booster warmtepomp in gezinswoningen: een koelanalyse**

***De Lamper Nick - 20183334***

***Jansen David - 20182789***

**PROMOTOR: Verhaert Ivan**

**COPROMOTOR: Jacobs Stef**

Universiteit Antwerpen

**Bachelor of Science in de  
industriële wetenschappen: elektromechanica**



## Voorwoord

Deze thesis behandelt een onderzoek naar een innovatieve koeltechniek, namelijk geokoeling gecombineerd met SWW productie via een booster warmtepomp. Aan de hand van simulaties wordt deze vergeleken met een standaard split airco. Tijdens het schrijven van deze scriptie hebben we de opgedane kennis uit verschillende HVAC gerelateerde opleidingsonderdelen kunnen benutten.

Het schrijven van de thesis en het opstellen van de simulaties waren niet mogelijk geweest zonder de steun van onze promotoren. Bij deze willen we Ivan Verhaert, Stef Jacobs en Robin Baetens dan ook bedanken voor hun begeleiding en feedback tijdens dit traject.

Nick De Lamper  
David Jansen

Antwerpen, 21/08/2022

## Inhoudsopgave

HOOFDSTUK 1: INLEIDING .....	1
HOOFDSTUK 2: LITERATUURSTUDIE .....	2
2.1 Klassieke split airco unit .....	2
2.2 Geokoeling gecombineerd met SWW .....	3
2.3 (Woon)comfort.....	4
HOOFDSTUK 3: METHODE .....	5
HOOFDSTUK 4: MODELERING .....	6
4.1 Koelvraag.....	6
4.1.1 Interne warmteproductie .....	6
4.1.2 Transmissieverlies .....	7
4.1.3 Ventilatieverlies .....	7
4.1.4 Zonnewinsten.....	7
4.1.5 Totale warmtebalans.....	8
4.2 Sanitair warm water: buffervat.....	9
4.3 Systemen.....	9
4.3.1 Klassiek systeem .....	9
4.3.2 Geokoeling gecombineerd met SWW.....	10
HOOFDSTUK 5: SIMULATIE .....	11
5.1 Case.....	11
5.2 Koelvraag.....	11
5.2.1 Interne warmteproductie .....	12
5.2.2 Transmissieverlies .....	12
5.2.3 Ventilatieverlies .....	13
5.2.4 Zonnewinsten.....	13
5.3 Sanitair warm water.....	13
5.4 Systemen.....	14
5.4.1 Klassiek systeem .....	14
5.4.2 Geokoeling gecombineerd met SWW.....	14
5.5 Hittegolf.....	15
HOOFDSTUK 6: RESULTATEN.....	16
6.1 Koelvraag vs. (niet) geleverd koelvermogen .....	16
6.2 Primaire energiekost.....	18
6.3 Effect van regeling innovatief systeem .....	18
6.4 Hittegolf.....	19
6.5 Realiteit.....	20
HOOFDSTUK 7: BESLUIT.....	21
<i>BIBLIOGRAFIE</i> .....	22
<i>BIJLAGE</i> .....	25

## Hoofdstuk 1: INLEIDING

De effecten van de klimaatopwarming zijn niet meer weg te denken uit onze samenleving. Deze beginnen zich ook duidelijk te reflecteren in de energievraag van gebouwen. De gemiddelde temperatuur is de laatste decennia met 0,02°C per jaar gestegen [1]. Ook komen steeds vaker extreme weersomstandigheden voor [2][3]. Bijkomend stijgt de vraag naar koeling binnenshuis door zaken zoals een betere isolatie, grotere raampartijen en toegenomen luchtdichtheid. Om ook tijdens de warme zomermaanden voldoende comfort te genieten, zal de vraag naar koeling een basis energiebehoefte worden [3].

Om deze koeling te voorzien, wordt meestal geopteerd voor een split airco unit (lucht-lucht warmtepomp), wat een goedkope oplossing biedt. Dit in tegenstelling tot de kostprijs van het energieverbruik, wat het grootste pijnpunt is van deze technologie [4]. Deze toestellen zijn niet efficiënt en ook het geleverde comfort laat vaak te wensen over [5][6]. Wat dit comfort juist inhoudt, zal in *Hoofdstuk 2.3* besproken worden.

Hedendaags zijn er heel wat nieuwe koeltechnieken op de markt die een betere efficiëntie en comfort bieden. Om een goed beeld te hebben van welke technieken er bestaan, wordt er eerst een literatuurstudie uitgevoerd. Nadien zal er één systeem vergeleken worden met een standaard split airco unit. In deze thesis werd gekozen voor vloerkoeling in combinatie met een BEO-veld. Het BEO-veld (boorgat energieopslag) bestaat uit een reeks verticale buizen waarin water door de ondergrond gekoeld of verwarmd wordt. Dit systeem heeft het potentieel om beter te presteren [7]. In de vergelijking ligt de focus op koeling voor eengezinswoningen en niet op koeling van appartementen of collectieve systemen.

De onderzoeksvraag van deze studie luidt: *“Hoe kan de koelvraag in een eengezinswoning beantwoord worden aan de hand van een BEO-veld met vloerkoeling en wat zijn de voor- en nadelen ten opzichte van een standaard airco unit op gebied van gebruikerscomfort en energetische efficiëntie?”*.

## Hoofdstuk 2: LITERATUURSTUDIE

Om de klassieke split airco unit te kunnen vergelijken met een innovatief systeem, werd eerst een literatuurstudie uitgevoerd. In deze studie werden verschillende concepten onderzocht en met elkaar vergeleken. Na een afweging van de voor- en nadelen van elk systeem werd uiteindelijk gekozen voor een systeem waarbij een geothermische warmtepomp gecombineerd wordt met een booster warmtepomp voor sanitair warm water (SWW). Het grootste voordeel van dit systeem is het lage energieverbruik en de gunstige prestaties van booster warmtepompen in appartementsgebouwen [8][9].

Om een goed beeld te hebben van de werking van beide concepten, worden deze eerst toegelicht. Ook zal het begrip comfort kort aangehaald worden, zodat duidelijk is wat hiermee bedoeld wordt.

### 2.1 Klassieke split airco unit

Wanneer koeling voorzien wordt in een eengezinswoning in België, is airconditioning (AC) de huidige standaard koelinstallatie [10]. Het meest voorkomende koelsysteem is een split airco unit. Hiermee wordt getracht om een aangename temperatuur te bereiken binnenshuis. Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende types airco's die er bestaan. De meeste airco units zijn tevens ook in staat om te verwarmen, maar dit laten we buiten beschouwing in deze studie.



Figuur 1 - Split airco

Tabel 1 - Soorten airco units

Type	Korte uitleg
(Single-)split systeem	Meest voorkomende AC-systeem. Heeft één binnen- en buitenunit. Voor de koeling van 1 kamer.
Multi-split systeem	Voor het koelen van meerdere kamers. In elke kamer waar airco gewenst is, wordt een aparte binnenunit geplaatst. Aan elke buitenunit kunnen er verschillende binninunits gekoppeld worden. Dit aantal is afhankelijk van de fabrikant [11].
Mobiele airco's	Twee soorten: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Monoblock airco: Deze staat op wieltjes om verplaatsen mogelijk te maken. De warme lucht wordt aan de hand van een slang naar buiten gestuurd.</li> <li>- Split airco: Hier wordt gebruik gemaakt van een binnen- en buitenunit die verbonden zijn door koelleidingen [12].</li> </ul>

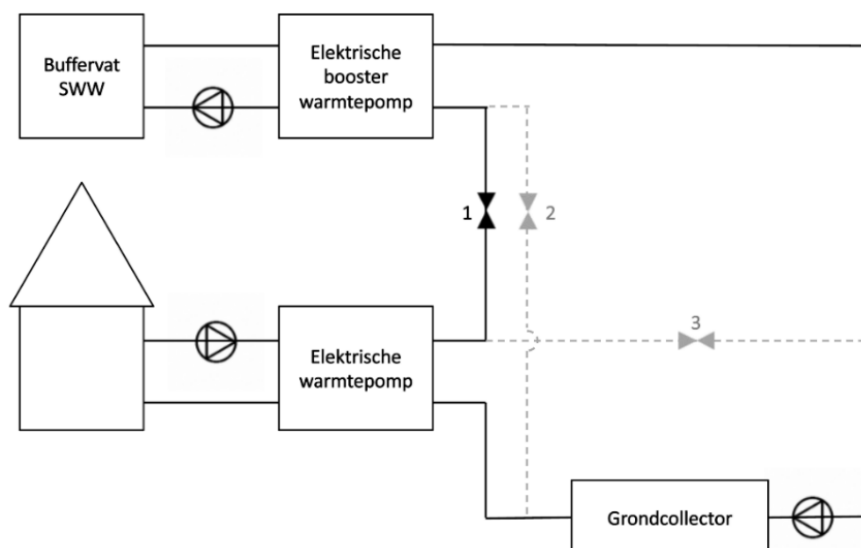
Aangezien het (single-)split systeem het meest voorkomende is, zal deze vergeleken worden met de innovatieve techniek. Wanneer gekeken wordt naar de werking van een airco, dan valt vast te stellen dat dit een warmtepomp is. Namelijk een lucht-lucht warmtepomp die de warmte onttrekt uit de omgeving en aan de buitenlucht afgeeft. Voor de algemene werking van de warmtepomp wordt verwezen naar p8-14 van de cursus 3-Thermodynamica [13] en de website van Daikin [14].

## 2.2 Geokoeling gecombineerd met SWW

Dit systeem maakt gebruik van twee verschillende warmtepompen. Enerzijds een geothermische warmtepomp die voor verwarming kan zorgen in de winter of passieve koeling in de zomer en anderzijds een elektrische booster warmtepomp die instaat voor de SWW-voorziening. Deze warmtepompen bestaan uit vier hoofdcomponenten: een verdamper, compressor, condensor en expansieventiel. Aan de condensorzijde wordt warmte afgegeven aan de omgeving, terwijl aan de verdamperzijde warmte van de omgeving wordt onttrokken [15].

Figuur 2 is een schematische voorstelling van het systeem waarbij geokoeling wordt gecombineerd met de productie van SWW. De zwarte lijnen stellen een gecombineerde werking voor, terwijl de grijze lijnen een afzonderlijke werking voorstellen. Bij gecombineerde werking, wanneer er vraag is naar koeling en naar SWW-productie, is ventiel 1 geopend en zijn ventielen 2 en 3 gesloten. Aan de condensorzijde van de elektrische warmtepomp wordt het afgiftesysteem van de woning aangesloten. Via de verdamperzijde die verbonden is met de grondcollector wordt in winterregime, wanneer er verwarmingsvraag is, warmte opgepompt die via het afgiftesysteem aan de woning wordt afgegeven. In zomerregime, bij vraag naar koeling, wordt via een bypass de elektrische warmtepomp overgeslagen. Hierdoor ontstaat een rechtstreekse verbinding tussen grondcollector en vloersysteem, waardoor passieve koeling wordt toegepast. In *Bijlage B* worden enkele afgiftesystemen besproken. In deze studie is gekozen voor vloerkoeling. Door het lage energieverbruik is dit systeem hedendaags zeer interessant gezien de hoge energieprijzen [16].

Via de bypass kan de warmte die onttrokken werd uit de woning gerecupereerd worden voor de productie van SWW. Dankzij deze voorverwarming kan de elektrische booster werken met een kleiner temperatuurverschil tussen condensor en verdamper, wat een verhoging van de COP (coefficient of performance) met zich meebrengt. De verdamper van de booster warmtepomp zal warmte onttrekken uit de voorverwarmde vloeistof. Aan de condensorzijde wordt deze warmte afgegeven aan een buffervat voor SWW [17].



**Figuur 2 - Schematische voorstelling geokoeling gecombineerd met SWW**

**Tabel 2 - Werkingsmodi gecombineerd systeem**

Werkingsmodus	Geopende ventielen	Gesloten ventielen
Koeling en SWW	1	2 en 3
Enkel koeling	3	1 en 2
Enkel SWW	2	1 en 3

Als het gehele systeem enkel in koelmodus werkt, is ventiel 3 geopend en zijn ventielen 1 en 2 gesloten. Aangezien hier geen SWW-productie nodig is, zal er geen recuperatie plaatsvinden. De onttrokken warmte wordt in deze situatie aan de bodem afgegeven [17].

Tot slot is ventiel 2 geopend en zijn ventielen 1 en 3 gesloten wanneer er enkel vraag is naar SWW. De warmte die nodig is langs de verdamperzijde wordt nu rechtstreeks uit de grondcollector gehaald. In deze situatie is er geen voorverwarming waardoor het temperatuurverschil tussen verdamper en condensor van de booster warmtepomp groter is. Dit leidt tot een lagere COP en er zal meer elektriciteit nodig zijn om het buffervat op temperatuur te brengen [17][18].

Bovenstaande warmtepomp kan ook actief koelen. In combinatie met een vloersysteem kan dit echter leiden tot een zeer lage vloertemperatuur met het risico op condensvorming. Bovendien zorgt een te lage vloertemperatuur voor discomfort. Daarom wordt de elektrische warmtepomp uitgeschakeld en wordt enkel de circulatiepomp ingeschakeld. Hierdoor is passieve koeling mogelijk. Bij passieve koeling wordt het water gekoeld in de bodem om vervolgens, via het vloersysteem, de warmte uit de ruimte te onttrekken. Dankzij deze passieve manier van koelen, circuleert water van ongeveer 18°C doorheen het vloersysteem wat zorgt voor een aangename vloertemperatuur en bovendien heeft passieve koeling een lager energieverbruik [19][20].

## 2.3 (Woon)comfort

Comfort is een zeer belangrijke eigenschap die mee in rekening wordt gebracht in deze studie. Algemeen betekent comfort dat de omgeving aangenaam moet zijn om erin te vertoeven. In Tabel 3 worden enkele factoren aangehaald die hieraan bijdragen [21].

**Tabel 3 - Comfortparameters**

Factoren	Kort uitleg
Temperatuur	Een constante binnentemperatuur, zonder temperatuurschommelingen, zorgt voor een gelijkmatige warmte zonder luchtstromen.
Luchtkwaliteit	De luchtkwaliteit moet op ieder moment optimaal zijn. CO <sub>2</sub> , een te droge lucht of te veel luchtvochtigheid kunnen het wooncomfort doen dalen. Tocht is een veelvoorkomend probleem dat vermeden moet worden.
Regeling van apparatuur	Het eenvoudig naar eigen wensen inregelen van bepaalde apparatuur zoals een airco, verhoogt het comfort van de gebruiker.
Geluid	Geluidsoverlast is niet prettig en kan leiden tot gezondheidsproblemen zoals stressklachten en slaapproblemen.

Aangezien in deze studie de koelvraag van belang is, zal rekening gehouden worden met de temperatuur en de luchtkwaliteit om het nodige comfort te voorzien. Ook de regeling van de apparatuur zal aan bod komen. De geluidsproductie zal in deze thesis buiten beschouwing worden gelaten [21].



## Hoofdstuk 3: METHODE

Om een goede vergelijking te kunnen maken tussen het gekozen koelsysteem en de standaard, worden verschillende parameters voor zowel energetische efficiëntie als comfort in rekening gebracht. Tabel 4 geeft een overzicht van de eigenschappen die behandeld worden in deze studie.

**Tabel 4 - Parameters comfort en efficiëntie**

Comfort	Efficiëntie
Temperatuur	Primaire energie
Luchtkwaliteit: vervuiling, vochtigheid, tocht	
Regeling apparatuur	

Beide systemen zullen met elkaar vergeleken worden door middel van simulaties. Deze vergelijking is objectief aangezien voor beide dezelfde vraag- en weerprofielen kunnen gebruikt worden. Aan de hand van de simulatie wordt een duidelijk beeld geschetst van het prestatievermogen en comfort van beide technieken gedurende de zomermaanden. De invloed van extreme weersomstandigheden zal geanalyseerd worden door een hittegolf na te bootsen.

Om de simulaties mogelijk te maken, werd gebruik gemaakt van het programma 'Matlab'. Hierin worden twee belangrijke zaken vergeleken, de koelvraag en het geleverde koelvermogen. De bespreking hiervan zal gebeuren aan de hand van grafieken en tabellen. Er zal gekeken worden naar zowel kortere (één week) als langere periodes (12 weken) in de zomer om de performantie van de systemen na te gaan. Bovendien wordt er met verschillende tijdsintervallen gesimuleerd om de invloed op het vermogen te testen.

## Hoofdstuk 4: MODELERING

### 4.1 Koelvraag

De koelvraag van een woning kan bepaald worden met behulp van een warmtebalans. Met deze balans wordt de warmte-uitwisseling met de buitenomgeving onderzocht. Warmte stroomt van hogere naar lagere temperatuurzones door convectie, geleiding en straling. De snelheid van deze warmteoverdracht is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de twee temperatuurzones. Ook zal de warmte-energie zich gelijkmatig verdelen tot een uniform thermisch veld [22].

Onderstaande vergelijkingen en modellen zijn enkel geldig onder stationaire omstandigheden. Bij stationaire omstandigheden zijn er geen overgangsverschijnselen meer. Deze vereenvoudiging komt in de natuur niet voor, maar is wel nuttig voor het simuleren van de koelbelasting voor mechanische installaties [22].

#### 4.1.1 Interne warmteproductie

De interne warmteproductie,  $\dot{Q}_{int}$  [W], van een woning kan opgesplitst worden in twee categorieën: persoonsgebonden productie en warmteproductie van toestellen. De som van beide is de totale interne warmteproductie:

$$\dot{Q}_{int} = \dot{Q}_{personen} + \dot{Q}_{toestellen} \quad (4-1)$$

##### 4.1.1.1 Personen

Deze warmteproductie is afhankelijk van de mate waarin de mens actief is, met andere woorden de warmteproductie in het lichaam. De energieproductie per tijdseenheid door de mens wordt metabolisme genoemd.

Om de productie per persoon in Watt te bepalen, wordt rekening gehouden met enkele constanten. Metabolisme wordt uitgedrukt in "met". Eén "met" komt overeen met 58 W/m<sup>2</sup> en de gemiddelde lichaamsoppervlakte van een persoon is gemiddeld 1,8m<sup>2</sup> [23]. In Tabel 5 worden enkele typische activiteiten met bijhorende waarden weergegeven [24].

**Tabel 5 - Warmteproductie per activiteit**

Bezigheid	Metabolisme [met]	Productie [W/m <sup>2</sup> ]	Productie per persoon [W]
Slapen	0,7	40	72
Zitten	1,0	60	108
Staan	1,2	70	126
Wandelen (4.3 km/h)	2,6	150	270

De totale warmteproductie,  $\dot{Q}_{personen}$  [W], is de som van de productie per persoon.

#### 4.1.1.2 Toestellen

Binnenshuis zullen elektrische apparaten ook bijdragen aan de interne warmteproductie. Sommige toestellen werken continu waardoor deze ook constant een bepaalde warmte produceren. Deze warmte,  $\dot{Q}_{toestellen}$ , wordt uitgedrukt in Watt [W]. Om deze productie in rekening te brengen, werden deze warmtewinsten opgezocht voor verschillende apparaten. Welke deze juist zijn, wordt besproken in *Hoofdstuk 5*.

#### 4.1.2 Transmissieverlies

Doorheen de muren, het dak en de vloer van een woning gaat ook warmte verloren. Dit verlies wordt het transmissieverlies,  $\dot{Q}_{trans}$  [W], genoemd.

$$\dot{Q}_{trans} = U * A * \Delta T \quad (4-2)$$

Met oppervlakte  $A$  in  $m^2$  en  $\Delta T = T_{uit} - T_{in}$  het temperatuurverschil tussen de binnen- en buitenwand.  $U$  [ $W/m^2 \cdot K$ ] is de warmtedoorgangscoefficiënt die de hoeveelheid warmte uitdrukt die in de tijd per  $m^2$  en per graad temperatuurverschil tussen de ene en de andere zijde van een constructie doorgelaten wordt [25].

Elke wand, vloer en dak is opgebouwd uit verschillende materialen met elk hun eigen dikte,  $d$  [m], en thermische geleidbaarheid,  $\lambda$  [ $W/m \cdot K$ ]. Voor elk materiaal kan de warmteweerstand,  $R$  [ $m^2 \cdot K/W$ ], bepaald worden. De som van al deze weerstanden is de totale warmteweerstand  $R_w$  en is omgekeerd evenredig met de  $U$ -waarde van een constructieonderdeel [25].

$$R_w = \Sigma R \text{ en } U = \frac{1}{R_w} \quad (4-3)$$

#### 4.1.3 Ventilatieverlies

Voor een gegeven ventilatiedebiet van verse buitenlucht,  $\dot{V}$  [ $m^3/s$ ], kan de warmtelast,  $\dot{Q}_{vent}$  [W], van een gebouw berekend worden aan de hand van vergelijking 4-4.

$$\dot{Q}_{vent} = \rho * c_p * \dot{V} * \Delta T \quad (4-4)$$

Hierbij is  $\rho = 1,293 \text{ kg}/m^3$  de dichtheid en  $c_p = 1005 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{K}$  de specifieke warmte van lucht.  $\Delta T = T_{uit} - T_{in}$  is het verschil in temperatuur tussen de luchtstroom die het gebouw binnenkomt en de lucht die naar buiten wordt geblazen [26].

#### 4.1.4 Zonnewinsten

De zonnewinsten,  $\dot{Q}_{zon}$  [W], doorheen een venster worden in de EPB-berekening als volgt bepaald [27]:

$$\dot{Q}_{zon} = 0,95 * g_w * A_g * I \quad (4-5)$$

$$g_w = 0,9 * (a_c * F_c + (1 - a_c)) * g_{\perp} \quad (4-6)$$

**Tabel 6 - Zonwering**

Met 0,95 = vervuilingfactor [27]  
 $A_g$  = glasoppervlakte van venster [ $m^2$ ]  
 $I$  = totale bezonning op het vensteroppervlak [ $W/m^2$ ]  
 0,9 = invalshoekcorrectie [27]  
 $a_c$  = gemiddelde gebruiksfactor  
 $F_c$  = reductiefactor voor zonwering  
 $g_{\perp}$  = g-waarde glas voor loodrechte inval

Type zonwering	$F_c$
Buitenzonwering	0,5
Ongeventileerde tussenzonwering	0,6
Binnenzonwering	0,9
Andere gevallen	1,0

De gemiddelde gebruiksfactor  $a_c$  geeft de tijdsfractie aan waarin zonwering in gebruik is, gewogen naar invallende zonnestraling. Dit om ervoor te zorgen dat een gesloten zonwering 's nachts geen meerwaarde heeft. Bij koeling voor vaste zonwering wordt gebruiksfactor 1 gehanteerd terwijl bij handbediende en automatische zonwering de gebruiksfactor respectievelijk 0,2 en 0,5 bedraagt [27].

Om het effect van verschillende types zonwering in de berekening mee te nemen, wordt met reductiefactor  $F_c$  gerekend. Tabel 6 geeft de verschillende reductiefactoren die beschikbaar zijn in de EPB-software [27].

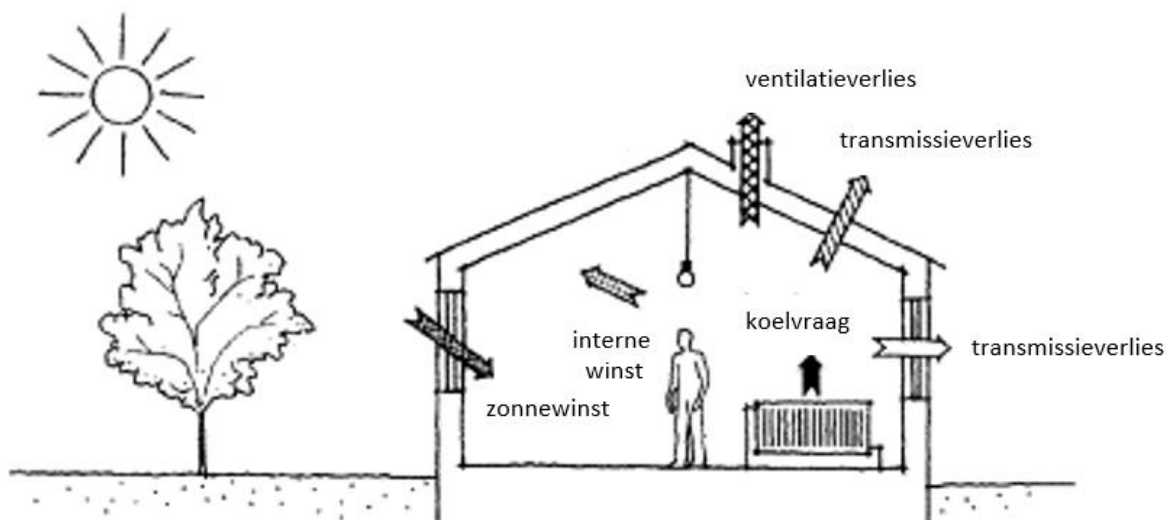
In de berekening worden zonnewinsten door opake delen niet meegerekend. Daarom wordt ook rekening gehouden met het frame rondom het glas voor de bepaling van  $A_g$ . Afhankelijk van de U-waarden van het glas en het frame wordt met een reductiefactor van 0,8 of 0,7 gerekend [27].

#### 4.1.5 Totale warmtebalans

Het totale vermogen,  $\dot{Q}_{\text{totaal}}$  [W], kan nu berekend worden als de som van alle voorgaande formules:

$$\dot{Q}_{\text{totaal}} = \dot{Q}_{\text{int}} + \dot{Q}_{\text{vent}} + \dot{Q}_{\text{trans}} + \dot{Q}_{\text{zon}} \quad (4-7)$$

De bestaande thermische toestand blijft behouden wanneer vergelijking 4-7 nul is. Dit wordt thermische balans genoemd. Wanneer dit totale vermogen positief is, zal de temperatuur in de woning toenemen. Vice versa geldt dat de temperatuur zal afnemen, wanneer dit vermogen negatief is. Aan de hand van dit vermogen wordt de koelvraag bepaald [22].



Figuur 3 - Warmtebalans woning [28]

## 4.2 Sanitair warm water: buffervat

Aangezien het innovatieve systeem de restwarmte van de koeling recupereert voor het opwarmen van het SWW, wordt bij het klassieke systeem een condenserende gasketel voor SWW geplaatst om een correcte vergelijking tussen beide systemen te kunnen maken.

De gasketel of warmtepomp voor SWW zal energie leveren aan een buffervat. De energiestroom naar het buffervat kan opgedeeld worden in een stilstandsverlies en het opvulvermogen. De berekeningen voor SWW zijn sterk vereenvoudigd aangezien de focus van dit onderzoek op de koelvraag ligt.

### 4.2.1.1 Stilstandsverlies

Het stilstandsverlies,  $\dot{Q}_{stilstand}$  [W], wordt met behulp van vergelijking 4-8 berekend.

$$\dot{Q}_{stilstand} = U * A * \Delta T \quad (4-8)$$

Hierbij zijn warmtedoorgangscoefficiënt,  $U$  [W/m<sup>2</sup>\*K], en de oppervlakte,  $A$  [m<sup>2</sup>], parameters die afhankelijk zijn van de grootte en (isolatie)materiaal van het buffervat.  $\Delta T$  is het temperatuurverschil tussen de temperatuur in het vat en de temperatuur van de ruimte waarin het vat staat opgesteld [29].

### 4.2.1.2 Opvulvermogen

De hoeveelheid energie die nodig is om het buffervat op te vullen, is afhankelijk van de hoeveelheid afgetapt SWW.  $\dot{Q}_{vul}$  [W] is het vermogen die uit het buffervat verloren gaat door aftapping van SWW [30]:

$$\dot{Q}_{vul} = \rho * c * \dot{V} * \Delta T \quad (4-9)$$

met  $\rho = \text{massadichtheid water} = 1000 \text{ kg/m}^3$   
 $c = \text{soortelijke warmte water} = 4186 \text{ J/kg} * K$   
 $\dot{V} = \text{afgetapt volumedebiet SWW} [\text{m}^3/\text{s}]$   
 $\Delta T = T_{\text{sanitair warm water}} - T_{\text{sanitair koud water}}$

## 4.3 Systemen

Om van de nodige koeling te kunnen genieten, moet het geleverde vermogen even groot zijn als de koelvraag. Ook voor het SWW moet de productie gelijk zijn aan de vraag. Aangezien beide systemen anders werken, zullen deze ook beide kort toegelicht worden.

### 4.3.1 Klassiek systeem

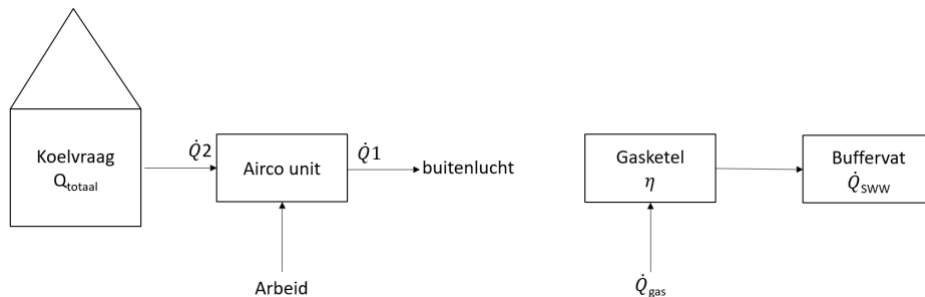
#### 4.3.1.1 Split airco unit

Het geleverde vermogen wordt hier geproduceerd door de reeds besproken lucht-lucht warmtepomp. Figuur 4 geeft een schematische voorstelling van dit concept. De koelvraag,  $\dot{Q}_2 = \dot{Q}_{totaal}$  [W], werd berekend in paragraaf 4.1.5. Met behulp van dit koelvermogen en een constante COP kan berekend worden hoeveel vermogen,  $\dot{Q}_1$  [W], aan de secundaire kant aan de buitenlucht wordt afgegeven. Vervolgens kan hieruit het verbruikte (elektrische) vermogen, *Arbeid* [W], bepaald worden. Al deze berekeningen gebeuren aan de hand van de formule voor het COP [13]. Deze berekening is terug te vinden in *Bijlage D*.

$$COP = \frac{\text{nuttig}}{\text{kost}} = \frac{\dot{Q}_2}{\text{Arbeid}} = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2} \quad (4-10)$$

### 4.3.1.2 Condenserende gasketel

Aan de hand van de rendementsformule  $\eta = \dot{Q}_{SWW} / \dot{Q}_{gas}$  kan het benodigde vermogen gas, om voldoende SWW te produceren, bepaald worden [13].



Figuur 4 - Schematische voorstelling klassiek systeem

## 4.3.2 Geokoeling gecombineerd met SWW

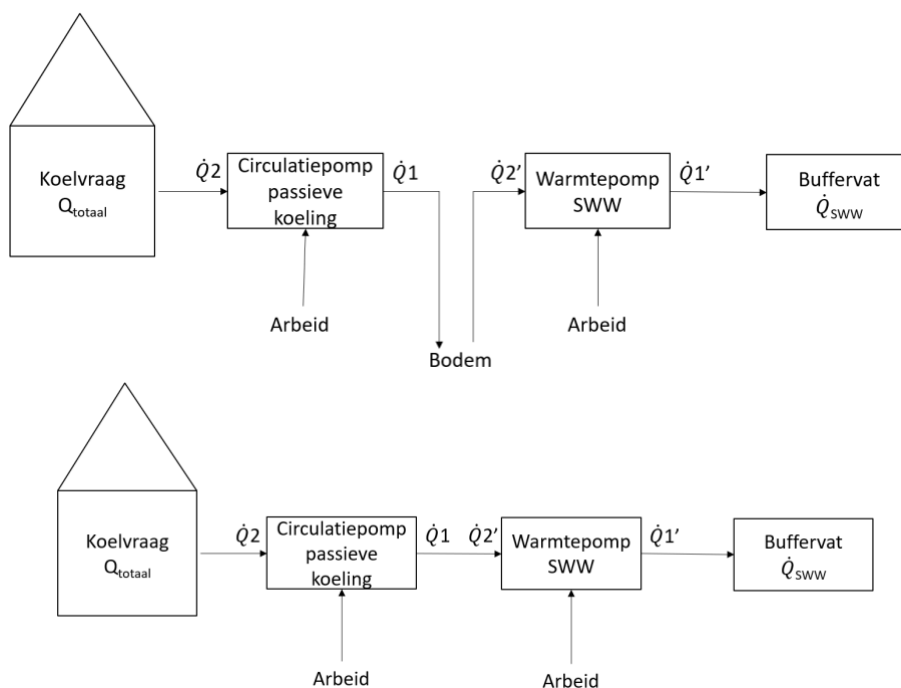
### 4.3.2.1 Circulatiepomp koeling

De berekeningen van  $\dot{Q}_1$  [W] en *Arbeid* [W] gebeuren ook hier aan de hand van de formule uit paragraaf 4.3.1.1. Het enige verschilpunt is dat het vermogen  $\dot{Q}_1$  hier aan de bodem of aan de warmtepomp voor SWW wordt afgegeven in plaats van aan de buitenlucht zoals bij de split airco unit het geval is [13].

### 4.3.2.2 Warmtepomp SWW

$$COP = \frac{\text{nuttig}}{\text{kost}} = \frac{\dot{Q}_1'}{\text{Arbeid}} = \frac{\dot{Q}_1'}{\dot{Q}_1' - \dot{Q}_2'} \quad (4-11)$$

Hierbij is  $\dot{Q}_1'$  het vermogen dat nodig is bij de opwarming van SWW en  $\dot{Q}_2' = \dot{Q}_1$  het vermogen dat gerecupereerd wordt van de circulatiepomp voor koeling of het vermogen dat rechtstreeks uit de bodem wordt onttrokken [13].



Figuur 5 - Geokoeling zonder recuperatie (boven), met recuperatie (onder)

## Hoofdstuk 5: SIMULATIE

### 5.1 Case

Om de koelvraag en het geleverde koelvermogen te kunnen simuleren is voor de woning uit Figuur 6 gekozen. De detailplannen zijn in *Bijlage A* terug te vinden. In een voorgaande studie is een EPB-berekening voor dit gebouw uitgevoerd (in I-Energieprestaties van gebouwen). Hierdoor waren verschillende gegevens zoals U-waarden van constructieonderdelen, g-waarden van de beglazing en de verschillende afmetingen reeds overzichtelijk weergegeven in het EPB-verslag. Deze gegevens zijn overgenomen in de simulatie van de koelvraag.



**Figuur 6 - Plannen woning [31]**

### 5.2 Koelvraag

De warmtebalans uit paragraaf 4.1.5 wordt per tijdstap gedurende een bepaalde periode gesimuleerd.

$$\dot{Q}_{\text{totaal}} = \dot{Q}_{\text{int}} + \dot{Q}_{\text{vent}} + \dot{Q}_{\text{trans}} + \dot{Q}_{\text{zon}} \quad (5-1)$$

Aan de hand van metingen van instal2020, is er een weerprofiel opgesteld [32]. Hieruit worden twee belangrijke zaken gehaald die verder in de simulatie gebruikt worden. Enerzijds de variabele buitentemperatuur per tijdseenheid die nodig is om de transmissie- en ventilatieverliezen te berekenen. Anderzijds de stralingsdichtheid per geveloriëntatie die gebruikt wordt bij het bepalen van de zonnwinst.

## 5.2.1 Interne warmteproductie

### 5.2.1.1 Personen

Bij de persoonsgebonden interne warmtewinst is gekozen voor drie verschillende activiteiten. Hiermee wordt een weekprofiel per bewoner opgesteld waarbij de warmteproductie per tijdstap wordt opgeslagen. Bovendien wordt een onderscheid gemaakt tussen weekdays en het weekend. Ook wordt de CO<sub>2</sub> productie per activiteit bijgehouden per tijdstap omdat dit later nodig is bij het bepalen van het ventilatiedebiet. Deze productie is 0,16\*M liter per uur met M het metabolisme of warmteproductie in Watt [23].

**Tabel 7 - Warmte- en CO<sub>2</sub> productie per activiteit**

Activiteit bewoner	Warmteproductie [W]	CO <sub>2</sub> productie [l/h]
Aanwezig - slapen	72	11,52
Aanwezig - actief	180	28,8
Afwezig	0	0

### 5.2.1.2 Toestellen

Voor de warmtewinst van de toestellen wordt een dagschema opgesteld dat herhaald wordt voor elke dag van de week. Hierbij wordt zowel rekening gehouden met continue verbruikers, zoals een koelkast en diepvriezer, als verbruikers die slechts een bepaalde duur worden gebruikt zoals een koffiezetapparaat. Tabel 8 geeft de toestellen weer die in acht zijn genomen in de simulatie samen met hun warmteproductie en hun gebruikstijd per dag [33].

**Tabel 8 - Warmteproductie toestellen**

Toestellen (verbruik)	Warmteproductie [W]	Tijdspannes [min/dag]
Diepvries (vast)	140	1440
Koelkast (vast)	80	1440
Fornuis (variabel)	3650	20
Microgolfoven (variabel)	1000	5
Elektrische oven (variabel)	1000	60
Koffiezet (variabel)	276,67	5
PC + scherm (variabel)	220	360

## 5.2.2 Transmissieverlies

Bij het bepalen van het transmissieverlies wordt het huis als één thermische zone beschouwd met een setpunt van 24°C. Dit maakt het mogelijk om ook hier een vermogen per tijdstap te berekenen. De overige parameters zijn constanten die in Tabel 9 terug te vinden zijn. De bepaling van het setpunt is terug te vinden in *Bijlage C.2*.

**Tabel 9 - Parameters transmissieverlies [31]**

Constructie	Oppervlakte [m <sup>2</sup> ]	U-waarde [W/m <sup>2</sup> *K]
Vloer	104,04	0,42
Muren	207,26	0,2
Ramen	35,5	1,2



### 5.2.3 Ventilatieverlies

Voor de ventilatieverliezen wordt ook met het setpunt van 24°C gerekend. Op basis van de persoonsgebonden CO<sub>2</sub> productie wordt de concentratie van de binnenlucht bepaald in [ppm]. Wanneer de binnenconcentratie groter wordt dan de waarde aangegeven door de gekozen IDA 2 klasse (Tabel 10), zal het ventilatiesysteem op vol vermogen werken. Wanneer dit niet het geval is, wordt een basisventilatie van 10% genomen. Hiermee wordt ten slotte het ventilatieverlies per tijdstap berekend. Voor de buitenluchtkwaliteit werd een waarde van 400 ppm genomen [34].

**Tabel 10 - IDA klasse CO<sub>2</sub>-niveau [35]**

Klasse	CO <sub>2</sub> -niveau boven buitenluchtconcentratie [ppm]	
	Typische waarden	Standaardwaarden
IDA 1	≤ 400	350
IDA 2	400 - 600	500
IDA 3	600 - 1000	800
IDA 4	> 1000	1200

### 5.2.4 Zonnewinsten

De laatste factor van de warmtebalans is de zonnewinst. We veronderstellen automatische buitenzonwering wat overeenkomt met gebruiksfactor  $a_c = 0,5$  en reductiefactor  $F_c = 0,5$ .

Parys heeft onderzocht dat een  $A_g$ -waarde van 0,7 vooral voor grote ramen te laag is, waardoor de invloed van de zonnewinst onderschat wordt [27]. Daarom wordt in deze simulatie een factor van 0,8 genomen. Dit zal de realiteit beter benaderen. In Tabel 11 staan de gebruikte vensteroppervlaktes.

**Tabel 11 – Raamoppervlaktes [31]**

Oriëntatie	Oppervlakte [m <sup>2</sup> ]
Noord	6,75
Oost	17,5
Zuid	2,5
West	8,75
Totaal	35,5

## 5.3 Sanitair warm water

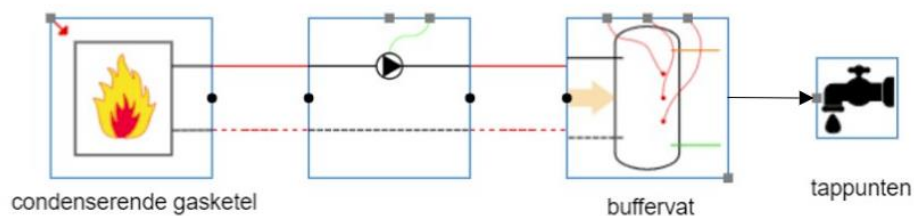
Met behulp van de instal2020 profielgenerator is een verbruiksprofiel voor een heel jaar opgesteld per tijdstap [32]. Deze bedraagt 15 min in deze case. Hieruit wordt een willekeurige periode met dezelfde lengte als de simulatieduur gekozen. Aan de hand van de tapdebieten kan de benodigde hoeveelheid energie berekend worden die nodig is om koud water van 10°C op te warmen tot 60°C. Ook wordt er rekening gehouden met de stratificatie in het buffervat en stilstandsverliezen. De stratificatie is vereenvoudigd door te veronderstellen dat slechts een deel van het volume van 200L van het buffervat op 60°C staat. Ook hier wordt, zoals bij de koelvraag, niet op basis van temperaturen gesimuleerd. De simulatie gebeurt aan de hand van de formules uit paragraaf 4.2.

## 5.4 Systemen

### 5.4.1 Klassiek systeem

Bij het klassieke systeem wordt lucht van 22°C de ruimte binnen geblazen [36]. De koelvraag wordt vergeleken met het vermogen dat de split airco unit kan leveren. Wanneer deze vraag groter is dan het maximale vermogen, wordt het maximale koelvermogen geleverd en wordt het verschil opgeslagen als 'niet behaald vermogen'. Dit niet behaald vermogen geeft een idee van het discomfort dat de bewoner zal ervaren. Ook wanneer de vraag kleiner is dan het minimale vermogen, zal deze koelvraag opgeslagen worden als 'niet behaald vermogen'.

Het vermogen voor sanitair warm water wordt geleverd door een condenserende gasketel. Een schematische voorstelling wordt weergegeven in Figuur 7. Hierbij wordt het buffervat op temperatuur gehouden door de verliezen per tijdstap aan te vullen. Ook zal de gasketel het buffervat bijvullen wanneer dit nodig is. Uiteindelijk zal het gasverbruik van de condenserende ketel worden omgerekend naar primaire energie om deze te kunnen vergelijken met die van het innovatieve systeem. Hierbij wordt rekening gehouden met een factor van 1,08 voor primaire energie [37].



Figuur 7 - SWW condenserende gasketel [38]

Tabel 12 - Parameters klassiek systeem

	COP	Rendement [%]	Qmax [W]	Qmin [W]
Airco unit [36]	4,61	/	7000	1800
Condenserende gasketel [39]	/	98,6	11200	2900

### 5.4.2 Geokoeling gecombineerd met SWW

Zoals bij het klassieke systeem wordt ook hier het geleverde vermogen begrensd wanneer de koelvraag groter is dan het maximale vermogen. Opnieuw wordt het aandeel niet geleverd vermogen bijgehouden. Wanneer de restwarmte van de koeling voldoende groot is voor de productie van SWW, zal deze gebruikt worden door de warmtepomp voor SWW. Deze warmtepomp zal de restwarmte dan oppompen naar het buffervat. Wanneer er onvoldoende restwarmte is, zal de SWW-warmtepomp de warmte oppompen vanuit de bodem. Rekening houdend met de COP-factoren van beide pompen kunnen de nodige arbeid en vermogens berekend worden voor koeling en SWW. De kost zal hier alsook worden omgerekend naar de eerder aangehaalde primaire energie met een primaire energie ratio (PER) van 2,5 [37].

De COP-factor van de warmtepomp voor SWW is aan de hand van de COP van Carnot en de systeemefficiëntie omgerekend. Voor de circulatiepomp van passieve koeling is ook een COP-factor berekend. Een uitwerking van beide berekeningen is te vinden in *Bijlage D*.

**Tabel 13 - Parametes innovatief systeem**

	COP	Qmax [W]	Qmin [W]
Circulatiepomp koeling	71,4	2500	0
Warmtepomp SWW [40]	3,7	6200	2700

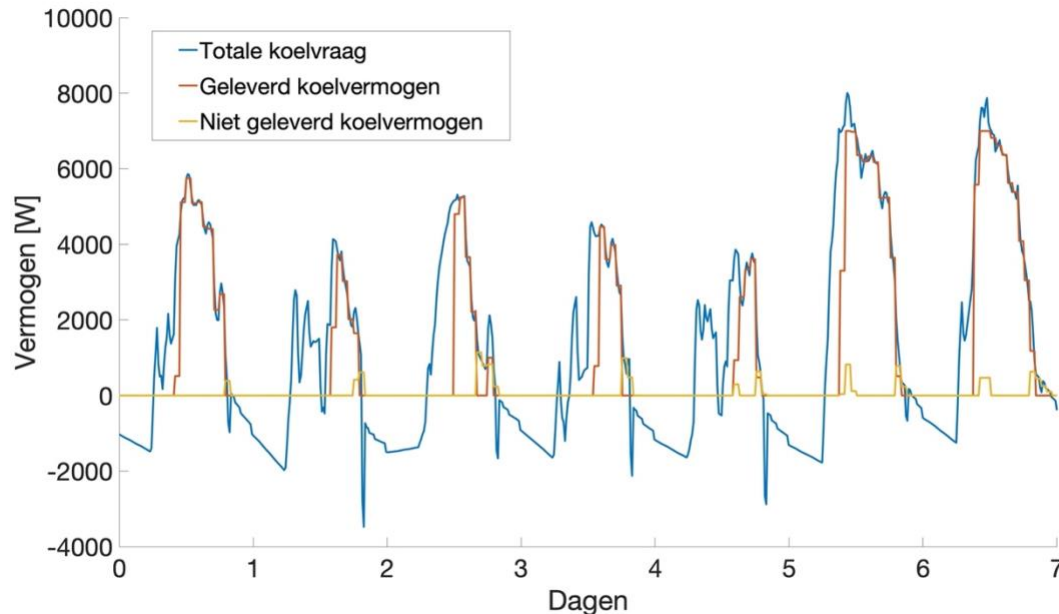
## 5.5 Hittegolf

Om in de simulatie rekening te houden met een eventuele hittegolf wordt het weerprofiel aangepast door deze te vermenigvuldigen met een factor 1,15. Dit om te kunnen voldoen aan de voorwaarde van een hittegolf. Hierbij moet op vijf opeenvolgende dagen een temperatuur van minstens 25°C gehaald worden waarbij op drie dagen een temperatuur van minstens 30°C wordt bereikt. Deze hittegolf wordt in *Bijlage C.1* meer gedetailleerd weergegeven [41].

## Hoofdstuk 6: RESULTATEN

### 6.1 Koelvraag vs. (niet) geleverd koelvermogen

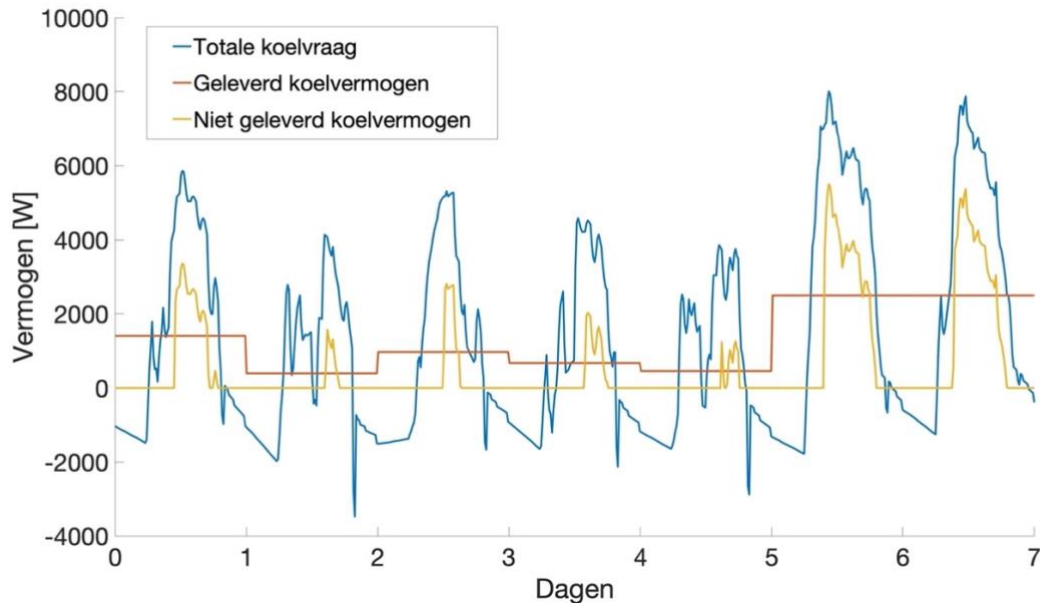
Om de resultaten duidelijk weer te geven in een grafiek, wordt slechts één week tijdens de zomer gevisualiseerd. In deze case werd de week van 10 t.e.m. 16 augustus 2020 bekeken.



Figuur 8 - Koelvermogen klassiek systeem

Figuur 8 toont de koelvraag tegenover het geleverde vermogen voor het klassieke systeem. Er valt op te merken dat niet altijd voldaan wordt aan de koelvraag. Hier kan de begrenzing van het geleverde vermogen worden waargenomen. Om de realiteit beter te benaderen is een uitmiddeling van deze waarden uitgevoerd over een tijdspanne van één uur. Hierdoor is het verloop van het geleverde koelvermogen blokvormig. Het niet geleverde koelvermogen, door de begrenzing, is voorgesteld door de gele functie. Dit geeft weer dat op deze momenten voor de gebruiker discomfort geldt, aangezien het gevraagde koelvermogen niet geleverd kan worden. Na periodes van een negatieve koelvraag is een verschuiving in het geleverde vermogen ten opzichte van de koelvraag op te merken. Dit komt omdat de woning reeds voldoende is afgekoeld om onder het setpunt van 24°C te blijven. De negatieve piek zal met andere woorden een deel van de daaropvolgende positieve piek tenietdoen. Daarom is er een verschuiving in de tijd merkbaar.

Aangezien rekening gehouden wordt met de thermische traagheid van vloerkoeling bij het innovatieve systeem zijn de vermogens uitgemiddeld. Om de betonmassa van de vloer op te warmen tot de gewenste temperatuur, is een bepaalde tijd nodig die afhangt van de samenstelling van de vloer. Systemen met een thermische massa werken continu en reageren trager dan een split airco unit. Om hiermee rekening te houden, worden de vermogens uitgemiddeld over een tijdsspanne van 24 uur [42]. In Figuur 9 worden dezelfde vermogens als hierboven afgebeeld, maar hier voor het innovatieve systeem.



**Figuur 9 - Koelvermogen innovatief systeem**

Bij het innovatieve systeem valt op te merken dat ook hier niet altijd de koelvraag beantwoord wordt. Op het eerste gezicht is het discomfort hoger bij dit systeem, omdat de koelvraag vaker boven het geleverde vermogen ligt dan bij het klassieke systeem het geval was. Er ontstaan relatief grote pieken bij het niet geleverde koelvermogen. In Figuur 9 ligt het geleverde koelvermogen soms boven de koelvraag. Dit komt door de uitmiddeling over een tijdspanne van 24 uur. Het te leveren vermogen wordt als het ware gespreid in de tijd. In realiteit betekent dit dat er wordt ingespeeld op de traagheid en het beperkte vermogen van de koelvloer. Voordat er een piek in koelvraag is, zal het systeem reeds in werking treden om de woning voor te koelen. Hierdoor zal de piek van de koelvraag in werkelijkheid lager liggen dan weergegeven in Figuur 9. Door de pieken in de koelvraag kan de binnentemperatuur toenemen tot boven de gewenste 24°C. Daarom is het noodzakelijk om na de piek in koelvraag de ruimte te blijven koelen.

In Tabel 14 wordt naar het (procentueel) niet geleverde koelvermogen op weekbasis gekeken. Het procentuele, niet geleverde vermogen bedraagt 5,1% en 2,1% voor respectievelijk het klassieke en innovatieve systeem. Hier komt geokoeling beter voor de dag wegens de uitmiddeling van het geleverde vermogen over een periode van 24 uur. Echter mag niet vergeten worden dat de pieken van het niet geleverde vermogen bij vloerkoeling een stuk groter zijn dan bij de split airco unit. Dit heeft als gevolg dat de temperatuur in huis op korte termijn sneller zal toenemen. De kans dat de binnentemperatuur de gewenste 24°C overschrijdt, is bijgevolg groter.

**Tabel 14 - Vergelijking geleverde vermogens (1 week)**

	Geleverd koelvermogen [kWh]	Niet geleverd koelvermogen [kWh]	Procentueel niet geleverd [%]
Koelvraag	218,0		
Klassiek	207,0	11,2	5,1
Innovatief	213,4	4,6	2,1

Tabel 15 geeft een beter inzicht of aan de koelvraag voldaan wordt gedurende een langere periode (van 1 juni tot en met 30 augustus). Ook hier is een verschil tussen de twee systemen op vlak van niet geleverd koelvermogen. Wederom is de reden dat geokoeling beter voor de dag komt de uitmiddeling over een langere periode.

**Tabel 15 - Vergelijking geleverde vermogens (12 weken)**

	Geleverd koelvermogen [kWh]	Niet geleverd koelvermogen [kWh]	Procentueel niet geleverd [%]
Koelvraag	2091,4		
Klassiek	1987,4	104,0	5,0
Innovatief	2041,1	50,3	2,4

Het koelen met de innovatieve techniek heeft enkele voordelen. Aangezien vloerkoeling gebruikt wordt, is het systeem ingebouwd in de vloer. Hierdoor is het plaatsbesparend en ook visueel aantrekkelijker dan een airco unit tegen de binnenmuur [43]. Ook is er geen sprake van tocht bij deze manier van koelen. Bij airco is dit wel een voorkomend probleem wat vermeden moet worden om het comfort voor de gebruiker te waarborgen [44]. Een nadeel van passieve vloerkoeling is de thermische traagheid van de installatie. Hierdoor is een goede inregeling van het systeem noodzakelijk. Ook het beperkte vermogen is een nadeel ten opzichte van een airco unit.

## 6.2 Primaire energiekost

De nodige primaire energiekost wordt weergegeven op weekbasis in Tabel 16. Bij het klassieke systeem ligt deze kost duidelijk hoger. Het verschil bedraagt ongeveer factor 3. Dit kan verklaard worden door het grote energiegebruik van de split airco unit ten opzichte van het verbruik van de circulatiepomp bij passieve koeling. Beide verbruiken worden, zoals in paragraaf 5.4.2 aangehaald, vermenigvuldigd met een PER van 2,5 bij de omrekening naar primaire energie.

**Tabel 16 - Vergelijking primaire energiekost**

	Primair energieverbruik [kWh]
Klassiek	183,8
Innovatief	57,6

## 6.3 Effect van regeling innovatief systeem

Om het effect van verschillende regelstrategieën met elkaar te vergelijken zijn simulaties met verschillende uitmiddeltijden uitgevoerd. In Tabel 17 worden de vermogens voor drie verschillende simulatietijden weergegeven. Algemeen kan besloten worden dat hoe kleiner de uitmiddeltijd, hoe groter het percentage niet geleverd vermogen. Dit kan verklaard worden aan de hand van volgende uitleg. Bij het innovatieve systeem worden de vermogens uitgemiddeld om rekening te houden met de thermische traagheid van de woning. Wanneer er discomfort geldt, doordat de koelvraag niet geleverd kan worden, zal het niet geleverde koelvermogen ook worden uitgemiddeld. Hierdoor wordt er rechtstreeks rekening gehouden met pieken in de koelvraag die in de toekomst zullen bereikt worden. Dit doordat al op voorhand wordt gekoeld. Ook na de vraagpiek wordt de woning verder afgekoeld.

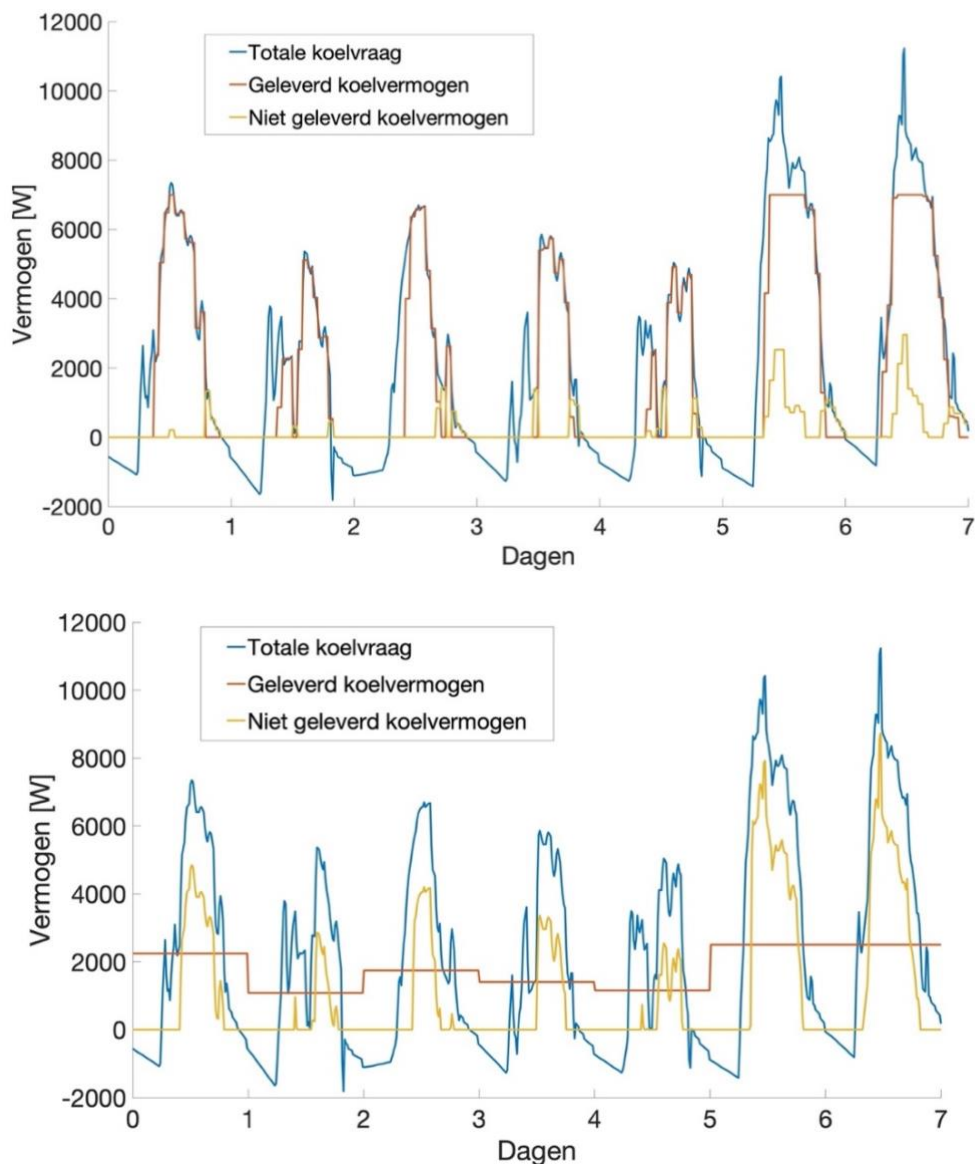
Het resultaat hiervan is dat het comfort stijgt wanneer de uitmiddeltijd groter wordt. Er is dan meer tijd om de piekbelastingen te spreiden doorheen de dag.

**Tabel 17 - Effect uitmiddeling**

	Geleverd koelvermogen [kWh]	Niet geleverd koelvermogen [kWh]	Procentueel niet geleverd [%]
Koelvraag	218,0		
Innovatief - 6 uur	189,2	28,8	13,2
Innovatief - 12 uur	206,3	11,7	5,3
Innovatief - 24 uur	213,4	4,6	2,1

## 6.4 Hittegolf

De hittegolf is gesimuleerd aan de hand van het weerprofiel besproken in Hoofdstuk 5.5. Om de invloed hiervan te bekijken, wordt opnieuw gekeken of er aan de koelvraag voldaan wordt door beide systemen in Figuur 10.



**Figuur 10 - Hittegolf klassiek (boven) en innovatief (onder)**

**Tabel 18 - Vermogens hittegolf**

	Geleverd koelvermogen [kWh]	Niet geleverd koelvermogen [kWh]	Procentueel niet geleverd [%]
Koelvraag	358,0		
Klassiek	318,4	39,6	11,1
Innovatief	303,1	54,9	15,3

Uit Figuur 10 volgt dat beide systemen, zoals eerder aangehaald, op momenten de koelvraag niet kunnen beantwoorden. Wel wordt duidelijk dat het innovatieve systeem iets minder goed presteert wanneer de koelvraag grotere pieken vertoont. Dit is waar te nemen in Tabel 19 waarin het percentage niet geleverd koelvermogen 4,2% hoger ligt dan bij het klassieke systeem. In geval van extreme weersomstandigheden komt het klassieke systeem beter voor de dag. Dit komt door de begrenzing van het maximale koelvermogen van een koelvloer. De split airco kan deze hoge vermogens wel leveren. Hierdoor zal echter het risico op tocht vergroten wat kan leiden tot een andere vorm van discomfort.

## 6.5 Realiteit

Aangezien in de simulatie verschillende aannames zijn gemaakt, zal deze niet volledig de realiteit nabootsen. Zo is er geen rekening gehouden met eventuele degeneratie van de bodem of thermische inertie. Met dat laatste wordt bedoeld dat het gebouw met enige vertraging zal opwarmen of afkoelen door de thermische massa van het gebouw. Ook zijn de modellen voor het sanitair warm water sterk vereenvoudigd omdat de focus van dit onderzoek op het koelgedeelte ligt.



## Hoofdstuk 7: **BESLUIT**

Wegens de klimaatopwarming en het steeds vaker optreden van extreme weersomstandigheden stijgt de vraag naar koeling binnenshuis. Om ook tijdens de warme zomermaanden voldoende comfort te genieten, zal de vraag naar koeling een basis energiebehoefte worden.

Om een goede vergelijking te kunnen maken tussen geokoeling gecombineerd met een booster warmtepomp en de standaard airco unit werd een simulatieomgeving opgesteld. De vergelijking tussen beide systemen is objectief aangezien dezelfde vraag- en weerprofielen gebruikt werden. Het prestatievermogen van beide technieken werd gedurende de zomermaanden en tijdens een hittegolf getest. De beoordelingsparameters die in rekening werden gebracht zijn comfort en verbruik van primaire energie.

In geval van comfort zijn de belangrijkste parameters het al dan niet geleverd koelvermogen, de systeemregeling en tocht. Wanneer wordt gekeken naar het geleverde vermogen is geokoeling de betere oplossing, aangezien het percentage niet geleverd vermogen lager ligt. De invloed van de regeling heeft hier echter veel invloed op. Bij een kortere uitmiddeltijd was het percentage niet geleverd vermogen beduidend hoger. Dit aangezien er minder goed kan ingespeeld worden op grote pieken in de koelvraag wegens het beperkte koelvermogen en de thermische traagheid van het systeem. Bij langere uitmiddeltijden wordt de pieklast over een langere periode gespreid.

Bij de hittegolf viel op dat de klassieke airco unit, wegens het hogere maximale vermogen, beter presteert wanneer er grote vraagpieken zijn. Wanneer de airco deze grote vermogens levert, vergroot het risico op tocht. Dit kan leiden tot een andere vorm van discomfort.

Bij het verbruik van primaire energie is er een groot verschil. Het innovatieve systeem verbruikt meer dan drie keer minder primaire energie. Dit is te danken aan het lage energieverbruik van een circulatiepomp ten opzichte van een split airco unit.

Uit deze resultaten kan geconcludeerd worden dat geokoeling gecombineerd met een booster warmtepomp de betere oplossing is. Op basis van comfort presteren beide systemen gelijkaardig. In geval van pieklasten zal de airco unit beter presteren met het risico op tocht, terwijl de thermische traagheid van het innovatieve systeem een nadeel is. Wanneer echter ook primaire energie in rekening wordt gebracht wordt duidelijk dat geokoeling de meest interessante keuze is.

Om een beter beeld te krijgen van de voor- en nadelen van elk systeem, moet de simulatie gedetailleerder uitgevoerd worden om met meer factoren rekening te houden. Een warmtebalans van de bodem om de degeneratie in beeld te brengen en de thermische inertie van het gebouw moeten in rekening worden gebracht. Een simulatie op basis van temperaturen kan ook een beter inzicht geven op vlak van thermisch (dis)comfort. Dit zijn zaken die in een volgende studie onderzocht kunnen worden.

## BIBLIOGRAFIE

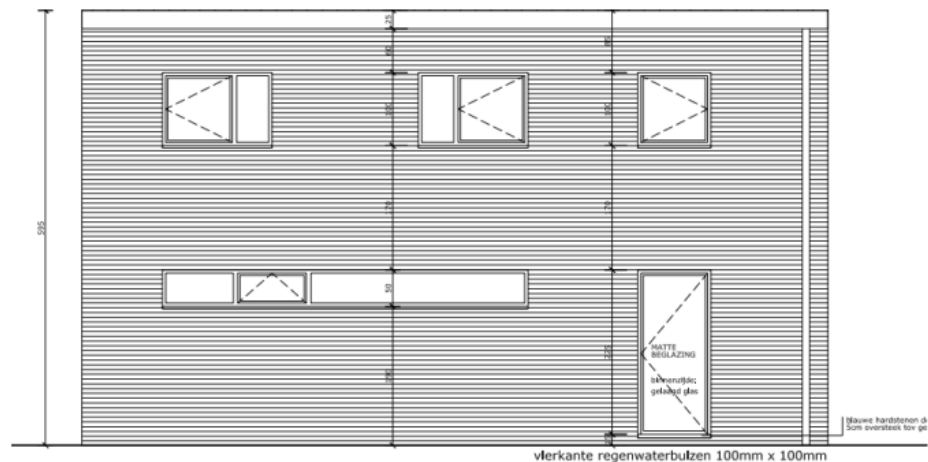
- [1] H. Shakouri G., “The share of cooling electricity in global warming: Estimation of the loop gain for the positive feedback,” *Energy*, vol. 179, pp. 747–761, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.ENERGY.2019.04.170.
- [2] M. Hosseini, K. Javanroodi, and V. M. Nik, “High-resolution impact assessment of climate change on building energy performance considering extreme weather events and microclimate – Investigating variations in indoor thermal comfort and degree-days,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 78, p. 103634, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.SCS.2021.103634.
- [3] H. Thomson, N. Simcock, S. Bouzarovski, and S. Petrova, “Energy poverty and indoor cooling: An overlooked issue in Europe,” *Energy and Buildings*, vol. 196, pp. 21–29, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2019.05.014.
- [4] “Cooling – Analysis - IEA.” Accessed: Apr. 08, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/cooling>
- [5] “Hoeveel stroom verbruikt een airco? | Pure Energie.” <https://pure-energie.nl/kennisbank/hoeveel-stroom-verbruikt-een-airco/> (accessed Aug. 02, 2022).
- [6] “Ziek van je airco? Hierop moet je letten | Daikin.” [https://www.daikin.be/nl\\_be/warmtepompen/informatie/airco-ziekte.html](https://www.daikin.be/nl_be/warmtepompen/informatie/airco-ziekte.html) (accessed Aug. 02, 2022).
- [7] H. J. G. Diersch and D. Bauer, “Analysis, modeling, and simulation of underground thermal energy storage systems,” *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*, pp. 173–203, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-819885-8.00007-3.
- [8] “Koelsystemen - Energiesparen.” <https://www.energiesparen.be/EPB-pedia/koelsystemen> (accessed Aug. 20, 2022).
- [9] S. Jacobs, “Lage temperatuur-combilus met boosterwarmtepompen: een conceptstudie,” Universiteit Antwerpen, Antwerpen, 2020.
- [10] “Hoofdstuk 19 Koelinstallaties”.
- [11] “Multi split airco kopen: mogelijkheden en prijzen inclusief montage.” <https://www.airconditioning-specialist.be/multi-split-airco> (accessed Jul. 29, 2022).
- [12] “De beste mobiele split airco’s van 2021 | Mobielesplitairco.nl.” <https://mobielesplitairco.nl/> (accessed Aug. 02, 2022).
- [13] J. van de Paer, *3-Thermodynamica*. Antwerpen: Cursusdienst Geoenenborgercampus, 2017.
- [14] “De werking van warmtepompen uitgelegd | Daikin.” [https://www.daikin.be/nl\\_be/warmtepompen/werking-warmtepompen.html](https://www.daikin.be/nl_be/warmtepompen/werking-warmtepompen.html) (accessed Aug. 17, 2022).
- [15] J. van de Paer, “Deel 4. Koeling,” 1st ed., 2019.
- [16] “Stijgende energieprijzen: Wat kan je zelf doen? | ENGIE.” <https://www.engie.be/nl/stijging-energieprijzen/> (accessed Aug. 03, 2022).
- [17] W. Wu, T. You, B. Wang, W. Shi, and X. Li, “Simulation of a combined heating, cooling and domestic hot water system based on ground source absorption heat pump,” *Applied Energy*, vol. 126, pp. 113–122, Aug. 2014, doi: 10.1016/J.APENERGY.2014.04.006.
- [18] J. van de Paer, *3-Thermodynamica*. Antwerpen: Cursusdienst Geoenenborgercampus, 2017.

- [19] “Warmtepompen en passieve koeling - GeoTherma.”  
<https://www.geotherma.be/warmtepomp-koeling-passief-of-actief/> (accessed Aug. 03, 2022).
- [20] “2022 | Passieve koeling met een bodem warmtepomp • Warmtepomp-weetjes.nl.”  
<https://warmtepomp-weetjes.nl/uitleg/passieve-koeling-met-een-bodem-warmtepomp/> (accessed Aug. 03, 2022).
- [21] “7 kenmerken van een comfortabele, duurzame woning -.”  
<https://www.bcdadvies.nl/7-kenmerken-van-een-comfortabele-duurzame-woning/> (accessed Feb. 23, 2022).
- [22] “Heat Loss or Heat Gain.” [https://www.new-learn.info/packages/clear/thermal/buildings/building\\_fabric/heat\\_transfer/heat\\_loss.html](https://www.new-learn.info/packages/clear/thermal/buildings/building_fabric/heat_transfer/heat_loss.html) (accessed May 03, 2022).
- [23] I. Verhaert and J. van de Paer, *Luchtbehandeling*. 2015.
- [24] “ANSI/ASHRAE Addendum g to ANSI/ASHRAE Standard 55-2010,” 2013, Accessed: May 03, 2022. [Online]. Available: [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org)
- [25] L. Lauriks and S. van Craenendonck, “Hoofdstuk 6 BOUWFYSICA EN ENERGIEPRESTATIE VAN GEBOUWEN,” in *1-Bouwkunde*, 2018, pp. 146–154.
- [26] D. W. Etheridge, “Ventilation, air quality and airtightness in buildings,” *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*, pp. 77–100, 2010, doi: 10.1533/9781845699277.1.77.
- [27] W. Parys, “VOORSTUDIE ZONWERING IN EPB-CONTEXT EINDRAPPORT: VOORSTUDIE ZONWERING IN EPB-CONTEXT,” Oct. 2009. Accessed: Apr. 30, 2022. [Online]. Available: [http://www.verozo.be/sites/verozo/files/files/Publicaties/locale%20overhitting\\_met%20zonwering.pdf](http://www.verozo.be/sites/verozo/files/files/Publicaties/locale%20overhitting_met%20zonwering.pdf)
- [28] K. B. Wittchen and S. Aggerholm, “Calculation of building heating demand in EPIQR,” *Energy and Buildings*, vol. 31, no. 2, pp. 137–141, Feb. 2000, doi: 10.1016/S0378-7788(99)00027-4.
- [29] “Overall Heat Transfer Coefficients.” [https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficient-d\\_434.html](https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficient-d_434.html) (accessed May 10, 2022).
- [30] B. Bleys, “Basisprincipes Sanitair Warm Water”, Accessed: May 10, 2022. [Online]. Available: [www.tetra-sww.be](http://www.tetra-sww.be)
- [31] W. Leenders, “bouwen van een vrijstaande woning met garage,” Mar. 2009.
- [32] “Instal2020 - verwarming en sanitair water gecombineerd.” <https://www.instal2020.be/> (accessed May 07, 2022).
- [33] “Nonresidential Cooling and Heating Load Calculation Procedures”.
- [34] “KNMI - Atmosferische CO2 concentratie blijft stijgen.” <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/atmosferische-co2-concentratie-blijft-stijgen> (accessed Aug. 17, 2022).
- [35] S. Wendy and V. Stijn, “Binnenhuismilieu referentietask 2: IDA klassen,” 2015.
- [36] “Daikin\_Lucht-lucht\_WT.pdf.”  
<https://documentcloud.adobe.com/spodintegration/index.html?r=1&locale=en-us> (accessed Aug. 17, 2022).
- [37] E. Janssen, *Energiesystemen*. Antwerpen: Cursusdienst Campus Groenenborger, 2021. Accessed: Jul. 28, 2022. [Online]. Available: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- [38] “Hydronic System Optimisation.” <https://app.hysopt.com/#/insplib> (accessed Jun. 10, 2022).
- [39] “Wall\_mounted\_gas\_condensing\_boilers\_D2CND\_Product\_catalogue\_ECPN

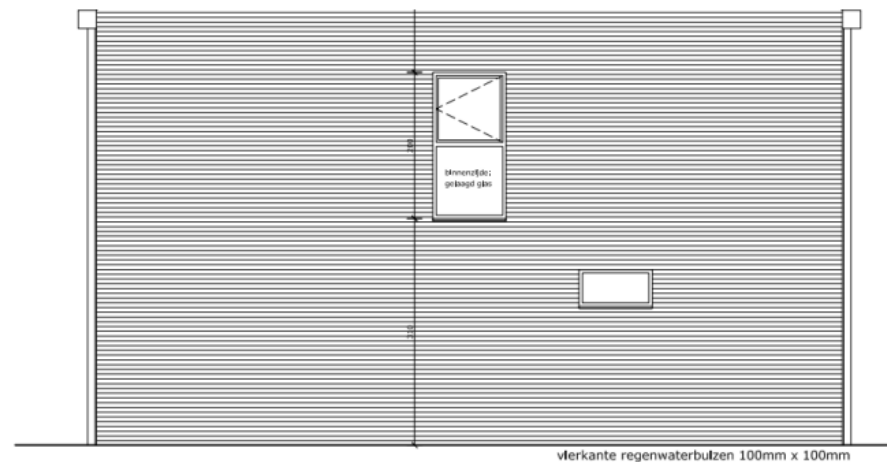
- L17\_710A\_Dutch\_1\_1\_.pdf.”  
<https://documentcloud.adobe.com/spodintegration/index.html?r=1&locale=en-us>  
(accessed Aug. 17, 2022).
- [40] WOLF, “WOLF HIGH EFFICIENCY HEAT PUMPS.”
- [41] “KMI - Hittegolf.” <https://www.meteo.be/nl/info/weerwoorden/hittegolf> (accessed May 10, 2022).
- [42] Henk, “THERMISCHE BETONACTIVERING IN DE UITVOERING Eindrapportage Stufib/Stubeco-studiecel”.
- [43] “Je woning koelen met vloerverwarming: zo zit dat | Daikin.”  
[https://www.daikin.be/nl\\_be/blog/koelen-met-vloerverwarming.html](https://www.daikin.be/nl_be/blog/koelen-met-vloerverwarming.html) (accessed May 10, 2022).
- [44] “Koude tocht | Daikin.” [https://www.daikin.be/nl\\_be/faq/cold-draughts.html](https://www.daikin.be/nl_be/faq/cold-draughts.html) (accessed May 10, 2022).
- [45] “4. Warmteafgiftesystemen,” in *6-Klimatisering HVAC-calculaties: Hydronica*,
- [46] X. Gu, M. Cheng, X. Zhang, Z. Qi, J. Liu, and Z. Li, “Performance analysis of a hybrid non-centralized radiant floor cooling system in hot and humid regions,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, p. 101645, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.CSITE.2021.101645.
- [47] “NIVA Ventilator Convector Verwarmen & Koelen,” 2019.
- [48] “aroVAIR ventilator-convectoren | Vaillant.”  
<https://www.vaillant.be/consumenten/producten/arovair-90944.html#specification>  
(accessed Jul. 26, 2022).
- [49] I. Verhaert, “6-HVAC-calculaties,” Antwerpen, 2020.
- [50] “Bronnen aarde, grond en lucht voor warmtepompen - warmtepomp-panel.”  
<https://warmtepomp-panel.nl/warmtepompbron.html> (accessed Aug. 02, 2022).
- [51] E. Janssen, “Conceptfiches over de productie en distributie van SANITAIR WARM WATER,” vol. 2, May 2018.
- [52] “samenvatting projectresultaten - SCOOOLS.” <https://www.cornet-scools.com/samenvatting-projectresultaten.html> (accessed Aug. 03, 2022).
- [53] “Wandhangende mono-energetische warmtepomp geoTHERM VWS 36 - Vaillant.”  
<https://www.vaillant.be/consumenten/producten/geotherm-vws-36-47808.html>  
(accessed Aug. 03, 2022).
- [54] “DAB Evosta 2 40-70/130 Circulatiepomp – – Waterpomp.”  
<https://www.waterpomp.be/dab-evosta-2-40-70-130-circulatiepomp-cv-pomp>  
(accessed Aug. 03, 2022).
- [55] “Grundfos ALPHA1L 25-40 / 130 mm (CV Pomp) - 99160578 - Verwarming Shop Online.” [https://www.verwarming-shop-online.be/Grundfos-ALPHA1L-25-40-/-130-mm-\(CV-Pomp\)-99160578](https://www.verwarming-shop-online.be/Grundfos-ALPHA1L-25-40-/-130-mm-(CV-Pomp)-99160578) (accessed Aug. 03, 2022).

# BIJLAGE

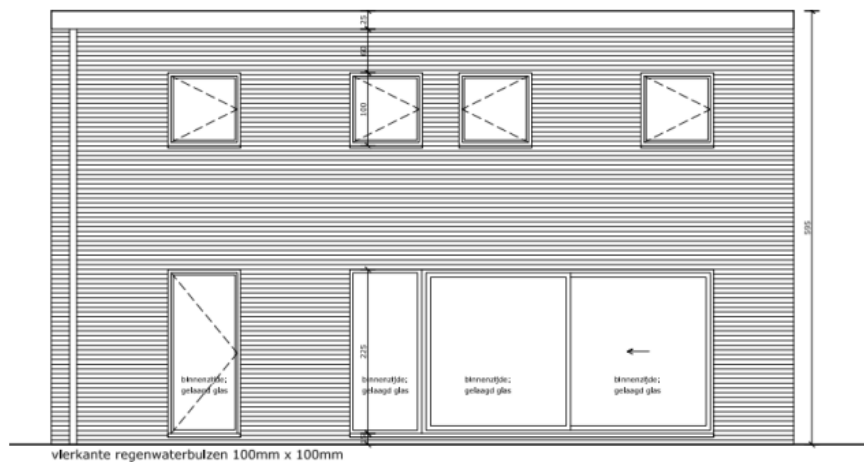
## A – Plannen woning



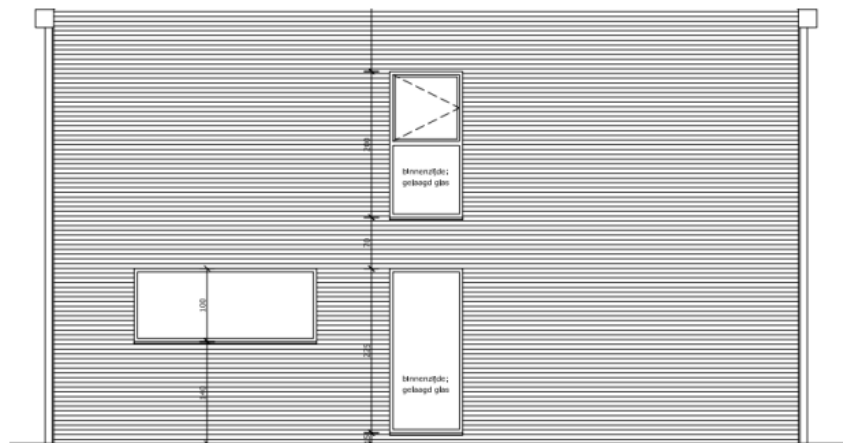
VOORGEVEL - west



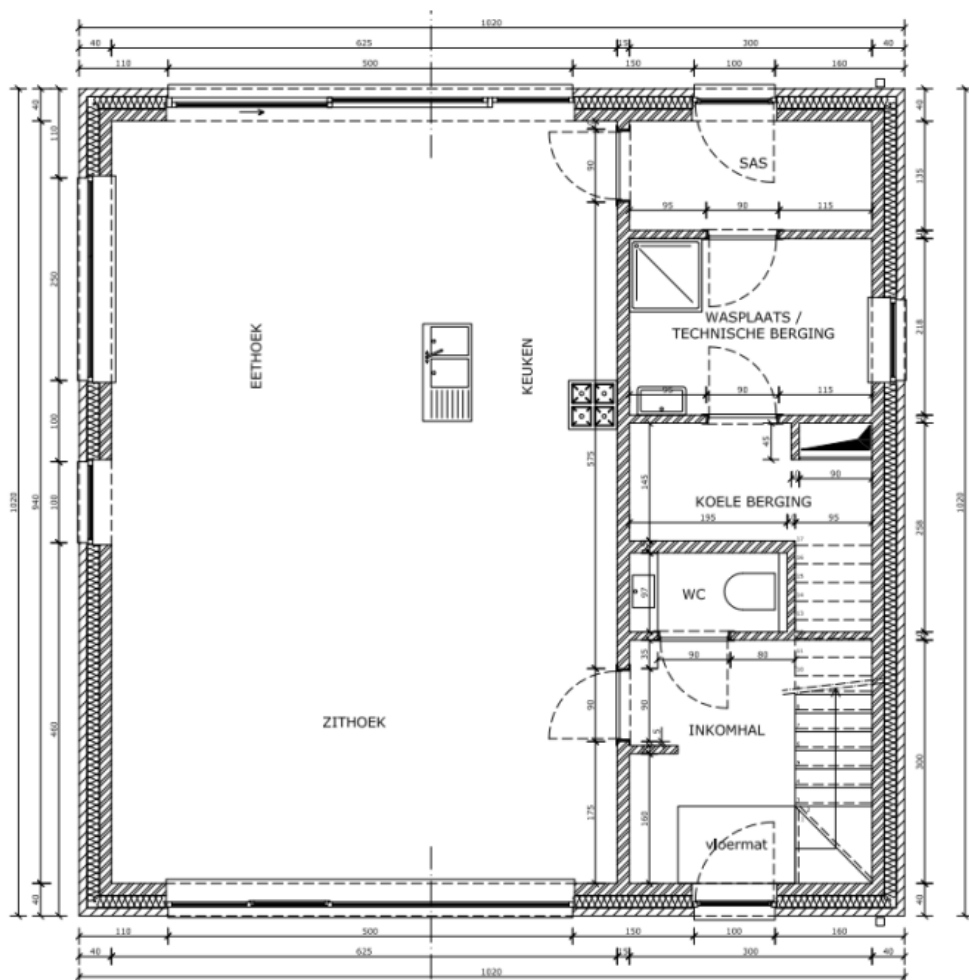
ZIJGEVEL RECHTS - zuid



ACHTERGEVEL - oost

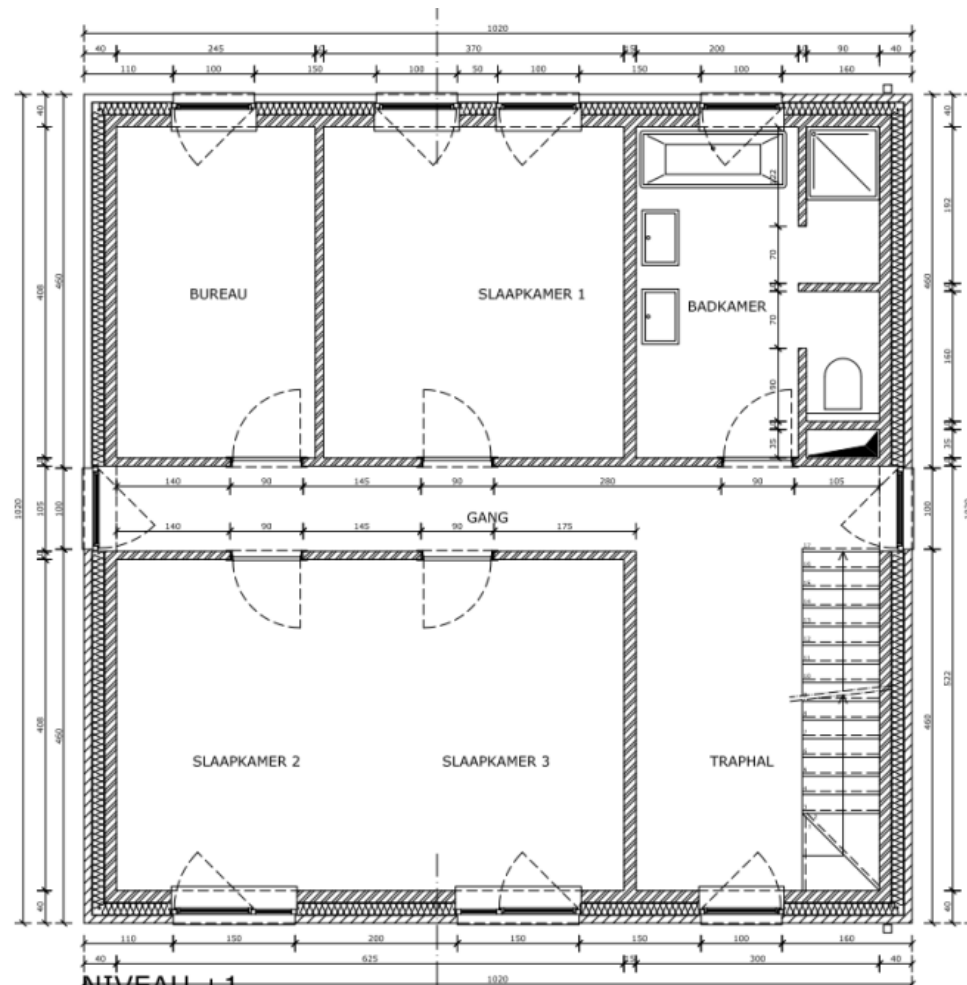


ZIJGEVEL LINKS - noord



GELIJKVLOERS

A'



NIVEAU +1

## B – Afgiftesystemen (eindunits)

In het innovatieve concept werd gebruik gemaakt van vloerkoeling. Er zijn uiteraard nog andere afgiftesystemen beschikbaar die te combineren zijn met een elektrische warmtepomp of circulatiepomp. In deze bijlage worden kort drie verschillende eindunits besproken. De voor- en nadelen van elke eindunit worden ook opgelijst.

### B.1 Vloerkoeling

Bij vloerkoeling kan hetzelfde vloersysteem gebruikt worden als bij vloerverwarming. Het afgiftevermogen van koeling is bepalend bij de dimensionering van het vloersysteem [45].

**Tabel 19 - Voor- en nadelen vloerkoeling**

VOORDELEN	NADELEN
Neemt geen leefruimte in	Thermische traagheid
Lage temperatuurafgifte	Niet mogelijk bij elk type vloerbedekking
Stralingswarmte	Dure installatie
Geluidloos	Kans op condensatie bij actieve koeling
Tochtvrij	[19][45][46]

### B.2 Plafondkoeling

Gelijkaardig aan vloerkoeling uit *B.1 Vloerkoeling*. In de zomer is het iets efficiënter dan vloerkoeling maar er is meer kans op condensatie [46].

### B.3 Ventiloconvectoren

Een ventilo convector is een convector met ingebouwde ventilator zodat een grotere vermogensuitwisseling mogelijk is. Hierdoor kan deze compacter worden uitgevoerd ten opzichte van een gewone convector. De warmtewisselaar is bovenaan de convector ingebouwd en de ventilator die onderaan staat zal de warme binnenlucht over de koude warmtewisselaar blazen zodat de binnentemperatuur daalt. Dit wordt voornamelijk in niet-residentiële gebouwen toegepast. Daarom wordt dit systeem niet verder bekeken [45].

**Tabel 20 - Voor- en nadelen ventiloconvectoren**

VOORDELEN	NADELEN
Compact	Elektriciteitsverbruik ventilator
Lage temperatuurafgifte	Geluidsproductie ventilator
Lucht is stofvrij dankzij ingebouwde filter	Relatief hoge installatiekost
Eindunits apart regelbaar	
Actieve koeling mogelijk -> lagere temperatuur	
Luchtontvochtiging mogelijk (goed voor comfort)	[15][39][47][48]

## C – Hittegolf en temperatuur setpunt

### C.1 Hittegolf

Zoals aangehaald in *Hoofdstuk 5.5*, moet er aan bepaalde voorwaarden voldaan zijn vooraleer er gesproken kan worden van een hittegolf. Om te bewijzen dat het aangepaste weerprofiel daadwerkelijk voldoet aan deze voorwaarden, wordt deze hieronder voorgesteld. Tabel 22 stelt de maximale temperatuur per dag voor.

**Tabel 21 - Max. dagtemperaturen hittegolf**

Dag 1: (10/08/2020)	Dag 2: (11/08/2020)	Dag 3: (12/08/2020)	Dag 4: (13/08/2020)	Dag 5: (14/08/2020)	Dag 6: (15/08/2020)	Dag 7: (16/08/2020)
22,40	31,39	32,64	30,56	29,76	27,24	21,94

De voorwaarden stellen dat er op tenminste vijf opeenvolgende dagen een temperatuur van 25°C wordt bereikt. Hierbij moet er op ten minste drie dagen ook een temperatuur van 30°C gehaald worden. Uit tabel 22 blijkt dat deze voorwaarden gelden van dag twee (11/08) tot dag zes (15/08), waardoor er kan gesproken worden van een hittegolf [41].

### C.2 Temperatuur setpunt

Het koelproces wordt gestart wanneer de temperatuur stijgt boven de 24°C. Deze waarde is bepaald aan de hand van Figuur 11. Met behulp van de warmteweerstand van de kleding en de activiteit van de persoon, kan de temperatuur bepaald worden waarbij er comfort geldt. De warmteweerstand, uitgedrukt in “clo”, is verschillend voor mannen en vrouwen, en hun kledingstijl. Rekening houdend met de periode van de zomer, en dus lichtere kledij, geldt er een waarde van 0,50 clo voor mannen en 0,38 clo voor vrouwen.

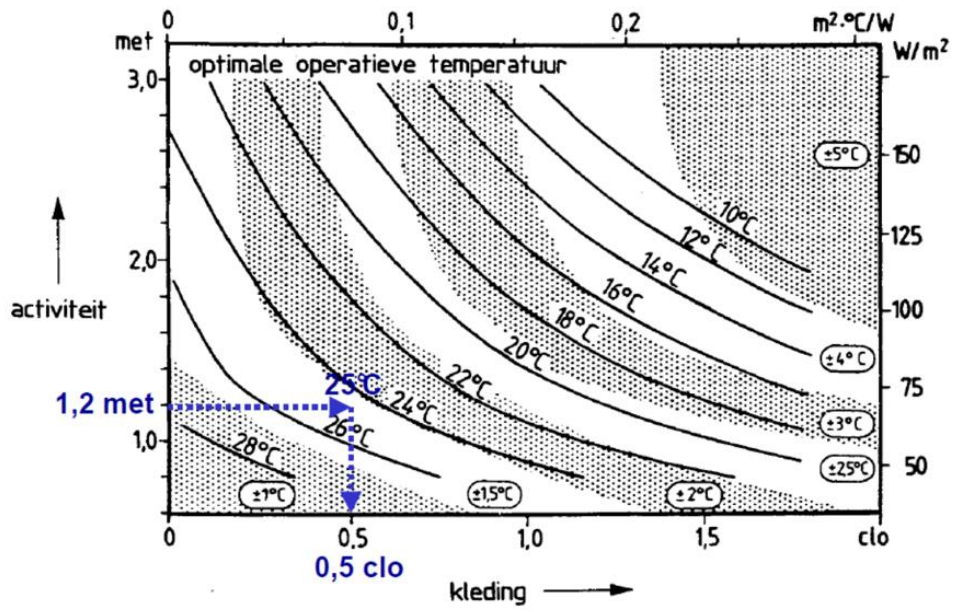
Voor de activiteit, uitgedrukt in “met”, wordt er uitgegaan van een lichte activiteit (huishoudelijk), wat overeenkomt met een waarde van 1,2 met.

Als beide waarden worden uitgezet op Figuur 12, wordt er een operationele temperatuur bekomen van 25(±1,5)°C bij mannen. Voor vrouwen zal deze hoger gelegen zijn. Om geen onderscheid te maken in geslacht zal er gewerkt worden met de laagste operationele temperatuur. Deze temperatuur duidt aan wat de gevoelstemperatuur is. Rekening houdend met het feit dat de stralingswarmte van het gebouw in de zomer hogere temperaturen bereikt, is gekozen voor een setpunt van 24°C [49].

Activiteit (bron NEN EN ISO 7730) (Totaalwaarden gebaseerd op 1,8 m <sup>2</sup> lichaamsoppervlak)	Metabolisme			Dagelijkse kleding + meubilair Voorbeeld kantooromgeving op basis van NEN EN ISO 7730	I <sub>cl</sub>	
	met	W/m <sup>2</sup>	W		clo	m <sup>2</sup> K/W
Rust, liggend	0,8	46	83	<u>Mannen</u>		
Rust, zittend	1,0	58	104	Onderbroek, hemd met korte mouwen, lichte broek, lichte sokken, schoenen	0,50	0,08
Lichte activiteit zittend (kantoor, huis, school, laboratorium)	1,2	70	126	Ondergoed, shirt, broek, jasje, sokken, schoenen	1,0	0,155
Lichte activiteit staand (winkel, laboratorium, lichte industrie)	1,6	93	167	<u>Vrouwen</u>		
Matige activiteit staand (verkoper, huishoudelijk werk, werk aan machine)	2,0	116	209	Ondergoed, bloes met korte mouwen, rok, panties, schoenen	0,38	0,06
Lopen: 2 km/h	1,9	110	200	Ondergoed, bloes, sweater, broek, sokken, schoenen	0,85	0,13
3 km/h	2,4	140	250	<u>Meubilair</u>		
4 km/h	2,8	165	300	Eenvoudige stoel	0,1	0,0155
5 km/h	3,4	200	360	Gestoffeerde stoel	0,2	0,031
				Gestoffeerde stoel met rug en zijanten	0,3	0,0465

**Figuur 11 - Activiteit en warmteweerstand kledij [49]**





Figuur 12 - Grafiek operatieve temperatuur [49]

## D – Berekening COP

### D.1 COP warmtepomp SWW

In de technische fiche van de warmtepomp voor SWW zijn volgende zaken gegeven: B0/W55 met een COP van 2,8 [40].

Met deze gegevens wordt de COP volgens Carnot berekend.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{condensor}}{T_{condensor} - T_{verdamer}} = \frac{(273 + 55)}{(273 + 55) - (273 + 0)} = \frac{328}{55} = 5,96 \quad (D-1)$$

$$COP_{reëel} = 2,8 \quad (D-2)$$

De verhouding van (D-1) en (D-2) is het systeemrendement  $\eta_{systeem}$ .

$$\eta_{systeem} = \frac{COP_{reëel}}{COP_{Carnot}} = \frac{2,8}{5,96} = 0,47 \quad (D-3)$$

Het regime waarin de warmtepomp voor SWW werkt is B11/W63 wanneer de warmte uit de bodem wordt onttrokken. Voor de bodem is 11°C genomen omdat op ongeveer 2m diepte de temperatuur in de zomer 11°C bedraagt [50]. De temperatuur van het water in het buffervat moet 60°C zodat eventuele legionellaproductie kan vermeden worden [51]. Aan de hand van de COP van Carnot en het systeemrendement uit formule (D-3) wordt de reële COP bepaald.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{condensor}}{T_{condensor} - T_{verdamer}} = \frac{(273 + 63)}{(273 + 63) - (273 + 11)} = \frac{336}{52} = 6,46 \quad (D-4)$$

$$COP_{reëel} = COP_{Carnot} * \eta_{systeem} = 6,46 * 0,47 = 3,03 \quad (D-5)$$

Op een analoge manier wordt de COP in geval van recuperatie bij passieve koeling berekend. Het regime is hier B20/W63. De bijhorende COP bedraagt dan 3,67.

### D.2 COP passieve vloerkoeling

Uit projectresultaten van het SCoolS-project van Thomas More blijkt dat vloerkoeling een nominaal vermogen heeft van 20 à 30 W/m<sup>2</sup> [52]. Voor deze case is het totale koelvermogen dan gelegen tussen 2kW en 3kW. Uit technische specificaties van verschillende circulatiepompen wordt gehaald dat het verbruik typisch tussen 4W en 60W ligt [53][54][55]. Voor de bepaling van de COP wordt met gemiddelde waarden gerekend.

$$COP_{passieve\ koeling} = \frac{nuttig}{kost} = \frac{2500\ W}{35W} = 71,4 \quad (D-6)$$

**E – Figuren- en tabellenlijst**

Figuur 1 - Split airco .....	2
Figuur 2 - Schematische voorstelling geokoeling gecombineerd met SWW .....	3
Figuur 3 - Warmtebalans woning [28].....	8
Figuur 4 - Schematische voorstelling klassiek systeem .....	10
Figuur 5 - Geokoeling zonder recuperatie (boven), met recuperatie (onder) .....	10
Figuur 6 - Plannen woning [31].....	11
Figuur 7 - SWW condenserende gasketel [38].....	14
Figuur 8 - Koelvermogen klassiek systeem.....	16
Figuur 9 - Koelvermogen innovatief systeem .....	17
Figuur 10 - Hittegolf klassiek (boven) en innovatief (onder).....	19
Figuur 11 - Activiteit en warmteweerstand kledij [49].....	28
Figuur 12 - Grafiek operationele temperatuur [49] .....	29
Tabel 1 - Soorten airco units.....	2
Tabel 2 - Werkingsmodi gecombineerd systeem .....	3
Tabel 3 - Comfortparameters.....	4
Tabel 4 - Parameters comfort en efficiëntie.....	5
Tabel 5 - Warmteproductie per activiteit.....	6
Tabel 6 - Zonwering .....	7
Tabel 7 - Warmte- en CO2 productie per activiteit .....	12
Tabel 8 - Warmteproductie toestellen.....	12
Tabel 9 - Parameters transmissieverlies [31] .....	12
Tabel 10 - IDA klasse CO2-niveau [35].....	13
Tabel 11 – Raamoppervlaktes [31].....	13
Tabel 12 - Parameters klassiek systeem.....	14
Tabel 13 - Parametes innovatief systeem .....	15
Tabel 14 - Vergelijking geleverde vermogens (1 week) .....	17
Tabel 15 - Vergelijking geleverde vermogens (12 weken) .....	18
Tabel 16 - Vergelijking primaire energiekost .....	18
Tabel 17 - Effect uitmiddeling .....	19
Tabel 19 - Vermogens hittegolf.....	20
Tabel 20 - Voor- en nadelen vloerkoeling.....	27
Tabel 21 - Voor- en nadelen ventiloconvectoren.....	27
Tabel 22 - Max. dagtemperaturen hittegolf.....	28