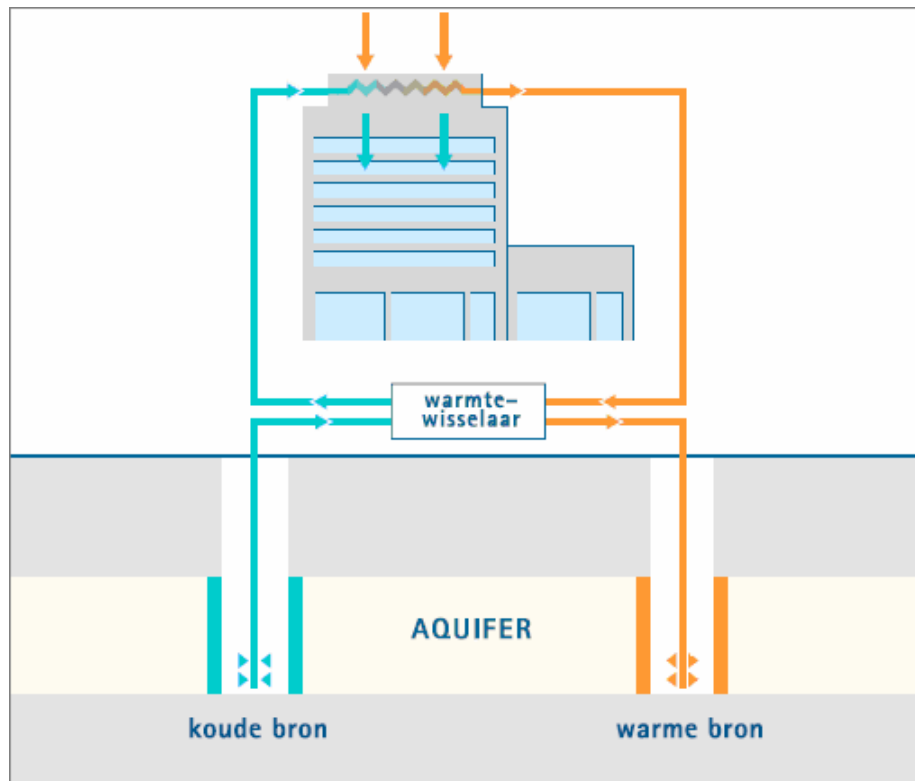


# WARMTE KOUDE OPSLAG ... NÓG BETER!



Daan Schipper  
Laurens Hos

Nijmegen, januari '07

Hogeschool Utrecht

Opleiding:  
Algemene Operationele Technologie

RTB Van Heugten Nijmegen



## Voorwoord

Voor u ligt het afstudeerrapport dat wij in het kader van onze afstudeeropdracht hebben opgesteld. De afstudeeropdracht dient ter afronding van de opleiding Algemene Operationele Technologie (AOT) aan de Hogeschool Utrecht. Wij hebben onze studietijd erg plezierig gevonden. Niet alleen wat school betreft was dit een interessante periode. Ook het contact met de medestudenten hebben wij erg belangrijk gevonden.

Door middel van Brunel Engineering zijn wij in contact gekomen met Van Heugten te Nijmegen. Van Heugten wilde een onderzoek laten verrichten naar het verbeteren van een Warmte Koude Opslag installatie. Omdat wij beiden zeer geïnteresseerd waren in deze opdracht hebben wij deze aangenomen. Duurzame energie staat op dit moment volop in de belangstelling vanwege het milieu en de stijgende energiekosten. We zijn blij met de opgedane kennis tijdens de afstudeerperiode bij Van Heugten. Door de afstudeeropdracht hebben wij veel geleerd over zowel de theoretische als de praktische aspecten van Warmte Koude Opslag installaties.

Ten slotte willen wij iedereen bedanken die direct of indirect heeft bijgedragen aan het afronden van deze afstudeeropdracht.

- Van Heugten voor het beschikbaar stellen van de afstudeerplaatsen en voor de medewerking die door Van Heugten hieraan is verleend.
- De collega's van de afdeling Utiliteit en Industrie voor alle informatie en gezelligheid.
- Contactpersonen van verschillende fabrikanten.
- De heer R. Zoete (afstudeerbegeleider school) en ir. M.T. de Jong (afstudeerbegeleider Van Heugten)
- Onze ouders die ons de mogelijkheid hebben geboden om te gaan studeren en ons gedurende de studie hebben gesteund.

Daan Schipper en Laurens Hos,

Nijmegen, januari '07



## Samenvatting

Dit afstudeerrapport bevat het onderzoek naar het verbeteren van een Warmte Koude Opslag (WKO) installatie. Er zijn veel 'standaard' haalbaarheidsstudies gedaan waarbij veelal berekeningen en simulaties gemaakt worden om het energieverbruik te bepalen. In tegenstelling tot de 'standaard' haalbaarheidsstudies wordt dit onderzoek verricht aan de hand van meetgegevens van het warmte- en koudegebruik van een bestaand project. Deze meetgegevens zijn gecombineerd met de energieopwekking van een nog te bouwen kantoorgebouw. Hierbij is een model gemaakt waarin een berekening gemaakt wordt van de financiële besparing per jaar, terugverdientijd en de financiële besparing na 20 jaar ten opzichte van een conventionele warmte- en koude-installatie. Naast de financiële besparing is in het model de reductie van schadelijke stoffen berekend wanneer een WKO installatie wordt toegepast ten opzichte van een conventionele installatie. Tevens is het model gebruikt om de meest geschikte warmtepomp te bepalen. Aan de hand van het model en de meetgegevens is gekeken of het ontwerp van de WKO installatie geoptimaliseerd kan worden, ten opzichte van het ontwerp van het nog te bouwen kantoorgebouw, wat gebaseerd is op berekeningen en simulaties.

Uit het onderzoek komt naar voren dat het financieel en milieutechnisch gezien gunstig is om een WKO installatie te plaatsen. Uit verder onderzoek met verschillende warmtepompvermogens is gebleken dat een warmtepomp met een vermogen van 400 kW zorgt voor de kortste terugverdientijd en dat een aanzienlijke reductie van schadelijke stoffen wordt gerealiseerd ten opzichte van de conventionele installatie.

Het document is opgebouwd uit een aantal hoofdstukken. Allereerst volgt een inleiding. Hierin wordt beschreven hoe de opdracht is verkregen en waarom de opdracht wordt uitgevoerd.

Vervolgens wordt de opdracht beschreven. Er wordt uitgelegd wat de vraagstelling van Van Heugten is. Daarna worden de centrale onderzoeksvraag, de doelstellingen die bereikt moeten worden en een gedetailleerde omschrijving van de opdracht beschreven.

Na de opdrachtoomschrijving wordt het plan van aanpak beschreven. Het plan van aanpak is in eerste instantie geschreven om het onderzoek in goede banen te leiden en om een indruk te geven hoe te werk is gegaan tijdens het afstudeeronderzoek. In het plan van aanpak is het project opgedeeld in drie fasen: het vooronderzoek, de uitwerkingen en de conclusies.

In het vooronderzoek wordt kort beschreven wat een WKO installatie is en wordt het principe achter een warmte koude opslag installatie beschreven. Vervolgens komen de volgende aspecten aan bod: het jaaroverzicht energieverbruik, bepaling piekvermogens, bepaling van extreme weersituaties, investering- en onderhoudskosten, de bronbalans, regelingen in een koud, normaal en warm jaar, de meest geschikte warmtepomp, extra besparingsmogelijkheden en een beschrijving van de gemaakte rekenmodellen.

Het onderzoek wordt afgesloten met het hoofdstuk 'Conclusies'. Het bevat de conclusies uit de onderzoeksvragen gevolgd door een aantal discussiepunten betreffende het onderzoek. Tot slot worden aanbevelingen gedaan voor Van Heugten.



## Inhoudsopgave

Afkortingen en begrippen .....	9
Inleiding .....	11
1 De opdracht .....	13
1.1 Vraagstelling .....	13
1.2 Doelstelling .....	13
1.3 Opdrachtoomschrijving .....	13
2 Plan van aanpak .....	15
2.1 Vooronderzoek .....	15
2.2 Uitwerkingen .....	15
2.3 Conclusies .....	15
3 De werking van WKO .....	17
3.1 WKO principe .....	17
4 Onderzoekresultaten .....	19
4.1 Jaaroverzicht energieverbruik .....	20
4.2 Bepaling piekvermogens .....	24
4.3 Weersituaties .....	25
4.4 Kosten .....	26
4.4.1 Investeringskosten .....	26
4.4.2 Onderhoudskosten .....	27
4.4.3 Gas- en elektriciteitsprijs .....	27
4.5 Bronbalans .....	28
4.5.0 Onbalans .....	28
4.5.1 Energiekosten systemen .....	29
4.6 Regelingen .....	30
4.6.1 Koud en normaal jaar .....	30
4.6.2 Warm jaar .....	32
4.7 Meest geschikte warmtepomp .....	33
4.7.1 Financiële besparing .....	34
4.7.2 Milieubesparing .....	38
4.7.3 Meest geschikte warmtepomp .....	42
4.8 Extra besparingen .....	44
4.8.1 Energieprijs variatie .....	44
4.8.2 Temperatuurvariatie .....	45
4.8.3 Warmte invangen met drogekoeler .....	47
4.8.4 Energiedak .....	50
4.8.5 Subsidie .....	51
4.8.6 EPC .....	51
4.8.7 Conventioneel koelen versus WKO .....	52
4.9 Beschrijving modellen .....	54
4.9.1 Rekenmodel .....	54
4.9.2 COP bepaling .....	55
5 Conclusies .....	57
5.1 Conclusies onderzoeksvragen .....	57
5.2 Discussie .....	58
6 Literatuurlijst .....	61

**Bijlagenlijst**

Bijlage 1 Bedrijfsbeschrijving  
Bijlage 2 WKO  
Bijlage 3 Energie richtlijnen  
Bijlage 4 Kosten  
Bijlage 5 Samenstelling gas- en elektriciteitsprijzen  
Bijlage 6 Subsidie  
Bijlage 7 Correctiefactoren seizoensgegevens  
Bijlage 8 Energieverbruik per seizoenssituatie  
Bijlage 9 Bepaling piekvermogens  
Bijlage 10 Extreme weersituaties  
Bijlage 11 Keuze warmtepomp  
Bijlage 12 Emissies  
Bijlage 13 Rendementsbepaling  
Bijlage 14 Regelingen seizoenen  
Bijlage 15 Meetgegevens  
Bijlage 16 Rekenmodel vermogens  
Bijlage 17 Vermogensberekening drogekoeler  
Bijlage 18 Financiële besparing per warmtepompvermogen  
Bijlage 19 CO<sub>2</sub> reductie per warmtepompvermogen  
Bijlage 20 NO<sub>x</sub> reductie per warmtepompvermogen  
Bijlage 21 SO<sub>2</sub> reductie per warmtepompvermogen  
Bijlage 22 Systeemtelingen



## Afkortingen en begrippen

CBS	<i>Centraal Bureau voor de Statistiek</i>
CO <sub>2</sub>	<i>Koolstofdioxide</i>
COP	<i>Coëfficiënt Of Performance</i>
CV	<i>Centrale verwarming</i>
DK	<i>Drogekoeler</i>
ECN	<i>Energieonderzoek Centrum Nederland</i>
EIA	<i>Energie Investering Aftrek</i>
EPA	<i>Energie Prestatie Advies</i>
EPBD	<i>Energy Performance Building Directive</i>
EPC	<i>Energie Prestatie Coëfficiënt</i>
EPDM	<i>Ethyleen Propyleen Dieen Monomeer</i>
EPN	<i>Energie Prestatie Norm</i>
GKW	<i>Gekoeld water</i>
HTV	<i>Hoge Temperatuur Verwarming</i>
KM	<i>Koelmachine</i>
KNMI	<i>Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut</i>
LBK	<i>Luchtbehandelingskast</i>
LTV	<i>Lage Temperatuur Verwarming</i>
NO <sub>x</sub>	<i>Stikstofoxiden</i>
PER	<i>Primary Energy Ratio</i>
PVC	<i>Polyvinylchloride</i>
RLK	<i>Regeling Lekdichtheid</i>
SO <sub>2</sub>	<i>Zwavel dioxide</i>
STEG	<i>Stoom- en gasturbine</i>
STEK	<i>Stichting Erkenningsregeling voor de uitoefening van het Koeltechnisch installatiebedrijf</i>
TCO	<i>Total Costs of Ownership</i>
TNO	<i>Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek</i>
TSA	<i>Tegenstroom apparaat</i>
VITO	<i>Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek</i>
VROM	<i>Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer</i>
WKK	<i>Warmte Kracht Koppeling</i>
WKO	<i>Warmte Koude Opslag</i>
WP	<i>Warmtepomp</i>

NEN 2916 utiliteitsbouw en NEN 5128 woongebouwen

*Bepalingsmethode voor EPC van een gebouw. Hiermee kan de energiezuinigheid van de bouwkundige en installatietechnische componenten van een gebouw worden beoordeeld.*

NEN-EN 13487

*Warmtewisselaars; condensors met geforceerde luchtkoeling en drogekoelers. Een berekeningsmethode voor de geluidsmeting op een bepaalde afstand.*



## Inleiding

Na eerdere kennismaking met het bedrijfsleven tijdens de stage wordt de opleiding AOT aan de Hogeschool Utrecht afgesloten met een afstudeeropdracht. De kennis die is opgedaan tijdens de studie wordt in de praktijk toegepast in een project dat in vier maanden dient te worden gerealiseerd.

Raadgevend Technies Buro Van Heugten te Nijmegen bood ons de kans om ons te verdiepen in een WKO installatie. Van Heugten is een onafhankelijk adviesbureau op het gebied van technische installaties in de bouw, waarbij alle advieswerkzaamheden van initiatief tot en met realisatie en onderhoud en beheer worden uitgevoerd.

Bij Van Heugten worden WKO installaties veel toegepast vanuit het oogpunt van kosten en milieu. Conventionele technieken om te verwarmen met een ketel en koelen met een compressiekoelmachine zijn echter in de loop der jaren steeds energiezuiniger geworden. Daarom kwam bij Van Heugten de vraag naar voren de voor- en nadelen van een WKO installatie ten opzichte van conventioneel verwarmen en koelen te actualiseren. Daarnaast wilde Van Heugten weten wat er aan het systeem zou kunnen verbeteren waardoor een WKO installatie aantrekkelijker wordt. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de ervaringen met gerealiseerde projecten van de afgelopen jaren. De centrale vraag 'Wat is de werkelijke terugverdientijd van de WKO installatie en hoe valt de installatie te verbeteren ten opzichte van de conventionele installatie?' zal daarom nader worden uitgewerkt. De gedetailleerde beschrijving van de opdracht wordt in hoofdstuk 1 'De opdracht' beschreven.

In de hoofdstukken 1 en 2 'Plan van aanpak' wordt de opdracht omschreven en afgebakend. Hoofdstuk 3 'De werking van WKO' geeft een algemene beschrijving van de werking van een WKO installatie. Aan de hand van ontvangen meetgegevens en systeemtekeningen wordt in hoofdstuk 4 'Onderzoeksresultaten' als eerste de warmte- en koudevraag vastgesteld. Vervolgens worden de piekvermogens en extreme weersituaties bepaald. In paragrafen 4.4 en 4.5 worden vervolgens de kosten en bronbalans uitgewerkt. Daarna kan worden bepaald welke warmtepomp (paragraaf 4.7) het meest geschikt is voor het project en welke besparingsmogelijkheden (paragraaf 4.8) er eventueel kunnen worden toegepast. Hierbij valt te denken aan energieprijsvariatie, temperatuurvariatie, warmte invangen met drogekoeler en subsidies.

Tot slot wordt het resultaat van het onderzoek geëvalueerd in hoofdstuk 5 'Conclusies'. In dit hoofdstuk worden conclusies en aanbevelingen gedaan. Vervolgens worden een aantal punten uit het onderzoek ter discussie gesteld. De bevindingen die hieruit volgen zullen leiden tot aanbevelingen om het project in de toekomst uit te breiden of de nauwkeurigheid ervan te verbeteren.



## 1 De opdracht

In dit hoofdstuk wordt de opdracht beschreven. Hierin wordt uitgelegd wat de onderzoeksvraag van Van Heugten is (1.1), welke doelen er gesteld worden met de uitwerkingen hiervan (1.2) en een opdrachtomschrijving (1.3).

### 1.1 Vraagstelling

De vraagstelling houdt in het verbeteren van een WKO installatie in een kantoorgebouw van 15.000 m<sup>2</sup>. Bij Van Heugten is een opdracht opgesteld, waarbij een gedetailleerde haalbaarheidsstudie moet worden uitgevoerd, gebruik makend van meetgegevens van bestaande projecten. Daarnaast wil het bedrijf weten wat het gevolg is van het veranderen van temperaturen aan de warmtepomp en andere opties om het systeemrendement te verbeteren.

De centrale vraag tijdens het onderzoek luidt: 'Wat is de werkelijke terugverdientijd van de WKO installatie en hoe valt de installatie te verbeteren ten opzichte van de conventionele installatie?' Deze vraag is opgedeeld in de volgende punten:

- Vergelijking van de investering- en onderhoudskosten van de WKO en conventionele installatie.
- Wat is de thermische balans in de bron en hoe is deze, in geval van een onbalans, te herstellen?
- Welke warmtepomp zorgt voor de kortste terugverdientijd en de minste emissie van schadelijke stoffen?
- Welke extra opties zijn mogelijk voor een kortere terugverdientijd van de WKO installatie?

### 1.2 Doelstelling

Aan het einde van het onderzoek wordt een advies gegeven voor de meest geschikte warmtepomp voor het kantoorgebouw. Daarnaast worden opties genoemd om het systeem verder te verbeteren.

### 1.3 Opdrachtomschrijving

Voor de opdracht worden meetgegevens gebruikt (warmte en koudevraag) van een bestaand kantoorgebouw met WKO installatie. Deze gegevens worden gecombineerd met de WKO installatie van een nog te realiseren project.

De opdracht is een haalbaarheidsstudie naar de WKO installatie in combinatie met een warmtepomp ten opzichte van conventionele warmte- koudeopwekking. Er wordt ook uitgezocht welke verbeteringen toegepast kunnen worden om de financiële besparing te vergroten, het energieverbruik te verminderen en de uitstoot van schadelijke stoffen te reduceren.

Met het veranderen van temperaturen aan de warmtepomp worden de temperaturen aan de verdamperszijde bedoeld. De warmtepomp is in bedrijf bij bepaalde in- en uitgangstemperaturen. Hier wordt onderzocht wat het effect is als de temperaturen verhoogd of verlaagd worden.

Een mogelijke manier om energie te besparen is door bijvoorbeeld de capaciteit van de drogekoeler te vergroten of te verkleinen waardoor er meer of minder warmte en koude kan worden ingevangen. Ook wordt gekeken of er andere mogelijkheden zijn om warmte en koude in te vangen<sup>1</sup> om de bronbalans te herstellen. Er wordt alleen gekeken naar warmte- en koudeopwekking, het klimaatinstallatie wordt buiten beschouwing gelaten.

Uit het onderzoek volgt een model, waar op basis van de gebruikte jaargegevens een uitkomst van de besparing wordt gegeven. Ook is het mogelijk om op basis van de oppervlakte van een gebouw en een in te voeren warmtepomp een beeld te vormen van de besparingen.

1) Er wordt in het rapport gesproken over het invangen van koude. Dit betekent dat warmte wordt afgevoerd.



## 2 Plan van aanpak

Om een beeld te vormen hoe het onderzoek is aangepakt, wordt in dit hoofdstuk het plan van aanpak beschreven. Het bestaat uit een drietal componenten: het vooronderzoek (2.1) waar de nodige voorkennis wordt opgedaan, de uitwerkingen (2.2) waar het onderzoek plaatsvindt en de conclusies (2.3) waar de resultaten beknopt en overzichtelijk worden weergegeven en een aanbeveling wordt gedaan.

### 2.1 Vooronderzoek

In het vooronderzoek worden vooral algemene zaken uitgezocht om kennis en inzicht te krijgen in het systeem.

Allereerst wordt gekeken wat een WKO installatie is. Hierbij wordt het systeem in componenten opgedeeld en worden deze componenten uitgezocht en beschreven. Deze beschrijvingen worden verder uitgelegd in bijlage 2 'WKO'.

Vervolgens wordt gekeken waar de conventionele installatie uit bestaat en zijn een aantal systeemtekeningen van beide installaties gemaakt, deze zijn beschreven in bijlage 14 'Systeemtekeningen origineel systeem'. Nadat duidelijk wordt waar het project uit bestaat wordt een analyse uitgevoerd op de meetgegevens. De gegevens worden geanalyseerd en gerangschikt, zodat er concrete informatie uit te halen valt die bruikbaar is voor het onderzoek.

### 2.2 Uitwerkingen

Als het vooronderzoek is afgerond wordt gekeken hoe de meetgegevens gebruikt kunnen worden om een model te creëren. Hiervoor wordt eerst onderzocht wat beschouwd wordt als een koud, normaal en warm jaar in Nederland. Aan de hand van deze bevindingen worden verschillende seizoenssituaties gesimuleerd.

Daarna worden de piekvermogens van het systeem bepaald welke nodig zijn om het vermogen van de componenten te dimensioneren en een rekenmodel op te stellen.

Aan de hand van het rekenmodel wordt een beeld gevormd van de balans in de bron bij de verschillende jaarsituaties. Als een onbalans ontstaat, wordt berekend wat de kosten zijn om de bron weer in balans te brengen.

Op basis van deze gegevens kan een nieuw model worden gemaakt om het systeem te dimensioneren. Het model bevat de financiële besparing en de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en SO<sub>2</sub> reductie. Hieruit volgt de keuze van de meest geschikte warmtepomp voor dit project.

Om na te gaan hoe de installatie zich in de toekomst kan gedragen wordt er een model opgesteld rekeninghoudend met een aantal factoren. Er wordt uitgezocht wat het effect is van hogere of lagere energieprijzen op de besparing en terugverdientijd op de WKO installatie over een periode. Daarnaast of het interessant is om koude op een conventionele manier op te wekken en wat er gebeurt wanneer een drogekoeler met een grotere of kleinere capaciteit wordt toegepast. Uiteindelijk worden een aantal optionele addities aan de WKO installatie uitgezocht.

### 2.3 Conclusies

In de conclusie worden alle bevindingen van het project verwerkt. Aan de hand van de resultaten en bevindingen worden aanbevelingen gedaan betreft mogelijke verbeteringen aan de installatie. Ook wordt een analyse gemaakt hoe het onderzoek nauwkeuriger verricht kan worden en wat nog uitgezocht kan worden.





### 3 De werking van WKO

WKO installaties worden al vele jaren toegepast en over de werking van dit systeem is al veel geschreven en bekend. Dit hoofdstuk dient daarom als algemene informatie over WKO installaties. In bijlage 2 'WKO' wordt WKO uitgebreid beschreven.

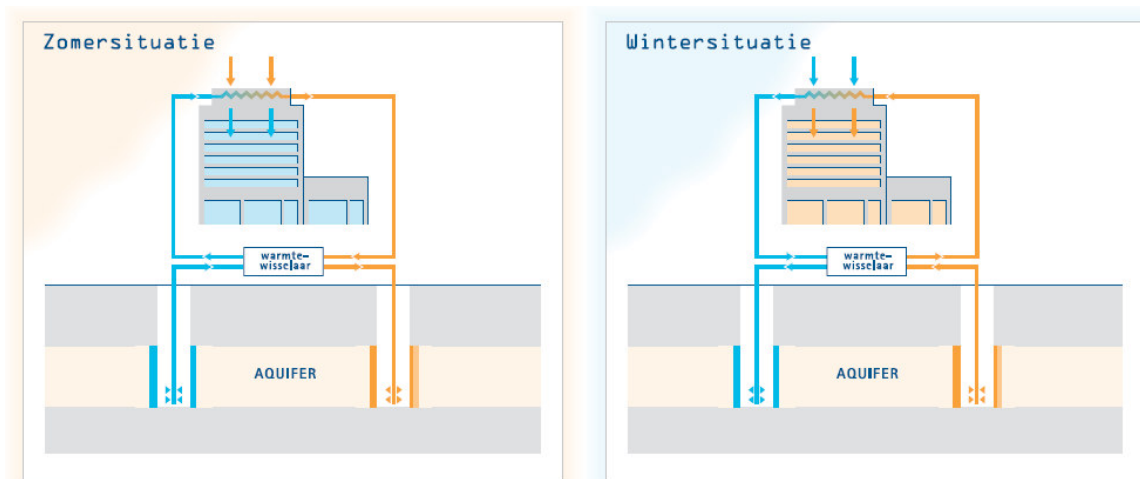
#### 3.1 WKO principe

Een WKO installatie maakt het mogelijk om energie op te slaan in een aquifer. Een aquifer is een watervoerende zandlaag die bestaat uit poreus zand. Deze laag zit gevangen tussen bijvoorbeeld twee kleilagen die ervoor zorgen dat oppervlaktewater niet in contact komt met het water in de aquifer, het bronwater niet naar de oppervlakte komt of het bronwater in de bodem wegzakt. De installatie maakt gebruik van energieopslag in de grond door middel van 'warm' en 'koud' water wat vaak gebruikt wordt in combinatie met een warmtepomp.

Om warmte en koude onder de grond op te slaan, moeten er putten worden geslagen om het water te transporteren naar de aquifer voor opslag. Doordat het water in het poreuze zand wordt vastgehouden, kan het worden opgeslagen en worden onttrokken alsof de grond een spons is. Dit wordt gedaan met pompen die tot in sommige gevallen met een debiet van 300 m<sup>3</sup>/h vanaf 200 meter diep het water injecteren of oppompen uit de aquifer.

Er zijn verschillende typen WKO installaties, namelijk mono- en doubletbronnen. Voor het project wordt gebruik gemaakt van een doublet systeem. Dit systeem maakt gebruik van twee verschillende bronnen die een bepaalde afstand uit elkaar staan. Dit omdat het water van de warme bron niet met het water van een koude bron mag mengen (thermische kortsluiting).

Een monobron is een bronsysteem waarbij de warme bron boven de koude bron is geplaatst. De bronnen zijn gescheiden door een stoorlaag zodat thermische kortsluiting voorkomen wordt.



Figuur 1: Zomersituatie en wintersituatie (bron: SenterNovem)

#### Zomersituatie

Het idee achter een WKO installatie is om in de zomer koud water van 9°C uit de grond te pompen, door een warmtewisselaar te leiden en het opgewarmde water van 17°C vervolgens op te slaan in de 'warme bron'. Als het gevraagde koudevermogen in het gebouw groter is dan het vermogen van de koude bron moet de warmtepomp inschakelen om het gewenste setpoint te bereiken. In dat geval wordt de warmte van ongeveer 35°C, die geproduceerd wordt aan de condensorzijde, vervolgens door de tweede warmtewisselaar afgegeven aan het bronsysteem. Hierbij moet er wel rekening mee worden gehouden dat er water met een maximum van 25°C opgeslagen mag worden in de bron.

**Wintersituatie**

In de winter werkt het andersom. Het opgeslagen water is afgekoeld in de bodem en wordt met circa 15°C uit de warme bron gepompt en door de warmtewisselaar geleid. De warmte wordt vervolgens door de verdamper van de warmtepomp afgekoeld naar ongeveer 6°C. Door middel van een compressor wordt de temperatuur verhoogd tot maximaal 55°C. Als de warmtevraag groter is dan de warmtepomp kan leveren kan een ketel de extra benodigde warmte opwekken. De geproduceerde 6°C aan de verdamperzijde zorgt ervoor dat de warmtestroom uit de warme bron wordt afgekoeld naar ongeveer 7°C in de TSA. Het afgekoelde water wordt vervolgens weer opgeslagen in de 'koude bron'.

Op deze manier wordt efficiënt gebruik gemaakt van energie, omdat de koude van de winter en warmte van de zomer benut kan worden. Ook de toegevoerde elektrische energie van de warmtepomp wordt omgezet in bruikbare warmte die direct benut of opgeslagen kan worden. Bij een koelmachine gebeurt dit niet; de geproduceerde warmte moet worden afgevoerd.

Er zijn verschillende uitvoeringen mogelijk met WKO installaties door te combineren met conventionele systemen. De installatie kan bijvoorbeeld extra zijn uitgerust met bijvoorbeeld een ketel voor extra verwarming of met een koelmachine, koeltoren of drogekoeler voor extra koeling. De drogekoeler kan ook gebruikt worden om warmte in te vangen.

**Doubletbron**

In figuur 1 wordt een kantoorgebouw met doubletbron schematisch weergegeven zoals die in het project gebruikt wordt. Een doubletbron bestaat uit twee bronnen waarbij de ene bron gebruikt wordt voor opslag van koud water en de andere voor warm water. Als water wordt opgeslagen wordt dit ook wel infiltreren genoemd. Vervolgens ontstaat een bel met water die wanneer gewenst onttrokken kan worden.

Bij een doublet uitvoering wordt gebruik gemaakt van twee bronnen die het ver genoeg uit elkaar staan, zodat de temperaturen uit de koude en warme bron elkaar niet kunnen verstoren. Het systeem is geschikt tot maximaal 300 m<sup>3</sup>/h. Een doubletsysteem wordt gebruikt bij vermogens van 350 tot 2000 kW.

Bij de huidige stand van de techniek kan op basis van investeringen de volgende globale indeling van opslagsystemen gemaakt worden:

- 0 tot 350 kW monobronsystemen
- 350 tot 2000 kW doubletsystemen

Het voorgaande geldt onder voorwaarde van een geschikte bodemgesteldheid. Op sommige plaatsen kan door samenstelling van de bodem geen WKO worden toegepast of kunnen alleen systemen toegepast worden met een klein debiet. Ook moet rekening gehouden worden met grondwaterstroming. Als het grondwater te snel stroomt, zou de warmte of koude verloren gaan of zouden koud en warm kunnen mengen. Een voorwaarde die de overheid stelt is dat de bodem over een periode van vijf jaar thermisch in balans moet zijn. Dit houdt in dat er netto niet meer koude of warmte onttrokken mag worden dan wordt geladen.

De rentabiliteit van systemen hangt sterk af van de specifieke projectkenmerken. Hierbij moet men denken aan de aanwezigheid van elektriciteit, gas en aansluiting op het riool. Als deze niet ter plekke aanwezig zijn moeten extra voorzieningen getroffen worden die extra kosten met zich meebrengen.

## 4 Onderzoeksresultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het onderzoek beschreven. De opbouw van bevindingen bestaat uit; analyses, het bepalen van de investeringskosten, het creëren van een model en de uitkomsten hiervan. Aan het eind worden een aantal variaties toegepast waarmee wordt nagegaan welke extra besparingen mogelijk zijn.

De volgende onderwerpen worden in dit hoofdstuk uitgewerkt:

- 4.1 Jaaroverzicht energieverbruik
- 4.2 Bepaling piekvermogens
- 4.3 Weersituaties
- 4.4 Kosten
  - 4.4.1 Investeringskosten
  - 4.4.2 Onderhoudskosten
  - 4.4.3 Gas- en elektriciteitsprijs
- 4.5 Bronbalans
  - 4.5.0 Onbalans
  - 4.5.1 Energiekosten systemen
- 4.6 Regelingen
  - 4.6.1 Koud en normaal jaar
  - 4.6.2 Warm jaar
- 4.7 Meest geschikte warmtepomp
  - 4.7.1 Financiële besparing
  - 4.7.2 Milieubesparing
  - 4.7.3 Meest geschikte warmtepomp
- 4.8 Extra besparingen
  - 4.8.1 Energieprijs variatie
  - 4.8.2 Temperatuurvariatie
  - 4.8.3 Warmte invangen met drogekoeler
  - 4.8.4 Energiedak
  - 4.8.5 Subsidie
  - 4.8.6 EPC
  - 4.8.7 Conventioneel koelen versus WKO
- 4.9 Beschrijving modellen
  - 4.9.1 Rekenmodel
  - 4.9.2 COP bepaling

#### 4.1 Jaaroverzicht energieverbruik

Om een duidelijk beeld te vormen van de aangeleverde meetgegevens, zijn deze eerst geanalyseerd, geschaald met 66% en verwerkt tot concrete informatie. De reden voor schalen is dat de meetgegevens afkomstig zijn van een groter gebouw. Het gebruiken van de meetgegevens is geoorloofd omdat het gebruik en de gebouwen goed vergelijkbaar zijn. De resultaten en keuzes die zijn gemaakt worden in dit hoofdstuk beschreven door middel van tabellen en grafieken.

Om het jaar overzichtelijk weer te geven zijn de jaargegevens allereerst opgesplitst in de verschillende seizoenen. Dit is gebeurd aan de hand van de meteorologische gegevens van het KNMI. Zo zijn de gevraagde vermogens van de winter, lente, zomer en herfst ontstaan.

	CV vraag	GKW vraag
Winter	501 MWh	27 MWh
Lente	254 MWh	93 MWh
Zomer	46 MWh	225 MWh
Herfst	169 MWh	142 MWh
Totaal	970 MWh	487 MWh

Tabel 1: CV en GKW vraag per seizoen voor het jaar 2005.

Hierbij zijn de gegevens van één jaar gebruikt, waarbij seizoenen gesimuleerd zijn aan de hand van het vermogen. Het vermogen is geschaald door middel van correctiefactoren, waarmee een 'koud', 'normaal' en 'warm' seizoen gesimuleerd wordt. Dit houdt in:  $-2^{\circ}\text{C}$  voor een koud en  $+2^{\circ}\text{C}$  voor een warm seizoen bij een gemiddeld 'normale' temperatuur. Gekozen is voor  $-2^{\circ}\text{C}$  en  $+2^{\circ}\text{C}$  omdat dit uit gegevens van het KNMI is afgeleid.

De berekende correctiefactoren staan weergegeven in tabel 2 en 3. De wijze waarop deze zijn berekend is te lezen in bijlage 7 'Correctiefactoren seizoensgegevens'.

Koeling	
Koude zomer 0,80	Warme zomer 1,37
Koude winter 0,69	Warme winter 1,95
Koude herfst 0,83	Normale herfst 0,72
Koude lente 0,78	Warme lente 1,08

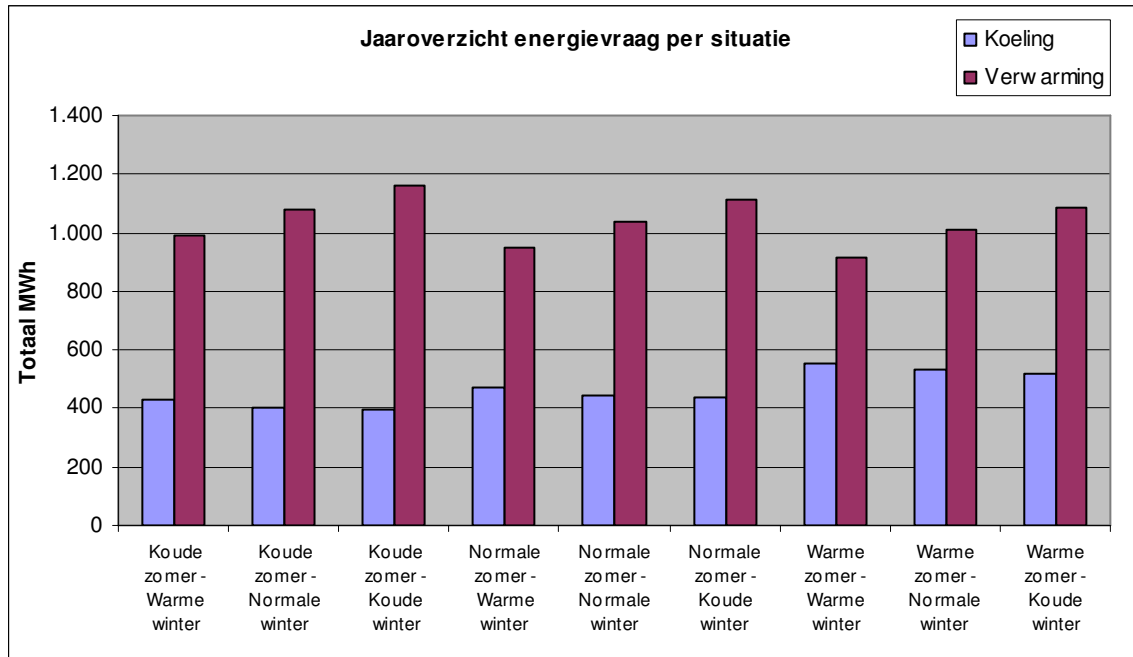
Tabel 2: Correctiefactoren voor koeling

Verwarming	
Koude zomer 1,96	Warme zomer 0,36
Koude winter 1,16	Warme winter 0,82
Koude herfst 0,75	Normale herfst 0,72
Koude lente 1,31	Warme lente 0,63

Tabel 3: Correctiefactoren voor verwarming

Om bijvoorbeeld een koude zomer te simuleren worden de meetgegevens in de zomer vermenigvuldigd met 0,80. Omdat het een warme herfst was in 2005 wordt hier teruggeschaald naar een normale en koude situatie. Met de correctiefactoren wordt het energieverbruik per seizoenssituatie berekend. De resultaten hiervan zijn te vinden in bijlage 8 'Energieverbruik per seizoenssituatie'.

Van de seizoenen is een overzicht gemaakt waarbij deze zijn samengevoegd tot verschillende jaarsituaties om de extremen te bepalen. Een overzicht van de samengevoegde seizoenen staat weergegeven in figuur 2.



Figuur 2: Jaaroverzicht van samengestelde seizoenen

Figuur 2 is samengesteld door de vermogens uit de gesimuleerde seizoenen bij elkaar op te tellen. Bijvoorbeeld door de koeling van de winter op te tellen bij de koeling van de zomer. Ook zijn de vermogens uit de tussenperiodes meegerekend (herfst en lente). Voor de herfst en lente is gekozen om gebruik te maken van de normale seizoensomstandigheden. De herfst en lente hebben relatief beperkte invloed op de gehele koeling en verwarming. Dit is noodzakelijk om de complexiteit van het onderzoek te beperken. Wanneer alle seizoenssituaties worden meegenomen ontstaan namelijk 27 verschillende mogelijkheden.

De meest extreme situatie is de koude zomer en koude winter. Hierbij is er een vermogenverschil van 766 MWh. Dit betekent dat meer warmte uit de bodem onttrokken wordt waardoor een koudeoverschot ontstaat, mits niet extra verwarmd wordt om de bron te ontlasten.

De minst extreme situatie is een warme zomer en warme winter. In dit geval is het vermogen verschil slechts 362 MWh. Over het hele jaar gezien is er altijd een grotere warmte- dan koudevraag.

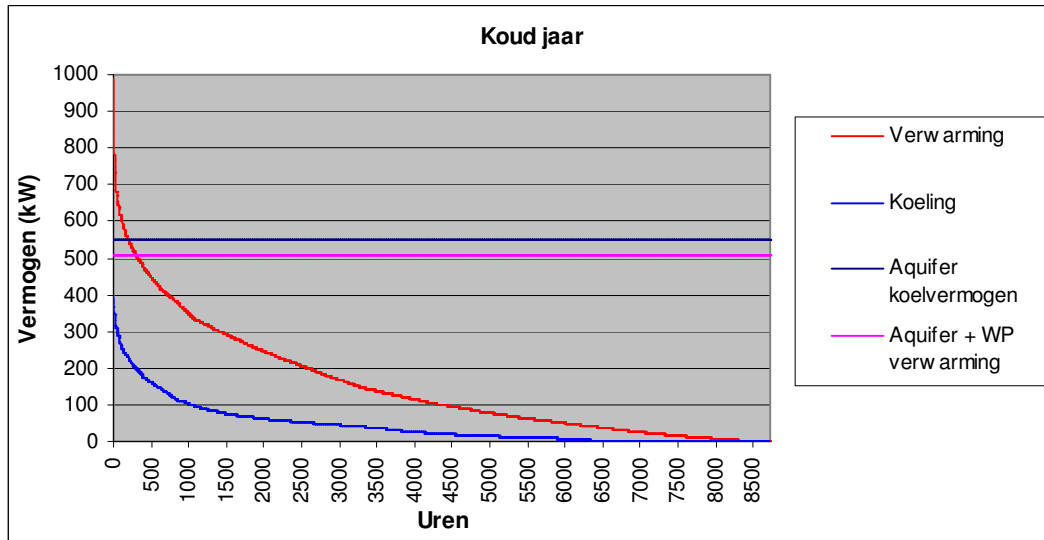
Omdat een koude zomer / koude winter, en een warme zomer / warme winter de uitersten zijn, is gekozen om verder te rekenen met de volgende situaties:

- Een koud jaar (koude winter, koude lente, koude zomer en koude herfst).
- Een normaal jaar (normale winter, normale lente, normale zomer en normale herfst).
- Een warm jaar (warme winter, warme lente, warme zomer en warme herfst).

De resultaten van deze situaties zijn weergegeven in figuren 3, 4 en 5 waar door middel van een curve (jaarbeslastingskromme) wordt aangegeven hoeveel uur een bepaald vermogen gevraagd wordt.

Jaarsituaties

Koud jaar



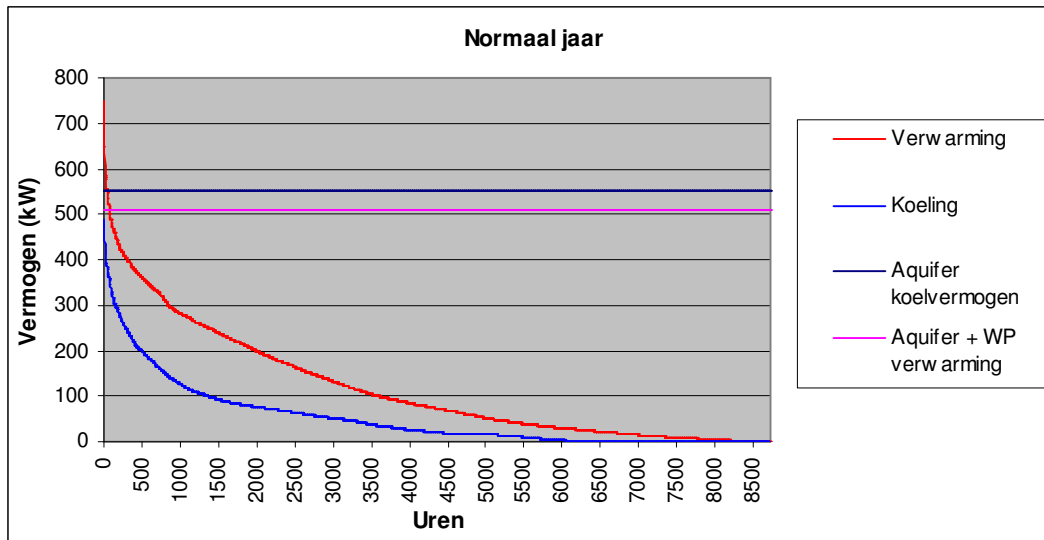
Figuur 3: Vermogen per uur van een koud jaar gebaseerd op gegevens uit 2005

Aan de hand van figuur 3 kan worden bepaald gedurende hoeveel tijd er een koude- en warmtevraag is geweest. Bijvoorbeeld het vermogen vanaf 300 kW verwarming komt vanaf 1500 uur voor, waardoor geconcludeerd kan worden dat er 1500 uur lang een warmtevraag van boven de 300 kW is.

In het koude jaar is ondervonden dat er minder koelvraag is dan warmtevraag. Hierdoor ontstaat een onbalans in de bron. Ook valt op te merken dat de warmtepomp in het project aan bijna alle uren warmtevraag kan voldoen. De piekvraag voor het CV-net is in een koud jaar ongeveer 1000 kW en het GKW-net 420 kW. In een koud jaar kan de bron het gehele jaar aan de koelvraag voldoen. Voor de verwarming is het bronvermogen echter te klein. Hiervoor wordt een ketel bijgezet die het resterende vermogen levert, zodat een totaalvermogen van 1000 kW geleverd kan worden.

Gezien het aantal draaiuren is de warmtepomp goed gedimensioneerd. Normaliter is de vuistregel dat een warmtepomp aan ongeveer 90% van het totale aantal uren kan voldoen bij 50% van het totaal gevraagde vermogen. Dit betekent voor verwarming, dat een warmtepomp van 500 kW voldoende moet zijn. De vuistregel is niet altijd van toepassing. Er kan bewust gekozen worden voor een warmtepomp met een groter of kleiner vermogen, bijvoorbeeld wanneer geen geschikte technische ruimte aanwezig is. Om onafhankelijk te kunnen beoordelen wat de meest geschikte warmtepomp is wordt in het onderzoek niet uitgegaan van de vuistregel. Omdat de warmtevraag hoger ligt dan de koudevraag, wordt er meer warmte uit de bron onttrokken dan geladen. Het gevolg hiervan is dat meer koude dan warmte geladen wordt en er een onbalans ontstaat.

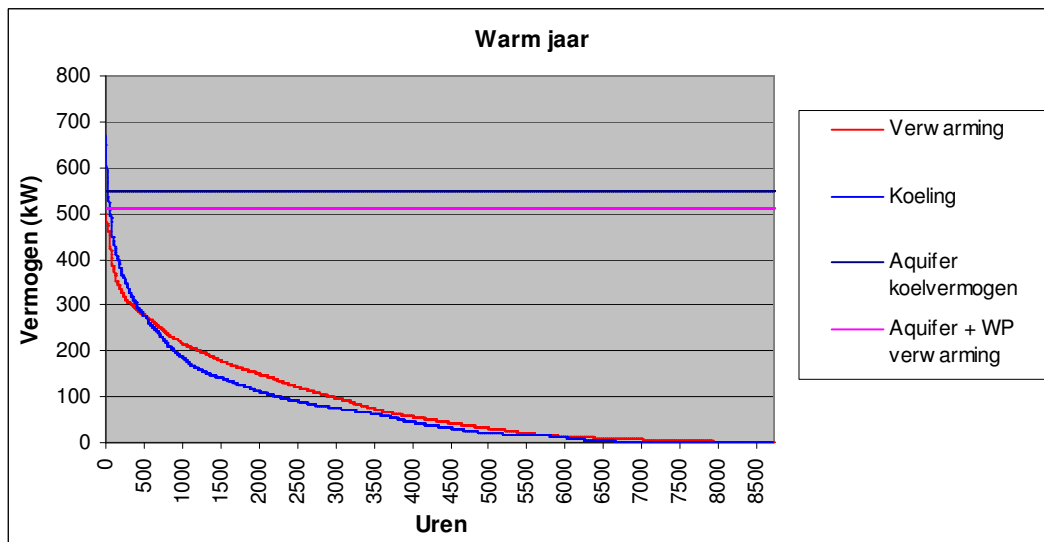
**Normaal jaar**



Figuur 4: Vermogen per uur van een normaal jaar gebaseerd op gegevens uit 2005

In figuur 4 is te zien dat de warmtevraag wederom hoger is dan de koudevraag voor een normaal jaar. Ook hier beschikt de bron over voldoende vermogen om de koudevraag te leveren. De maximale warmtevraag is gedaald naar 750 kW, waardoor de warmtepomp van 550 kW ruim tweederde van het totaal gevraagde vermogen kan leveren. Omdat de warmtevraag groter is dan de koudevraag, zal de situatie voorkomen dat meer warmte uit de bron wordt onttrokken dan er geladen wordt. Daardoor wordt meer koude geladen dan warmte en ontstaat een onbalans.

**Warm jaar**

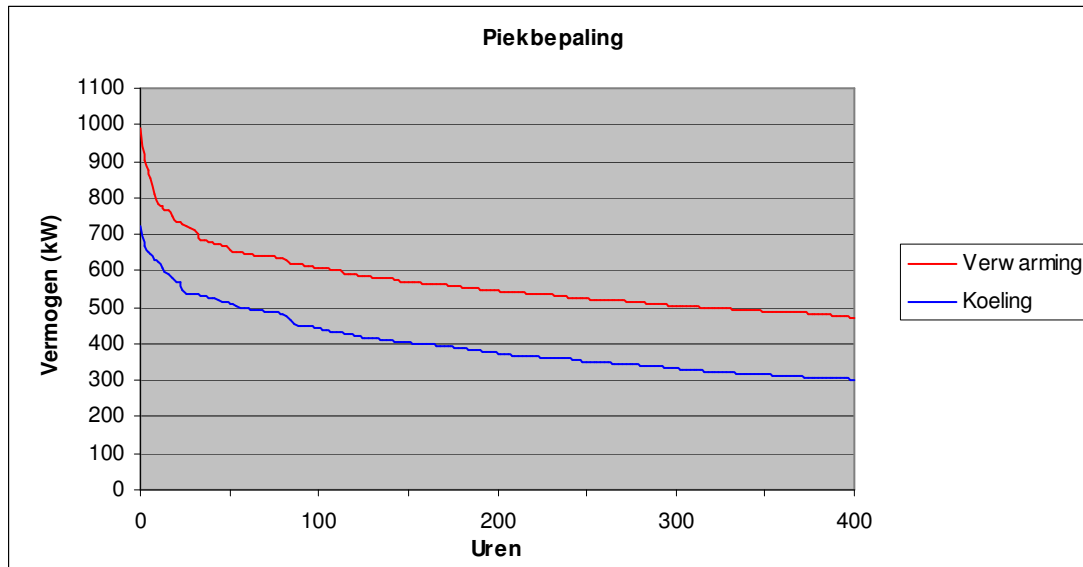


Figuur 5: Vermogen per uur van een warm jaar gebaseerd op gegevens uit 2005

Met behulp van figuur 5 kan geconcludeerd worden dat de totale warmtevraag in een warm jaar bijna gelijk is aan de koudevraag. De bron kan door de toename van koeling als gevolg van het warme jaar niet meer voldoen aan de piek van de koudevraag, waardoor de warmtepomp vaker in bedrijf moet worden gesteld om aan de koudevraag te voldoen. Deze situatie komt maar enkele uren voor. De gevraagde warmte kan in dit geval volledig door de warmtepomp worden geleverd. Omdat de warmte- en koudevraag dicht bij elkaar liggen, is de bron nagenoeg in balans.

#### 4.2 Bepaling piekvermogens

Door de verschillende seizoenen te combineren tot jaren, is bepaald dat er drie type jaren kunnen worden samengesteld waarop het onderzoek wordt gebaseerd. Hieruit is figuur 6 voortgekomen waarin gekeken kan worden naar een combinatie van een koud en warm jaar. Bij een koud jaar, komt de maximale warmtevraag naar voren en bij een warm jaar de maximale koelvraag.



Figuur 6: Piekbepaling warmte en koude

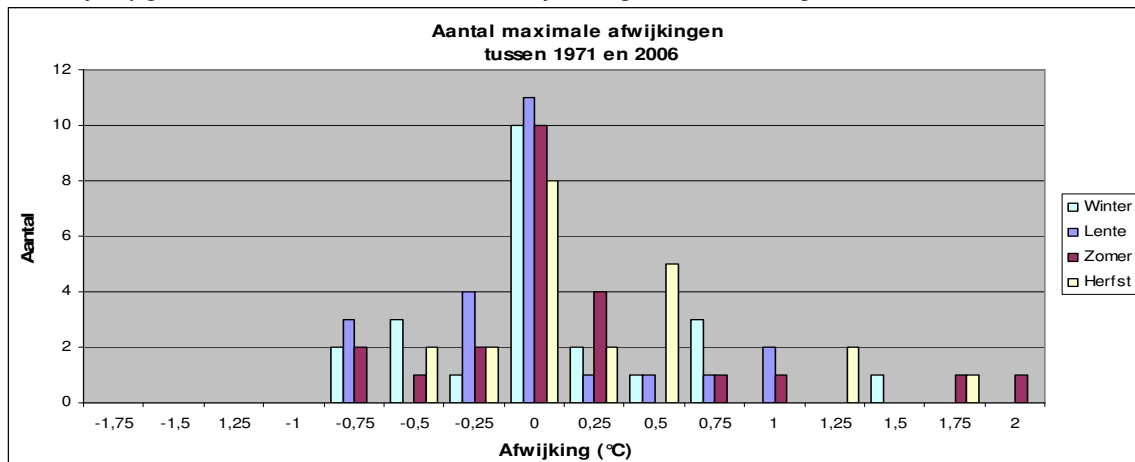
Uit de grafiek valt te concluderen dat een piekvermogen van 1000 kW voor verwarming en een piekvermogen van 720 kW voor koeling gevraagd wordt. In de huidige situatie levert de warmtepomp ongeveer 500 kW voor de verwarming en wordt de overige 500 kW bijgestookt door middel van een ketel. Voor de koudeopwekking wordt gebruik gemaakt van de bron. Bij de meeste situaties voldoet het vermogen van de bron van 550 kW om het GKW-net te voorzien van koude. Alleen bij een warm jaar heeft de bron onvoldoende vermogen en moet de warmtepomp worden ingeschakeld om aan de piek van 720 kW koude te kunnen voldoen.



### 4.3 Weersituaties

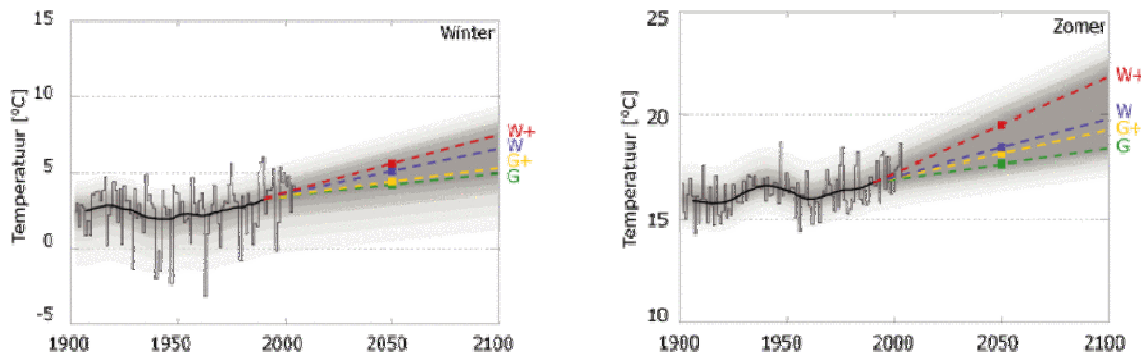
Aan de hand van onderzoek, gebaseerd op seizoensgegevens van het KNMI, wordt verwacht dat de stijging van de buitentemperatuur doorzet. In het onderzoek wordt daarom rekening gehouden dat een normaal en warm jaar in de toekomst vaker voor zal komen. Een koud jaar, gesteld op  $-2^{\circ}\text{C}$  van het gemiddelde, komt minder vaak voor en weegt minder zwaar mee in het onderzoek.

Dit onderzoek wordt verricht met de maximale afwijkingen in temperatuur die tussen 1971 en 2006 zijn opgetreden. De resultaten hiervan zijn terug te vinden in figuur 7.



Figuur 7: Aantal maximale afwijkingen tussen 1971 en 2006

Het onderzoek komt overeen met een voorspelling door het KNMI waarvan de resultaten in figuur 8 staan weergegeven.



Figuur 8: Temperatuursverwachting in de winter en zomer (bron: KNMI)

Verwacht wordt dat de gemiddelde temperaturen zullen blijven stijgen. Een exacte beschrijving van de grafieken is te vinden in bijlage 10 'Extreme weersituaties'.

Het gevolg van de buitentemperatuurstijging is dat voor beide installaties meer elektriciteit gebruikt wordt en minder gas wordt gestookt. Dit heeft effect op de besparing van de WKO installatie ten opzichte van de conventionele installatie. De WKO installatie gebruikt voornamelijk elektriciteit om warmte te produceren en de conventionele installatie gas, met als gevolg dat bij stijging van de buitentemperatuur de energiekosten sterker dalen bij de conventionele installatie dan bij de WKO installatie waardoor de terugverdientijd langer wordt.

#### 4.4 Kosten

##### 4.4.1 Investeringskosten

Een belangrijk punt in de overweging om te kiezen tussen een WKO of de conventionele installatie zijn de investeringskosten en de onderhoudskosten van deze installaties. Er wordt gekeken naar de kosten van de warmte- en koudeopwekking tot de verdelers in het kantoorgebouw. Er wordt een zo nauwkeurig mogelijk beeld van de kosten gegeven waarbij de regeltechnische voorzieningen buiten beschouwing worden gelaten. Hierbij te denken aan bekabeling, opnemers/transmitters en regelsystemen. Omdat de WKO installatie een complexer regelsysteem nodig heeft zijn deze kosten wel meegenomen.

De kosten worden berekend aan de hand van het programma InstallOffice en door middel van het aanvragen van offertes bij verschillende fabrikanten. InstallOffice wordt bij Van Heugten gebruikt om kostenramingen te maken. De berekening is voor beide systemen opgesplitst in twee delen, namelijk 'Distributieleiding CV' en 'Distributieleiding-gekoeldwater'. Hierin zijn de hoofdcomponenten drogekoeler, warmtepomp/compressiekoelmachine en ketels opgenomen. Voor de WKO installatie zijn de kosten voor de aanleg van de aquiferinstallatie opgenomen onder het kopje 'Aquiferinstallatie'.

De loonkosten van het installeren van het systeem zijn ook meegenomen in de berekening. Stelposten zijn de onvoorziene kosten (5%) van de materiaalkosten. Het totaaloverzicht is weergegeven in tabel 4 bij een maximale koelvraag van 720 kW en een maximale warmtevraag van 1000 kW. Het uitgewerkte overzicht is weergegeven in bijlage 4 'Kosten'.

	WKO	Conventioneel
Distributieleiding CV	€42.100	€54.800
• Hr-ketel (500 kW) / (2x500 kW)		
Distributieleiding-gekoeldwater	€154.800	€120.400
• Warmtepomp (550 kW) / koelmachine (720 kW)		
• Drogekoeler (637,5 kW, $\Delta T=1K$ ) / (850 kW, $\Delta T=8K$ )		
• TSA (550 kW, $\Delta T=1K$ ) / (850 kW, $\Delta T=8K$ )		
Bronstelsysteem (550 kW)	€240.500	-
Loonkosten	€24.200	€23.000
Stelposten (5%)	€10.600	€8.800
<b>Totaal</b>	<b>€472.200</b>	<b>€207.000</b>

Tabel 4: Totaaloverzicht kosten

De investeringskosten van de WKO installatie zijn beduidend hoger dan de conventionele installatie. De kosten van het CV- en GKW-net van de conventionele- en de WKO installatie zijn nagenoeg hetzelfde. Het verschil komt door de aquiferinstallatie die in totaal €240.500,- kost.

De investering- en onderhoudskosten worden gebruikt om de terugverdientijd te berekenen in hoofdstuk 4.7.1 'Financiële besparing'. Dit is de standaard situatie die bedoeld is voor het geplande kantoorgebouw. In het verdere onderzoek wordt gevarieerd met de investeringskosten en vermogens van de drogekoeler, warmtepomp, ketels, TSA's en het bronstelsysteem. Overige componenten worden in het verdere onderzoek niet gebruikt, vanwege de kleine kostenvariatie.

#### 4.4.2 Onderhoudskosten

Van de belangrijkste componenten in de installatie wordt uitgezocht hoeveel de jaarlijkse kosten bedragen. Er wordt gekeken naar de CV ketel, koelmachine, warmtepomp, drogekoeler, TSA en het bronsysteem. Door het opvragen van de jaarlijkse onderhoudskosten bij verschillende fabrikanten is een zo nauwkeurig mogelijk berekening gemaakt van de jaarlijkse onderhoudskosten. De onderhoudskosten zijn weergegeven in bijlage 4 'Kosten'.

- De totale jaarlijkse onderhoudskosten van de conventionele installatie bedragen €4.600,-. Dit is 2,2 % van de totale investering van €207.000,- exclusief BTW.
- De totale jaarlijkse onderhoudskosten van de WKO installatie bedragen €12.200,-. Dit is 2,6% van de totale investering van €472.200,- exclusief BTW.

#### 4.4.3 Gas- en elektriciteitsprijs

De gas- en elektriciteitsprijs waarmee wordt gerekend, zijn voor het jaar 2006 gesteld op:

- €0,47 per m<sup>3</sup> Gronings aardgas.
- €0,09 per kWh elektriciteit.

De prijzen worden gebruikt om de jaarlijkse energiekosten en terugverdientijd te berekenen. De kWh prijs van elektriciteit is bepaald aan de hand van 30% daltarief en 70% plateautarief. De exacte berekeningen van de kosten zijn te vinden in bijlage 5 'Samenstelling gas- en elektriciteitsprijzen'.

## 4.5 Bronbalans

### 4.5.0 Onbalans

Om de onbalans in de bron te bepalen is gekeken naar de warmte- en koudevraag van het gebouw en de hoeveelheid warmte en koude er is geproduceerd om aan de warmte- en koudevraag te voldoen.

Er is een model gemaakt waarmee berekend wordt wat de balans over een bepaald jaar is en hoeveel elektriciteit en gas is verbruikt. Dit model berekent aan de hand van een in te voeren warmtepomp het ketel- en koelmachinevermogen, de bronvermogens en het gevraagde elektrische vermogen per seizoen. De berekening staat uitgelegd in bijlage 16 'Rekenmodel vermogens'. Uit het model volgen de gegevens uit tabel 5 en tabel 6. Dit zijn voorbeeld tabellen van alleen de winter en zijn van toepassing op de warmtepomp Carrier 30HXC130 (550 kW) welke voor het nog te realiseren project gepland staat.

		Verwarming			
		Koud		Warm	
		Normaal			
WINTER					
Situatie WKO		Situatie WKO		Situatie WKO	
Opgewekte warmte WP	524 MWh	Opgewekte warmte WP	475 MWh	Opgewekte warmte WP	409 MWh
Opgewekte koude WP	391 MWh	Opgewekte koude WP	354 MWh	Opgewekte koude WP	303 MWh
Pelektrisch WP	133 MWh	Pelektrisch WP	122 MWh	Pelektrisch WP	105 MWh
Pketel	55 MWh	Pketel	26 MWh	Pketel	2 MWh
Situatie Conventioneel		Situatie Conventioneel		Situatie Conventioneel	
Opgewekte warmte	579 MWh	Opgewekte warmte	501 MWh	Opgewekte warmte	411 MWh
Opgewekte koude KM	0 MWh	Opgewekte koude KM	0 MWh	Opgewekte koude KM	0 MWh
Pelektrisch KM	0 MWh	Pelektrisch KM	0 MWh	Pelektrisch KM	0 MWh

Tabel 5: Voorbeeld gegevens verwarming in de winter

In tabel 5 is het model weergegeven voor verwarming waarin berekend wordt hoeveel verwarming nodig was in de winter. Hierbij wordt berekend hoeveel warmte is opgewekt door de warmtepomp, hoeveel koude er tijdens deze warmteproductie is opgewekt, hoeveel elektriciteit dit kost en hoeveel de ketel extra moet stoken om aan de piekvermogens te voldoen. Dit wordt voor alle seizoenen berekend, waardoor een negental van deze tabellen ontstaan. Zowel voor 'Situatie WKO' als 'Situatie Conventioneel' zijn de verbruiken weergegeven.

		Koeling			
		Koud		Warm	
		Normaal			
WINTER					
Situatie WKO		Situatie WKO		Situatie WKO	
Opgewekte warmte	24 MWh	Opgewekte warmte WP	36 MWh	Opgewekte warmte WP	71 MWh
Opgewekte koude	19 MWh	Opgewekte koude	27 MWh	Opgewekte koude	53 MWh
Pelektrisch WP	6 MWh	Pelektrisch WP	9 MWh	Pelektrisch WP	18 MWh
Situatie Conventioneel		Situatie Conventioneel		Situatie Conventioneel	
Opgewekte warmte	0 MWh	Opgewekte warmte	0 MWh	Opgewekte warmte	0 MWh
Opgewekte koude KM	19 MWh	Opgewekte koude KM	27 MWh	Opgewekte koude KM	53 MWh
Pelektrisch KM	2 MWh	Pelektrisch KM	5 MWh	Pelektrisch KM	13 MWh

Tabel 6: Voorbeeld gegevens koeling in de winter

In tabel 6 is het model weergegeven voor koeling waarin berekend wordt hoeveel koeling nodig was in de winter. Net als bij verwarming wordt de opgewekte warmte, opgewekte koude en het elektriciteitsverbruik berekend. Er is in geval van koeling geen gasverbruik. Onder 'Situatie WKO' wordt de conventionele installatie berekend aan de hand van dezelfde warmtepomp die dan als koelmachine werkt. Hierbij wordt de koeling geleverd door de warmtepomp en is er geen warmteopwekking, omdat de warmte naar de buitenlucht wordt afgevoerd.

Door de gegevens uit het model te combineren en een jaar samen te stellen uit de verschillende seizoenen wordt berekend hoe groot de onbalans is en hoeveel vermogen in totaal wordt opgewekt. Een voorbeeld van een koud jaar is weergegeven in tabel 7.

KOUD JAAR	
Opgewekte warmte WP	1196 MWh
Opgewekte koude WP	914 MWh
Pelektrisch WP	282 MWh
Pketel	139 MWh
<b>Totaal gevraagd</b>	
Warmte	1335 MWh
Koude	356 MWh
<b>Onbalans vanaf koude 558 MWh</b>	
(914 MWh - 356 MWh = 558 MWh)	

Tabel 7: Voorbeeld onbalans van een koud jaar

De onbalans wordt bekeken vanaf de koude kant van de bron. Wanneer het getal positief is, wordt meer koude geladen en wanneer dit getal negatief is meer koude onttrokken. In het voorbeeld is er een onbalans van 558 MWh. Deze wordt berekend door de gevraagde koude af te trekken van de opgewekte koude tijdens verwarming. Met deze gegevens worden vervolgens de energiekosten berekend.

#### 4.5.1 Energiekosten systemen

Door de gegevens te gebruiken uit tabel 7 is tabel 8 tot stand gekomen. In deze tabel wordt berekend hoeveel de gaskosten en elektrakosten zijn. Vervolgens wordt berekend hoeveel het kost om de bron in balans te brengen. De conventionele installatie wordt ook berekend zodat de jaarlijkse besparing kan worden bepaald.

Koud Jaar		
<b>Samenvatting WKO</b>		<b>Prijs</b>
Opgewekte warmte WP	1196 MWh	
Opgewekte koude WP	914 MWh	
Pelektrisch WP	282 MWh	
Gemiddelde COP Koude	3,2	
Pketel	139 MWh	€ 6.800
<b>Onbalans</b>		
<b>Onbalans vanaf koude</b>	<b>558 MWh</b>	
m.b.v droge koeler	278 MWh	
Pelektrisch DK	14 MWh	€ 1.300
Overige Koude	280 MWh	
Pketel opwarmen koude	280 MWh	
<b>Ontlasten Warmtepomp d.m.v Ketel</b>		
Opgewekte koude WP	635 MWh	
Pelektrisch WP	196 MWh	€ 17.900
Opgewekte warmte WP	831 MWh	
Pketel ontlasten WP	366 MWh	€ 18.000
<b>Totaal</b>		<b>€ 44.000</b>
<b>Situatie Conventioneel</b>		
Opgewekte warmte	1335 MWh	€ 65.900
Opgewekte koude KM	356 MWh	
Pelektrisch KM	101 MWh	€ 9.200
<b>Totaal</b>		<b>€ 75.100</b>
<b>Besparing</b>		<b>€ 31.100</b>

Tabel 8: Voorbeeld kostenberekening voor een koud jaar

Er is geconstateerd dat met de warmtepomp Carrier 30HXC130 een besparing mogelijk is van ongeveer €31.000,-. Dit zijn de kosten van de conventionele installatie min de kosten van de WKO installatie.

Om de WKO installatie in balans te brengen moet 558 MWh aan warmte worden ingevangen. Hiervoor wordt eerst de drogekoeler ingezet, die op een relatief goedkope wijze 278 MWh aan warmte kan invangen. De bron is nu nog niet in balans. Daarom wordt de warmtepomp ontlast door de ketel in te zetten waardoor er minder koude wordt opgewekt. Dit brengt extra kosten met zich mee.

De berekening wordt gedaan over een periode van één jaar. In een warm jaar kan de drogekoeler meer warmte invangen dan dat benodigd is en deze warmte kan dan gebruikt worden om een eventueel tekort van het jaar ervoor op te heffen.

#### 4.6 Regelingen

In dit hoofdstuk worden een aantal situatieschetsen gemaakt met de warmtepomp Carrier 30XHC130 met een vermogen van 550 kW aan de condensorzijde.

Het doel van deze situatieschetsen is om duidelijk te maken hoe het mogelijk is de onbalans van de bron te herstellen en om aan te geven waar alle warme en koude stromen door geleverd worden. Er wordt een koud, een normaal en een warm jaar beschreven. Een gedetailleerde beschrijving van de regelingen is te vinden in bijlage 14 'Regelingen seizoenen'.

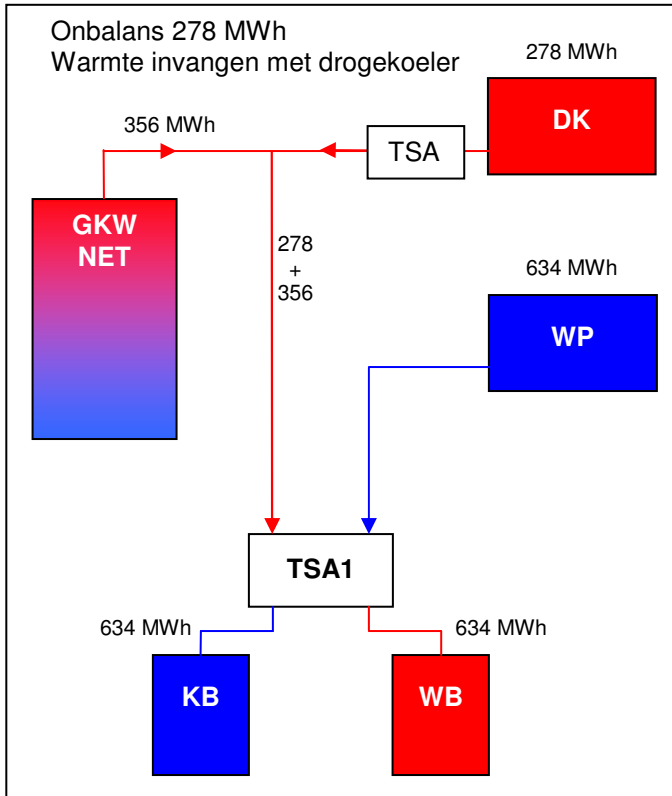
De overheid stelt dat de bodem over een periode van vijf jaar thermisch in balans moet zijn. Het is niet te voorspellen welke combinaties van een koud, normaal en warm jaar de komende jaren zullen voorkomen. Daarom is de onbalans over een periode van één jaar berekend.

##### 4.6.1 Koud en normaal jaar

In het geval van een koud en normaal jaar ontstaat een koudeoverschot. Om het koudeoverschot op te heffen moet extra warmte worden ingevangen via TSA1 (zie figuur 9 en 10 op de volgende pagina). Dit is mogelijk door de drogekoeler in te schakelen bij een buitentemperatuur vanaf 19°C. De buitentemperatuur moet minimaal 19°C zijn, omdat tussen de bron en de drogekoeler twee TSA's aanwezig zijn, die beide een  $\Delta T$  van 1K hebben.

Het is onmogelijk om in een koud jaar voldoende warmte in te vangen. Wanneer de buitentemperatuur te laag is kan geen warmte door de drogekoeler worden ingevangen, omdat de aanvoertemperatuur van de warme bron minimaal 17°C moet zijn. De aanvoertemperatuur van 17°C is vastgelegd in de regeling van het nog te realiseren project om de benodigde temperatuur voor verwarming van 15°C in de winter mogelijk te maken (zie figuur 15 en 16 uit bijlage 2 'WKO').

Ook als de bron in storing is, is het onmogelijk om de drogekoeler te gebruiken om warmte of koude te laden. Het is wel mogelijk om extra warmte in te vangen als in de zomer een koudevraag ontstaat die kleiner is dan het bronvermogen kan leveren, zodat meer koude wordt geleverd dan gevraagd. Dit overschot wordt opgeheven met de drogekoeler. Wanneer een koudeoverschot dreigt te ontstaan moet de ketel de warmtepomp ontlasten. Door het ontlasten van de warmtepomp wordt minder koude geproduceerd en daardoor minder koude geladen. Op deze manier ontstaat een kleinere onbalans die de drogekoeler volledig kan opheffen.



Opgewekte koude WP	634 MWh
Ingevangen warmte DK	278 MWh
Opgewarmd door GKW-net	356 MWh
Balans KB + WB	634 MWh

Situatie: koud jaar

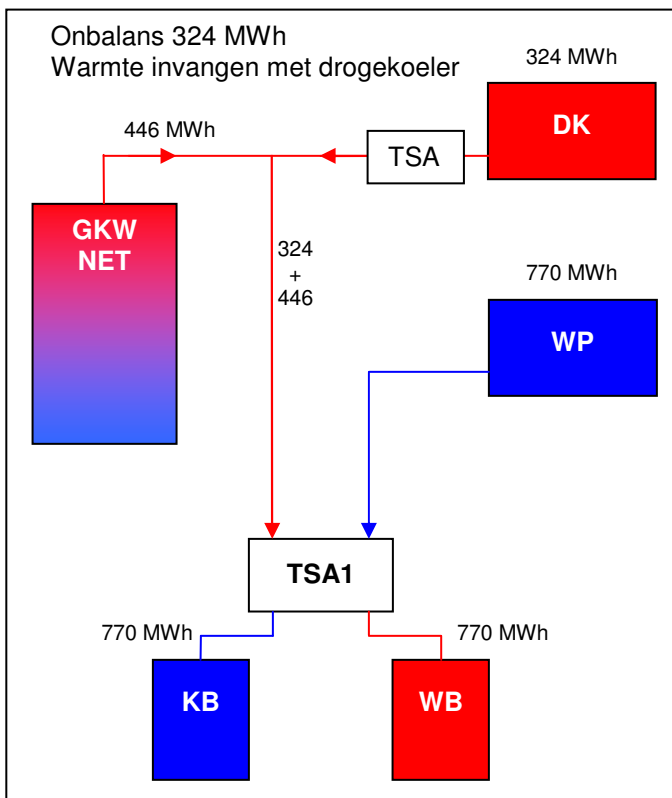
In figuur 9 zijn de warme en koude stromen schematisch weergegeven om een beeld te geven hoe de aquifer in balans gehouden wordt.

De warme bron levert 634 MWh warmte aan de warmtepomp die vervolgens 634 MWh koude teruglevert aan de koude bron.

De koude bron levert 634 MWh koude aan het GKW-net, die de gevraagde koude afneemt en omzet in 356 MWh warmte.

Er moet 278 MWh warmte extra worden ingeladen door de drogekoeler om 634 MWh terug te leveren aan de warme bron.

Figuur 9: koud jaar



Opgewekte koude WP	770 MWh
Ingevangen warmte DK	324 MWh
Opgewarmd door GKW-net	446 MWh
Balans KB + WB	770 MWh

Situatie: normaal jaar

In figuur 10 zijn de warme en koude stromen schematisch weergegeven om een beeld te geven hoe de aquifer in balans gehouden wordt.

De warme bron levert 770 MWh warmte aan de warmtepomp, die vervolgens 770 MWh koude teruglevert aan de koude bron.

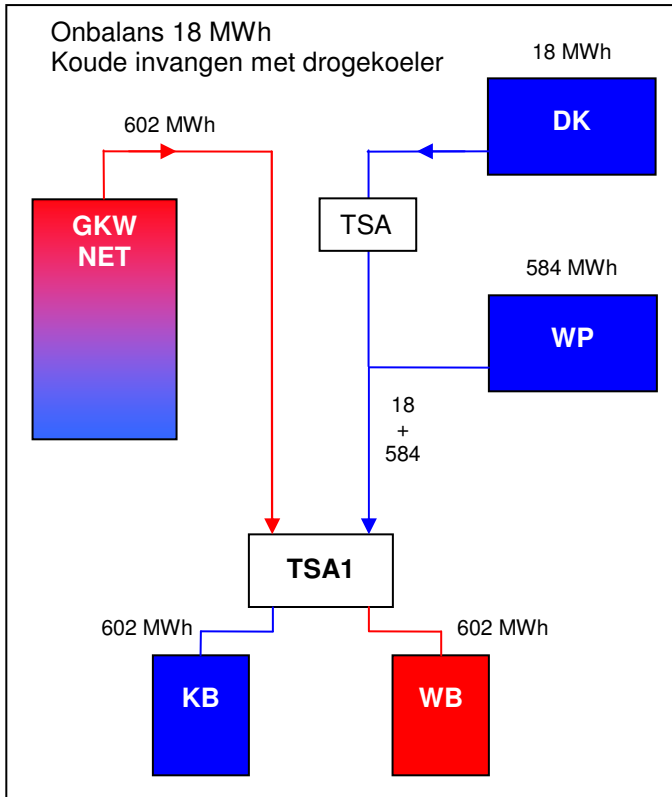
De koude bron levert 770 MWh koude aan het GKW-net, die de gevraagde koude afneemt en omzet in 446 MWh warmte.

Er moet 324 MWh warmte extra worden ingeladen door de drogekoeler om 770 MWh terug te leveren aan de warme bron.

Figuur 10: normaal jaar

#### 4.6.2 Warm jaar

In een warm jaar wordt vanaf koude kant gezien te weinig koude geladen. Door de drogekoeler in te schakelen in de winter kan er vervolgens koude worden geladen in de koude bron. Net als bij warmte invangen verloopt dit proces via TSA1.



Opgewekte koude WP	584 MWh
Ingevangen koude DK	18 MWh
Opgewarmd door GKW-net	602 MWh
Balans KB + WB	602 MWh

Situatie: warm jaar

In figuur 11 zijn de warme en koude stromen schematisch weergegeven om een beeld te geven hoe de aquifer in balans gehouden wordt.

De warme bron levert 602 MWh warmte aan de warmtepomp, die vervolgens 584 MWh koude teruglevert aan de koude bron.

Er moet 18 MWh koude extra worden ingeladen door de drogekoeler om 602 MWh terug te leveren aan de koude bron.

De koude bron levert 602 MWh koude aan het GKW-net, die de gevraagde koude afneemt en omzet in 602 MWh warmte.

Figuur 11: warm jaar



#### 4.7 Meest geschikte warmtepomp

Uit onderzoek blijkt dat het weinig uit maakt voor welke fabrikant voor warmtepompen men kiest; de kostenbesparingen van elke warmtepomp met hetzelfde vermogen zijn nagenoeg gelijk. In bijlage 11 'Keuze warmtepomp' staan vier warmtepompen met hetzelfde vermogen van verschillende fabrikanten onder condities van een normaal jaar beschreven. Bij een koud en warm jaar liggen de onderlinge besparingen eveneens op ongeveer hetzelfde niveau. Er is daarom gekozen om het onderzoek voort te zetten met de warmtepompen van Carrier omdat bij Van Heugten hiervan de meeste gegevens beschikbaar zijn.

Aan de hand van gegevens van Carrier is in het model een lijst van negen warmtepompvermogens van 200 kW tot 1000 kW samengesteld (per 100 kW) met bijbehorende COP waarden bij verschillende deellasten. Bij deze warmtepompen zijn de COP waarden per deellast een gegeven.

Met de negen verschillende warmtepompvermogens is bepaald welk vermogen de meeste besparing zal opleveren. Deze besparing is in dit onderzoek afhankelijk van een tweetal factoren; de energie- en onderhoudskosten van de WKO installatie en de conventionele installatie. De energiekosten worden vervolgens verdeeld in de kosten van het verstoekte gas en de gebruikte elektriciteit.

Een voorbeeld van een warmtepomp installatie van 400 kW staat in tabel 9 weergegeven. In bijlage 18 'Financiële besparing per warmtepompvermogen' staan de tabellen van alle warmtepompen. Hierin zijn alleen de hoofdcomponenten opgenomen in de berekening, omdat deze de grootste verschillen in kosten met zich meebrengen.

Koud Jaar	400 kW	Normaal Jaar	400 kW	Warm Jaar	400 kW
WKO	€ 46.300	WKO	€ 26.900	WKO	€ 16.800
Onderhoud WKO	€ 9.000	Onderhoud WKO	€ 9.000	Onderhoud WKO	€ 9.000
Conventioneel	€ 75.200	Conventioneel	€ 62.900	Conventioneel	€ 51.400
Onderhoud Conv.	€ 4.600	Onderhoud Conv.	€ 4.600	Onderhoud Conv.	€ 4.600
Besparing	€ 24.500	Besparing	€ 31.600	Besparing	€ 30.200
<b>Investeringskosten WKO</b>		<b>Investeringskosten Conventioneel</b>		<b>Investeringsverschil</b>	
CV Ketel 2x300 kW	€ 20.400	CV Ketel 2x500 kW	€ 30.000	<b>€ 156.300</b>	
Warmtepomp 400 kW	€ 38.300	Koelmachine 750 kW	€ 60.000		
Drogekoeler 400 kW	€ 37.300	Droge koeler 850 kW	€ 28.900		
TSA 400 kW ( $\Delta T$ 1)	€ 10.300	TSA 850 kW ( $\Delta T$ 5)	€ 3.100		
Bronstelsysteem 400 kW	€ 172.000				

Tabel 9: Investerings en jaarlijkse kosten warmtepomp 400 kW

Tabel 9 is verdeeld in de drie typen jaren; een koud, een normaal en een warm jaar. Te zien is dat voor zowel de conventionele installatie als de WKO installatie de kosten omlaag gaan. Dit komt voornamelijk, omdat er dan minder gas verstoekt wordt waardoor de kosten afnemen. De besparing is afhankelijk van de energiekosten van de WKO en de conventionele installatie evenals de onderhoudskosten van beide installaties.

Ook is te zien dat de jaarlijkse kosten van de conventionele installatie hoger uitkomen dan de WKO installatie. Dit komt voornamelijk door het verstoken van gas. Het jaarlijkse onderhoud van een WKO installatie ligt hoger door het bronsysteem.

3,2% van de investeringskosten van een WKO installatie zijn onderhoudskosten. Voor de conventionele installatie bedraagt deze 3,0%. Deze getallen wijken af van de genoemde getallen uit paragraaf 4.4.2 'Onderhoudskosten', omdat deze alleen gebaseerd zijn op de hoofdcomponenten van de installatie.

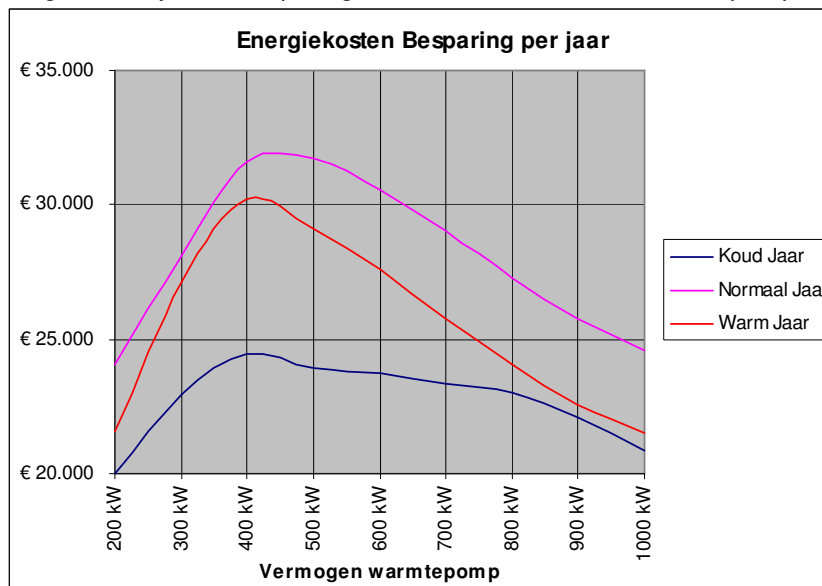
De duurdere componenten van een WKO installatie zijn twee Hr-ketels (om redundantie in de installatie te brengen), de warmtepomp, de drogekoeler, de warmtewisselaar tussen de warmtepomp en de drogekoeler en het bronsysteem. Bij deze componenten zijn alle vermogens op elkaar afgestemd, om te voldoen aan de piekvraag van warmte en koude. De warmtepomp moet in combinatie met de ketels het piekvermogen voor verwarming kunnen leveren en met de bron het piekvermogen van koude. De prijzen zijn daarom bij elke warmtepomp verschillend. De drogekoeler wordt bij de WKO installatie ook ingezet om warmte in te vangen voor het bronsysteem. Zoals in paragraaf 4.6 'Regelingen' is beschreven.

Bij de conventionele installatie zijn de duurdere componenten de twee Hr-ketels, de koelmachine, de drogekoeler en een warmtewisselaar die de drogekoeler met de koelmachine verbindt. De drogekoeler wordt in deze situatie ook ingezet om vrije koeling te leveren.

#### 4.7.1 Financiële besparing

##### Energiekosten besparing

In figuur 12 zijn alle besparingen van de verschillende warmtepompen in een grafiek gezet.



Figuur 12: Energiekosten besparing van WKO ten opzichte van conventioneel per jaar

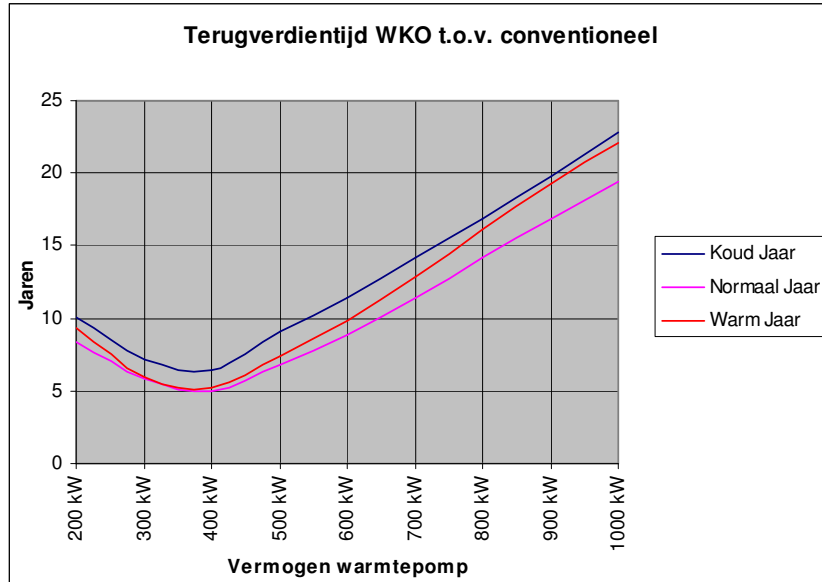
In de grafiek is te zien dat bij een warmtepomp van rond 400 kW de lijnen beginnen te dalen. Een warmtepomp van 400 kW geeft daarom de grootste energiekosten besparing. Het is financieel onaanvaardbaar om voor een warmtepomp met een grotere capaciteit te kiezen, omdat de besparing dan lager uit valt. Dit omdat de onderhoudskosten groter worden en er een steeds grotere onbalans in de aquifer ontstaat die moet worden opgeheven door het ontlasten van de warmtepomp door middel van een ketel, waardoor het gasverbruik stijgt.

De besparing alleen geeft geen volledig beeld omdat de investeringskosten niet zijn meegenomen. Een warmtepomp die groter is (bijvoorbeeld 600 kW) geeft een besparing van ongeveer €38.000,- in een normaal jaar, maar brengt ook hogere investeringskosten met zich mee. Deze investeringskosten zijn gebaseerd op eerder genoemde componenten van de installatie. Hierbij is vanuit gegaan dat kleine aanpassingen als leidingen etc. geen significante kostenstijging veroorzaken.

### Terugverdiëntijd

Door de besparing tegenover de investeringskosten te zetten wordt de terugverdiëntijd van de WKO installatie berekend.

Als gekeken wordt naar de investering en de besparing bij verschillende warmtepompen kan worden berekend wat de terugverdiëntijd is. De resultaten zijn in figuur 13 weergegeven.



Figuur 13: Terugverdiëntijd van een WKO installatie ten opzichte van de conventionele installatie

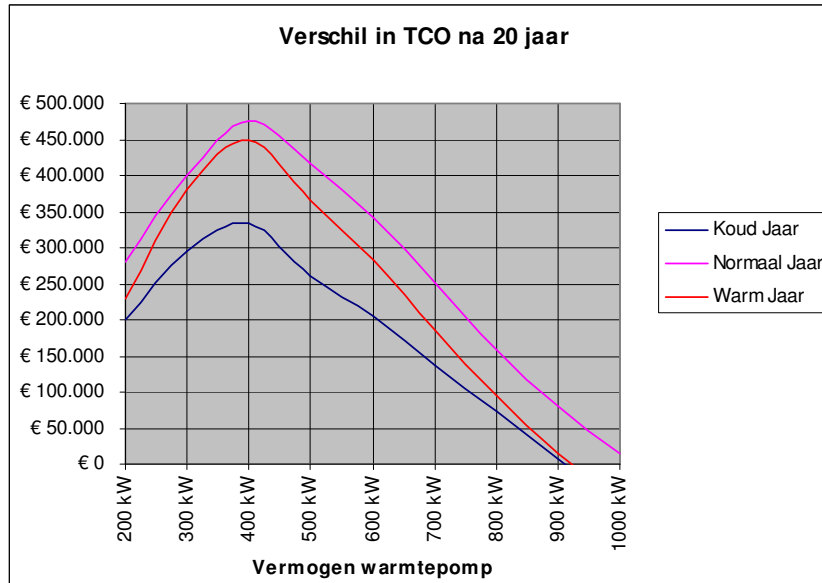
Voor een zo kort mogelijke terugverdiëntijd is de warmtepomp van 400 kW het meest geschikt. De minimale terugverdiëntijd komt neer op ongeveer zeven jaar.

Onder de 400 kW neemt de terugverdiëntijd toe. Dit komt, omdat de investeringskosten hoger zijn en de besparing kleiner is. De investering is hoger, omdat bij een kleinere warmtepomp een grotere bron moet worden toegepast om aan het piekvermogen van de koude te voldoen.

Na 400 kW loopt de terugverdiëntijd snel op. De reden hiervoor is dat ten eerste de besparing kleiner wordt en ten tweede de investering hoger. Bij bijvoorbeeld een warmtepomp van 600 kW is ook een bron nodig van 600 kW, omdat de warmtepomp anders niet zijn maximale warmtevermogen kan leveren. Het gevolg is dat de terugverdiëntijd bij een WKO installatie met bijvoorbeeld een warmtepomp van 900 kW kan oplopen tot 20 jaar, wat ongewenst is.

### Besparing na 20 jaar

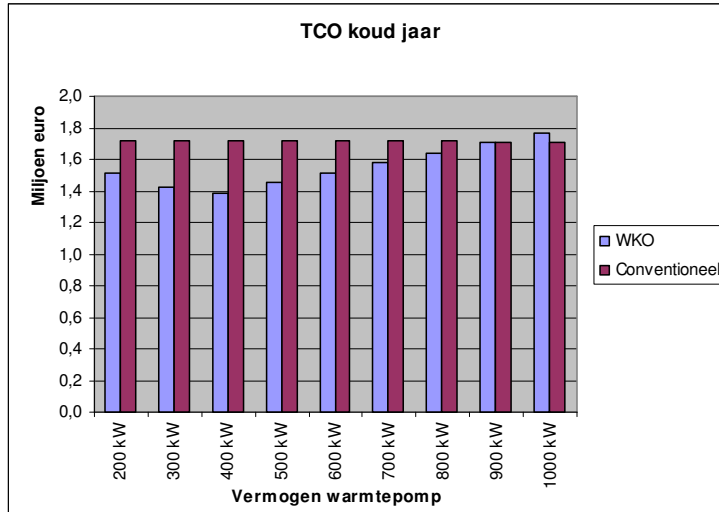
Nadat de terugverdientijd in kaart is gebracht, wordt gekeken naar de totale besparing over 20 jaar. Er is gekozen voor 20 jaar, omdat de gemiddelde levensduur van een warmtepomp, ketel en bron rond de 20 jaar liggen. Wanneer van 15 jaar wordt uitgegaan, daalt de besparing, maar wordt er nog steeds een besparing gerealiseerd ten opzichte van de conventionele installatie. De grafiek is tot stand gekomen door de terugverdientijd en de financiële besparing te combineren. Tussentijdse investeringen en rente zijn niet meegenomen.



Figuur 14: Verschil in Total Costs of Ownership (TCO) na 20 jaar

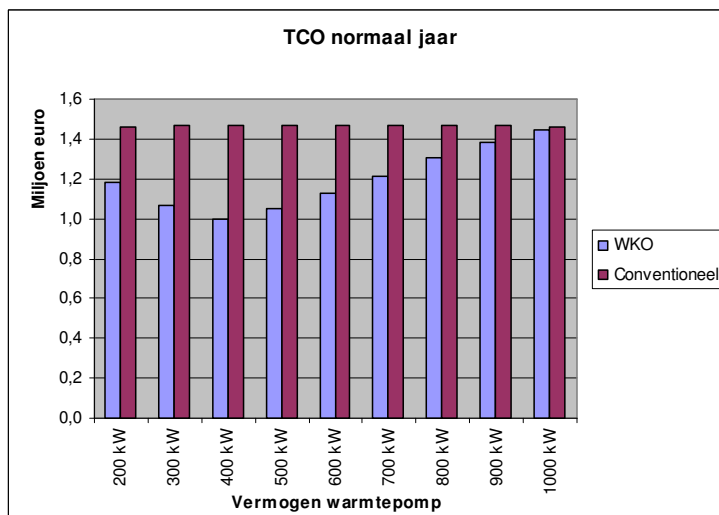
In figuur 14 komt wederom naar voren dat de warmtepomp van 400 kW de hoogst relatieve besparing geeft. De prijzen zijn over een periode van 20 jaar berekend aan de hand van de kosten van gas, elektriciteit en onderhoud mits de gas- en elektriciteitsprijzen constant blijven. Een vergelijkend beeld van de TCO van beide installaties is weergegeven op de volgende pagina in figuren 15, 16 en 17.

De kosten van de WKO installatie vallen na een periode van 20 jaar stukken lager uit dan die van de conventionele installatie, wanneer de juiste warmtepomp gebruikt wordt. Tijdens een warme periode kan de conventionele installatie bijna twee keer zo veel kosten als de WKO installatie. In de grafiek zijn extremen genomen, het is onwaarschijnlijk dat er 20 jaar achter elkaar een warm jaar optreedt. Het zal namelijk een combinatie van een koude, warme en normale jaren zijn, waardoor de besparing en terugverdientijd anders uitvallen. De minimaal haalbare besparing is een koude periode van 20 jaar lang. Een warmtepomp van 900 kW geeft bij een warme en koude periode geen besparing meer. De investeringskosten wegen daar niet meer op tegen de besparing per jaar. Een warmtepomp boven de 400 kW is daarom af te raden.

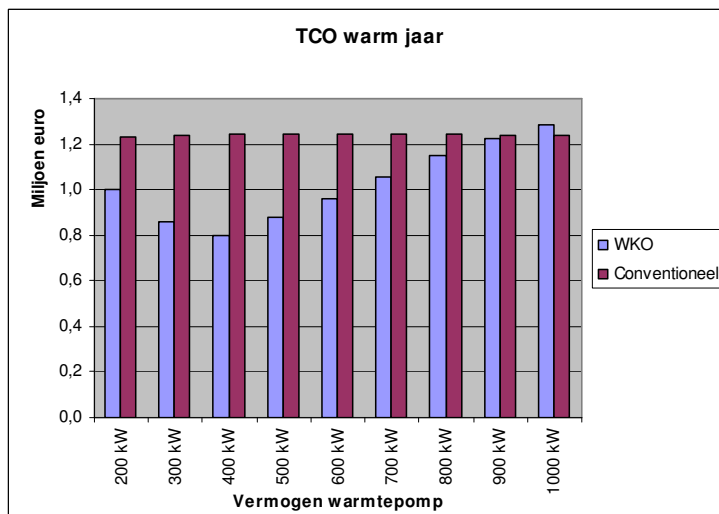


In figuren 15, 16 en 17 zijn de TCO's weergegeven van de WKO installatie en de conventionele installatie bij 20 koude, normale en warme jaren.

Figuur 15: TCO over 20 koude jaren



Figuur 16: TCO over 20 normale jaren



Figuur 17: TCO over 20 warme jaren

#### 4.7.2 Milieubesparing

In deze paragraaf wordt bepaald hoeveel de uitstoot van schadelijke stoffen gereduceerd kan worden door middel van het toepassen van de WKO installatie. Ook vanwege de strenger wordende wet- en regelgeving is het verplicht om een 'groen' advies te geven.

Nadat de energiebesparing is bepaald, wordt gekeken naar het effect van de verschillende warmtepompen op het milieu. Het effect wordt berekend aan de hand van het gas- en elektriciteitsverbruik van de WKO installatie ten opzichte van de conventionele installatie. Hierbij wordt alleen gekeken naar het stroomverbruik van de warmtepomp, drogekoeler en het gasverbruik van de ketel.

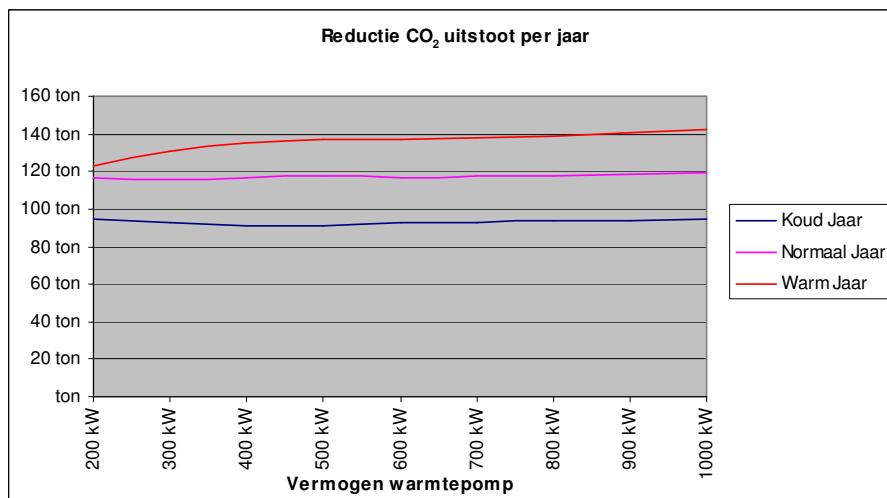
#### CO<sub>2</sub> reductie t.o.v. de conventionele installatie

Als eerste wordt gekeken naar de reductie van de CO<sub>2</sub> emissie van de WKO installatie. Het berekende elektriciteits- en gasverbruik per warmtepomp worden vermenigvuldigd met de berekende CO<sub>2</sub> emissie per kilowattuur. Voor elektriciteit uit Nederlandse energiecentrales is dit 0,66 kg CO<sub>2</sub>/kWh elektriciteit en voor Gronings aardgas met een ketelrendement van 109% is dit 0,20 kg CO<sub>2</sub>/kWh warmte. De berekeningen zijn te vinden in bijlage 12 'Emissies'. Een voorbeeld van de warmtepomp (400 kW) is weergegeven in tabel 10.

Koud Jaar	400 kW	Normaal Jaar	400 kW	Warm Jaar	400 kW
WKO		WKO		WKO	
Gas	120 ton	Gas	30 ton	Gas	8 ton
Elektra	119 ton	Elektra	141 ton	Elektra	107 ton
<b>Totaal</b>	<b>239 ton</b>	<b>Totaal</b>	<b>171 ton</b>	<b>Totaal</b>	<b>115 ton</b>
Conventioneel		Conventioneel		Conventioneel	
Gas	264 ton	Gas	205 ton	Gas	150 ton
Elektra	66 ton	Elektra	82 ton	Elektra	101 ton
<b>Totaal</b>	<b>330 ton</b>	<b>Totaal</b>	<b>287 ton</b>	<b>Totaal</b>	<b>251 ton</b>
<b>Besparing</b>	<b>91 ton</b>	<b>Besparing</b>	<b>117 ton</b>	<b>Besparing</b>	<b>136 ton</b>

Tabel 10: CO<sub>2</sub> emissie bij een warmtepomp van 400 kW ten opzichte van de conventionele installatie

De resultaten van alle warmtepompen zijn terug te vinden in bijlage 19 'CO<sub>2</sub> reductie per warmtepompvermogen'. Van deze resultaten is figuur 18 gemaakt waarin is weergegeven hoeveel de reductie is.



Figuur 18: Reductie CO<sub>2</sub> emissie van een WKO installatie ten opzichte van de conventionele installatie per jaar

De CO<sub>2</sub> reductie is voor een koud en normaal jaar 'redelijk' constant. Over het algemeen geldt hier: hoe groter de warmtepomp, des te hoger de CO<sub>2</sub> reductie. In een warm jaar neemt de besparing eerst toe tot het punt van ongeveer 400 kW en blijft daarna licht stijgen.

Om de emissie van CO<sub>2</sub> te verminderen is het daarom het meest gunstig om een warmtepomp met een zo groot mogelijke capaciteit te kiezen. De extra investering weegt echter niet op tegen de extra reductie. De reden waarom de reductie geen grote verschillen laat zien, is omdat het vergroten van de warmtepomp de balans van de bron verstoort. De onbalans wordt opgeheven door het extra invangen van warmte met de drogekoeler en het ontlasten van de warmtepomp, dit gebeurt door de ketel vaker in bedrijf te stellen. Het gevolg is dat het elektriciteitsverbruik afneemt, maar het gasverbruik toeneemt. Deze twee factoren heffen elkaar grotendeels op.

Omdat de drogekoeler bij een warm jaar meer uren in bedrijf kan zijn, zal meer warmte worden geladen. Hierdoor hoeft de ketel minder in bedrijf te zijn, met als gevolg lagere CO<sub>2</sub> emissie.

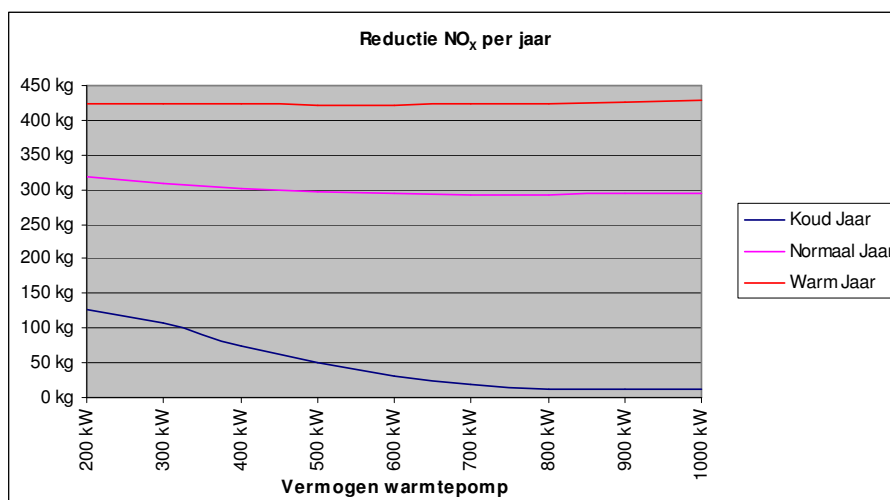
### NO<sub>x</sub> reductie t.o.v. de conventionele installatie

Ten tweede wordt gekeken naar de reductie van NO<sub>x</sub> emissie van de WKO installatie. Hierbij zijn de NO<sub>x</sub> emissies berekend per kilowattuur. Voor elektriciteit uit Nederlandse energiecentrales komt dit neer op 0,71 gram NO<sub>x</sub>/kWh elektriciteit en voor Gronings aardgas met een ketelrendement van 109% komt het neer op 0,15 gram NO<sub>x</sub>/kWh warmte. De berekeningen zijn te vinden in bijlage 12 'Emissies'. Een voorbeeld van de warmtepomp (400 kW) is weergegeven in tabel 11.

Koud Jaar	400 kW	Normaal Jaar	400 kW	Warm Jaar	400 kW
WKO		WKO		WKO	
WKO	92 kg	WKO	23 kg	WKO	6 kg
Gas	290 kg	Gas	152 kg	Gas	116 kg
<b>Elektra</b>	<b>382 kg</b>	<b>Elektra</b>	<b>175 kg</b>	<b>Elektra</b>	<b>123 kg</b>
Conventioneel		Conventioneel		Conventioneel	
WKO	203 kg	WKO	158 kg	WKO	115 kg
Gas	254 kg	Gas	319 kg	Gas	430 kg
<b>Elektra</b>	<b>457 kg</b>	<b>Elektra</b>	<b>477 kg</b>	<b>Elektra</b>	<b>545 kg</b>
<b>Besparing</b>	<b>75 kg</b>	<b>Besparing</b>	<b>301 kg</b>	<b>Besparing</b>	<b>423 kg</b>

Tabel 11: NO<sub>x</sub> emissie bij een warmtepomp van 400 kW ten opzichte van de conventionele installatie

De NO<sub>x</sub> reductie van alle warmtepompen zijn terug te vinden in bijlage 20 'NO<sub>x</sub> reductie per warmtepompvermogen'. Van deze resultaten is figuur 19 gemaakt waarin is weergegeven hoeveel de reductie bij verschillende warmtepompen is.



Figuur 19: Reductie NO<sub>x</sub> emissie van een WKO installatie ten opzichte van de conventionele installatie per jaar

Er is een dalende lijn geconstateerd bij een koud jaar en een toenemende capaciteit van de warmtepomp. De reden voor deze daling is het toenemende gebruik van aardgas. Net als bij de vorige paragraaf (CO<sub>2</sub> reductie) wordt meer gestookt met gas om de warmtepomp te ontlasten, met als gevolg een hogere NO<sub>x</sub> emissie. Bij een normaal en warm jaar, kan de drogekoeler de onbalans zodanig opheffen dat de ketel weinig extra in bedrijf is en de NO<sub>x</sub> reductie verhoogd wordt.

Voor een normaal en warm jaar heeft het veranderen van warmtepomp vermogen weinig effect op de reductie, maar met een koud jaar is het een grote investering die relatief weinig oplevert. Kijkend naar NO<sub>x</sub> besparing is het verstandig om een warmtepomp tussen de 200 en 400 kW te kiezen, om een 'redelijke' reductie te realiseren.

### SO<sub>2</sub> reductie t.o.v. de conventionele installatie

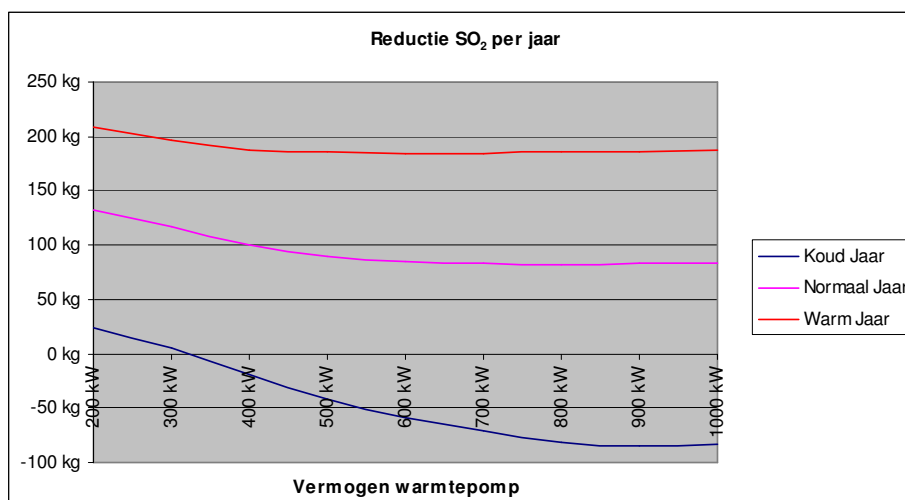
Ten derde wordt gekeken naar de reductie van SO<sub>2</sub> emissie van de WKO installatie. Hierbij zijn de SO<sub>2</sub> emissies bepaald per kilowattuur. Voor elektriciteit uit Nederlandse energiecentrales komt dit neer op 0,425 gram SO<sub>2</sub>/kWh elektriciteit en voor Gronings aardgas op 0,002 gram SO<sub>2</sub>/kWh warmte. De bepaling van deze getallen staat in bijlage 12 'Emissies'. Een voorbeeld van de warmtepomp (400 kW) is weergegeven in tabel 12.

Koud Jaar	400 kW	Normaal Jaar	400 kW	Warm Jaar	400 kW
WKO		WKO		WKO	
Gas	1 kg	Gas	0 kg	Gas	0 kg
Elektra	172 kg	Elektra	91 kg	Elektra	69 kg
<b>Totaal</b>	<b>174 kg</b>	<b>Totaal</b>	<b>91 kg</b>	<b>Totaal</b>	<b>69 kg</b>
Conventioneel		Conventioneel		Conventioneel	
Gas	2 kg	Gas	2 kg	Gas	1 kg
Elektra	151 kg	Elektra	190 kg	Elektra	256 kg
<b>Totaal</b>	<b>154 kg</b>	<b>Totaal</b>	<b>192 kg</b>	<b>Totaal</b>	<b>257 kg</b>
<b>Besparing</b>	<b>-20 kg</b>	<b>Besparing</b>	<b>101 kg</b>	<b>Besparing</b>	<b>188 kg</b>

Tabel 12: SO<sub>2</sub> emissie bij een warmtepomp van 400 kW ten opzichte van de conventionele installatie

Bij een koud jaar komt het voor dat de reductie 'negatief' is, wat een toename van de SO<sub>2</sub> emissie betekent. Dit komt, omdat de WKO installatie warmte produceert met elektriciteit en de conventionele installatie met gas. Gronings aardgas heeft een relatief lage SO<sub>2</sub> emissie.

De SO<sub>2</sub> emissies van alle warmtepompen zijn terug te vinden in bijlage 21 'SO<sub>2</sub> reductie per warmtepompvermogen'. Van deze resultaten is figuur 20 gemaakt waarin is weergegeven hoeveel de reductie is.



Figuur 20: Reductie SO<sub>2</sub> emissie van een WKO installatie ten opzichte van de conventionele installatie per jaar



De reductie neemt af naarmate de capaciteit van de warmtepomp toeneemt. De reden hiervan is dat het elektriciteitsverbruik toeneemt. Bij de conventionele installatie is er een vast elektriciteits- en gasverbruik. Bij een WKO installatie is het verbruik variabel en wordt bij grotere warmtepompen vooral op gas bespaard, maar neemt het elektriciteitsverbruik toe.

Stoken met gas geeft een lage  $SO_2$  emissie, daarom heeft het elektriciteitsverbruik de grootste invloed op de  $SO_2$  emissie van de installatie. Het is gezien de  $SO_2$  reductie verstandig om niet te kiezen voor een warmtepomp met een grote capaciteit. In een koud jaar is een warmtepomp met grote capaciteit niet geschikt voor  $SO_2$  reductie, maar in een normaal en warm jaar wel. Dit komt omdat bij de conventionele situatie het elektriciteitsverbruik sterk toeneemt. Bij een normaal en warm jaar blijkt een warmtepomp van onder de 500 kW het meest geschikt. Een warmtepomp groter dan 500 kW betekent een hogere investering voor een kleinere reductie van de  $SO_2$  emissie.

### 4.7.3 Meest geschikte warmtepomp

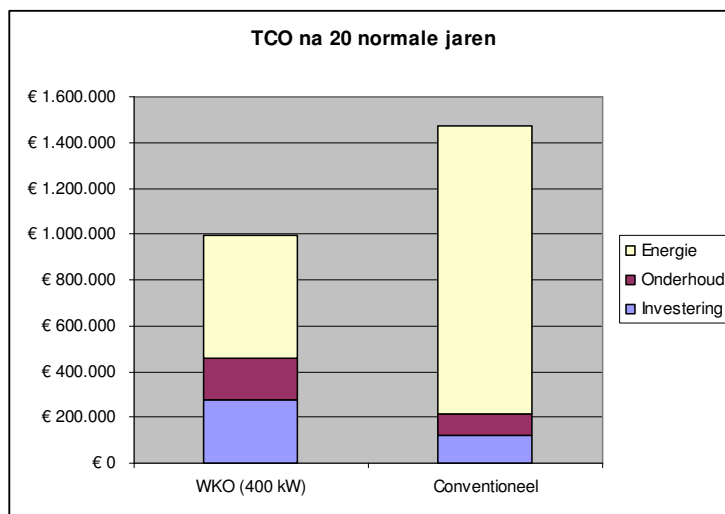
In dit hoofdstuk worden de resultaten van het financiële onderzoek en het milieu onderzoek samengevat en wordt er een conclusie getrokken wat de meest geschikte warmtepomp is voor het project.

#### Financieel

De besparing is het grootst bij een warmtepomp van een vermogen van ongeveer 400 kW. Na 20 jaar een normale periode levert dat een besparing op van maximaal €475.000,-. Een koude periode levert de minste besparing op, namelijk €333.000,-. De belangrijkste resultaten staan samengevat in tabel 13. In figuur 21 staat de TCO na 20 normale jaren weergegeven

Jaar	Kosten conventioneel	Kosten WKO	Besparing
Koud	€1.718.000	€1.385.000	€333.000
Normaal	€1.471.000	€996.000	€475.000
Warm	€1.244.000	€795.000	€449.000

Tabel 13: Schematisch overzicht van de kosten na 20 jaar



Figuur 21: TCO na 20 normale jaren

**Milieu**

Vanuit het milieu oogpunt is bij elke warmtepomp een 'forse' CO<sub>2</sub> reductie te realiseren. In een warm jaar stijgt de lijn bij de warmtepomp van 400 kW tot het maximum, en blijven de lijnen van een koud en warm jaar nagenoeg gelijk. Het is daarom aan te raden om hier een warmtepomp met een vermogen van 400 kW te gebruiken.

Bij de NO<sub>x</sub> emissie is de reductie van emissie voor een warm en normaal jaar nagenoeg gelijk bij elke warmtepomp. Bij een koud jaar is een groot verschil op te merken. Hierbij daalt de NO<sub>x</sub> reductie sterk. Het is daarom onverstandig om een te grote warmtepomp te kiezen. Aangezien verwacht wordt dat de gemiddelde jaartemperatuur zal stijgen, heeft de NO<sub>x</sub> emissie van een koud jaar geen grote invloed op de keuze.

Gezien de SO<sub>2</sub> emissie, is bepaald dat de warmtepomp niet groter mag zijn dan 500 kW. Wanneer de warmtepomp groter wordt, neemt de reductie af en de investering toe. Bij een koud jaar is weinig reductie mogelijk ten opzichte van een conventionele installatie, maar net als bij NO<sub>x</sub> reductie heeft het koude jaar geen grote invloed.

**Conclusie**

Uit dit onderzoek volgt dat het de meest geschikte warmtepomp een vermogen heeft van circa 400 kW. Deze warmtepomp kan aan ongeveer 96% van het totale aantal uren voldoen bij 40% van het totaal gevraagde vermogen in een normaal jaar met een gemiddelde COP waarde van 3,4 voor koudeproductie en 4,4 voor warmteproductie.

Uitgaande van een normaal jaar is de CO<sub>2</sub> reductie circa 40%, de NO<sub>x</sub> reductie circa 60%, de SO<sub>2</sub> reductie circa 50% en de besparing van de TCO circa 30% ten opzichte van de conventionele installatie.

Bij het project is de warmtepomp van 400 kW het meest geschikt voor:

- de kortste terugverdientijd
- een hoge reductie van CO<sub>2</sub> emissie
- een hoge reductie van NO<sub>x</sub> emissie bij een normaal of een warm jaar
- een hoge reductie van SO<sub>2</sub> emissie bij een normaal of een warm jaar

#### 4.8 Extra besparingen

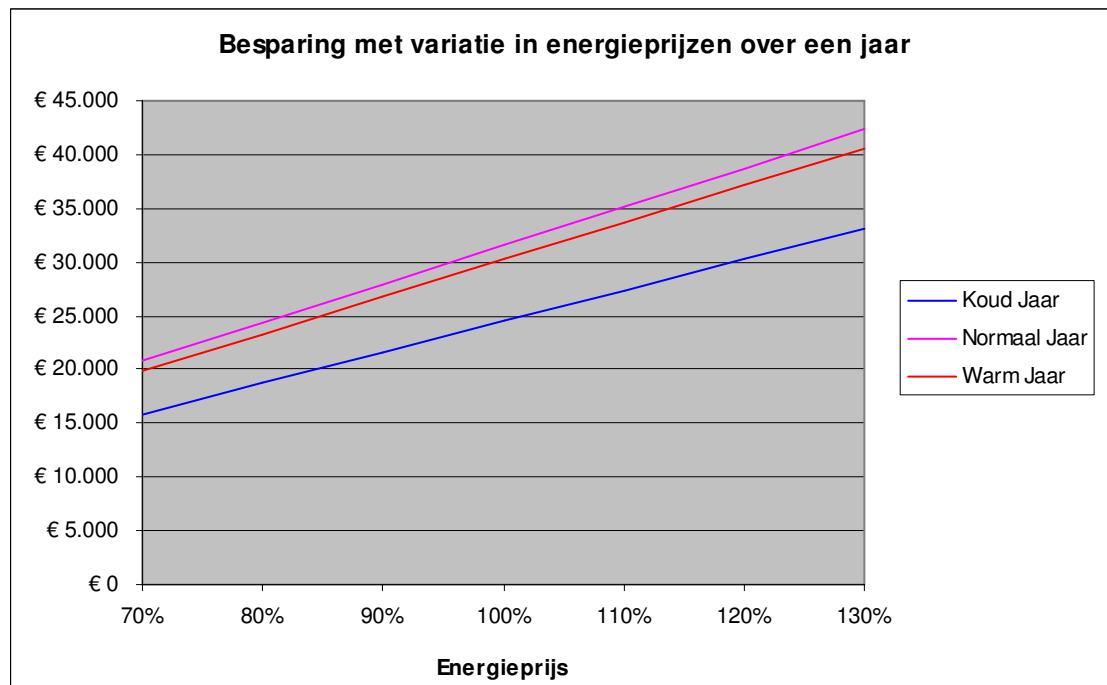
##### 4.8.1 Energieprijs variatie

De afgelopen jaren zijn de energieprijzen gestegen. Door de toenemende vraag naar brandstof neemt de energieprijs toe. De verwachting is dat de energieprijzen blijven stijgen. Het is daarom zaak te onderzoeken wat het effect is van de stijgende energieprijzen op de WKO installatie ten opzichte van de conventionele installatie.

##### Besparing WKO t.o.v. conventioneel met variabele energieprijzen

Met de warmtepomp van 400 kW is de besparing bij de energieprijs bepaald. Deze besparing is op te delen in de besparing van elektriciteit en besparing van aardgas. Om een prognose te kunnen maken wat het effect van de prijsvariatie is, zijn deze waarden vermenigvuldigd met hetzelfde percentage. Aangenomen is dat als bijvoorbeeld de gasprijs 10% stijgt, de elektriciteitsprijs eveneens 10% stijgt.

De resultaten van verschillende percentages staan weergegeven in figuur 22.



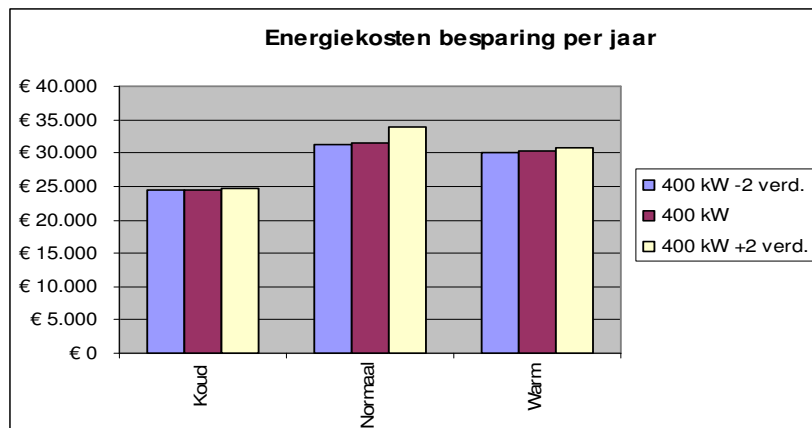
Figuur 22: Besparing met variërende energieprijzen over één jaar

Bij een toenemende energieprijs neemt de energiekostenbesparing toe ongeacht het jaartype. Bij een prijsstijging van 30% in een koud jaar is een extra besparing mogelijk van circa €8.500,- ten opzichte van de conventionele installatie. Bij een normaal en warm jaar is de besparing hoger, namelijk circa €10.500,-.

#### 4.8.2 Temperatuurvariatie

Om te onderzoeken wat het effect is van het variëren van de verdampertemperatuur op de warmtepomp wordt gebruik gemaakt van het model COP bepaling uit hoofdstuk 4.9.2 'Model COP bepaling'. Het onderzoek wordt verricht aan de hand van de meest geschikte warmtepomp met een vermogen van 400 kW.

Het doel van dit onderzoek is, om te kijken naar het financiële aspect, wanneer de verdampertemperatuur verhoogd of verlaagd wordt. Wanneer de temperaturen hoger of lager worden, kan worden gekeken naar de klimaatinstallaties of een goedkopere installatie kan worden toegepast. Bij lagere GKW-net temperaturen kunnen bijvoorbeeld kleinere ventilatoren worden gebruikt, om aan dezelfde koudevraag te voldoen. Bij hogere temperaturen moeten grotere ventilatoren worden gebruikt. De verschillen worden weergegeven in figuur 23, 24 en 25 waarbij wordt gekeken naar de energiekosten besparing per jaar, terugverdientijd en besparing na 20 jaar ten opzichte van de conventionele installatie.

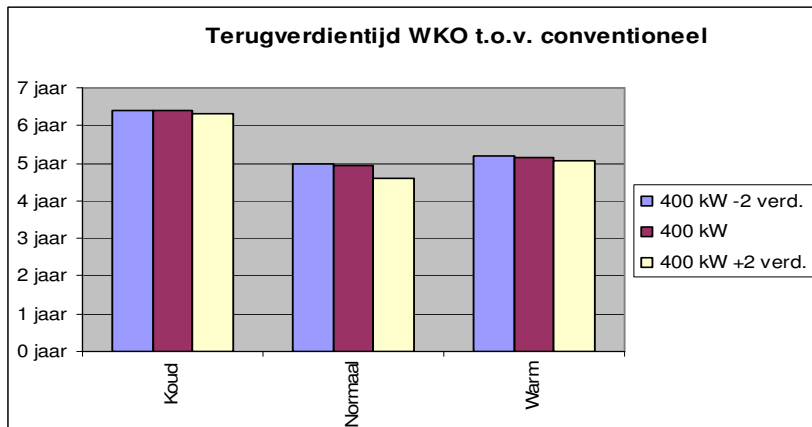


Figuur 23: Energiekosten besparing per jaar met temperatuurvariatie aan verdamperzijde

In figuur 23 is de besparing van de energiekosten per jaar weergegeven. Het verschil is te verklaren omdat bij een temperatuursverhoging de compressor van de warmtepomp minder arbeid moet leveren waardoor de theoretisch maximaal haalbare COP van de warmtepomp toeneemt. Aan de hand van onderstaande formule kan worden verklaard dat het energieverbruik afneemt bij een kleinere  $\Delta T$ .

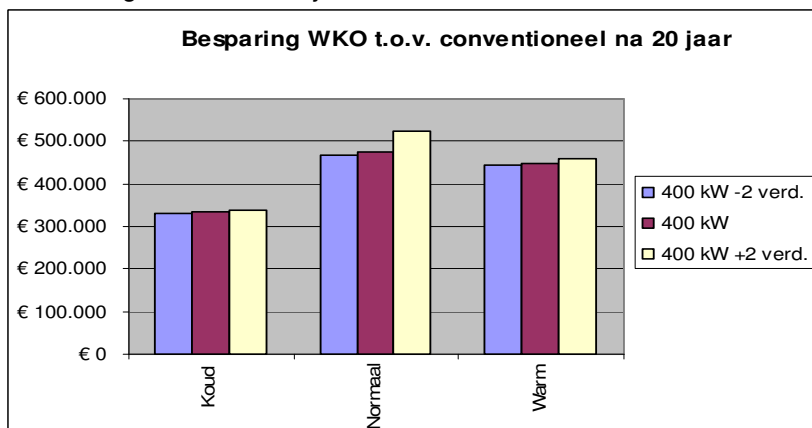
$$\frac{T_{hoog}}{T_{hoog} - T_{laag}} = COP_{max,theoretisch}$$

Één uitschieter is geconstateerd, namelijk een normaal jaar met +2°C aan de verdamperzijde. Bij een koud en warm jaar is de toename gering. Uit de grafiek valt op te maken dat in een normaal jaar een extra besparing van circa €4.000,- mogelijk is.



Figuur 24: Terugverdiertijd met temperatuurvariatie aan verdamperzijde

De terugverdiertijd is weergegeven in figuur 24. Het maximale verschil bij een normaal jaar en +2°C is ongeveer een half jaar.



Figuur 25: Besparing met temperatuurvariatie aan verdamperzijde na 20 jaar

Om een beeld te vormen van de totale besparing na 20 jaar is onderzocht hoeveel jaar winst gerealiseerd kan worden ten opzichte van de conventionele installatie. De resultaten hiervan staan in figuur 25. Net als bij voorgaande onderzoeken is geconstateerd dat er een uitschieter is bij een normaal jaar. Dat betekent dat na 20 jaar een extra besparing van circa €50.000,- ten opzichte van normaal €475.000,- mogelijk is. Aan de hand van dit bedrag kan gekeken worden of het financieel interessant is, om een investering in klimaatinstallaties te doen. Voor een koud en warm jaar is in beide gevallen de besparing gering.

### Conclusie

Gezien de resultaten van het onderzoek valt te concluderen dat een verhoging van de temperatuur aan de verdamperzijde in de winter extra besparing met zich mee brengt. Deze winst kan alleen gerealiseerd worden in een normaal jaar. Bij een warm en koud jaar is de winst gering. Omdat verwacht wordt dat de buitentemperatuurstijging volgens het KNMI doorzet, is het onverstandig de verdampertemperatuur te verlagen of te verhogen. Vanwege de hogere verdampertemperatuur moet een groter koelwaterdebiet worden verpompt, wat resulteert in een hoger elektriciteitsverbruik. Het effect van +2°C aan de verdamperzijde betekent een temperatuursstijging in de bron; er wordt namelijk water van een hogere temperatuur geladen. Onderzocht moet worden wat het effect van deze temperatuursstijging is op de koudelevering van de bron in de zomer. Een kleinere  $\Delta T$  brengt namelijk grotere LBK's met zich mee. De investeringskosten hiervan zijn niet meegerekend, omdat het project zich beperkt tot de installatie tot aan de verdelers, waardoor geen nauwkeurige conclusie getrokken kan worden.

### 4.8.3 Warmte invangen met drogekoeler

Zoals vermeld, kan warmte worden ingevangen met de drogekoeler. In plaats van koude lucht wordt er warme lucht langs de koelribben geblazen. Dit is alleen mogelijk tijdens de zomerregeling.

Door een groter debiet uit de koude bron te pompen, wordt een groter thermisch vermogen gecreëerd. Een deel van deze koude zal worden gebruikt door de afnemers en de overige koude wordt via een bypass naar de drogekoeler geleid. De drogekoeler verwarmt dit water naar een temperatuur van 17-27°C, afhankelijk van de buitentemperatuur, zodat het via TSA1 in de warme bron kan worden geladen. Zie figuur 9 en 10 op pagina 31.

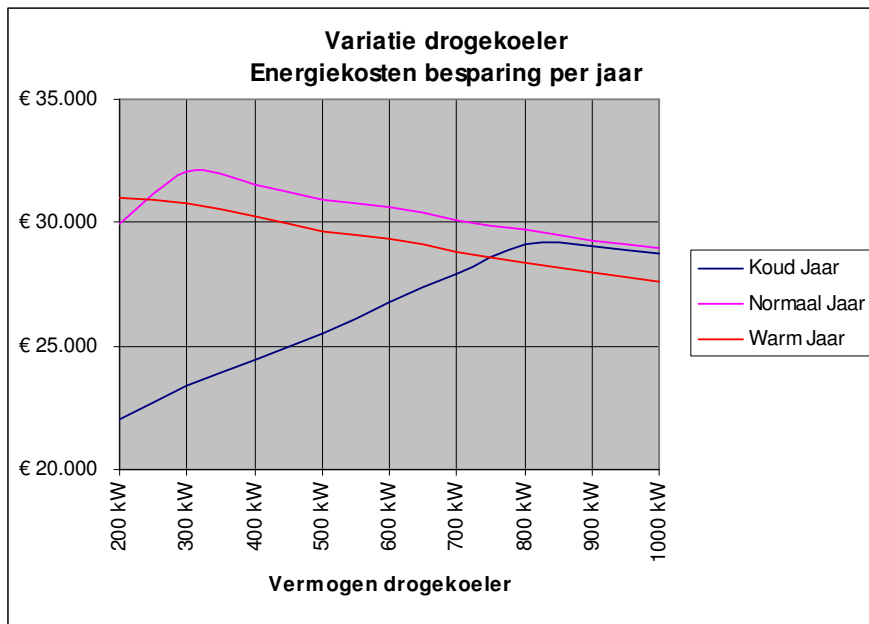
Hierbij is het een vereiste dat de drogekoeler pas inschakelt vanaf een buitentemperatuur van minimaal 19°C. Dit omdat er twee warmtewisselaars tussen de drogekoeler en de bron zijn geplaatst, die beide een  $\Delta T$  van 1K hebben.

De uitkomst van dit onderzoek is afhankelijk van het vermogen van de drogekoeler. Hoe groter de capaciteit van de drogekoeler, des te meer warmte of koude kan worden ingevangen. Uit de meetgegevens blijkt dat alleen in de lente, zomer en herfst warmte kan worden ingevangen, omdat de buitentemperaturen hier geschikt is. In de winter komt de buitentemperatuur niet boven de 15,7°C waardoor het onmogelijk is om warmte in te vangen. In tabel 14 is een overzicht weergegeven met de berekende vermogens voor een drogekoeler van 400 kW die geschikt is voor een warmtepomp van 400 kW. Uitleg over de berekening is te lezen in bijlage 17 'Vermogensberekening drogekoeler'.

<b>Koud jaar</b> 202 MWh	<b>Normaal jaar</b> 333 MWh	<b>Warm jaar</b> 537 MWh
<b>koude winter koude zomer</b> 243 MWh	<b>normale winter koude zomer</b> 243 MWh	<b>warme winter koude zomer</b> 243 MWh
<b>koude winter normale zomer</b> 332 MWh	<b>normale winter normale zomer</b> 332 MWh	<b>warme winter normale zomer</b> 332 MWh
<b>koude winter warme zomer</b> 465 MWh	<b>normale winter warme zomer</b> 465 MWh	<b>warme winter warme zomer</b> 465 MWh

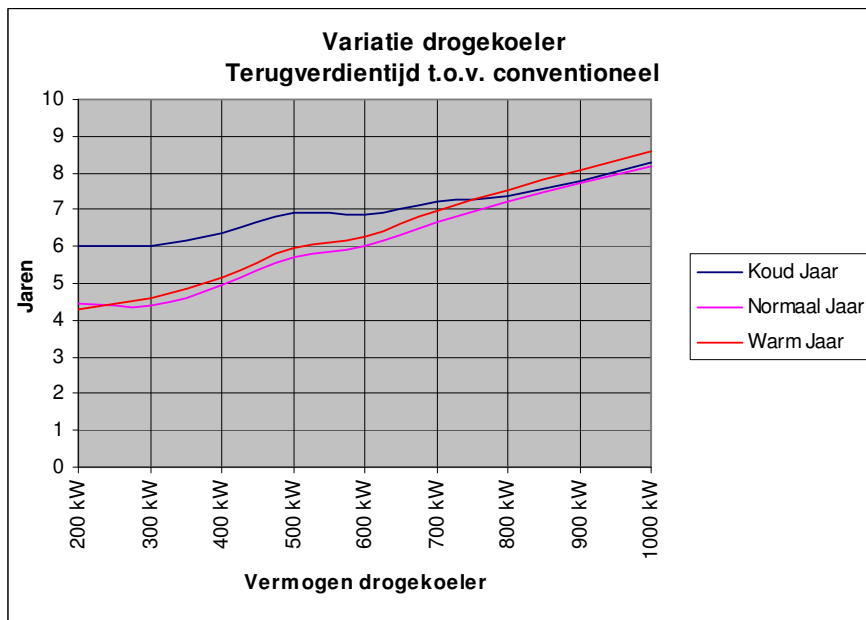
Tabel 14: Warmte invangen met een drogekoeler van 400 kW

Met deze berekening is het mogelijk om te variëren met het vermogen van de drogekoeler. Om te kijken welk vermogen van de drogekoeler de meeste besparing geeft wordt gebruik gemaakt van de warmtepomp van 400 kW, omdat deze het meest geschikt is voor het project. Vervolgens is gekeken wat het effect is wanneer een drogekoeler met grotere of kleinere capaciteit wordt toegepast. Net als bij het onderzoek van de warmtepomp is gekeken naar de besparing (figuur 26), terugverdientijd (figuur 27) en het verschil in TCO na 20 jaar (figuur 28) ten opzichte van de conventionele installatie.



Figuur 26: Energiekosten besparing per jaar warmtepomp 400 kW met verschillende drogekoelers

Uit figuur 26 is geconstateerd dat de besparing van de energiekosten afneemt naarmate het vermogen van de drogekoeler toeneemt. De besparing neemt af, omdat op een gegeven moment de maximaal benodigde warmte is ingevangen om de bron in balans te brengen, waardoor een grotere drogekoeler geen voordeel meer biedt. En de jaarlijkse onderhoudskosten nemen vervolgens toe. Alleen in de situatie met een koud jaar is het verstandig om een drogekoeler tot maximaal 800 kW toe te passen, omdat in deze situatie te weinig warmte kan worden ingevangen.



Figuur 27: Terugverdientijd warmtepomp 400 kW met verschillende drogekoelers

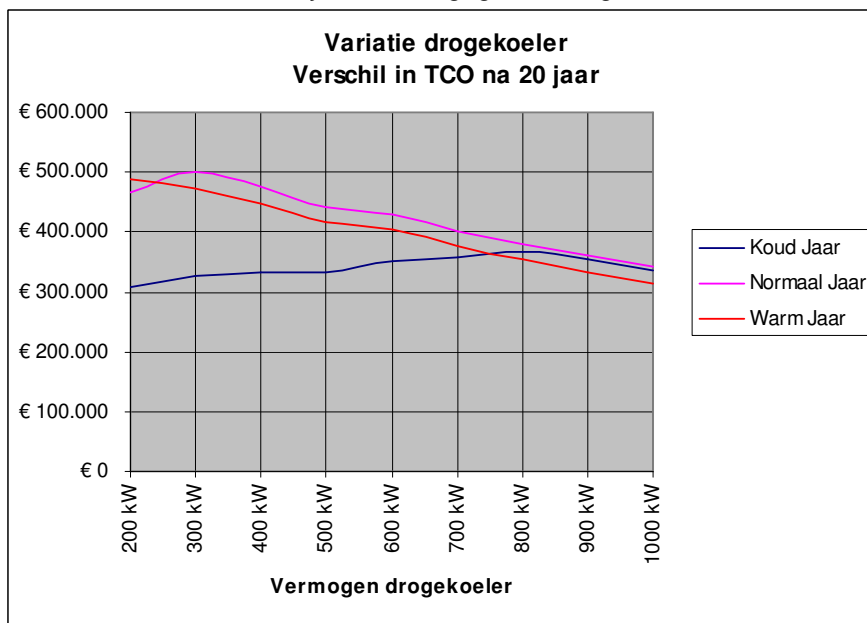


In figuur 27 is te zien dat de terugverdientijd toeneemt. Hieruit valt op te maken dat het onverstandig is om een drogekoeler met een te groot vermogen te selecteren. Een te grote drogekoeler en de warmtewisselaar die daarbij hoort hebben beide een kleine  $\Delta T$  wat een groot warmtewisselend oppervlak met zich mee brengt, dit is te verklaren met de onderstaande formules. De investeringskosten stijgen hierdoor. Daarnaast neemt de besparing af met als gevolg dat de terugverdientijd oploopt tot bijna 9 jaar.

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T_{\text{rekenkundig}} \qquad \Delta T_{\text{rekenkundig}} = \frac{(T_{wi} - T_{ki}) + (T_{wu} - T_{ku})}{2}$$

Waarbij:  $Q = \text{Watt}$   
 $k = \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$   
 $A = \text{m}^2$   
 $\Delta T_{\text{rekenkundig}} = \text{K}$

Het verschil in TCO na 20 jaar is weergegeven in figuur 28.



Figuur 28: Verschil in TCO na 20 jaar, warmtepomp 400 kW met verschillende drogekoelers

De grafiek laat een dalende lijn zien voor een normaal en warm jaar. Bij een normaal jaar zit de piek bij een drogekoeler van 300 kW. Het is echter onverstandig om voor 300 kW te kiezen, omdat de warmtepomp een vermogen van 400 kW heeft. Wanneer de warmtepomp in bedrijf is om koude te produceren, ontstaat warmte aan de condensorzijde van ongeveer 400 kW. Deze warmte moet volledig worden afgevoerd wanneer de bron in storing is. Er kan worden gekozen om een drogekoeler met een te kleine capaciteit toe te passen en het risico te nemen dat de warmtepomp niet op vollast kan draaien, wanneer de bron in storing is.

**Conclusie**

Aan de hand van de resultaten voor de warmtepomp van 400 kW, die bepaald is in paragraaf 4.7.3 'Meest geschikte warmtepomp', kan geconcludeerd worden dat het effect van een grotere drogekoeler ongewenst is. Dit komt vooral door de hoger wordende investeringskosten en de lager wordende besparingen. Er kan voor een kleinere drogekoeler gekozen worden, zodat meer bespaard wordt, maar het gevolg is dat niet de maximale koudeproductie kan worden gehaald wanneer de bron in storing is. De drogekoeler moet in dit geval even grote capaciteit hebben als de geproduceerde condensorwarmte als de warmtepomp koude levert.

#### 4.8.4 Energiedak

Doordat in een koud en normaal jaar een koudeoverschot ontstaat, moet extra warmte voor de bronbalans worden ingevangen. Dit kan door middel van een energiedak. Een schematische tekening hiervan wordt weergegeven in figuur 29.

Een energiedak is een dak dat bestaat uit glycolvoerende lamellen die onder de dakbedekking worden geplaatst. Doordat zonnestralen op het veelal zwart uitgevoerde dak terecht komen wordt de straling omgezet in warmte. De opgevangen stralingswarmte en de omgevingswarmte worden vervolgens door de glycolvoerende lamellen ingevangen.

Het dak kan worden gebruikt om warmte in te vangen voor de voorverwarming van tapwater en om bij een koudeoverschot extra warmte in te vangen voor de thermische balans in de bron. Het dak kan ook fungeren om koude in te vangen door overtollige warmte af te voeren naar de buitenlucht.

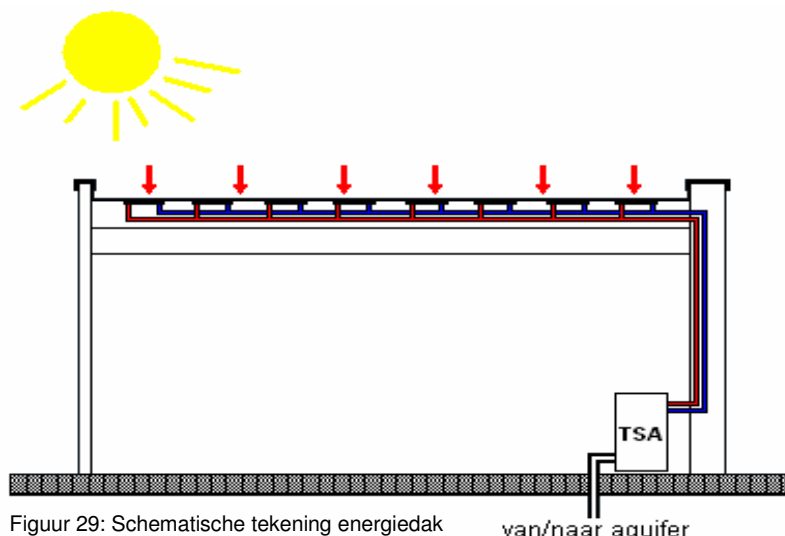
Doordat het systeem is verdeeld in meerdere circuits en uitgerust is een toerengeregelde pomp kan de warmte en koude productie nauwkeurig worden geregeld.

Metalen energiedaken zijn hiervoor extra geschikt doordat door warmtegeleiding van het metaal dezelfde opbrengst kan worden gegenereerd met ongeveer de helft minder lameloppervlak dan in een dak met polyvinylchloride (PVC) of Ethyleen Propyleen Dieen Monomeer (EPDM). Het systeem is flexibel omdat diverse vormen van dakbedekking mogelijk zijn en zowel op vlakke als hellende daken.

De totale energieopbrengst van een energiedak per jaar is door het TNO becijferd op 500 kWh warmte per  $m^2$ . Dit komt neer op een jaarlijkse zinstraling van gemiddeld 1,8 GJ per  $m^2$ . In de zomer kunnen temperaturen van 60°C door het dak gegenereerd worden. Er moet dan wel rekening gehouden worden dat water van maximaal 27°C in de bron mag worden opgeslagen. Het is onder 10°C buitentemperatuur mogelijk om warmte met het dak in te vangen.

Het energiedak kan ook 'koude invangen' door middel van convectie. Het koudevermogen per  $m^2$  is nog onbekend. De totale energieopbrengst wordt hoger als het koudevermogen ook wordt meegerekend.

De kosten van een energiedak komen neer rond de €220 en €240 per  $m^2$  (bron: Hafkon BV). Bij een koudeoverschot van 280 MWh in een normaal jaar is een oppervlak nodig van 560  $m^2$ . De kosten van een energiedak van 560  $m^2$  bedragen €123.000,- tot €134.000,-. Of het rendabel is om dit systeem toe te passen in combinatie met een WKO installatie moet nader onderzocht worden in een vervolgstudie. Deze optie is laat tijdens het onderzoek naar voren gekomen en is een relatief onbekende techniek voor utiliteitsbouw. In de agrarische sector wordt dit principe al vaak toegepast.



Figuur 29: Schematische tekening energiedak

van/naar aquifer

#### 4.8.5 Subsidie

##### EIA

Volgens de Energie-investeringsaftrek (EIA) regeling komen de warmtepomp, drogekoeler en de warmte- en/of koudeopslag in de bodem in aanmerking voor subsidie. De regeling en de berekening zijn te vinden in bijlage 6 'Subsidie'. Als in de toekomst geïnvesteerd wordt in energiezuinige installaties is het belangrijk om investeringen, als die in aanmerking komen volgens de EIA, te doen in het begin van een nieuw jaar. De kans om in aanmerking van de regeling te komen wordt naar mate het jaar vordert steeds kleiner omdat het budget van de overheid, voor de EIA, op raakt.

Het directe fiscale voordeel voor het project bedraagt €44.950.- bij de investering van €345.140,-

#### 4.8.6 EPC

##### Energierichtlijnen

Nieuwe utiliteitsgebouwen moeten voldoen aan de Europese richtlijn Energy Performance Building Directive (EPBD). De richtlijn stelt eisen aan de energieprestatie van gebouwen. De berekening, volgens de richtlijn, gaat volgens de Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC). De hoogte van de EPC waarde is vastgelegd in het bouwbesluit in de vorm van een EPC eis. Voor kantoorgebouwen met voornamelijk kantoorfunctie is de eis vastgesteld op 1,5.

Volgens de berekening in bijlage 3 'Energie richtlijnen' met het programma EP Varianten geldt voor het kantoorgebouw van 15.000 m<sup>2</sup> met de conventionele installatie dat de EPC waarde uitkomt op 1,4. Voor het kantoorgebouw met WKO installatie is berekend dat de EPC waarde uitkomt op 1,2. De berekening geeft indruk van de verbetering door een WKO installatie en is niet nauwkeurig. Doordat de WKO installatie minder energie verbruikt dan de conventionele installatie komt de EPC waarde lager uit.

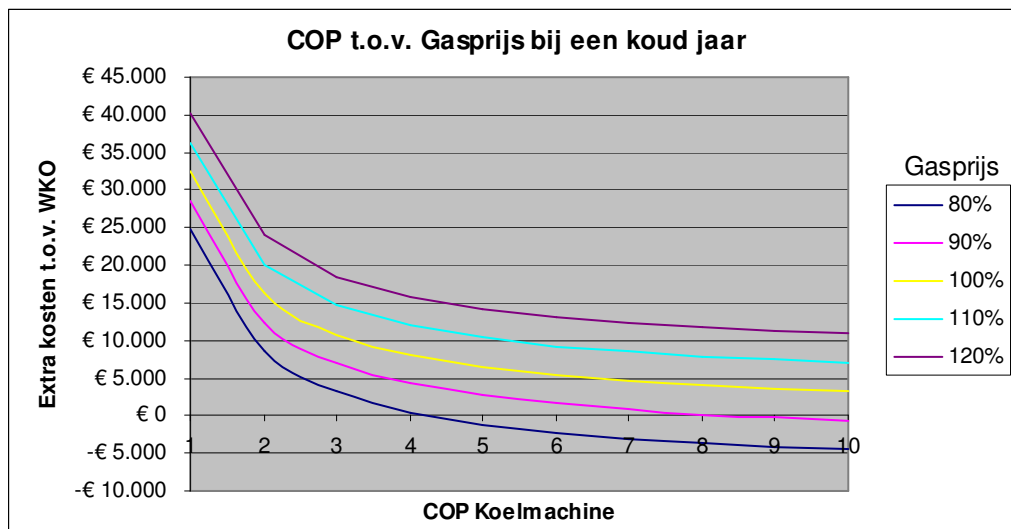
##### Conclusie

Zoals verwacht is de energieprestatie van een kantoorgebouw met de WKO installatie beter dan een kantoorgebouw met de conventionele installatie. Als alleen gekeken wordt naar de energieprestatie van een gebouw zou gekozen moeten worden voor een WKO installatie. De EPC eis zou in de toekomst eventueel kunnen worden aangescherpt. Daarom is het verstandig om te kiezen voor een WKO installatie omdat de conventionele installatie wellicht niet meer voldoet aan de eisen van de Europese richtlijn.

#### 4.8.7 Conventioneel koelen versus WKO

Er wordt gekeken, aan de hand van de eerder vermeldde stijgende gasprijs, wanneer de conventionele installatie goedkoper wordt ten opzichte van de WKO installatie. Het hele model wordt doorgerekend met de stijgende en dalende gasprijs.

Het doel van dit onderzoek is om te kijken of de kosten van conventionele installatie lager kunnen uitvallen dan de kosten van de WKO installatie, waarbij de gasprijs en de COP van de koelmachine variabel zijn. Deze gegevens zijn uitgezocht voor een warmtepomp van circa 400 kW en een koelmachine van 720 kW en zijn voor een koud, normaal en warm jaar benaderd. De resultaten van het onderzoek zijn weergegeven in figuur 30, 31 en 32.

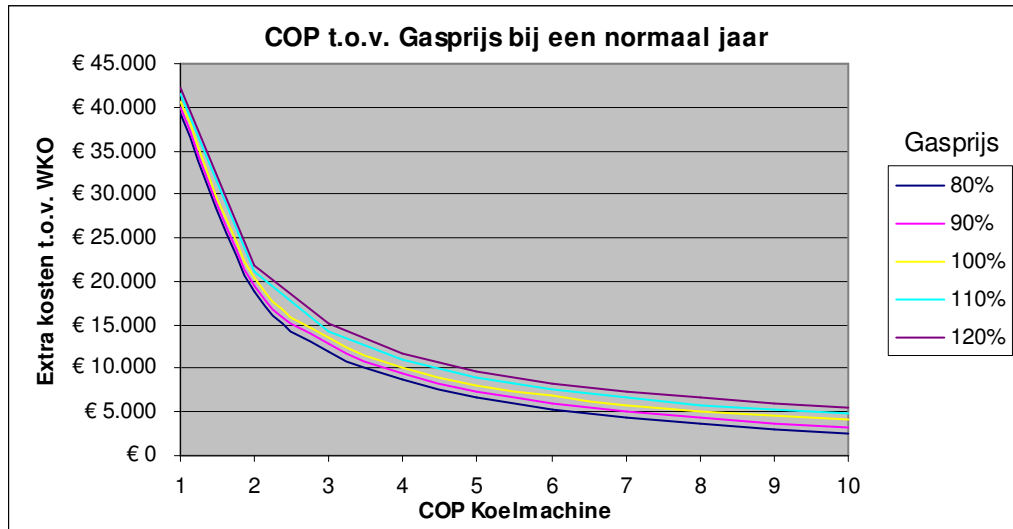


Figuur 30: COP ten opzichte van de gasprijs bij een koud jaar

Uit figuur 30 valt te concluderen dat in een koud jaar, bij een gasprijs van 80% van de huidige prijs, de koelmachine met een COP van ongeveer 4 of hoger goedkoper wordt dan de WKO installatie. Wanneer de gasprijs stijgt, komt de koelmachine niet in de buurt van de WKO installatie. Bij een gasprijs van 90% van de huidige prijs is er al een COP waarde van 8 nodig voor gelijke kosten. Dit is tot nu toe onhaalbaar, omdat de huidige koelmachines een gemiddelde COP van 3,5 hebben.

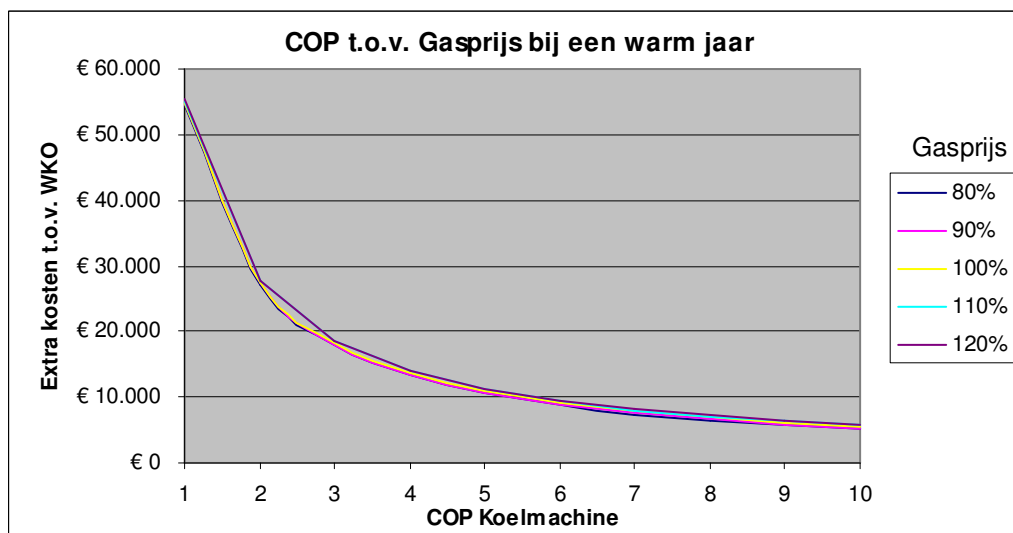
De vermindering naar 80% van de gasprijs is gekozen om aan te tonen dat het eventueel mogelijk is om winst te behalen met een conventionele installatie ten opzichte van de WKO installatie.

De koelmachine die gebruikt wordt, bij de huidige gasprijs en de conventionele installatie, heeft een gemiddelde COP van 3,5 waardoor deze circa €9.000,- per jaar duurder uit komt ten opzichte van de WKO installatie. Wanneer in de toekomst koelmachines ontworpen worden met een COP waarde die hoger ligt, zullen de extra kosten verminderen. Dit geldt echter ook voor de COP waarde van de warmtepomp die gebruikt wordt voor koudeopwekking.



Figuur 31: COP ten opzichte van de gasprijs bij een normaal jaar

In figuur 31 wordt uit gegaan van een normaal jaar. Geconstateerd is dat het onmogelijk is om met een koelmachine goedkoper uit te zijn dan met de WKO installatie. Het verschil tussen de verschillende gasprijzen wordt minder, omdat minder gas wordt verstoekt.



Figuur 32: COP ten opzichte van de gasprijs bij een warm jaar

In figuur 32 wordt uitgegaan van een warm jaar. Net als bij een normaal jaar is het onmogelijk om in een warm jaar een winst te behalen door middel van een koelmachine toe te passen betreft de koeling. Het verschil tussen de gasprijzen is wederom door de toenemende buitentemperatuur kleiner geworden.

**Conclusie**

Geconcludeerd kan worden dat het vrijwel onmogelijk is om goedkoper uit te zijn met een conventionele installatie dan met een WKO installatie.

#### 4.9 Beschrijving modellen

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe met de gemaakte modellen moet worden gewerkt.

##### 4.9.1 Rekenmodel

Met dit rekenmodel kan de besparing worden berekend per warmtepomp. In tabel 15 is het eerste blad van het model weergegeven. Het model is gemaakt om de meest geschikt warmtepomp te bepalen en is een resultaat van het afstudeeronderzoek.

Carrier 400 kW Tretour,condensator		Deellast gegevens								
		20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
55 °C	Pcondensator	88,9 kW	94,2 kW	137,5 kW	174,8 kW	195,2 kW	217,3 kW	263,1 kW	312,3 kW	361,6 kW
	Pelektrisch	35,7 kW	36,6 kW	46,5 kW	44,5 kW	58,3 kW	74,1 kW	81,9 kW	85,8 kW	87,0 kW
	Pverdampers	53,3 kW	57,6 kW	91,0 kW	130,3 kW	136,9 kW	143,2 kW	181,2 kW	226,6 kW	274,6 kW
	COP koud	1,49	1,57	1,96	2,93	2,35	1,93	2,21	2,64	3,16
	COP warm	2,49	2,57	2,96	3,93	3,35	2,93	3,21	3,64	4,16
50 °C	Pcondensator	90,8 kW	96,2 kW	140,4 kW	178,5 kW	199,3 kW	221,9 kW	268,7 kW	318,9 kW	369,2 kW
	Pelektrisch	32,4 kW	33,2 kW	42,6 kW	43,2 kW	55,2 kW	68,4 kW	75,9 kW	81,2 kW	84,4 kW
	Pverdampers	58,5 kW	63,0 kW	97,8 kW	135,4 kW	144,1 kW	153,4 kW	192,8 kW	237,8 kW	284,8 kW
	COP koud	1,81	1,90	2,29	3,13	2,61	2,24	2,54	2,93	3,37
	COP warm	2,81	2,90	3,29	4,13	3,61	3,24	3,54	3,93	4,37
45 °C	Pcondensator	92,7 kW	98,2 kW	143,4 kW	182,3 kW	203,5 kW	226,5 kW	274,3 kW	325,7 kW	377,0 kW
	Pelektrisch	29,3 kW	30,0 kW	39,1 kW	41,9 kW	52,3 kW	63,2 kW	70,3 kW	76,8 kW	82,0 kW
	Pverdampers	63,4 kW	68,2 kW	104,3 kW	140,4 kW	151,2 kW	163,3 kW	204,0 kW	248,9 kW	295,0 kW
	COP koud	2,16	2,27	2,67	3,36	2,89	2,58	2,90	3,24	3,60
	COP warm	3,16	3,27	3,67	4,36	3,89	3,58	3,90	4,24	4,60
40 °C	Pcondensator	96,9 kW	105,0 kW	149,0 kW	188,7 kW	215,0 kW	240,7 kW	287,6 kW	336,3 kW	385,0 kW
	Pelektrisch	25,3 kW	26,3 kW	33,7 kW	37,5 kW	46,6 kW	56,0 kW	62,4 kW	67,6 kW	73,0 kW
	Pverdampers	71,6 kW	78,8 kW	115,3 kW	151,1 kW	168,4 kW	184,7 kW	225,2 kW	268,6 kW	312,0 kW
	COP koud	2,83	3,00	3,42	4,03	3,61	3,30	3,61	3,97	4,28
	COP warm	3,83	4,00	4,42	5,03	4,61	4,30	4,61	4,97	5,28
35 °C	Pcondensator	100,4 kW	110,4 kW	154,1 kW	194,7 kW	223,1 kW	252,2 kW	299,1 kW	346,9 kW	392,9 kW
	Pelektrisch	21,0 kW	22,6 kW	29,3 kW	33,6 kW	40,9 kW	48,5 kW	53,8 kW	58,9 kW	64,2 kW
	Pverdampers	79,4 kW	87,8 kW	124,8 kW	161,0 kW	182,2 kW	203,7 kW	245,4 kW	288,0 kW	328,7 kW
	COP koud	3,78	3,89	4,26	4,79	4,45	4,20	4,56	4,89	5,12
	COP warm	4,78	4,89	5,26	5,79	5,45	5,20	5,56	5,89	6,12
30 °C	Pcondensator	103,5 kW	114,2 kW	157,8 kW	199,4 kW	230,8 kW	261,4 kW	308,0 kW	354,9 kW	400,0 kW
	Pelektrisch	17,9 kW	19,3 kW	25,1 kW	29,9 kW	35,8 kW	41,4 kW	46,7 kW	51,9 kW	57,3 kW
	Pverdampers	85,6 kW	95,0 kW	132,7 kW	169,5 kW	195,0 kW	220,0 kW	261,3 kW	302,9 kW	342,7 kW
	COP koud	4,78	4,93	5,29	5,67	5,45	5,31	5,59	5,83	5,98
	COP warm	5,78	5,93	6,29	6,67	6,45	6,31	6,59	6,83	6,98

Oppervlakte Model	15000 m <sup>2</sup>
Oppervlakte Project	30000 m <sup>2</sup>
Factor	2

Tabel 15: In te voeren gegevens van het rekenmodel

In de tabel dienen de gele vlakken te worden ingevuld naar warmtepompspecificatie. Hierbij moet het vermogen van de condensator en het opgenomen elektrische vermogen worden ingevuld. Aan de hand van deze twee gegevens wordt het vermogen van de verdampers, de COP koud en COP warm in de roze vlakken berekend. Deze waarden worden verder in het model gebruikt. Een voorbeeld hiervan staat in bijlage 16 'Rekenmodel vermogens'.

Tevens dient de oppervlakte van het project in het gele vlak te worden ingegeven. De ingegeven waarde van 30.000 m<sup>2</sup> is een voorbeeld. In het onderzoek is gerekend met een oppervlakte van 15.000 m<sup>2</sup>. Aan de hand van de ingegeven waarde wordt de factor bepaald in het roze vlak welke toegepast wordt op de meetgegevens. Een voorbeeld van het resultaat dat volgt uit het model staat in tabel 8 op pagina 29 weergegeven.

#### 4.9.2 COP bepaling

Om de temperatuur van de verdamper van de warmtepomp te verhogen of te verlagen is met Excel een model gemaakt om de COP te bepalen. Met het model kunnen alle COP waarden worden berekend voor een warmtepomp. Dit gebeurt door middel van het invoeren van één COP lijn. Het voordeel hiervan is dat minder gegevens hoeven worden opgevraagd bij de warmtepompfabrikant.

De ingevoerde waarden worden gebruikt voor een berekening om een inschatting te maken van de COP waarden. Het model wordt gebruikt om te kijken wat het effect is van het verhogen of verlagen van de verdampertemperatuur waarvan de resultaten zijn beschreven in paragraaf 4.8.2 'Temperatuurvariatie'.

##### Invoer

In de groene vlakken moeten de bekende gegevens van de warmtepomp worden ingevoerd. Rechts van de tabellen wordt kort uitgelegd waar ze voor dienen.

Bekende temperaturen	
Ingaande temp.	40 °C
Uitgaande temp.	6 °C

Tabel 16: Invoeren temperaturen

In tabel 16 moeten de bekende temperaturen worden ingevoerd. In dit geval is 40°C en 6°C ingevuld. Aan de hand van deze temperaturen wordt de theoretisch maximale COP bepaald.

Temperatuur gegevens bij dezelfde deellast	
Condensortemp.	COP
55 °C	2,48
50 °C	2,86
45 °C	3,30
40 °C	3,98
35 °C	4,83
30 °C	5,87

Tabel 17: Invoeren COP bij verschillende condensortemperaturen

In tabel 17 moeten de COP waarden worden ingevoerd bij de verschillende condensortemperaturen. Het is vereist dat deze voor dezelfde deellast zijn. Deze gegevens worden gebruikt om de relatie tussen de verschillende condensortemperaturen te bepalen.

Deellast gegevens	
Deellast (%)	COP
20	3,98
30	4,14
40	4,76
50	4,82
60	4,50
70	4,25
80	4,58
90	4,87
100	5,06

Tabel 18: Invoeren COP bij deellast

Als de onderlinge relatie bepaald is, moeten in tabel 18 de COP waarden bij de deellasten worden ingevoerd. Deze gegevens moeten overeen komen met de temperaturen die zijn ingegeven bij tabel 16. Aan de hand van deze gegevens en de theoretisch maximale COP wordt het rendement berekend. Het rendement wordt gebruikt om de rest van de COP waarden te berekenen.

Gewenste gegevens	
Ingaande temp.	40 °C
Uitgaande temp.	6 °C

Tabel 19: Invoeren gewenste temperaturen

Als laatste moeten de gewenste gegevens worden ingevoerd in tabel 19. Het gaat hier om de condensortemperatuur (ingaaende temp.) en de verdampertemperatuur (uitgaande temp.).

**Uitvoer**

De blauwe vlakken worden vervolgens berekend aan de hand van de ingevoerde gegevens.

**Theoretisch maximale COP**

$(T_H / \Delta T)$	9,21
--------------------	------

Tabel 20: Maximale COP

De theoretisch maximaal haalbare COP wordt weergegeven in tabel 20. Deze wordt berekend aan de hand van de ingevoerde gegevens uit tabel 16.

Een voorbeeldberekening:

$$\frac{T_H}{\Delta T} = \frac{40 + 273}{40 - 6} = 9,21$$

**Berekend rendement**

Deellast (%)	$\eta$
20	0,43
30	0,45
40	0,52
50	0,52
60	0,49
70	0,46
80	0,50
90	0,53
100	0,55

Tabel 21: Rendement per deellast

Vervolgens worden de verschillende rendementen berekend bij de deellasten voor de ingevoerde COP gegevens. De resultaten hiervan staan in tabel 21.

Een voorbeeldberekening bij 20% deellast:

$$\frac{COP}{Max\ COP} = \frac{3,98}{9,21} = 0,43$$

**Berekende afwijking**

<b>COP bij 20% en 45 °C</b>	3,31
<b>Afwijking met 40 °C</b>	-0,65
<b>Theoretisch maximale COP</b>	
$(T_H / \Delta T)$	9,21
Factor	1

Tabel 22: Afwijking en correctie

De bovenstaande rendementen zijn nog niet direct toepasbaar op alle COP waarden. Er moet een correctie worden uitgevoerd die ervoor zorgt dat de COP waarden juist worden berekend (tabel 22). Hierbij is gekeken naar de afwijking met de opgegeven temperaturen. De afwijking wordt automatisch berekend door een vierdegraad formule. De factor die wordt berekend, wordt bepaald door de ingegeven verdampertemperatuur.

**Berekende COP gegevens**

Deellast (%)	$\eta$	COP
20	0,42	3,89
30	0,48	4,42
40	0,50	4,62
50	0,50	4,62
60	0,49	4,55
70	0,49	4,49
80	0,49	4,53
90	0,51	4,73
100	0,56	5,12

Tabel 23: Berekende COP

Na de correctie zijn in tabel 23 alle COP waarden berekend voor de gewenste temperaturen uit tabel 19.

In tabel 24 wordt vervolgens een overzicht gegeven van alle berekende COP waarden.

Deellast (%)	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\eta$	0,42	0,48	0,50	0,50	0,49	0,49	0,49	0,51	0,56
<b>COP bij 55 °C</b>	2,41	2,94	3,14	3,14	3,07	3,01	3,05	3,25	3,64
<b>COP bij 50 °C</b>	2,77	3,30	3,50	3,51	3,43	3,38	3,42	3,61	4,01
<b>COP bij 45 °C</b>	3,23	3,76	3,96	3,97	3,89	3,84	3,88	4,07	4,47
<b>COP bij 40 °C</b>	3,89	4,42	4,62	4,62	4,55	4,49	4,53	4,73	5,12
<b>COP bij 35 °C</b>	4,76	5,29	5,49	5,49	5,42	5,36	5,40	5,60	6,00
<b>COP bij 30 °C</b>	5,79	6,32	6,52	6,53	6,45	6,40	6,44	6,63	7,03

Tabel 24: Overzicht COP waarden



## 5 Conclusies

In dit hoofdstuk worden de vragen uit de probleemstelling in paragraaf 5.1 'Conclusies onderzoeksvragen' beantwoord. De centrale vraag tijdens het onderzoek was: *'Wat is de werkelijke terugverdientijd van de WKO installatie en hoe valt de installatie te verbeteren ten opzichte van de conventionele installatie?'* Vervolgens wordt de nauwkeurigheid van het onderzoek beschreven in paragraaf 5.2 'Discussie'. Aan de hand van de discussie wordt in paragraaf 5.3 'Aanbeveling' een advies gegeven voor een eventueel vervolgonderzoek.

### 5.1 Conclusies onderzoeksvragen

Het gestelde koud jaar weegt minder zwaar mee bij het trekken van de conclusies omdat een koud jaar de afgelopen 26 jaar niet is voorgekomen en omdat het KNMI verwacht dat de gemiddelde temperatuur stijgt.

#### Kosten

*'Vergelijking van de investering- en onderhoudskosten van de WKO en conventionele installatie.'* De investeringskosten van de WKO installatie zijn ruim twee keer hoger dan de investeringskosten van de conventionele installatie. Het investeringsverschil komt door de aquiferinstallatie. De onderhoudskosten van de WKO installatie zijn bijna drie keer zo hoog als de onderhoudskosten van de conventionele installatie.

#### Bronbalans

*'Wat is de thermische balans in de bron en hoe is deze, in geval van een onbalans, te herstellen?'* Er is vastgesteld dat met de warmtepomp van circa 550 kW, die in het nog te realiseren project gebruikt gaat worden, er in een koud of een normaal jaar een koudeoverschot ontstaat van circa 300 MWh. Door het invangen van warmte met de drogekoeler is het mogelijk om het koudeoverschot gedeeltelijk op te heffen. Het overige koudeoverschot wordt voorkomen door de warmtepomp te ontlasten. In een warm jaar ontstaat een warmteoverschot van rond de 18 MWh.

#### Warmtepomp

*'Welke warmtepomp zorgt voor de kortste terugverdientijd en de minste emissie van schadelijke stoffen?'* Uit onderzoek is gebleken dat de meest geschikte warmtepomp voor het project een vermogen heeft van circa 400 kW. Met deze warmtepomp heeft de installatie een terugverdientijd van vijf jaar. De WKO installatie is 'groener' dan de conventionele installatie omdat de uitstoot van schadelijke stoffen in een normaal of warm jaar met meer dan de helft wordt verminderd.

#### Besparingsmogelijkheden

*'Welke opties zijn mogelijk voor een zo groot mogelijke financiële besparing?'* Er zijn een aantal mogelijkheden welke ervoor zorgen dat de WKO installatie financieel een nog groter voordeel biedt ten opzichte van de conventionele installatie. Hierbij is onderzocht wat de effecten zijn van een hoger of lager wordende energieprijzen, temperatuursveranderingen verdamperzijdig en het vergroten of verkleinen van de capaciteit van de drogekoeler.

##### - Energieprijs

Het onderzoek heeft aangetoond dat bij een verhoging van de gas- en elektriciteitsprijs de financiële besparing per jaar toeneemt. Bij een verhoging van 30% wordt met de WKO installatie 35% extra bespaard per jaar ten opzichte van de conventionele installatie.

##### - Temperatuur variatie verdamperzijdig

Aan de hand van het verrichte onderzoek is naar voren gekomen dat bij een normaal jaar en een stijging van 2°C aan de verdamperzijde een extra financiële besparing van circa €50.000,- gerealiseerd kan worden over een periode van 20 jaar. Als naar een koud of warm jaar gekeken wordt, is de besparing minimaal. Verwacht wordt dat de gemiddelde buitentemperatuur blijft stijgen. Daarom is het onverstandig de verdampertemperatuur te veranderen.

**- Drogekoeler**

Een drogekoeler met een capaciteit van 400 kW is het meest gunstig voor dit project. De terugverdiëntijd van de installatie komt neer op bijna 5 jaar. Er is vastgesteld dat het effect van het vergroten van de capaciteit ongewenst is en de terugverdiëntijd verlengt. Er kan worden gekozen voor een kleinere drogekoeler, zodat de terugverdiëntijd korter wordt, maar het gevolg hiervan is dat de maximale koudeproductie niet haalbaar is wanneer de bron in storting is.

**- Energiedak**

Het is mogelijk om in plaats van de drogekoeler een energiedak toe te passen. Bij een koudeoverschot van rond de 300 MWh is een oppervlak van ongeveer 560 m<sup>2</sup> benodigd. De investeringskosten van het energiedak bedragen dan ongeveer €123.200,- tot €134.000,-. Het systeem is verder niet doorgerekend in het onderzoek, omdat er onvoldoende tijd was.

**- Subsidies**

Volgens de EIA regeling komen de warmtepomp, drogekoeler en de aquifer in aanmerking voor subsidie. Het directe fiscale voordeel voor het project bedraagt €44.900,- bij de investering van €345.100,-.

**- EPC**

De energieprestatie van het gebouw met de WKO installatie is beter dan het gebouw met de conventionele installatie. Als alleen gekeken wordt naar de energieprestatie is het verstandig om voor de WKO installatie te kiezen. De EPC eis kan eventueel in de toekomst worden aangescherpt en de conventionele installatie voldoet dan wellicht niet meer aan de eisen van de Europese richtlijn. Volgens de huidige richtlijn mag een utiliteitsgebouw met hoofdzakelijk kantoorfunctie een EPC eis van 1,5 hebben. Het verschil tussen de EPC gebruiksfunctie bij de WKO installatie en de conventionele installatie is 0,2.

**5.2 Discussie**

Van Heugten heeft gevraagd om het onderzoek te evalueren voor een eventueel vervolgonderzoek. Er is geprobeerd het onderzoek zo goed en volledig mogelijk uit te voeren. Toch is het zo, dat op bepaalde punten in het onderzoek verbeterd kan worden. Zo zijn de aangeleverde meetgegevens geschaald op 66%, omdat het kantoorgebouw van het project kleiner is dan het kantoorgebouw van de aangeleverde meetgegevens. Er is onderzocht wat het financiële effect is van het vergroten of verkleinen van de gestelde 66%. Uit onderzoek is gebleken dat de gevolgen van ± 5 procentpunt op de geschaalde meetgegevens een verschil van ± €1.500,- geeft op de financiële besparing per jaar. Doordat de piekvermogens nauwelijks veranderen blijven de investeringskosten gelijk.

De aangeleverde meetgegevens zijn van het jaar 2005. Omdat geen referentiejaar beschikbaar waren is het niet met zekerheid te zeggen of de gesimuleerde jaarsituaties betrouwbaar zijn.

De investeringskosten zijn bepaald aan de hand van de hoofdcomponenten van de installatie. Kleine componenten (leidingwerk, kleppen, etc.) en het regel- en elektrotechnische deel zijn buiten beschouwing gelaten. Omdat de WKO installatie regeltechnisch complexer is, is hier een extra kostenpost voor opgenomen.

De meeste specificaties van de warmtepompen waren bekend van Carrier en omdat er een minimaal verschil bij verschillende fabrikanten in besparing is geconstateerd, is het onderzoek verder gebaseerd op de warmtepompen van Carrier.

De temperatuurvariatie is gebaseerd op het model 'COP bepaling'. Dit model maakt een berekening van de COP waarden wanneer de temperaturen aan de warmtepomp verdamperzijdig hoger of lager worden. De berekende waarden in het model komen vrijwel overeen met de opgevraagde COP waarden van Carrier, maar zijn met dit model niet exact te berekenen. Wanneer de temperatuur verdamperzijdig wordt verhoogd stijgt ook de gemiddelde temperatuur in de koude bron. De gevolgen van deze temperatuursverandering zijn niet onderzocht omdat de klimaatinstallatie niet is opgenomen in het onderzoek.

### 5.3 Aanbeveling

Door gebruik te maken van meetgegevens van meerdere jaren, neemt de betrouwbaarheid van het onderzoek toe en kan nauwkeuriger worden bepaald wat een koud, normaal en warm jaargetijde is. De jaargetijden hoeven dan niet gesimuleerd te worden.

Het is aan te raden om meetgegevens te gebruiken van hetzelfde gebouw en installatie als waar het onderzoek op wordt verricht. Zo treedt niet het probleem op dat vermogens moeten worden geschaald.

Om een nauwkeuriger beeld te krijgen van de investeringskosten is het verstandig om gebruik te maken van de investeringskosten van een recent opgeleverd kantoorgebouw. Hierbij moeten dan ook de inregel- en investeringskosten gebouwszijdig worden opgenomen.

Vanwege de beschikbare gegevens is in dit project gekozen voor de warmtepompen van Carrier. Om zeker te zijn dat de warmtepomp van Carrier van 400 kW het meest geschikt is, moeten warmtepompspecificaties worden opgevraagd van meerdere fabrikanten. Vervolgens moet per fabrikant berekend worden welke warmtepomp het meest geschikt is. De meest geschikte warmtepompen moeten onderling met elkaar worden vergeleken.

Om de gebruiksvriendelijkheid van de modellen te verbeteren moet er een programma worden geschreven, waarbij het rekenmodel en het COP model zijn gecombineerd. Door het invoeren van een type warmtepomp en de oppervlakte van een kantoorgebouw wordt een overzicht samengesteld van de financiële besparing, het energieverbruik en de reductie van schadelijke stoffen. Om de terugverdientijd te berekenen moeten de investeringskosten automatisch worden berekend aan de hand van de ingevoerde oppervlakte.

Het is aan te bevelen om bij een vervolgstudie het GKW- en CV-net in het onderzoek op te nemen. Het gevolg hiervan is dat het model complexer, maar ook vollediger wordt. Vervolgens kan gevarieerd worden met de intredetemperaturen van het gebouw en wat het effect is op de dimensies van bijvoorbeeld de LBK's van de installatie.

Wegens tijdsnood is het energiedak niet verder onderzocht, maar het is wel een interessante optie om verder te onderzoeken. Er kan onderzocht worden wat de exacte investeringskosten van het dak zijn, hoe het systeem toegepast kan worden, hoeveel koude en warmte kan worden ingevangen en wat de voor- en nadelen zijn ten opzichte van de drogekoeler. Wanneer blijkt dat het dak geschikt is om toe te passen, kunnen de resultaten worden geïmplementeerd in het model.



## 6 Literatuurlijst

### *Boeken*

Ing. G.A. Jansen Opwekking warmte en koude Avans, 2004/2005	Poly-energie zakboekje Prof. Dr. W. van Gool Koninklijke PBNA, 1986
Ing. O.W.W. Nuijten Verwarmingstechniek 5 Intechnium, 1994	NVON en de CEVO Binas Wolters-Noordhoff, 2004
Ir. A.J.M. van Kimmenaede Warmteleer voor technici Wolters-Noordhoff, 2001	Ir. A.J. Seebregts en Ir. C.H. Volkers Monitoring Nederlandse elektriciteitscentrales Energy research Center of the Netherlands, 2005
Ir. J. Ouwehand Toegepaste Energietechniek Academic Service, 2001	
Ir. Jan F.G. Janssen Nieuwbouwkunde Technische Universiteit Eindhoven, 2001	

### *Internet*

<a href="http://www.ibkcompac.nl">www.ibkcompac.nl</a>	<a href="http://www.senternovem.nl">www.senternovem.nl</a>
<a href="http://www.guentner.nl">www.guentner.nl</a>	<a href="http://www.wetten.overheid.nl">www.wetten.overheid.nl</a>
<a href="http://www.trane-airconditioning.nl">www.trane-airconditioning.nl</a>	<a href="http://www.knmi.nl">www.knmi.nl</a>
<a href="http://www.york.nl">www.york.nl</a>	<a href="http://www.cbs.nl">www.cbs.nl</a>
<a href="http://www.alfalaval.nl">www.alfalaval.nl</a>	<a href="http://www.carrier.nl">www.carrier.nl</a>
<a href="http://www.geocomfort.nl">www.geocomfort.nl</a>	<a href="http://www.essent.nl">www.essent.nl</a>
<a href="http://www.vito.be">www.vito.be</a>	<a href="http://www.hafkon.nl">www.hafkon.nl</a>
<a href="http://www.ecn.nl">www.ecn.nl</a>	

### *Projecten Van Heugten met WKO*

Smedinghuis, Lelystad CEC Zuid-Scharwoude, Gemeente Langedijk Plantenziektenkundige Dienst, Wageningen Koudeopslag nieuwbouw Hoofdkantoor ING, Amsterdam
---