

GASKEUR		
HR	HR Verwarming	107
HR _{ww}	HR Warm Water	
CW	Comfort Warm Water	6
SV	Schonere Verbranding	

Gaskeur HR 107: Eindstation?

Verduurzaming van verwarmingsinstallaties in
bestaande woongebouwen

GASKEUR		
HR	HR Verwarming	214
HR _{ww}	HR Warm Water	
CW	Comfort Warm Water	6
SV	Schonere Verbranding	
NZ	Naverwarming Zonneboiler	



Wolfgang Okken
Studentnummer 1537854
Technisch Adviesburo Duinwijck

20 december 2010

Hogeschool Utrecht
Hogere installatietechniek, dual

Docentbegeleiders
Ir. Joost Jongen
Ir. Corné Duiser

Bedrijfsbegeleider
Ing. Angeliek Fleuren

1 Verklaring hogeschool

Het bestuur van de Stichting Hogeschool Utrecht te Utrecht aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid voor schade voortvloeiende uit het gebruik van enig gegeven, hulpmiddel, werkwijze of procedure in dit verslag beschreven. Vermenigvuldiging zonder toestemming van de auteur en de school is niet toegestaan. Indien het afstudeerwerk in een bedrijf is verricht, is voor vermenigvuldiging of overname van tekst uit dit verslag eveneens toestemming van het bedrijf vereist.

Afbeeldingen omslag:

RBG Warmteservice (2010), bewerkt door auteur

Hier (2010)

Motivations

First, fossil fuels are a finite resource. (...)

Second, we're interested in security of energy supply. (...)

Third, it's very probable that using fossil fuels changes the climate. (...)

Whichever of these concerns motivates you, we need energy numbers, and policies that add up.

(MacKay 2009)

1.1 Afkortingenlijst

Afkorting	Verklaring
c.o.p.	coëfficiënt of performance = rendement van warmtepomp
e.i.a.	Eenmalige investeringsaftrek
E_k	koude
E_{opg}	opgewekte elektrische energie
e.p.c.	Energie prestatie coëfficiënt
E_{pr}	primaire energie
E_{th}	thermische energie = $E_w + E_k$
E_w	warmte
gawp	gasabsorptiewarmtepomp
gbww	gesloten bodem warmtewisselaar
GJ	gigaJoule = 10^9 Joule
gmwp	gasmotorwarmtepomp
Hb	bovenste verbrandingswaarde van Gronings aardgas 35,1 MJ/m ³ _n
Ho	onderste verbrandingswaarde van Gronings aardgas 31,7 MJ/m ³ _n
HR 107	hoog rendementsketel, rendement ≥ 107 % (Ho) of 96,6 % (Hb)
kW	kiloWatt = 10^3 Watt = 10^3 Joule/seconde
kWh	kiloWattuur = 3,6 MJ
l/w wp	lucht/waterwarmtepomp
m ³ _n	normaal m ³ = 1 m ³ bij 1 bar en 25°C
MJ	megaJoule = 10^6 Joule
η_{opw}	opwekrendement van elektriciteit
n.c.w.	netto contante waarde
N.I.M.B.Y.	Not In My Back Yard; goed idee, maar niet hier
P_{in}	infiltratieverlies
P_{nom}	nominaal vermogen, vollastvermogen
P_{tr}	transmissieverlies
P_{vent}	ventilatieverlies
p.e.r.	primary energy rate
$q_{v,10}$	specifiek infiltratieverlies
$Q_{v,\text{nom}}$	nominale volumestroom
Rc	warmteweerstand van de constructie
Re	warmteweerstand van de grenslaag buiten
Ri	warmteweerstand van de grenslaag binnen
spec.besp.	specifieke besparing
T_{bui}	buitentemperatuur
T_{ontw}	ontwerptemperatuur
T_{aanv}	aanvoertemperatuur
T_{ret}	retourtemperatuur
tvt	eenvoudige terugverdientijd
vh,eq	equivalente vollasturen
w/w wp	water/waterwarmtepomp
wko	warmte- en koudeopslag = kwo
wtw	warmteterugwinning

2 Samenvatting

2.1 Inleiding

Nederland staat vol met collectieve woongebouwen met een zorgwekkend hoog energieverbruik ten behoeve van verwarming. Enerzijds wordt dit veroorzaakt door gebrekkige isolatiemaatregelen. Anderzijds doordat de benodigde warmte wordt opgewekt door middel van een even doeltreffend als primitief proces: verbrandingswarmte van aardgas wordt toegevoerd aan de warm te houden ruimten. Dit kan beter. Ook in gebouwen welke inmiddels zijn voorzien van dubbel glas en enige dakisolatie is nog veel mogelijk op het gebied van na-isolatie. Door het moderniseren van de ventilatie-installatie kan de warmtevraag verder worden teruggedrongen.

Wanneer deze maatregelen in voldoende mate worden genomen, kan met lagere verwarmingswatertemperaturen worden gewerkt dan in de oorspronkelijke situatie. Hierdoor wordt, naast een onmiddellijke energiebesparing, een situatie gecreëerd waarin de inzet van warmtepompen als warmtebron zinvol wordt. Warmtepompen leveren warmte efficiënter naarmate afgifte- en brontemperaturen dichter bij elkaar liggen. Wanneer de verwarmingswatertemperatuur laag genoeg ligt, leveren warmtepompen warmte efficiënter dan gasgestookte verwarmingsketels.

2.2 Onderzoek

Op basis van de specifieke energiebesparing zijn combinaties van isolatiemaatregelen en bivalente warmteopwekinstallaties samengesteld. Voor het onderzochte woongebouw blijkt, ongeacht de mate waarin isolatiemaatregelen worden toegepast, de grootste specifieke energiebesparing te worden bereikt bij toepassing van lucht/waterwarmtepompen in combinatie met HR 107 ketels. Een belangrijk voordeel boven warmtepompsystemen met bodembronnen is de beperkte investering en de ontbrekende noodzaak voor vergunningen.

De grootste specifieke energiebesparing wordt bereikt met een beperkt pakket aan isolatiemaatregelen; aanpassing van het ventilatiesysteem in de inpandige collectieve gangen, spouwmuurisolatie en vloerisolatie onder de begane grondvloer in combinatie met een 229 kW lucht/waterwarmtepomp. De energiebesparing ten opzichte van de huidige staat van het gebouw bedraagt ca. 34%.

Een iets lagere specifieke energiebesparing, maar een hogere absolute energiebesparing wordt bereikt met dezelfde isolatiemaatregelen in combinatie met 14 gasabsorptiewarmtepompen: ca. 40%. De warmtepompen zijn zodanig gedimensioneerd dat deze alle nodige warmte kunnen leveren onder de voor de warmtepompen gunstige condities (bron- en afgiftetemperaturen). Hierdoor worden de warmtepompen vrij groot en kostbaar. Deze investeringen worden niet terugverdiend.

Door het warmtepompaandeel te verkleinen kan een balans worden gevonden tussen investering enerzijds en energiebesparing anderzijds.

Het hierboven genoemde pakket van isolatiemaatregelen en zes gasabsorptiewarmtepompen verdient de ervoor benodigde investering in negen jaar terug door de besparing op energiekosten. Door het huidige subsidiebeleid van de overheid is het beeld nog positiever. Doordat gawp en water / waterwarmtepompen worden gesubsidieerd met een aankoopsubsidie tot ca. 80% van het investeringsbedrag daalt de eenvoudige terugverdientijd van sommige onderzochte combinaties fors. Daarnaast heeft de eenmalige investeringsaftrek een gunstig effect. Van de hierboven genoemde maatregelencombinatie bedraagt de eenvoudige terugverdientijd, rekening houdend met subsidies zeven jaar. Na een periode van 15 jaar, de technische levensduur van de warmtepompen, is de gehele investering ruim twee maal terugverdiend en behoeven alleen de gawp te worden vervangen.

Wanneer het doel van een voorgenomen renovatie niet is om energie te besparen, maar bijvoorbeeld om CO₂ emissie terug te dringen of om geld te verdienen, kan het in deze scriptie beschreven systeem ook worden toegepast.

Wanneer het doel is om geld te verdienen, moeten de mogelijke maatregelen worden onderzocht zoals in deze scriptie is beschreven. De maatregelen moeten nu uitsluitend worden gecombineerd op basis van hun specifieke energiekostenbesparing [(€/j)/€]. Hoe hoger de minimale specifieke energiekostenbesparing welke wordt gehanteerd als selectie criterium, des te hoger is de winst. Wanneer het doel is om CO₂ te besparen, dient per maatregel de specifieke CO₂ besparing

[(kg CO₂/j)/€] te worden bepaald, in plaats van de specifieke energiebesparing. Wat het doel ook is, steeds wordt op deze manier het beste resultaat gevonden dat voor het te investeren bedrag mogelijk is.

2.3 Gevonden methode

Het was de bedoeling de bevindingen uit dit onderzoek samen te vatten in een matrix of spreadsheet, waarmee voor diverse situaties de beste oplossing gevonden kan worden. Dat bleek moeilijker dan vooraf gedacht. De reden hiervoor is dat er teveel variabelen zijn. Verschillende gebouwen hebben uiteenlopende gebruikers en verschillende bouwfysische parameters. De mogelijkheden om aanpassingen te doen zijn verschillend. Daardoor is geen standaard waarde aan te nemen voor de in een bepaald gebouw benodigde verwarmingswatertemperaturen. Hierdoor staat niet vooraf vast welke bivalente installatie voor een bepaald gebouw het hoogste rendement realiseert.

Om deze reden is de gevolgde werkwijze in een stroomschema vastgelegd. De in de bijlagen getoonde berekeningen, en dat zijn er veel, zullen voor elk project moeten worden herhaald. Door gebruik te maken van de voor dit onderzoek samengestelde spreadsheets blijft de benodigde hoeveelheid tijd binnen redelijke perken.

2.4 Conclusie

In bestaande woongebouwen zijn veel mogelijkheden om energie te besparen. Dit geldt vooral voor oudere gebouwen, van voor de eerste oliecrisis in 1973. Wanneer een energiebesparingsproject wordt uitgevoerd wordt vaak alleen naar bouwkundige- of juist naar installatietechnische maatregelen gekeken. Hierdoor wordt een kans gemist. Wanneer de warmtebehoefte van een gebouw wordt verlaagd, neemt het benodigde verwarmingsvermogen af. Wanneer aan de bestaande radiatoren niets wordt veranderd, kan hierdoor de watertemperatuur van de verwarmingsinstallatie worden verlaagd. Hoe verder de watertemperatuur kan worden verlaagd, des te groter worden de mogelijkheden om warmtepompen in te zetten. Warmtepompen kunnen vaak met een hoger rendement warmte produceren dan HR 107 ketels. Door toepassing van warmtepompen wordt zodoende een vermenigvuldigingsfactor toegepast op het rendement van isolatiemaatregelen. In sommige gevallen kan de benodigde investering worden terugverdiend uit de besparing op energiekosten die ermee wordt bereikt.

Voor het onderzochte woongebouw aan de Van der Veldelaan in Alkmaar bleek de meest aantrekkelijke combinatie van maatregelen te bestaan uit aanbrengen van spouwmuurisolatie, vloerisolatie, plaatsen van warmteterugwinning op de ventilatie-installatie van de gemeenschappelijke gang en het toevoegen van zes gasabsorptiewarmtepompen aan de bestaande HR 107 ketels. Dit pakket van maatregelen kost ca. € 195.000, rekening houdend met subsidies. De energiebesparing bedraagt ca. 2.150 GJ/jaar. Dit komt overeen met 60.000 m³_n / jaar aardgas en € 39.000 / jaar en 40% van het huidige gasverbruik. De benodigde investering wordt door de besparing op energiekosten terugverdiend in zeven jaar.

HR 107 ketels zijn een onmisbare warmtebron bij aanvoertemperaturen boven 65°C. Beneden deze aanvoertemperatuur kunnen warmtepompen met een hoger rendement warmte produceren. Wat een gebouweigenaar ook beweegt; de wens om energiekosten te beperken, CO₂ uitstoot te reduceren of spaarzaam met eindige grondstoffen om te springen, het loont om energiebesparingsprojecten uit te voeren. Voorafgaand onderzoek naar het optimale pakket van maatregelen is noodzakelijk, zodat verspilling van geld wordt voorkomen.

3 Inhoudsopgave

1	Verklaring hogeschool	2
1.1	Afkortingenlijst	3
2	Samenvatting	4
2.1	Inleiding	4
2.2	Onderzoek	4
2.3	Gevonden methode	5
2.4	Conclusie	5
3	Inhoudsopgave	6
4	Inleiding	8
4.1	Opdracht	8
4.2	Probleemstelling	8
4.3	Deelvragen	8
4.4	Afbakening	9
4.5	Doelstelling	9
4.6	Leeswijzer	9
5	Het onderzoek	10
5.1	Referentiegebouw	10
5.1.1	Beschrijving van het referentiegebouw	10
5.1.2	Prestatie-indicatoren voor het energieverbruik	11
5.1.3	Berekening van de jaarlijkse warmtebehoefte	12
5.1.4	Correctie voor de werkelijke warmtebehoefte	12
5.1.5	Bepaling van het opwekkingsrendement	13
5.2	Mogelijkheden tot verlaging van de warmtebehoefte	13
5.2.1	Isolatie	13
5.2.2	Specifieke energiebesparing isolatie en ventilatie	15
5.2.3	Aanpassingen: voorstel A en B	16
5.2.4	Resultaten van isolatie- en ventilatiemaatregelen	16
5.3	Mogelijkheden tot verhoging van het opwekkingsrendement	19
5.3.1	Benutting van verbrandingswarmte van aardgas	19
5.3.2	Bemetering, regeltechniek	20
5.3.3	Warmtepompen	21
5.3.4	Warmtebronnen	24
5.3.5	Warmtepompen in combinatie met HR 107 ketels	26
5.4	Toepasbare combinaties van maatregelen	27
5.4.1	Selectiecriteria	27
5.4.2	Samenstelling concepten en selectie	28
5.4.3	Financiële haalbaarheid	30
5.4.4	Subsidies	32
5.4.5	Optimalisatie van de gevonden combinaties	34
5.4.6	Methode voor het samenstellen van besparingsconcepten	36

6	Conclusie en aanbevelingen	38
6.1	Conclusie	38
6.2	Aanbevelingen	39
7	Bronnenlijst	40
8	Bijlagen	41

4 Inleiding

4.1 Opdracht

De onderzoeksoopdracht voor deze scriptie luidt in een zin: onderzoek welke conceptkeuzen er zijn voor de verduurzaming van gasgestookte verwarmingsinstallaties in bestaande collectieve woongebouwen.

Technisch Adviesburo Duinwijck adviseert veelvuldig bij de vervanging van grote gasgestookte verwarmingsketels in bestaande woongebouwen. Het is hierbij gebruikelijk dat een bestaande combinatie van twee grote VR-ketels wordt vervangen door modernere HR-ketels. Er verschijnen alternatieven voor deze HR-ketels op de markt, welke een aanzienlijk hoger rendement hebben, zoals warmtepompen. Er zitten haken en ogen aan deze alternatieven. Het is voor Technisch Adviesburo Duinwijck van belang om inzicht te verkrijgen in de mogelijkheden die deze alternatieve warmteopwekkers hebben en welke moeilijkheden ermee gepaard gaan. Kennis van de mogelijkheden en moeilijkheden leidt tot het vinden van de optimale oplossing voor vervanging van de oude verwarmingstoestellen.

De alternatieven voor HR-ketels zijn in technisch opzicht minder eenvoudig dan een installatie, uitsluitend bestaand uit HR-ketels. Dit betekent, dat met een opdracht voor ketelvervanging met warmtepomp(en) meer advieswerk gemoeid is dan bij een gangbare installatie. Door zich te concentreren op een verdere verhoging van het verwarmingsrendement blijven de adviezen van Technisch Adviesburo Duinwijck up to date en kan het zich onderscheiden van de adviseurs en installateurs, die zich beperken tot het vervangen van VR-ketels door HR 107 ketels. De waarde voor de opdrachtgevers is dat er op stookkosten wordt bespaard en de CO₂ emissie wordt verminderd.

De doelgroep van deze scriptie zijn mijn collega's die adviseren op het gebied van groot onderhoud van bestaande collectieve woongebouwen. Daarnaast is de inhoud van deze scriptie ook bedoeld voor beheerders van bestaande collectieve woongebouwen en andere geïnteresseerden.

4.2 Probleemstelling

Wanneer het einde van de levensduur van de verwarmingsinstallatie in een woongebouw is bereikt, breekt het moment aan dat men zich afvraagt: wat nu? Wordt de oude verwarmingsketel vervangen door een nieuwe? HR-107 ketels zijn aan het einde van hun ontwikkeling en er komen verschillende nieuwe, andere machines op de markt. Hoe te kiezen uit beschikbare alternatieven bij ketelvervanging?

4.3 Deelvragen

Het antwoord op de centrale vraag, hoe te kiezen uit beschikbare alternatieven bij ketelvervanging, ligt niet voor het grijpen. Om de beste oplossing te vinden moeten meerdere vragen worden beantwoord:

- Welke warmteopwekkers vinden wij in bestaande woongebouwen?
- Welke eisen worden gesteld aan warmteopwekkers ten behoeve van het gebruik?
- Welke alternatieven zijn er (efficiënter gasgebruik, duurzame opwekking)?
- Zijn aanpassingen aan het gebouw mogelijk en vereist?
- Is een hybride opstelling zinvol?
- Hoe wordt een hybride opstelling gedimensioneerd?
- Hoe efficiënt zijn de alternatieven?
- Wat zijn de financiële gevolgen?

In deze scriptie zal worden geprobeerd deze al deze vragen te beantwoorden. Uit de gevonden antwoorden moet duidelijk worden welke oplossingen beschikbaar zijn en welke oplossing de beste is voor een bepaald gebouw.

4.4 Afbakening

Het onderzoek naar alternatieve warmteopwekkers zal beperkt blijven tot toestellen welke gas of elektriciteit omzetten in warmte ten behoeve van ruimteverwarming. Bereiding van warmtapwater blijft buiten beschouwing. Het combineren van ruimteverwarming met warmtapwateropwekking stelt als eis dat de aanvoerwatertemperatuur altijd $\geq 65^{\circ}\text{C}$ moet bedragen. Dat sluit het toepassen van warmtepompen uit.

Buiten dit onderzoek vallen onder andere warmte-krachtkoppeling (wkk), micro-wkk (individuele elektriciteit leverende HRe-ketels) en geothermie; het rechtstreeks laten verwarmen van water door zeer diep gelegen aardlagen. Deze keuze is gemaakt, zodat de gevonden oplossingen direct aansluiten bij de situatie in het onderzochte gebouw; de verwarmingsinstallatie moet worden vernieuwd. De nieuwe installatie heeft uitsluitend tot doel in de warmtebehoefte van het woongebouw te voorzien, wkk-installaties leveren naast warmte ook elektriciteit.

De verkregen waarden voor warmteverbruik, opwekkingsrendementen, terugverdientijden etc. zijn gebaseerd op theoretische waarden. De energievraag van het gebouw wordt bepaald door berekening op basis van bekende eigenschappen van het gebouw, in combinatie met het bekende werkelijke gasverbruik. De eigenschappen van de verschillende warmteopwekkers worden gebaseerd op gegevens welke worden ontleend aan literatuur en fabrikanten. Metingen van het energieverbruik in meerdere gebouwen, voorzien van verschillende typen opwekinstallaties vallen buiten dit onderzoek, evenals uitwerkingen van hydraulische schakelingen van de te vergelijken installatieconcepten. De op deze manier verkregen waarden geven een zo nauwkeurig mogelijke voorspelling van de verandering van het energieverbruik ten gevolge van verschillende maatregelen en systemen. De kenmerkende eigenschappen van isolatiemaatregelen en de verschillende typen warmteopwekkers zijn beschikbaar in naslagwerken en productdocumentatie. De relatie van deze eigenschappen tot het energieverbruik ligt vast in natuurkundige formules en modellen.

4.5 Doelstelling

Het doel is te komen tot een overzicht van zinvolle installatieconcepten. Dit overzicht moet bruikbaar zijn als hulpmiddel bij de bepaling van de mogelijke oplossingen voor het onderzochte gebouw. Daarnaast zal worden geprobeerd een rekenmodel in de vorm van een spreadsheet te maken, waarmee op basis van hoofdkenmerken van ieder ander collectief woongebouw de optimale verwarmingsopstelling kan worden gevonden, inclusief een berekening van terugverdientijd en netto contante waarde ervan.

4.6 Leeswijzer

Allereerst zal in paragraaf 5.1 van een bepaald, bestaand woongebouw in beeld worden gebracht welke kenmerken het heeft en welk verwachte energieverbruik dit tot gevolg heeft.

In paragraaf 5.2 wordt nagegaan welke maatregelen toepasbaar zijn om de warmtevraag te verminderen. In paragraaf 5.3 wordt vervolgens onderzocht welke mogelijkheden er zijn om het opwekrendement van de warmte te verhogen.

In paragraaf 5.4 wordt gezocht naar de beste combinaties van isolatie en installatie. Tot dit punt speelt de economische kant van de kwestie een zeer ondergeschikte rol: er wordt alleen gekeken welke maatregelen de grootste energiebesparing per geïnvesteerde Euro opleveren, zodat zowel voor een beperkt budget als voor een groot budget de meest effectieve oplossing wordt gevonden.

Nadat de beste combinaties van maatregelen voor het referentiegebouw zijn gevonden, zal worden nagegaan wat de financiële gevolgen zullen zijn van de voorgestelde oplossingen. Vaak geldt dat een energiebesparend concept alleen wordt gerealiseerd wanneer het een financieel voordeel oplevert aan de investeerder. Ook dit wordt in paragraaf 5.4 onderzocht.

Tenslotte wordt op een rij gezet uit welke stappen dit onderzoek heeft bestaan en hoe de toegepaste werkwijze kan worden gebruikt voor elk willekeurig ander bestaand gebouw.

5 Het onderzoek

5.1 Referentiegebouw

5.1.1 Beschrijving van het referentiegebouw

Het referentiegebouw voor dit onderzoek is een flatgebouw, waarvan een belangrijke opdrachtgever van Duinwijck er tientallen bezit. Dit gebouw is een kenmerkend voorbeeld van het collectieve woongebouw, zoals dat in Nederland werd gebouwd na de tweede wereldoorlog, en tot de eerste energiecrisis in 1973. Het is gebouwd omstreeks 1969, het jaar dat de eerste mens voet op de maan zette. Het gebouw staat in Alkmaar, aan de Van de Veldelaan (zie figuur 1). Voor een plattegrond zie bijlage 1. Het telt elf verdiepingen. Op de begane grond bevinden zich gemeenschappelijke voorzieningen zoals een recreatierruimte, facilitaire ruimten, fietsenstalling en een appartement ten behoeve van de beheerder van het gebouw. Op de eerste tot en met de tiende verdieping bevinden zich 120 identieke appartementen welke worden verhuurd aan senioren. Op het dak van het gebouw bevindt zich een technische ruimte, waar de centrale verwarmingsinstallatie staat opgesteld.



Figuur 1(bron: <http://maps.google.nl>)

Het flatgebouw is opgetrokken uit ongeïsoleerde spouwmuur van baksteen, vloeren en dak van beton en grote kozijnen met houten borstweringpanelen en enkel glas. Gas was er in overvloed, de oliecrisis van 1973 was nog ver weg.

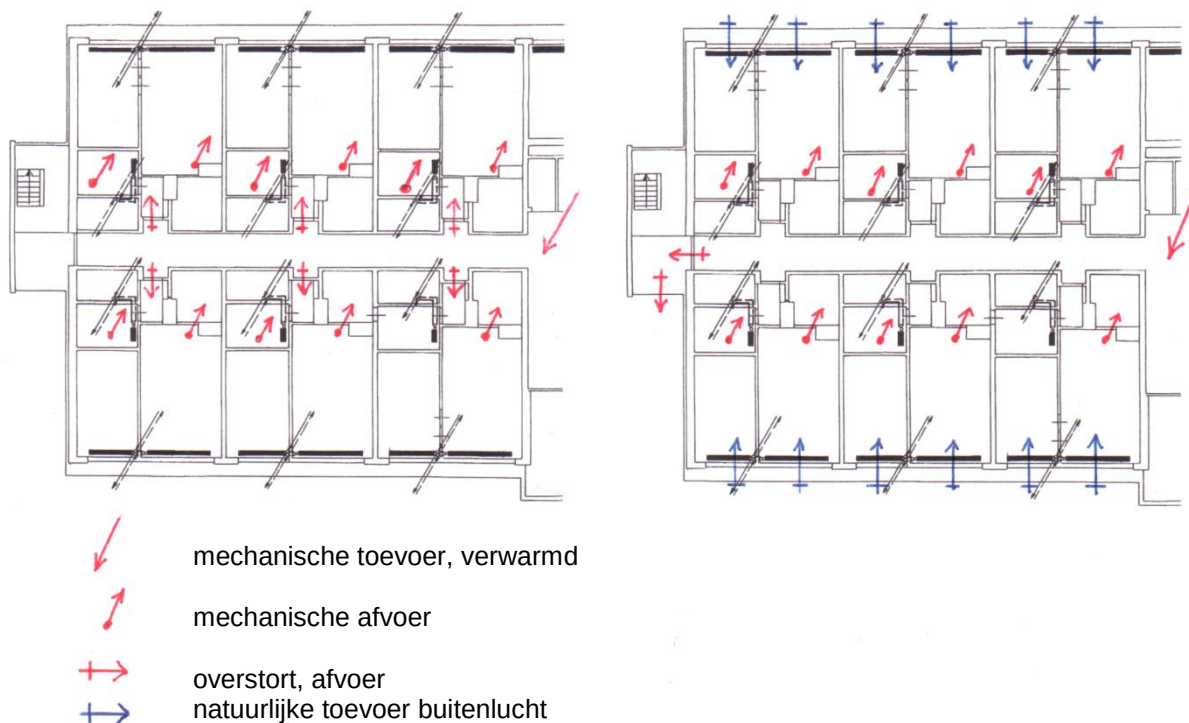
Het gebouw is voorzien van een ventilatie-installatie en een centrale verwarmingsinstallatie. Oorspronkelijk werd verse buitenlucht verwarmd tot 20°C en ingeblazen in de gangen tussen de appartementen. Door openingen in de muren van de gangen, boven de voordeuren van de appartementen, stroomde deze lucht de woningen binnen. In de woningen werd lucht afgezogen door afzuigventielen in de keukens en badkamers.

De verwarmingsinstallatie bestaat uit gasgestookte verwarmingsketels. Het verwarmingswater wordt via een transportleidingnet naar de appartementen gepompt, waar de warmte wordt afgegeven middels paneelradiatoren voor de borstweringpanelen en in de keukens.

In 1983 zijn de woningen deels geïsoleerd. Het dak is voorzien van isolatie en de kozijnen zijn voorzien van dubbel glas en ventilatietoevoerroosters. In de badkamers is een radiator toegevoegd. In 2009 is het ventilatiesysteem in de collectieve gang aangepast, zie voor een toelichting pagina 15. Zie voor een schets figuur 2.

oorspronkelijke situatie 1969

aangepaste situatie 1983



Figuur 2

5.1.2 Prestatie-indicatoren voor het energieverbruik

De eerste belangrijke maat voor bepaling van het energieverbruik is het vollastverwarmingsvermogen (P_{nom}) van het gehele gebouw. In het vollastvermogen is het effect van isolatiemaatregelen en wijzigingen in de ventilatie-installatie terug te vinden.

Doordat het vollastvermogen van het gebouw wordt beïnvloed door bovengenoemde maatregelen, terwijl de radiatoren in de appartementen ongewijzigd blijven, kan de temperatuur van het verwarmingswater worden verlaagd. De watertemperatuur is van invloed op het rendement van ieder type warmteopwekker. Bij HR 107 ketels is deze invloed beperkt omdat hier alleen de hoeveelheid te condenseren water uit de rookgassen varieert met de retourtemperatuur van het verwarmingswater. Bij warmtepompen is de invloed groot, doordat het rendement hiervan hoofdzakelijk wordt bepaald door de verhouding tussen afgifte- en brontemperatuur.

De tweede belangrijke maat is het opwekkingsrendement van de warmte. In dit onderzoek zullen verwarmingsinstallaties worden vergeleken die worden gestookt met gas, elektriciteit, of een combinatie hiervan. Om het energieverbruik van deze installaties onderling te kunnen vergelijken, is een grootheid nodig die voor beide systemen geschikt is. Hiervoor zal de primary energy rate (p.e.r.) [-] worden gehanteerd. Zie voor een nadere toelichting hiervan onder punt 5.1.5.

Omdat in dit onderzoek zowel wordt gekeken naar de gevolgen van isolatie (beperking van de warmtebehoefte) als van alternatieve installaties (verhoging van het opwekkingsrendement) zal het gezamenlijke resultaat van beide maatregelen moeten worden vergeleken.

Door de jaarlijkse warmtebehoefte [GJ/jr] te delen door de p.e.r. [-], wordt het jaarlijkse primaire energieverbruik [GJ/jr] van de onderzochte installaties gevonden.

Om de financiële haalbaarheid van de verschillende pakketten van maatregelen te kunnen beoordelen zal per pakket de eenvoudige terugverdientijd worden berekend. Dat wil zeggen: de investering per maatregelenpakket, gedeeld door de jaarlijkse besparing op energiekosten, verminderd met de kapitaalkosten en onderhoudskosten.

Tenslotte wordt de netto contante waarde van de verschillende pakketten berekend. Dat is de netto opbrengst tengevolge van de investering, rekening houdend met het feit dat aan een opbrengst in het heden een grotere waarde wordt toegekend dan aan een even grote opbrengst in de toekomst.

5.1.3 Berekening van de jaarlijkse warmtebehoefte

De jaarlijkse warmtebehoefte [GJ/jr] wordt berekend uit het vollastvermogen $P_{,nom}$ [kW], en het aantal equivalente vollasturen (vh,eq) per jaar.

$$E, th = \frac{P_{,nom} * vh,eq}{3.600} \quad [GJ/jr]$$

Het nominaal verwarmingsvermogen wordt bepaald volgens ISSO 51 *Warmteverliesberekening voor woningen en woongebouwen*. Omdat het nominaal verwarmingsvermogen hier het voor het gehele gebouw benodigde vermogen betreft, wordt de berekening uitgevoerd als een schilberekening. Dat wil zeggen dat de onderlinge warmteverliezen en warmtewinsten tussen de appartementen buiten beschouwing blijven. Voor deze berekening en alle andere voor deze scriptie uitgevoerde berekeningen zijn Excel spreadsheets gemaakt. Voor de bepaling van het totaal benodigde verwarmingsvermogen telt alleen de som van alle transmissieverliezen door vloer, gevel en dak, het infiltratieverlies en het ventilatieverlies. Zie voor de berekening bijlage 2 en 3.

Het aantal equivalente vollasturen per jaar is de jaarlijkse warmtebehoefte van het gebouw, gedeeld door $P_{,nom}$ van de verwarmingsinstallatie. Dit komt overeen met het aantal graaduren per jaar, gedeeld door het verschil tussen ontwerp binnentemperatuur en ontwerp buitentemperatuur:

$$vh, eq = \frac{\sum_{i=-10}^{18} (T_{,ontw} - i) h / jr}{18 - (-10)} \quad [h/jr]$$

waarbij: $T_{,ontw}$ = ontwerp binnentemperatuur 18°C
 $T_{,bu}$ = buitentemperatuur in stappen van 1K van -10 tot 18°C

Als ontwerp binnentemperatuur is 18°C gekozen. Dit is de gebruikelijke temperatuur voor de bepaling van het aantal graaduren in een bepaalde periode.

De gebruikte frequenties van gemiddelde buitentemperaturen zijn afkomstig van het KNMI, weerstation De Bilt, periode 1-1-1990 tot en met 31/12/1999 (KNMI, 2010).

Het hiermee gevonden aantal equivalente vollasturen, benodigd voor de verwarming is 2.357 per jaar.

5.1.4 Correctie voor de werkelijke warmtebehoefte

Uit de warmtebehoefte, berekend zoals beschreven in de vorige paragraaf kan het bijbehorende gasverbruik worden berekend door de warmtebehoefte te delen door het rendement van de installatie. Voor het onderzochte gebouw is een vollastverwarmingsvermogen berekend van 908 kW. Wanneer wordt gerekend met 2.357 vollasturen en een ketelrendement van 95% (H_b) levert dit het volgende theoretische gasverbruik:

$$(908 \text{ kW} \cdot 2.357 \text{ h} \cdot 3,6) / (35,1 \cdot 0,95) = 231.056 \text{ m}^3_{n/jr}$$

Van de eigenaar van het onderzochte pand zijn de werkelijk verbruikte hoeveelheden aardgas in 2007, 2008 en 2009 ontvangen. Het gemiddelde gasverbruik in deze periode bedroeg $151.390 \text{ m}^3_{n/jr}$.

Het werkelijke gasverbruik blijkt aanzienlijk lager te zijn dan het berekende gasverbruik. Hiervoor zijn diverse mogelijke oorzaken te bedenken:

- De berekening gaat uit van een forse winddruk tegen het gebouw. In werkelijkheid waait het meestal minder dan in de berekening.
- De berekening houdt geen rekening met warmtewinst ten gevolge van zoninstraling. In werkelijkheid wordt in alle verblijfsruimten zonnewarmte opgevangen.
- De berekening gaat uit van het maximale ventilatiedebiet. De bewoners kunnen ventilatioorosters sluiten, waardoor de hoeveelheid te verwarmen ventilatielucht afneemt.

- De berekening gaat uit van een temperatuur van 24°C in de badkamer, 22°C in de verblijfsruimten en 20°C in de collectieve gang. In werkelijkheid liggen deze temperaturen mogelijk lager.
- De berekening houdt geen rekening met warmteproductie door de in het gebouw aanwezige personen, dieren en elektrische huishoudelijke apparaten. Deze zijn in werkelijkheid wel aanwezig. De hierdoor geleverde warmte hoeft niet door de verwarmingsinstallatie te worden geleverd.

Voor de berekening van het te verwachten energieverbruik zal steeds moeten worden gecorrigeerd voor het gevonden verschil tussen berekend en werkelijk gasverbruik. Dat wil zeggen, dat een voor een bepaald pakket van isolatiemaatregelen berekend vollastvermogen zal worden verminderd met

$$\frac{231.056 - 151.390}{231.056} \cdot 100 = 34\%$$

5.1.5 Bepaling van het opwekkingsrendement

Het opwekkingsrendement van de verwarmingsinstallatie wordt berekend uit de geproduceerde warmte (en eventueel ook koude) $E_w + E_k = E_{th}$ en de verbruikte primaire energie E_{pr} . De verbruikte primaire energie bestaat deels uit gas en deels uit elektriciteit, welke in een elektriciteitscentrale is opgewekt uit -meestal- fossiele brandstof. Het opwekkingsrendement van de elektriciteit is mede afhankelijk van het type centrale dat is gebruikt. In Nederland zijn meerdere soorten centrales in gebruik, waardoor discussie mogelijk is over het opwekkingsrendement dat dient te worden toegepast. In dit onderzoek wordt hiervoor de waarde gebruikt die verplicht moet worden gehanteerd bij epc-berekeningen: 0,39 [-] (NEN 5128, 2004). Hierdoor wordt de verbruikte elektriciteit uitgedrukt in de energievorm waaruit zij is opgewekt: de primaire energiehoeveelheid E_{pr} in [MJ].

$$E_{pr} = (E_{th} [kWh] \cdot 3,6 [MJ/kWh] \div 0,39) + M_n^3 \text{ aardgas} \cdot 35,1 [MJ/M^3_n] \quad [MJ]$$

Nu kan de primary energy rate (p.e.r.) [-] worden bepaald uit de geproduceerde warmte [MJ] (en eventueel ook koude) en de hiervoor benodigde primaire energie [MJ] (DWA, 2002):

$$p.e.r. = \frac{E_w + E_k}{E_{pr}} \quad [-]$$

Door van verschillende installaties de p.e.r. te berekenen wordt het rendement van diverse installaties, hoe verschillend deze ook mogen zijn, volledig vergelijkbaar gemaakt.

5.2 Mogelijkheden tot verlaging van de warmtebehoefte

5.2.1 Isolatie

De bekendste manier van beperking van de warmtebehoefte is het verhogen van de warmteweerstand van de grensvlakken van het gebouw; isoleren. Door te isoleren wordt het warmteverlies ten gevolge van transmissie verminderd.

Het transmissieverlies door de gebouwschil volgt uit (Timmer, 2005):

$$P_{tr} = \sum \left(\frac{A \cdot U \cdot \Delta T}{1000} \right) [kW]$$

Het totale oppervlak $A [m^2]$ en het weer $\Delta T [K]$ laten zich moeilijk beïnvloeden. Het onderzoek richt zich volledig op het warmtegeleidingsvermogen $U [W/m^2K]$. Het warmtegeleidingsvermogen wordt berekend uit de warmteweerstand van de constructie R_c en de interne en externe overgangsweerstanden R_i en $R_e [m^2K/W]$. Het warmtegeleidingsvermogen wordt als volgt berekend:

$$U = \frac{1}{R_e + R_i + R_c} [W/m^2K]$$

R_i en R_e worden gegeven in ISSO 51.

De Rc van elke laag in de constructie wordt berekend uit de dikte [m] van de constructie en de warmtegeleidingscoëfficiënt λ [W/mK] van het betreffende materiaal.

De Rc van een constructielaag kan dus worden verhoogd door een constructielaag te vervangen door een ander materiaal met een hogere Rc (bijvoorbeeld spouwmuren vullen met isolatiemateriaal, vervangen van glas en buitendeuren door een beter isolerende soort), of het aan de binnenkant toevoegen van een isolerende laag (achter bijvoorbeeld borstweringpanelen, massieve muren) of aan de buitenkant toevoegen van een isolerende laag (bijvoorbeeld dak- en vloerisolatie, massieve muren).

Naast isolatiemaatregelen kan ook de kierdichtheid van het gebouw worden aangepakt. Hier valt te denken aan het aanbrengen van een tochtichte brievenbus, tochtstrippen rond alle buitendeuren en draairamen en het afkitten van alle naden tussen muren en kozijnen.

In de berekeningen zal er van uit worden gegaan dat de kierdichtheid van het gebouw hierdoor verbetert van $190 \cdot 10^{-5}$ tot $90 \cdot 10^{-5}$ [m^3/sm^2] ($q_{v,10}$ waarden volgens ISSO 51, tabel 4.2).

$$P_{\text{in}} = A_{\text{gevel}} \cdot Q_{v,10} \cdot \frac{1}{1000} \cdot \rho \cdot \Delta T \quad [\text{kW}]$$

Ventilatie-installatie

Het ventilatieverlies van het woongebouw bestaat uit het verwarmingsvermogen [kW] dat aan de toegevoerde ventilatielucht Q_v [m^3/h] moet worden toegevoerd, verminderd met de warmte die aan de afgevoerde lucht wordt onttrokken:

$$P_{\text{vent}} = \frac{Q_v \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot \Delta T (1 - \eta_{\text{wtw}})}{3,6} \quad [\text{kW}]$$

Het ventilatieverlies kan worden beperkt door het ventilatiedebiet te verminderen van een al dan niet door de bewoner ingesteld debiet, tot het minimaal noodzakelijke. Dit kan worden bereikt door een CO₂ gestuurde regeling toe te passen. Een andere mogelijkheid is het toepassen van warmteterugwinning; het onttrekken van warmte uit ventilatielucht en deze toevoeren aan de verse buitenlucht. Een combinatie van beide maatregelen is ook mogelijk.

In de appartementen kan voor een deel van de ventilatie een decentraal CO₂ gestuurd ventilatietoestel met warmteterugwinning worden toegepast, bijvoorbeeld Climarad of Brink Ademend raam. Het overige deel van de ventilatie dient op de huidige wijze te worden geregeld; toevoer via een gevelrooster in de slaapkamer, afvoer via de afzuigventielen in keukens en badkamer.

Het afzuigpunt in de keuken dient door de gebruiker te kunnen worden geopend en gesloten door middel van een klep in een motorloze afzuigkap. De collectieve afzuigventilator dient te zijn geregeld op constant drukverschil, zodat het ventilatiedebiet in de badkamers constant blijft en het totale ventilatiedebiet wordt verhoogd wanneer kleppen in de afzuigkappen worden geopend. Op deze wijze wordt de ventilatie van de slaapkamer en badkamer volgens het Bouwbesluit 2006 gehandhaafd en blijft de werking van de afzuigkap in de keuken, tijdens het koken, ongewijzigd.

De overige ventilatie van de woning wordt naar behoefte verzorgd door het CO₂ gestuurde ventilatietoestel met warmteterugwinning.

De ventilatie van de gezamenlijke gangen in het gebouw gebeurt met verwarmde verse buitenlucht. Deze lucht werd tot 2009 uit de gezamenlijke gangen afgevoerd via openingen in de gangmuren boven de voordeuren en toegevoerd aan de appartementen. Om te voldoen aan eisen met betrekking tot brandcompartimentering zijn deze openingen in de gangmuren in 2009 afgesloten. De verwarmde ventilatielucht wordt nu middels gevelroosters direct naar buiten afgevoerd (figuur 2).

Omdat de gewenste temperatuur in de gezamenlijke gangen 20°C bedraagt en de benodigde warmte uitsluitend door middel van de ventilatielucht wordt toegevoerd, is het ventilatiedebiet in deze gangen een veelvoud van het ventilatiedebiet dat ten behoeve van alleen ventilatie wenselijk zou zijn, met een hoog warmteverlies tot gevolg. Dit warmteverlies kan op twee manieren worden teruggedrongen:

- 1) Verlagen van het ventilatiedebiet tot het voor ruimteventilatie wenselijke debiet van 0,7 [dm³/(m²·s)] en toevoer van de benodigde warmte door middel van nieuw te plaatsen radiatoren.
- 2) Handhaven van de huidige luchtverwarming in de gangen, toevoegen van warmteterugwinning uit de afvoerlucht.

Beide varianten worden berekend in bijlage 3. De meest energiezuinige variant blijkt 2) te zijn. Dit is de variant die in alle energiebesparende pakketten zal worden gehanteerd.

5.2.2 Specifieke energiebesparing isolatie en ventilatie

Van de verschillende maatregelen die kunnen worden genomen om het energiegebruik van het gebouw te beperken kan de specifieke energiebesparing worden berekend. Hoeveel energie wordt bespaard per geïnvesteerde Euro? Wanneer geen onbeperkt budget beschikbaar is, kan met behulp van de specifieke energiebesparing worden gekozen welke maatregelen de voorkeur verdienen. Een voor de hand liggende werkwijze zou kunnen zijn maatregelen te kiezen, op volgorde van hoog naar lager, tot het budget op is.

Bij het samenstellen van de pakketten dient erop te worden gelet, dat de verschillende verwarmde ruimten in het gebouw ongeveer in dezelfde mate beïnvloed worden door de maatregelen. Wanneer bijvoorbeeld alleen het dak en de begane grondvloer zouden worden geïsoleerd, kan de verwarmingswatertemperatuur in de tussengelegen appartementen niet worden verlaagd. In dat geval heeft het nemen van isolatiemaatregelen geen gunstige invloed op de toepasbaarheid van warmtepompen.

Voor dit onderzoek zijn twee pakketten van isolatiemaatregelen samengesteld. Het eerste is samengesteld met een beperkt budget in gedachten. Het tweede pakket omvat alle reeds genoemde maatregelen. De uitkomsten van deze berekeningen zijn samengebracht in tabel 1. De berekeningen zijn terug te vinden in bijlage 3.

Maatregel	investering	besparing	spec. Besp.	voorstel A	voorstel B
	[€]	[GJ/j]	[(MJ/j)/€]		
wtw gangventilatie	75.000	814	10,85	X	X
spouwmuurisolatie	43.000	305	7,10	X	X
vloerisolatie	7.000	44	6,23	X	X
climarad 121 stuks	303.000	1.418	4,68		X
HR++ glas	288.000	487	1,40		X
borstwering 9 cm isolatie	55.000	51	0,92		X

tabel 1

5.2.3 Aanpassingen: voorstel A en B

Om de warmtevraag van het gebouw te verminderen is het vereiste nominaal verwarmingsvermogen van twee pakketten van maatregelen berekend:

Voorstel A

Spouwmuur:	vullen met minerale wol of schuim
Dak:	reeds geïsoleerd, blijft ongewijzigd
Begane grond vloer:	voorzien van 8 cm gesloten cellenschuim aan onderzijde
Ventilatie gangen:	voorzien van warmteterugwinning $\eta_{wtw} \geq 0,9$

Voorstel B

Als voorstel A, echter in de woonkamers van de appartementen wordt het ventilatietoeverrooster in de woonkamer verwijderd. In plaats daarvan wordt een decentraal ventilatietoestel geplaatst met mechanische luchttoe- en afvoer, warmteterugwinning en op CO₂ geregelde gelijkstroomventilatoren. Een minimum aan ventilatie blijft gehandhaafd doordat via het gevelrooster in de slaapkamer buitenlucht wordt toegevoerd, welke via de woonkamer wordt overgestort naar de keuken, badkamer en berging, waar de lucht wordt afgevoerd via het bestaande collectieve ventilatiesysteem. De hoeveelheid lucht die door dit systeem wordt afgevoerd varieert tussen 75 en 150 m³/h, afhankelijk van de stand van de klep in de motorloze afzuigkap. Wanneer mensen in het appartement aanwezig zijn en de CO₂ concentratie in de woonkamer te hoog wordt, springt het decentrale ventilatietoestel bij.

Kierdichting:	afkitten van naden tussen kozijn en bouwkundige muren, tochtstrips rond ramen en buitendeuren (noodzakelijk in combinatie met mechanische luchttoe- en afvoer met wtw).
Beglazing:	bestaand dubbel glas vervangen door HR++
Borstwering:	de bestaande 3 cm isolatieschuim verwijderen en vervangen door 9 cm isolatie, inclusief multiplex afdekplaat aan binnen- en buitenzijde van het kozijn.

5.2.4 Resultaten van isolatie- en ventilatiemaatregelen

Door maatregelen te nemen op het gebied van isolatie en ventilatie wordt de warmtebehoefte van het gebouw verlaagd. Wanneer de bestaande radiatoren in het gebouw ongewijzigd blijven, kan de aanvoertemperatuur van het verwarmingswater worden verlaagd. Wanneer de watertemperatuur wordt verlaagd en de ruimtetemperatuur gelijk blijft, neemt het verwarmingsvermogen af. Het verloop van het afgiftevermogen van radiatoren wordt beschreven door de volgende formule:

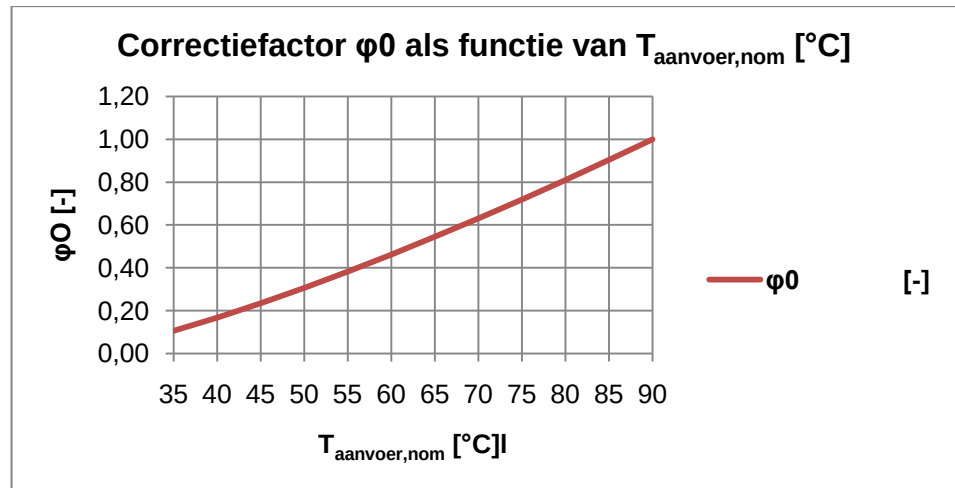
$$P = P_{norm} \cdot \varphi$$

waarbij φ = correctiefactor. Het verwarmingsvermogen, vastgesteld volgens NEN-EN 442, vermenigvuldigd met de correctiefactor, geeft het verwarmingsvermogen onder de specifieke omstandigheden ($T_{aanv}/T_{ret}/T_{rui}$).

De correctiefactor φ wordt berekend met behulp van de specifieke omstandigheden, de radiatorconstante n en de volgende formule (Knoll, 2002:808):

$$\varphi = \frac{(65-20)^{1-n} - (75-20)^{1-n}}{75-65} \cdot \frac{T_{aanv} - T_{ret}}{(T_{ret} - T_{rui})^{1-n} - (T_{aanv} - T_{rui})^{1-n}} [-]$$

Voor vrijwel alle radiatoren is de radiatorconstante een waarde tussen 1,2 en 1,4 [-]. Voor de berekening van de verandering van het verwarmingsvermogen als gevolg van veranderende watertemperaturen is met 1,3 gerekend. In figuur 3 is het verloop van de correctiefactor weergegeven. De retourtemperaturen welke zijn aangehouden, zijn terug te vinden in figuur 4.



Figuur 3

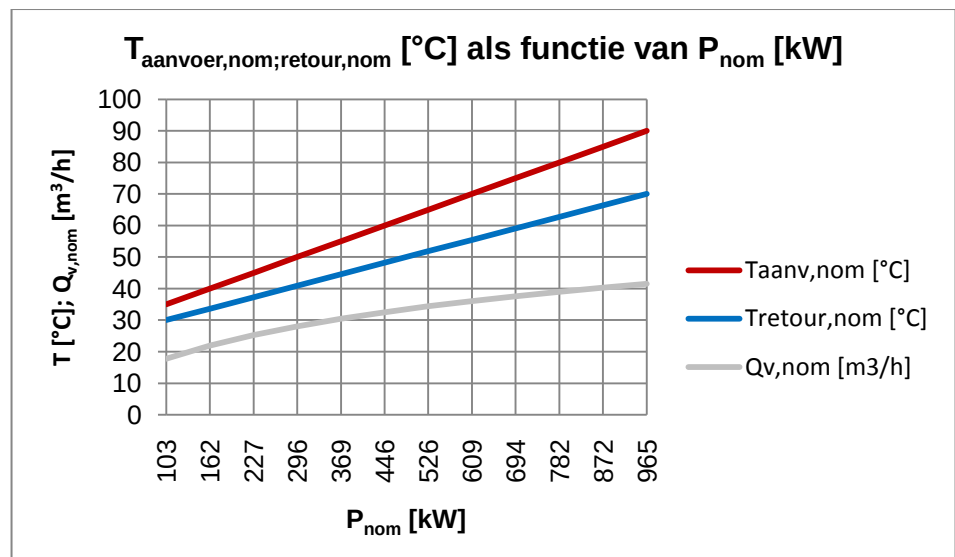
De correctiefactor ϕ_0 volgens NEN-EN 442 is 1,0 voor de volgende temperaturen: aanvoer/retour/ruimte = 75/65/20 °C. Voor figuur 3 is deze correctiefactor gecorrigeerd, zodat deze voor het referentiegebouw in de oorspronkelijke toestand (90/70/22) is 1,0. Hierdoor kan meteen uit de grafiek worden afgelezen wat de verandering van het verwarmingsvermogen is, wanneer de aanvoertemperatuur verder wordt verlaagd. Zie voor de berekening bijlage 5.

Duidelijk is te zien dat de correctiefactor, en dus het afgegeven vermogen van een radiator afneemt, wanneer de watertemperatuur afneemt. Dit verloop is bij benadering lineair. Met behulp van de correctiefactor kan worden bepaald wat het afgegeven verwarmingsvermogen van de radiatoren wordt voor iedere watertemperatuur. Dit is weergegeven in figuur 4.

Uit figuur 4 blijkt dat de relatie tussen vollastvermogen en aanvoertemperatuur bij benadering volgt uit de volgende functie:

$$T_{aanv} = P_v * 0,064 + 28,4 \text{ [°C]}$$

Zie figuur 4 voor een weergave van $T_{aav,nom}$, $T_{ret,nom}$ en het te verpompen waterdebiet $Q_{v,nom}$, wanneer het vollastvermogen door isolatiemaatregelen wordt verlaagd.



Figuur 4

In tabel 2 is weergegeven welke aanvoertemperaturen nodig zijn wanneer de huidige toestand van het gebouw wordt gehandhaafd (renovatie 1983, aanpassing ventilatie 2009), en wanneer voorstel A of voorstel B wordt uitgevoerd.

Nu bekend is wat het nominale verwarmingsvermogen voor het referentiegebouw is in de oorspronkelijke uitvoering, de huidige toestand en bij toepassing van voorstellen A en B, kan worden vastgesteld welke aanvoertemperatuur het verwarmingswater maximaal dient te hebben. Dit is weergegeven in tabel 2. Zie voor de berekening van het vollastvermogen bijlage 2.

Warmtebehoefte referentiegebouw			
omschrijving	vollastvermogen	warmtebehoefte	$T_{\text{aanvoer, nom}}$
	[kW]	[GJ/j]	[°C]
Origineel 1969	965	7.013	90
Renovatie 1983	908	6.596	87
Voorstel A	748	5.437	76
Voorstel B	480	3.487	61

tabel 2

Uit de berekening van het benodigd nominaal vermogen van het referentiegebouw blijkt dat de isolatiemaatregelen die in 1983 zijn getroffen een gunstig effect hebben gehad op het transmissieverlies. Het warmteverlies in de gangen is in 2009 echter sterk toegenomen. Dit, omdat er geen warme lucht meer via de gezamenlijke gangen mocht worden toegevoerd aan de appartementen. In plaats daarvan werd gekozen voor een eenvoudige aanpassing aan de gangen: de wanden daar de appartementen werden afgesloten en de gevels van de gangen werden voorzien van ventilatieafvoerroosters, waardoor verwarmde lucht uit de gang direct naar buiten wordt afgevoerd. Per saldo is het nominaal verwarmingsvermogen licht gedaald ten opzichte van de oorspronkelijke staat uit 1969.

Verder blijkt dat bij voorstel A het vollastvermogen en tengevolge daarvan de warmtebehoefte zijn afgenomen met 18% ten opzichte van de bestaande situatie. De aanvoertemperatuur van het verwarmingswater in de nominale situatie is gedaald tot 76°C. Dit is nog altijd een hoge aanvoertemperatuur, weinig lager dan de 80°C waarmee tegenwoordig wordt gewerkt bij het ontwerpen van hoge temperatuursystemen.

Bij voorstel B dalen vollastvermogen en warmtevraag naar verwachting verder, met 47% ten opzichte van de huidige situatie. De hiervoor benodigde aanvoerwatertemperatuur van 61°C ligt weinig boven 55°C, het maximum van wat tegenwoordig een lage temperatuursysteem mag heten. In deellastbedrijf (de buitentemperatuur ligt hoger dan -10°C) zal de aanvoertemperatuur verder dalen, waardoor de aanvoertemperatuur een groot deel van het stookseizoen geheel in het nuttige werkgebied van diverse typen warmtepompen komt.

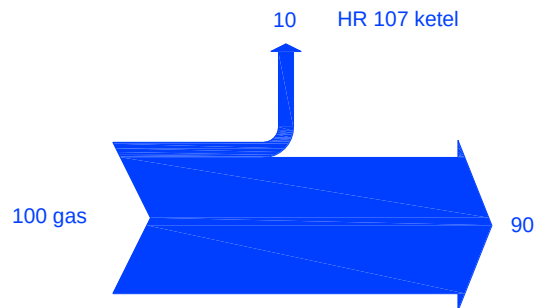
5.3 Mogelijkheden tot verhoging van het opwekkingsrendement

5.3.1 Benutting van verbrandingswarmte van aardgas

Vrijwel alle verwarmingstoestellen die tegenwoordig in collectieve woongebouwen dienst doen wekken warmte op door aardgas te verbranden met zuurstof uit omgevingslucht. Bij het verbranden van aardgas ontstaat een vlamtemperatuur van 900 – 1300°C (J. Ouwehand e.a., 2008). Deze warmte wordt toegevoerd aan het water in het verwarmingssysteem, dat wordt verwarmd van ca. 60°C tot ca. 80°C. Hierbij wordt ten hoogste 31,7 MJ/m³_n voelbare warmte geleverd.

Naast de voelbare warmte in de vlam en in de rookgassen komt bij de verbranding van aardgas ook waterdamp vrij. Door deze damp volledig te condenseren kan theoretisch nog eens 3,4 MJ/m³_n latente warmte worden gewonnen. Hoe lager de retourtemperatuur van het verwarmingswater is, des te groter is de te benutten hoeveelheid latente warmte is. Uit een m³_n aardgas kan theoretisch maximaal 35,1 MJ warmte worden gewonnen (J. Ouwehand e.a., 2008). Moderne HR 107 ketels weten ruim 95% van deze totale verbrandingswarmte aan het verwarmingswater toe te voeren. Hier is nauwelijks nog verbetering mogelijk.

De p.e.r. van een moderne, gasgestookte verwarmingsinstallatie is, rekening houdend met enig elektriciteitsverbruik ten behoeve van de circulatiepomp(-en) en de regeling $\approx 0,90$ dus bijna 1, zie het sankey diagram figuur 5.



Figuur 5

Toch kan het beter. Dat de uit aardgas te winnen hoeveelheid warmte voor centrale verwarming nooit meer dan 100% van de verbrandingswarmte kan bedragen lijkt voor de hand te liggen, maar is niet juist.

De warmte uit de gasvlam kan gedeeltelijk worden omgezet in mechanische energie door middel van een positief kringproces, bijvoorbeeld een gasturbine of een ottomotor. De op deze wijze verkregen mechanische energie kan worden gebruikt om een negatief kringproces aan te drijven, zoals een warmtepomp.

De installatie waarvan hierboven in het kort het werkingsprincipe is uitgelegd, een gasmotorwarmtepomp, is pas recent op de markt en heeft nog weinig concurrentie. De huidige modellen halen bij een aanvoerwatertemperatuur van 50°C een p.e.r. van $> 2,00$. Het is waarschijnlijk dat de p.e.r. van deze installatie nog zal toenemen. Ook is een uitvoering denkbaar welke bij dezelfde p.e.r. een hogere aanvoerwatertemperatuur levert. Waar de bovengrens ligt weet niemand. Wel valt te berekenen wat een theoretisch plafond is, dat met zekerheid niet in de praktijk zal worden gerealiseerd. Hiertoe wordt het rendement van Carnot-processen berekend, voor de gegeven temperaturen. Het Carnot proces is een theoretisch proces, waarin warmte wordt omgezet in arbeid of omgekeerd. Omdat de Franse wiskundige Sadi Carnot uitging van omkeerbare processen, dus geheel vrij van verliezen, hebben deze het hoogst denkbare rendement. De verbrandingsmotoren en warmtepompen die wij vandaag kennen werken geen van alle zonder warmte- en wrijvingsverliezen. Daarom zijn de processen in onze machines niet omkeerbaar en liggen de werkelijke rendementen lager.

Om de theoretisch maximaal haalbare p.e.r. te berekenen kan het genoemde proces worden samengesteld uit een positief en een negatief Carnot-proces. Uitgaande van een omgevingstemperatuur (brontemperatuur) van 10°C en een aanvoerwatertemperatuur van 80°C is de theoretisch maximaal haalbare p.e.r. hiervan 4,00 (Van Kimmenaede, 2004) (Zie berekening, bijlage 4). Het gezamenlijke mechanische en thermische rendement van de vandaag gangbare machines is ca. 52% (DWA, 2000). Het is daarom goed voor te stellen dat een gasmotorwarmtepomp onder de genoemde condities een p.e.r. realiseert van $4,00 \cdot 0,52 = 2,08$ [-].

5.3.2 Bemetering, regeltechniek

In oudere woongebouwen worden de kosten ten behoeve van de verwarming nog vaak alleen collectief geregistreerd en met behulp van een verdeelsleutel over de bewoners verdeeld. De temperatuur van het ketelwater is vaak gedurende het hele jaar constant.

Bemetering

Wanneer bewoners van appartementen in een collectief verwarmd woongebouw een vast bedrag voor verwarmingskosten betalen, zijn zij minder zuinig met warmte dan wanneer zij betalen voor hun eigen werkelijke warmteverbruik. Installatie van individuele warmtemeters in de appartementen levert een besparing op het warmteverbruik op van ca. 10% (R. van der Aa, 2009) tot 20 – 25% (Servicekosten.info, 2010).

Regeltechniek

De ketelwatertemperatuur in bestaande woongebouwen is vaak gedurende het gehele jaar constant. Het enige verschil tussen zomer en winter is dan dat de hoeveelheid water die per uur door het systeem circuleert, verschilt. In de zomer en tussenseizoenen zijn de warmteverliezen door de transportleidingen echter onnodig hoog. Wanneer de collectieve verwarmingsinstallatie niet ook wordt gebruikt om decentraal, dus in de appartementen zelf, warmtapwater te verwarmen kan door de watertemperatuur weersafhankelijk te regelen 1 – 4 % op energiekosten worden bespaard (SenterNovem, 2007). Een goede weersafhankelijke regeling is zelfs van doorslaggevend belang bij toepassing van warmtepompen, omdat het rendement hiervan direct afhankelijk is van onder meer de aanvoerwatertemperatuur. Dit geldt overigens alleen wanneer de verwarmingsinstallatie niet ook wordt gebruikt voor warmtapwaterbereiding. In dat geval zal de watertemperatuur nooit beneden 65°C mogen komen en is het toepassen van warmtepompen vrijwel uitgesloten.

Radiatoren in oudere woongebouwen zijn meestal voorzien van eenvoudige radiatorkranen waarmee de gewenste ruimtetemperatuur moeilijk precies is te regelen. Vooral bij installaties met niet weersafhankelijk geregelde ketelwatertemperatuurregeling betekent dit dat de radiatorkranen van tijd tot tijd moeten worden bijgesteld. Door thermostatische ventielen te monteren kan de juiste temperatuur worden ingesteld. De ingestelde waarde wordt gehandhaafd zonder dat de gebruiker er iets aan hoeft te doen. Naast een verhoogd comfort wordt hierdoor ca 2% op energiekosten bespaard (SenterNovem, 2007).

5.3.3 Warmtepompen

Op dit moment zijn drie verschillende typen warmtepompen op de markt, die alle drie in dit onderzoek zijn betrokken. Deze drie typen verschillen onderling sterk, zowel door de wijze waarop de warmtepompen worden aangedreven, als het werkingsprincipe van de warmtepomp zelf. Het werkingsprincipe wordt hier niet besproken omdat het voor de resultaten van dit onderzoek niet van belang is. Hieronder volgt een korte beschrijving van de voornaamste eigenschappen van de verschillende machines.

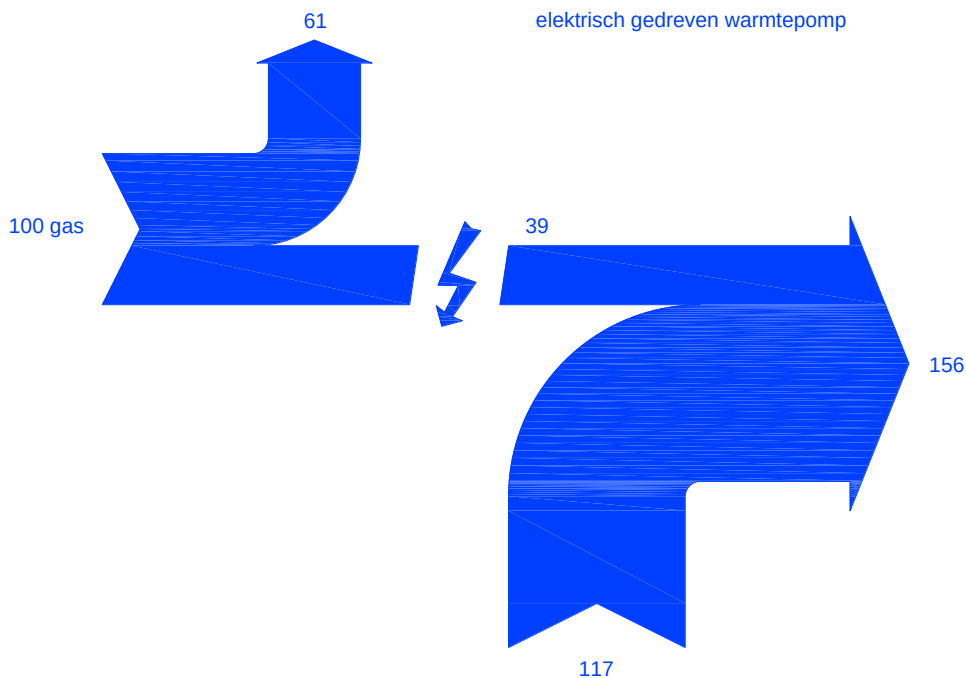
Bij de machines staan diagrammen van de energiestromen in de warmtepompen. De onderlinge verhouding tussen deze energiestromen geldt wanneer de machines onder gunstige condities werken.



Figuur 6 (Horos, 2010)

Elektrisch gedreven compressiewarmtepomp

Deze machine zet elektrische energie om in arbeid. Deze arbeid wordt toegevoerd aan een compressiekoelmachine die warmte verpompt van een verdamper naar een condensor. Deze machines zijn te koop van vele fabricaten en in iedere denkbare grootte vanaf enkele kiloWatt tot vele honderden (figuur 6). Daardoor zijn deze warmtepompen goed in te passen in vele verschillende installatieconcepten. Het rendement van de compressiewarmtepomp is hoofdzakelijk afhankelijk van de verhouding tussen de condensatietemperatuur en de verdampingstemperatuur. In de praktijk: hoe lager de verwarmingswatertemperatuur en hoe hoger de brontemperatuur, des te hoger het rendement. Als bovengrens voor de aanvoerwatertemperatuur zou kunnen worden aangehouden: de temperatuur waarbij de p.e.r. van de warmtepomp nog hoger is dan van een HR 107 ketel. Afhankelijk van het type bron ligt deze temperatuur tussen ca. 40°C en 50°C. Zie voor een sankey diagram figuur 7.



Figuur 7



Figuur 8 (Robur, 2010)

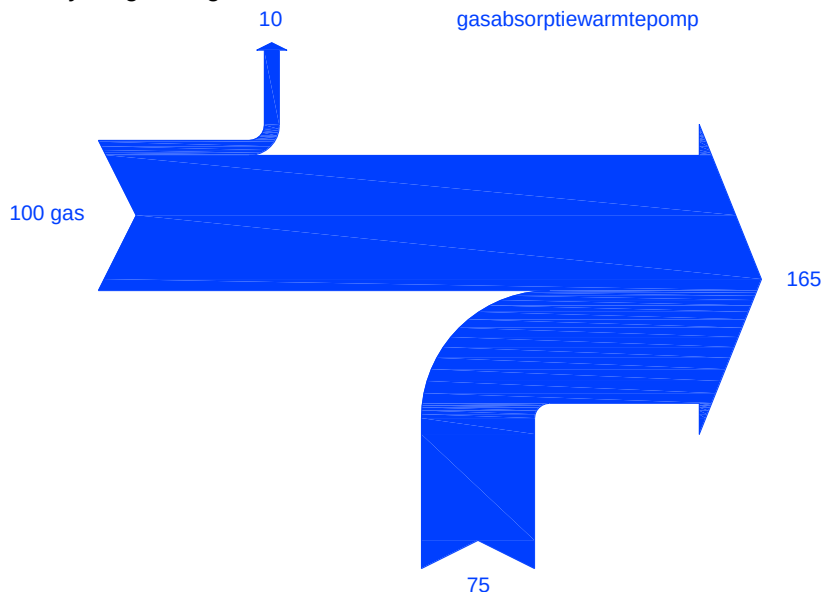
Gasabsorptiewarmtepomp (gawp)

Deze machine bestaat uit een absorptiewarmtepomp met als koelmiddelpaar ammoniak / water. Voor installaties welke ammoniak bevatten, gelden strenge veiligheidsvoorschriften vanwege de giftigheid van het gas. De gawp wordt af fabriek geleverd, inclusief compleet werkend ammoniakcircuit.

Daardoor dient de installateur die de gawp levert en installeert de machine alleen op te stellen en elektrisch en gas- en waterzijdig aan te sluiten.

Als warmtebron voor de thermische compressor wordt de verbrandingswarmte van aardgas gebruikt. De afvalwarmte uit de thermische compressor wordt samengevoegd met de condensorwarmte. Bij deze machine is ruim de helft van de geproduceerde warmte rechtstreeks afkomstig van de verbrandingswarmte van het aardgas. Bijna de helft van de geleverde warmte is afkomstig uit de warmtebron waarin de verdamper is geplaatst. Hierdoor kan de gawp warmte produceren bij een verwarmingswatertemperatuur tot 65°C. Door het gekozen koelmiddelpaar werkt deze warmtepomp nog bij een brontemperatuur van -20°C.

Gawp zijn op dit moment te koop van drie fabrikanten; het Italiaanse Robur en het Nederlandse Remeha en Buderus (figuur 8). Remeha heeft de machine van Robur voorzien van een regeling die gelijk is aan de regelingen uit haar eigen gasgestookte HR 107 ketelassortiment. Daardoor kan de Remeha gawp worden opgenomen in een cascade-opstelling. De cascaderегeling “denkt” dat de gawp een gewone ketel is, waardoor een combinatie van gawp en HR 107 ketels eenvoudig kan worden geregeld. Deze gawp wordt geleverd met een verwarmingsvermogen van 35 kW (bij $T_{\text{bron}} 0^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{aanv}} 50^{\circ}\text{C}$). Zie sankey diagram figuur 9.



Figuur 9



Figuur 10 (Reduses, 2010)

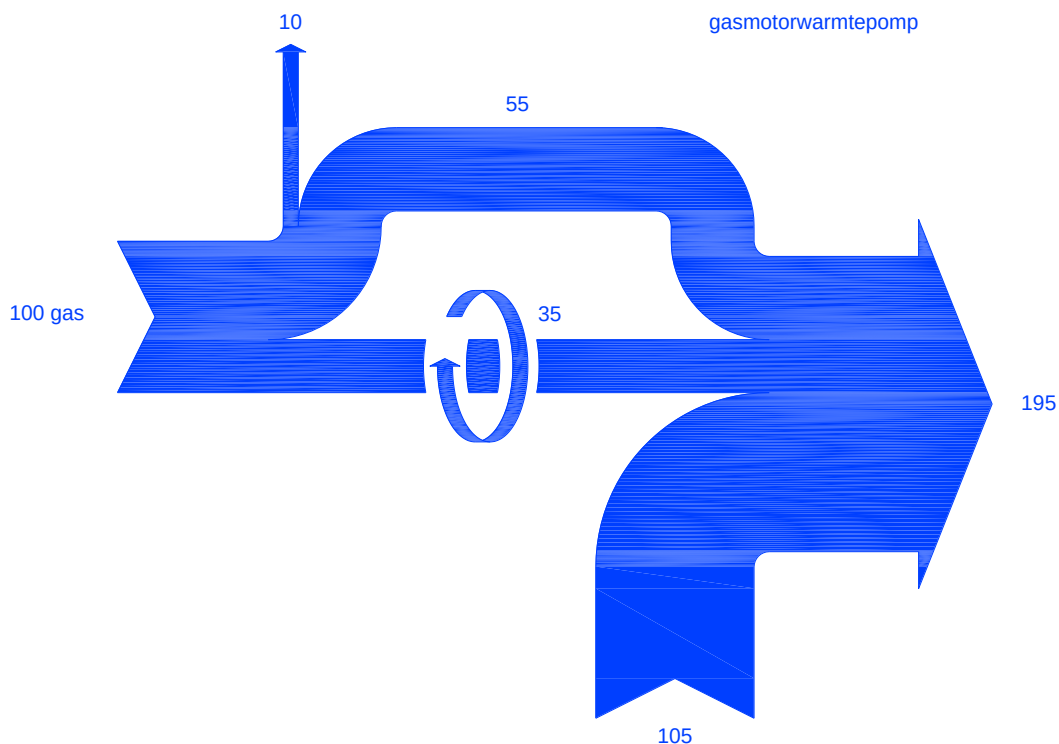
Gasmotorwarmtepomp (gmwp)

Deze machine bestaat uit een gasgedreven ottomotor (viertakt verbrandingsmotor). De motor zet een deel van de verbrandingswarmte van het aardgas om in arbeid. Deze arbeid wordt toegevoerd aan een compressiekoelmachine die warmte verpompt van een verdamper naar een condensor. De afvalwarmte uit de motor kan worden afgevoerd naar de buitenlucht, of nuttig worden gebruikt.

Er zijn op dit moment drie aanbieders op de Nederlandse markt; Aisin, Sanyo en VDL. De gmwp van Aisin wordt geleverd met een verwarmingsvermogen van 53 kW, Sanyo met 25 en 32 kW. Beide warmtepompen leveren de warmte alleen met een lage temperatuur van maximaal ca. 40°C.

De gmwp van Sanyo is ook leverbaar van 53 t/m 100 kW en VDL is leverbaar met een verwarmingsvermogen van 200, 300 en 400 kW (figuur 10). Dit vermogen is de som van twee fracties; de condensorwarmte, ca. 70% en de afvalwarmte van de motor, ca. 30%. Omdat de motor een bedrijfstemperatuur heeft van 90°C is de afvalwarmte hiervan beschikbaar bij een temperatuur van 80°C. Door de toevoeging van de motorafvalwarmte aan de nuttige warmte is het rendement van de VDL en de grotere Sanyo gmwp hoger dan van de andere fabricaten. Daarnaast levert het extra mogelijkheden, bijvoorbeeld toepassing in een hoge temperatuur verwarmingssystemen en warm tapwaterbereiding.

In dit onderzoek wordt de gmwp van VDL betrokken. Daarbij wordt ten behoeve van de uit te voeren berekeningen de motorwarmte toegevoerd aan de condensorwarmte. Hierdoor kan een watertemperatuur worden geleverd van ca. 50°C. Zie sankey diagram figuur 11.



Figuur 11

5.3.4 Warmtebronnen

Een warmtepomp heeft een bron nodig. Een bron is een medium met een zo hoog mogelijke temperatuur, waaraan de benodigde warmte kan worden onttrokken. Omdat het bronmedium bij voorkeur slechts enkele K wordt afgekoeld is er een grote hoeveelheid van nodig. Meestal kan hiervoor buitenlucht, de bodem rond het gebouw en het grondwater onder het gebouw worden gebruikt. Wanneer het gebouw naast een rivier staat, of een kanaal met voldoende doorstroming, kan ook dat een geschikte bron zijn. De meest toegepaste warmtebronnen worden hieronder in het kort besproken.

Lucht

Buitenlucht kan onbeperkt worden aangezogen, afgekoeld en weer afgeblazen. De hiervoor benodigde installatie is eenvoudig; een verdamper en een ventilator. Op het dak van vrijwel ieder woongebouw is hiervoor wel een plaats te vinden. De brontemperatuur varieert met de tijd van de dag en de seizoenen. Dit, samen genomen met het feit dat de verwarmingswatertemperatuur stijgt naarmate de buitenluchttemperatuur daalt, betekent dat het rendement van de warmtepomp zal variëren. Wanneer het buiten koud is heeft een warmtepomp met lucht als bron een lager rendement dan wanneer het warmer is. Bij buitenluchttemperaturen vlak boven het vriespunt zal de verdamper zo koud worden dat het in de lucht aanwezige vocht erop zal condenseren en bevriezen. Doordat de verdamper hierdoor in zijn werking wordt belemmerd, zal de warmtepomp af en toe een tijd omgekeerd moeten werken, dus warmte uit het verwarmingssysteem terug naar de verdamper (nu dus condensor) moeten pompen om deze ijsvrij te maken. Zie voor een lucht / waterwarmtepomp figuur 12.

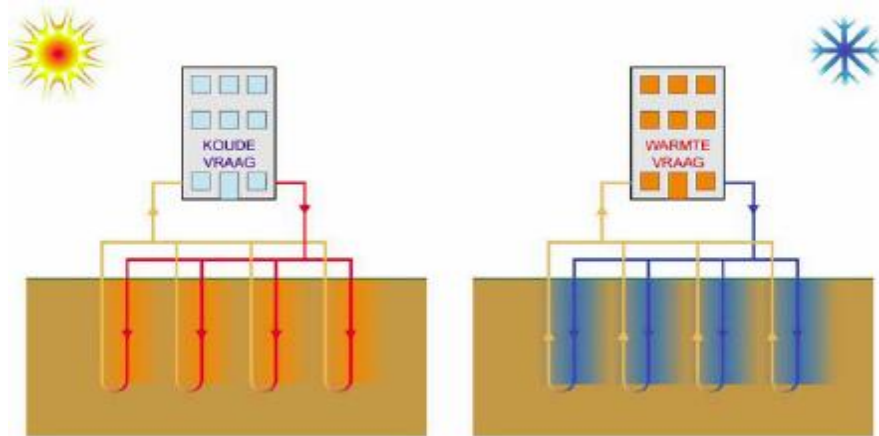


Figuur 12 (Daikin, 2010)

Gesloten bodemwarmtewisselaars (gbww)

Aan de bodem rond het gebouw kan warmte worden onttrokken door er slangen in te leggen, waardoor een water / glycolmengsel wordt gepompt. In de verdamper van de warmtepomp wordt het water / glycolmengsel enkele K afgekoeld, waarna het door de bodemwisselaars wordt gepompt. Daar wordt de temperatuur weer verhoogd, waarna de cyclus opnieuw begint. De bodem rond de wisselaars koelt hierdoor af, waardoor warmte uit de omringende bodem toestroomt. De bodemwarmte wordt voor het overgrote deel aangevuld door zoninstraling. Een verwaarloosbare fractie bestaat uit warmte welke uit de aardkern toestroomt en warmte ten gevolge van verval van nucleair materiaal in de bodem (MacKay, 2009). Op enkele tientallen meters diepte is de natuurlijke bodemtemperatuur ca. 11°C. Nadat enige maanden warmte aan de gbww is onttrokken daalt de bodemtemperatuur naar ca. 0°C tot 5°C, afhankelijk van het ontwerp van de gbww-installatie. Het is mogelijk in de zomer de koude bodem te gebruiken om een gebouw mee te koelen. Ook kan met een droge koeler of zonnecollectoren warmte worden opgevangen en opgeslagen in de gbww-installatie. Door niet alleen te verwarmen met bodemwarmte, maar ook te koelen, wordt de bodemtemperatuur minder beïnvloed en kan de gbww-installatie kleiner worden uitgevoerd dan wanneer alleen wordt verwarmd. Op deze manier uitgevoerd is een gbww-systeem een warmte- en koudeopslagsysteem (wko). In dit onderzoek is geen rekening gehouden met de mogelijkheid warmte terug naar de bron te voeren omdat de in het gebouw aanwezige radiatoren zich niet lenen voor koeling.

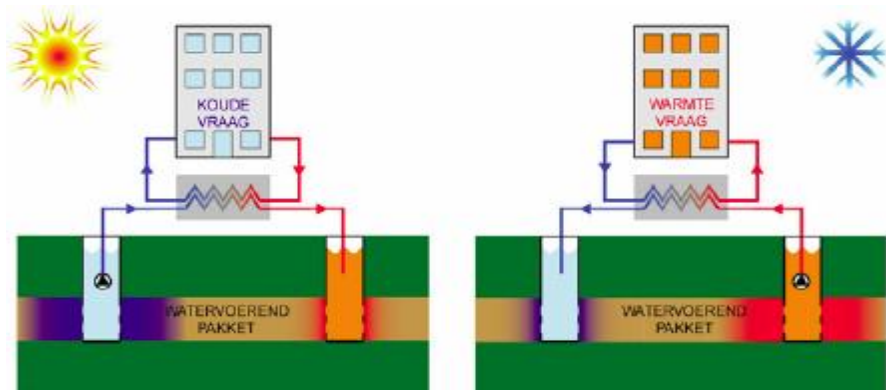
De wisselaars worden in Nederland meestal uitgevoerd als verticale bodemwisselaars. Dit zijn u-vormige lussen van dampdichte kunststof slang, welke in een gat van enkele tientallen tot ca. 200 m diep worden aangebracht. Op de meeste plaatsen is voor het aanbrengen van deze wisselaars geen vergunning nodig. Zie figuur 13 voor het werkingsprincipe.



Figuur 13 (KWO Brabant)

Open bronsysteem

Bij een open bronsysteem wordt op twee plaatsen een grondwaterbron geboord. Water uit de ene bron (de warme bron) wordt opgepompt en door de verdampers van de warmtepomp afgekoeld. Het afgekoelde water wordt geïnjecteerd in de tweede, koude bron. In de zomer gebeurt het tegenovergestelde. Dan wordt water uit de koude bron opgepompt om te worden verwarmd, waarna het wordt geïnjecteerd in de warme bron. Dit verwarmen kan door middel van bijvoorbeeld vloerkoeling, zonnecollectoren of een droge koeler. In tegenstelling tot bij de gbww-installatie is het 's zomers ontladen van de koude bron en het laden van de warme bron noodzakelijk om de werking van het systeem gedurende meer dan enkele jaren te garanderen. Voor grotere open-broninstallaties ($> 10 \text{ m}^3/\text{h}$, dit komt overeen met ca. 90 kW bronvermogen) is een vergunning van de betreffende provincie verplicht. Voor het verkrijgen en behouden van deze vergunning is het in evenwicht houden van de warmte- en koudelevering van de open broninstallatie een vereiste. Een open-broninstallatie is daarom per definitie een wko-installatie. De brontemperatuur van de warme bron bedraagt ca. 15°C , de koude bron ca. 5°C . Een goed ontworpen open bronsysteem levert voor verwarming de warmste brontemperatuur van de hier genoemde warmtebronnen. Daarnaast is de temperatuur van de koude bron meestal kant- en klaar voor de meeste koeltoepassingen, waardoor compressiekoelmachines overbodig worden en in de zomer veel energie kan worden bespaard. Voor ons referentiegebouw speelt de mogelijkheid tot koeling geen rol. Er zal in de berekeningen rekening worden gehouden met het energieverbruik om de koude te ontladen door middel van bijvoorbeeld een droge koeler of een energiedak. Zie figuur 14 voor het werkingsprincipe.



Figuur 14 (KWO Brabant)

5.3.5 Warmtepompen in combinatie met HR 107 ketels

Zoals duidelijk is geworden in tabel 2, kan de aanvoertemperatuur van het verwarmingswater in het referentiegebouw worden verlaagd tot 61°C in de vollastsituatie. De meest voorkomende combinaties van aanpassingen aan het gebouw zijn minder vergaand, daardoor ligt de maximale watertemperatuur meestal hoger. Warmtepompen leveren warmte met een hogere p.e.r. dan HR 107 ketels, mits de omstandigheden dit mogelijk maken. Warmtepompen zouden alleen moeten worden ingezet wanneer deze een betere p.e.r. kunnen realiseren dan HR 107 ketels. Immers: het doel was energiezuiniger oplossingen te vinden, niet de verspilling vergroten! Een p.e.r. van 1,00 is een praktische ondergrens. Bij gasgedreven machines wordt met de bovenste verbrandingswaarde van het verbruikte gas gerekend, omdat dit primaire energie is. Voor elektrisch gedreven machines moet het rendement van de machines worden vermenigvuldigd met het opwekkingsrendement van de gebruikte elektriciteit. Hiervoor wordt 0,39 aanhouden, de waarde die verplicht wordt toegepast bij epc-berekeningen. Bij elektrisch gedreven warmtepompen betekent dit dat de $c.o.p. \cdot 0,39 \geq 1,00$ dient te zijn. Daaruit volgt dat de c.o.p. ten minste 2,56 dient te bedragen.

Tot nu toe kunnen wij stellen dat alleen indien alle isolatiemaatregelen uit voorstel B worden genomen een vrijwel volledige overschakeling naar warmtepompen mogelijk is; er moeten dan ca. 13 gawp op het dak van het gebouw worden geplaatst alleen aangevuld met enkele HR 107 ketels voor het opvangen van pieklast (bijvoorbeeld wanneer het stormt, de zon niet schijnt en het zeer streng vriest). Zelfs in de vrijwel ideale situatie (voorstel B) kunnen de overige warmtepompen niet alle warmte bij de maximale aanvoertemperatuur leveren. Kunnen deze warmtepompen helemaal niet worden toegepast? Toch wel. Wanneer het buiten -10°C is, zijn de compressiewarmtepompen ongeschikt omdat de aanvoertemperatuur van het verwarmingswater te hoog ligt. De p.e.r. van de warmtepompen is dan kleiner dan 1,00. Wanneer de buitentemperatuur toeneemt, daalt de aanvoertemperatuur. De p.e.r. van de warmtepompinstallatie stijgt tot 1,00. Boven de temperatuur waar de p.e.r. de 1,00 bereikt is warmteopwekking met een warmtepomp zinvol. Beneden deze temperatuur is de HR 107 ketel efficiënter en zou deze de warmteopwekking moeten verzorgen. Wat zich hier aandient is een hybride, of bivalente installatie. Bij de bivalente installatie is het nu zaak uit te vinden waar dit omschakelpunt, het bivalentiepunt, ligt. Dit moet voor ieder type warmtepomp in combinatie met de berekende stooklijn voor het gebouw worden bepaald. Deze berekeningen zijn terug te vinden in bijlagen 10 tot en met 21.

5.4 Toepasbare combinaties van maatregelen

5.4.1 Selectiecriteria

Door warmtepompen te combineren met HR 107 ketels kan de p.e.r. van een verwarmingsinstallatie worden verbeterd en dus het energieverbruik verlaagd. Wanneer flink wordt geïsoleerd, kunnen warmtepompen een grotere bijdrage leveren en neemt de p.e.r. duidelijk toe, althans, dat is de verwachting. De benodigde investering zal fors zijn. Wanneer minder kan worden geïnvesteerd, zal er minder worden geïsoleerd en zullen de aanpassingen aan de installatie ook minder ingrijpend zijn. Om bij elk denkbare budget de juiste maatregelen te vinden, is de specifieke energiebesparing [(MJ/j)/€] een geschikt hulpmiddel. Begin met de maatregelen die per geïnvesteerde Euro de grootste energiebesparing leveren. Van alle tot nu toe genoemde maatregelen wordt de specifieke energiebesparing op een rij gezet. Hiertoe zal eerst voor de verschillende warmtepompen in combinatie met verschillende bronnen moeten worden bepaald waar hun bivalentiepunt ligt. Zie hiervoor de berekeningen in bijlage 10 t/m 21. Wanneer het bivalentiepunt bekend is, kan worden bepaald welk deel van de warmtelevering een warmtepomp kan verzorgen en wat de specifieke energiebesparing van die combinatie is. De berekening van de specifieke energiebesparing is mede gebaseerd op budgetprijzen voor de verschillende maatregelen. Zie hiervoor bijlage 22. Het resultaat is terug te vinden in tabel 3, 4 en 5.

Mogelijke maatregelen huidige toestand (renovatie 1983, ventilatie gang gewijzigd): $P_{nom} = 908$ [kW]			
warmteopwekker	investering [€]	besparing [GJ/j]	spec. Besparing [(MJ/j)/€]
l/w wp 257 kW	162.800	846	5,20
gawp l/w wp 385 kW (14st)	271.000	1.308	4,83
gm w/w wp 300 kW + open bron	368.800	1.351	3,66
w/w wp 214 kW + gbww	276.600	433	1,56

tabel 3

Mogelijke maatregelen bij uitvoering voorstel A: $P_{nom} = 748$ [kW]			
warmteopwekker	investering [€]	besparing [GJ/j]	spec. Besparing [(MJ/j)/€]
l/w wp 229 kW	151.600	916	6,04
gawp l/w wp 388 kW (14st)	271.000	1.266	4,67
gm w/w wp 300 kW + open bron	368.800	1.663	4,51
w/w wp 229 kW + gbww	291.600	581	1,99

tabel 4

Mogelijke maatregelen bij uitvoering voorstel B: $P_{nom} = 480$ [kW]			
warmteopwekker	investering [€]	besparing [GJ/j]	spec. Besparing [(MJ/j)/€]
l/w wp 181 kW	132.400	798	6,03
gm w/w wp 300 kW + open bron	368.800	1.473	4,00
gawp l/w wp 317 kW (13st)	254.500	861	3,38
w/w wp 204 kW + gbww	267.600	611	2,28

tabel 5

In de drie tabellen is per pakket van isolatie- en ventilatiemaatregelen samengebracht wat de mogelijkheden zijn voor de toepassing van warmtepompen. Ongeacht de gekozen variant, blijkt dat de elektrisch gedreven lucht/waterwarmtepomp steeds de grootste specifieke energiebesparing heeft.

De gasmotorwarmtepomp en de gasabsorptiewarmtepompen strijden om de tweede plaats. De investering voor de gasmotorwarmtepomp met open bron is steeds aanzienlijk hoger dan voor de lucht / waterwarmtepomp en voor de energiebesparing geldt hetzelfde. De energiebesparing van de water / waterwarmtepomp met gbww blijft achter bij de andere typen warmtepompen. Dit komt doordat de brontemperatuur met 0°C tot 5°C lager ligt dan die van alle andere bronnen. Door de lagere brontemperatuur is het rendement van de warmtepomp minder gunstig, waardoor de energiebesparing tegenvalt. Dit, samengenomen met de hoge investering voor de gbww levert de laagste specifieke energiebesparing op van alle varianten.

5.4.2 Samenstelling concepten en selectie

Nu kunnen alle mogelijke combinaties van isolatiemaatregelen en warmteopwekkers worden vergeleken op investering, energiebesparing en specifieke energiebesparing. Om te beginnen is voor de drie pakketten isolatiemaatregelen (huidige situatie, pakket A en pakket B) het energieverbruik bepaald van een referentieinstallatie met uitsluitend HR 107 ketels. De besparingen op primair energieverbruik zijn bepaald ten opzichte van de referentieinstallatie. Alle combinaties zijn in tabel 6 samengevoegd en gesorteerd op het specifieke energieverbruik.

warmteopwekinstallatie	isolatie	investering	besparing	spec. Besp.
		[€]	[GJ/j]	[MJ/(j-€)]
l/w wp 257 kW	huidige toestand	162.800	846	5,20
gawp l/w wp 385 kW (14st)	huidige toestand	271.000	1.308	4,83
gmwp w/w 300 kW + open bron	huidige toestand	368.800	1.351	3,66
w/w wp 214 kW + gbww	huidige toestand	276.600	433	1,56
l/w wp 229 kW	pakket A	276.600	1.866	6,75
gawp l/w wp 338 kW (14st)	pakket A	396.000	2.216	5,60
gmwp w/w 300 kW + open bron	pakket A	493.800	2.613	5,29
w/w wp 229 kW + gbww	pakket A	416.600	1.531	3,68
l/w wp 181 kW	pakket B	1.174.400	3.410	2,90
gmwp w/w 300 kW + open bron	pakket B	1.410.800	4.086	2,90
gawp l/w wp 317 kW (13st)	pakket B	1.296.500	3.473	2,68
w/w wp 204 kW + gbww	pakket B	1.309.600	3.224	2,46

tabel 6 (voor verklaringen van de afkortingen zie pagina 3)

De gevonden installaties zijn nu gesorteerd op de mate van energiebesparing die zij per geïnvesteerde Euro bieden. Voor een eigenaar van meerdere gebouwen zou dit een zinvolle maat kunnen zijn: alle maatregelen welke een bepaalde specifieke energiebesparing overtreffen, worden genomen, de overige niet. Wanneer een bepaald energielabel dient te worden behaald, kan gezocht worden naar de goedkoopste oplossing die de vereiste energiebesparing oplevert. Of bij een bepaald budget kan de oplossing die de hoogste energiebesparing levert snel worden gevonden.

Wat blijkt is dat de hoogste specifieke energiebesparingen worden gevonden voor warmteopwekinstallaties bestaand uit een combinatie van warmtepompen en HR 107 ketels welke worden toegepast in een geïsoleerd gebouw. Het nemen van isolatiemaatregelen vergroot dus het rendement van de warmtepompinstallaties.

In het gebouw in de huidige toestand en na toepassing van pakket A leveren de beide typen lucht/waterwarmtepompen de hoogste specifieke energiebesparing. Dit komt enerzijds doordat deze warmtepompen geen kostbare broninstallatie nodig hebben. Anderzijds werkt in het voordeel van deze warmtepompen dat de brontemperatuur (is de luchttemperatuur) juist hoog is wanneer de aanvoertemperatuur van het cv-water laag is.

De installaties met water / waterwarmtepompen en gbww hebben als gevolg van een vrij lage brontemperatuur (aangenomen is een brontemperatuur van gemiddeld 5°C) een lager rendement dan de lucht / waterwarmtepompen. Dit, gecombineerd met de hoge investering voor de gbww resulteert in een zeer laag specifiek energieverbruik.

De gasmotorwarmtepompen met open bron leveren in alle isolatievarianten de grootste energiebesparing. Doordat de warmtepompen en de broninstallaties duur zijn, blijft de specifieke energiebesparing achter bij de l/w warmtepompen.

Voor een vergelijking van de terugverdiertijden zijn de volgende combinaties van maatregelen gekozen:

Huidige situatie	:	257 kW lucht/waterwarmtepomp
Huidige situatie	:	14 st. gasabsorptiewarmtepompen
Pakket A	:	229 kW lucht/waterwarmtepomp
Pakket A	:	14 st. gasabsorptiewarmtepompen
Pakket B	:	300 kW gasmotorwarmtepomp

De eerste vier combinaties hebben in hun categorie de hoogste specifieke energiebesparing. Dit geldt niet voor de gasmotorwarmtepomp in combinatie met pakket B. Deze combinatie is gekozen omdat deze laat zien welke besparing technisch haalbaar is.

Van de hier geselecteerde vijf combinaties zullen in de volgende paragraaf de belangrijkste economische eigenschappen worden besproken.

5.4.3 Financiële haalbaarheid

In de vorige paragraaf zijn vijf combinaties van maatregelen geselecteerd, die verschillen in de gerealiseerde energiebesparing en benodigde investering. Als wordt gekeken naar de specifieke energiebesparing, zijn al deze vijf combinaties winnaars, de gevonden energiebesparing kan niet tegen een kleinere investering worden gerealiseerd.

De benodigde investering kan vaak alleen worden gedaan, wanneer deze zich na verloop van tijd terugverdient door middel van de besparing op energiekosten die zij tot gevolg hebben.

Om de financiële haalbaarheid in beeld te brengen bestaan de volgende twee methoden:

1. Eenvoudige terugverdientijd:

$$Tvt = \frac{I}{B - C - I \cdot \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}}} [jr]$$

Waarbij:	Tvt	= eenvoudige terugverdientijd [jr]
	I	= investering [€]
	r	= discontovoet [-]
	n	= levensduur [jr]
	B	= jaarlijkse energiekostenbesparing [€]
	C	= jaarlijkse onderhoudskosten [€]

Uitgangspunten voor de berekening van de kapitaalkosten zijn:

Discontovoet r	= 0,02 [-]
Levensduur n:	
bouwkundige maatr.	= 50 [jr]
HR++ glas	= 25 [jr]
Bronnen	= 30 [jr]
machines	= 15 [jr]
gastarief	= 0,65 [€/m ³ _n]
elektriciteitstarief	= 0,20 [€/kWh]

2. Netto contante waarde (n.c.w.):

$$n.c.w. = -I + \sum_{i=1}^n \frac{B - C - I \cdot \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}}}{(1+r)^i} [€]$$

Opbrengsten in de toekomst zijn minder aantrekkelijk dan even grote opbrengsten vandaag. Dit wordt veroorzaakt door inflatie. Bij een discontovoet van 2% bijvoorbeeld, wordt aan € 100 te ontvangen over een jaar, dezelfde waarde toegekend als aan € 98 vandaag. De contante waarde van een opbrengst van € 100 over een jaar is € 98.

Om de verschillende maatregelenpakketten te vergelijken wordt de verwachte energiekostenbesparing van de maatregelen contant gemaakt en verminderd met het investeringsbedrag. De oplossing met de hoogste netto contante waarde levert de investeerder het grootste financiële voordeel op.

Bij het berekenen van de contante waarde van energiebesparingen kan rekening worden gehouden met te verwachten energieprijsstijgingen, welke hoger kunnen zijn dan de verwachte inflatie. De uitkomst van een netto contante waardeberekening wordt zeer sterk beïnvloed door de aannames die erin verwerkt worden. Deze aannames (discontovoet, verwachte ontwikkeling van het gas- en elektriciteitstarief) zijn hoogst onzeker.

Het is ook mogelijk de berekening te maken met energieprijsstijgingen, welke de inflatie overtreffen. Omdat de vraag naar energie toeneemt, terwijl het aanbod dat niet meer doet, is dit zeker te verdedigen. Hierdoor neemt de verwachte besparing (B-C) jaarlijks toe. Als gevolg hiervan stijgt de verwachte n.c.w. na 15 jaar.

Door met een lage discontovoet te rekenen, gelijk aan de gewenste jaarlijkse inflatie in de Euro-zone en door geen voorspelling te doen over toekomstige energieprijsstijgingen, wordt een bescheiden, realistische n.c.w. berekend.

In deze scriptie is voor de berekening van de netto contante waarde uitgegaan van een zeer behoedzaam scenario. De uitgangspunten zijn:

looptijd n = 15 [jr]
 discontovoet r = 2 [%/jr]
 elektriciteitsprijsstijging = 0 [%/jr]
 gasprijsstijging = 0 [%/jr]

Wanneer de eis wordt gesteld dat een besparingsproject zichzelf moet terugbetalen uit de te realiseren energiekostenbesparing, is een terugverdientijd, korter dan de levensduur van de maatregel acceptabel. De netto contante waarde na 15 jaar is in dit geval positief. Zie voor de resultaten tabel 7.

warmteopwekinstallatie	isolatie	investering	kapitaalkosten	besparing	onderhoud	Tvt	NCW 15 jaar
		[€]	[€/jr]	[€/jr]	[€/jr]	[jr]	[€]
l/w wp 257 kW	huidige sit.	162.800	12.670	8.413	500	-	-224.000
gawp l/w wp 385 kW (14st)	huidige sit.	271.000	21.091	24.163	3.500	-	-276.000
l/w wp 229 kW	pakket A	276.600	17.231	28.292	500	26	-141.000
gawp l/w wp 388 kW (14st)	pakket A	396.000	26.523	40.929	3.500	36	-256.000
gm w/w wp 300 kW + open bron	pakket B	1.410.800	66.031	75.470	3.500	238	-1.334.000

Tabel 7

In tabel 7 is te zien dat geen enkele combinatie van maatregelen wordt terugverdiend binnen de technische levensduur van de warmtepompen. De aanpassingen besparen alle wel energie, maar geen geld.

Wanneer geen isolatiemaatregelen worden getroffen, zijn de kapitaalkosten hoger dan de energiekostenbesparing. Dit wordt deels veroorzaakt door de beperkte levensduur van de warmtepompen; ca. 15 jaar. Investerings in isolatie gaan langer mee, waardoor de kapitaalkosten lager zijn. Het minst ongunstige beeld is te zien bij de maatregelen mede bestaande uit pakket A. Hier wordt een terugverdientijd berekend van ca. 30 jaar, ruim twee maal de levensduur van de warmtepompen.

De radicale oplossingen met isolatiemaatregelen pakket B leveren ongeveer hetzelfde beeld op als bij pakket A. De energiekostenbesparing weegt nauwelijks op tegen de kapitaal- en onderhoudskosten. De maatregelen besparen veel energie, ca. 75% ten opzichte van de huidige situatie, maar leveren geen geld op.

Wat valt hieraan te doen? We kunnen hopen dat warmtepompen goedkoper worden. Een toenemend productievolume zorgt mogelijk voor dalende prijzen, zoals dat ook in de auto-industrie te zien is geweest. We kunnen wachten tot de energieprijzen genoeg gestegen zijn om de terugverdientijden tot de gewenste duur te verkorten. Regeringen kunnen de terugverdientijden helpen bekorten door energiebesparende maatregelen te subsidiëren.

5.4.4 Subsidies

De overheid, zowel landelijk als provinciaal en gemeentelijk, kent diverse subsidies voor energiebesparende maatregelen. Deze subsidies kunnen worden betaald in de vorm van een rechtstreekse vergoeding aan de investeerder, of in de vorm van korting op te betalen belastingen. Bij de samenstelling en de beoordeling van de verschillende installatieconcepten is tot nu toe alleen gelet op de mogelijke energiebesparingen, en de verschillende specifieke energiebesparingen [(MJ/j)/€]. Dit, omdat het doel was te onderzoeken hoeveel energiebesparing technisch haalbaar is, in beginsel onafhankelijk van wat financieel aantrekkelijk is. De reden hiervoor is het vermoeden dat door energieschaarste en door het steeds merkbaarder worden van de gevolgen van fossiel energieverbruik, het belang van energiebesparing de komende jaren zal toenemen. Dit zal tot uitdrukking komen in stijgende energieprijzen. Doordat energie een toenemend aandeel in het budget van consumenten en ondernemers zal krijgen, zal de wil energie te besparen toenemen. Hierdoor zullen subsidies kunnen verdwijnen. Ook kunnen subsidies (soms zeer plotseling) wegvallen omdat de hiervoor begrote budgetten zijn uitgeput.

Subsidies kunnen versturende effecten op de markt hebben. Voor windturbines, bijvoorbeeld, is een subsidie beschikbaar voor iedere opgewekte kWh. Hierdoor levert een windturbine de investeerder een jaarrendement op van ongeveer 100% op de kapitaal- en onderhoudskosten (Vestas, 2010).

Zonder deze subsidie levert windenergie ongeveer de kostprijs op, waardoor natuurlijk minder investeerders te vinden zullen zijn. Windturbines schieten als paddenstoelen uit de grond, de beperkende factor is alleen de moeilijkheid een bouwvergunning te verkrijgen. N.I.M.B.Y!

Voor photo-voltaïsche zonnecollectoren wordt soms een beperkte hoeveelheid subsidie beschikbaar gesteld op het aanschafbedrag van een pv-installatie. Hier speelt de moeilijkheid een bouwvergunning te verkrijgen geen rol. Wel is een probleem dat de prijs voor pv-cellen kan worden opgedreven door de subsidies op teruggeleverde energie in ons omringende landen.

Voor warmtepompen worden vaste bedragen uitgekeerd op basis van het geïnstalleerd vermogen, mits de warmtepompen worden geplaatst in bestaande woongebouwen.

Hoe dit ook zij, subsidieregelingen komen en gaan. Hieronder volgt een beknopt overzicht van de landelijk geldende regelingen voor woningcorporaties (Agentschap NL, 2010), zie tabel 8. Voor het nemen van een investeringsbeslissing is het aan te bevelen de genoemde website te raadplegen, om de actuele regelingen te vinden, zowel landelijk als lokaal.

maatregel	subsidie		opmerkingen
lucht/waterwarmtepomp excl. Gawp	€ 2.000	per installatie	
water/waterwarmtepomp	€ 500 € 250	per kW _{th}	tot 10 kW _{th} > 10 kW _{th}
gasabsorptiewarmtepomp	€ 500 € 250	per kW _{th}	tot 10 kW _{th} > 10 kW _{th}
maatregelen conform maatwerkadvies epa- adviseur (e.i.a.)	≤ 11%	totaal verbeterkosten	mits ≥ 2 energielabels verbetering. ook in combinatie met andere subsidies

tabel 8

Wat betekenen deze regelingen voor warmtepompen? Voorbeeld: een 35 kW gawp kost € 16.500. De subsidie voor deze maatregel bedraagt $11.250 + 1.815 = € 13.065$.

De energiebesparing bedraagt maximaal ca. 65.000 MJ/jr. Dit levert een specifieke energiebesparing op van $65.000 / (16.500 - 13.065) \leq 19 / (\text{MJ/jr}).\text{€}$. Vergelijk dat eens met de waarden uit tabel 1!

In de vorige paragraaf is voor vijf pakketten van energiebesparingsmaatregelen de eenvoudige terugverdiëntijd en netto contante waarde na 15 jaar bepaald. De maatregelen worden niet terugverdiend. Wat verandert hieraan wanneer rekening wordt gehouden met de op dit moment van kracht zijnde subsidieregelingen?

Hiervoor is ervan uitgegaan dat over het gehele te investeren bedrag 44% ten laste mag worden gebracht van de winst. Dit resulteert in een korting op het investeringsbedrag van 11%. Bovendien is het investeringsbedrag voor de warmtepompen verlaagd met de voor warmtepompen geldende subsidie. Zie tabel 9 voor de eenvoudige terugverdiëntijden, rekening houdend met subsidie.

warmteopwekinstallatie	isolatie	inv. Netto	kapitaalkosten	besparing	onderhoud	Tvt	NCW 15 jaar
		[€]	[€/jr]	[€/jr]	[€/jr]	[jr]	[€]
l/w wp 257 kW	huidige sit.	144.892	11.276	8.413	500	-	-188.000
gawp l/w wp 385 kW (14st)	huidige sit.	116.190	9.043	24.163	3.500	10	33.000
l/w wp 229 kW	pakket A	259.924	15.336	28.292	500	21	-100.000
gawp l/w wp 338 kW (14st)	pakket A	241.190	13.878	40.929	3.500	10	61.000
gm w/w wp 300 kW + open bron	pakket B	1.292.732	54.456	75.470	3.500	74	-1.068.000

tabel 9

De invloed van de subsidie is duidelijk zichtbaar, met uitzondering van de l/w warmtepomp. Dit wordt veroorzaakt doordat voor deze warmtepomp alleen e.i.a. beschikbaar is.

Voor de gasgedreven- en w/w warmtepompen worden grotendeels gesubsidieerd. De pakketten met gawp hebben een terugverdiëntijd die korter is dan de levensduur van de gawp; ten gevolge van de subsidieregelingen levert de installatie met gawp geld op.

5.4.5 Optimalisatie van de gevonden combinaties

De combinaties van HR 107 ketels en warmtepompen in dit onderzoek zijn samengesteld op basis van het benodigde verwarmingsvermogen en hun p.e.r. Voor iedere buitentemperatuur (in stappen van 1K) is berekend welke opwekker de hoogste p.e.r. heeft. Vervolgens is ervan uitgegaan dat de HR 107 ketels het volledige nominale vermogen dat voor het gebouw nodig is, kan leveren. De warmtepompen zijn zodanig gedimensioneerd dat deze het vermogen kunnen leveren dat bij het bivalentiepunt benodigd is. Deze werkwijze leidt tot het vinden van de meest energiezuinige combinaties. Wanneer de maximale energiebesparing of CO₂ reductie wordt gezocht, is dit de juiste werkwijze. Wanneer de terugverdientijd echter te hoog, of de n.c.w. te laag wordt gevonden, wat dan te doen?

Warmtepompen zijn per kW nominaal vermogen vele malen duurder dan HR 107 ketels. Wanneer het gekozen vermogen van een warmtepomp gelijk is aan het benodigd vermogen bij het bivalentiepunt, wordt de warmtepomp meestal niet volledig benut. Wanneer het buiten warmer is dan het bivalentiepunt, is de warmtepomp overbemeten. Is het buiten kouder dan het bivalentiepunt, staat de warmtepomp stil. Wanneer de warmtepomp kleiner wordt gekozen, neemt de hoeveelheid uren per jaar dat deze nominaal draait toe. Hierdoor nemen de energiebesparing en de terugverdientijd van de bivalente installatie af en neemt de netto contante waarde toe.

Wat betekent dit voor de installatie met de l/w warmtepomp in combinatie met pakket A? In figuren 15 en 16 is het verschil te zien tussen de 229 kW l/w warmtepompinstallatie uit tabel 9 en een warmtepomp van 150 kW in hetzelfde gebouw. In de grafieken is weergegeven hoeveel primaire energie er in het totaal door de installatie wordt verbruikt (de rode lijn) en welk aandeel de warmtepomp hierin heeft (de blauwe lijn). De onderliggende berekeningen zijn terug te vinden in bijlage 11 en 11a.

De 150 kW warmtepomp is 34% kleiner dan de 229 kW machine. De p.e.r. bij toepassing van de 229 kW warmtepomp bedraagt 1,19. Wanneer de 34 % kleinere warmtepomp wordt ingezet daalt de p.e.r. van de gehele installatie naar 1,14.

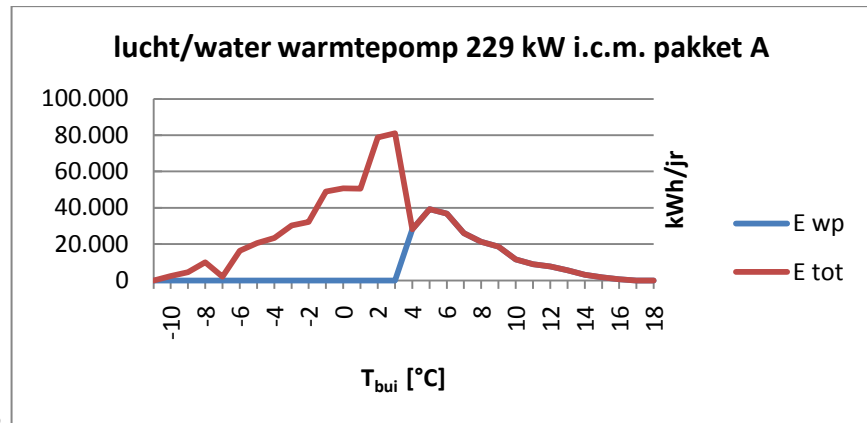
In figuren 17 en 18 is hetzelfde gedaan voor de installatie met 14 gasabsorptiewarmtepompen in combinatie met pakket A. Er is een tweede variant doorgerekend met 6 gawp in plaats van 14 stuks. Zie voor de berekeningen bijlage 20 en 20a. Duidelijk is te zien dat het aandeel van de gawp in de warmtelevering is afgenomen, maar niet in verhouding tot de afname in investering. De installatie met 14 gawp heeft een p.e.r. van 1,32. De installatie met 6 gawp heeft een p.e.r. van 1,29.

De terugverdientijden en netto contante waarden van de twee aangepaste combinaties zijn weergegeven in tabel 10. Bij de berekening is opnieuw rekening gehouden met de op dit moment beschikbare subsidies.

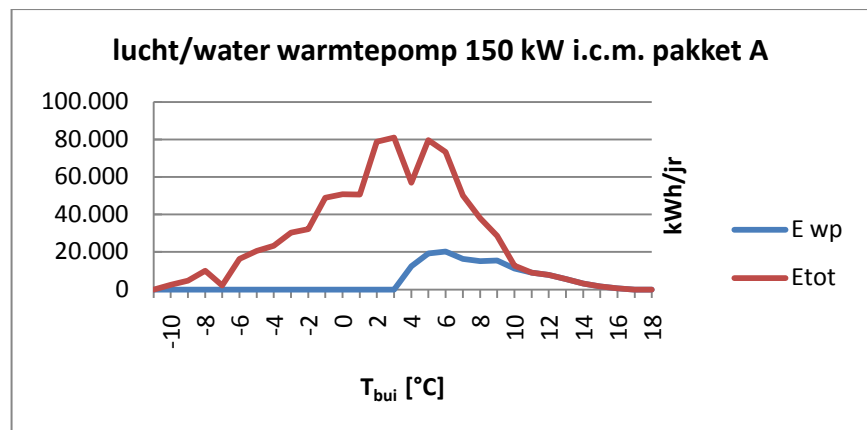
warmteopwekinstallatie	isolatie	inv. Netto	kapitaalkosten	besparing	onderhoud	Tvt	NCW 15 jaar
		[€]	[€/jr]	[€/jr]	[€/jr]	[jr]	[€]
l/w wp 150 kW	pakket A	231.800	13.147	27.415	500	17	-55.000
gawp l/w wp (6st)	pakket A	193.710	10.182	39.373	1.500	7	162.000

tabel 10

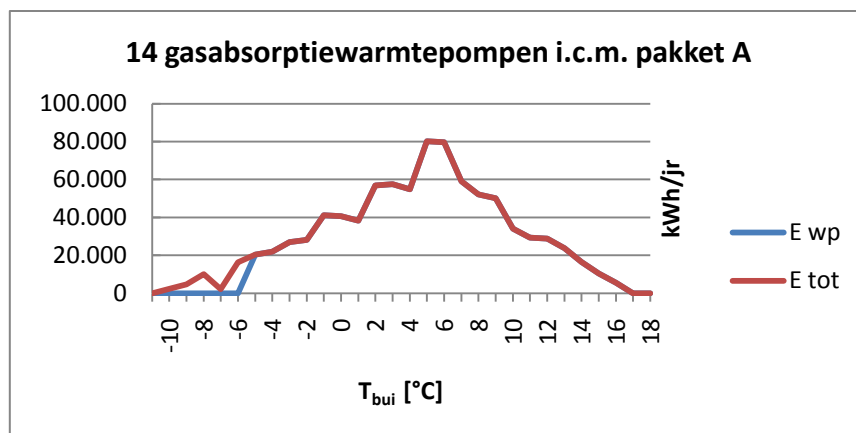
De tabel laat zien dat het verkleinen van het warmtepompaandeel in een bivalente installatie een gunstige uitwerking heeft op de terugverdientijd, zonder dat de energiebesparing sterk vermindert. In het geval van de gawp neemt de terugverdientijd drie jaar af en neemt de n.c.w. toe met ruim factor 2,5. De elektrisch gedreven lucht / waterwarmtepomp wordt ook in deze situatie niet rendabel.



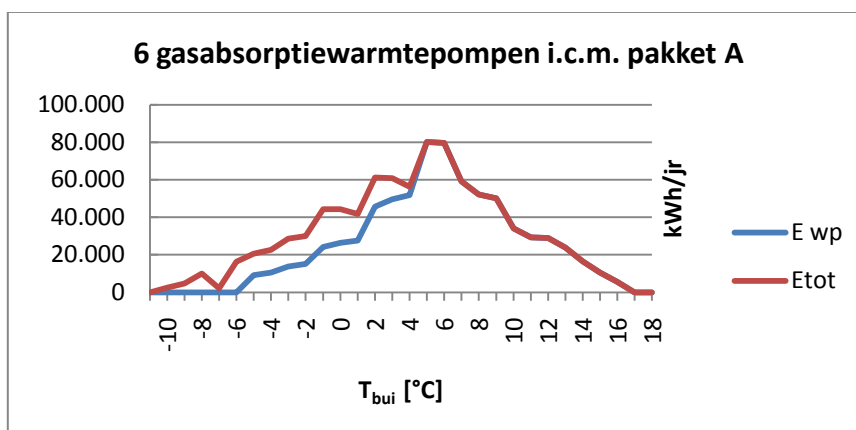
Figuur 15



Figuur 16



Figuur 17



Figuur 18

5.4.6 Methode voor het samenstellen van besparingsconcepten

Het was de bedoeling te komen tot een schema. In dit schema zou eenvoudig zijn op te zoeken wat de beste combinatie van maatregelen is, bij een bepaalde besparingsambitie. Dit bleek ingewikkelder dan gedacht. Het ene gebouw is het andere niet; in het referentiegebouw voor deze scriptie bevindt zich bijvoorbeeld een inpandige corridor, die door de wijze van verwarmen een groot besparingspotentieel had, bovendien met een zeer gunstige specifieke energiebesparing. In een ander gebouw, hoewel vergelijkbaar slecht geïsoleerd, kan de situatie anders zijn.

Warmtepompen worden ontwikkeld in verschillende configuraties, waardoor hun mogelijkheden in bestaande gebouwen uiteenlopen. Een schema dat vandaag, voor dit gebouw juist is, kan morgen incompleet zijn, en voor een ander gebouw ongeschikt.

Het lijkt daarom zinvoller een werkwijze te beschrijven, die leidt tot het vinden van de beste oplossing, ongeacht welke systemen vandaag op de markt zijn en ongeacht welke maatregelen in het te onderzoeken gebouw reeds zijn genomen. Deze werkwijze bestaat uit een aantal systematisch te doorlopen stappen, welke leiden tot de optimale oplossing. Het is overigens niet zeker dat de gewenste oplossing meteen wordt gevonden, nadat de methode eenmaal is doorlopen. Het is eerder een iteratief proces. Wanneer bijvoorbeeld een budget van € 250.000 beschikbaar is en er worden twee oplossingen gevonden; een welke een investering vergt van 200.000 en een van € 300.000 zou de eerste oplossing moeten worden gekozen, en blijft € 50.000 onbenut. Beter is het dan het proces opnieuw te doorlopen, waarbij enkele nieuwe pakketten worden onderzocht, die tussen de beide gevonden varianten in liggen. De werkwijze is grafisch voorgesteld in figuur 19.



Figuur 19

6 Conclusie en aanbevelingen

6.1 Conclusie

Nederland staat vol met collectieve woongebouwen met een zorgwekkend hoog energieverbruik ten behoeve van verwarming. Enerzijds wordt dit veroorzaakt door gebrekkige isolatiemaatregelen. Anderzijds doordat de benodigde warmte wordt opgewekt door middel van toestellen met een lage primary energy rate: gewoonlijk minder dan 1.

In bestaande woongebouwen zijn veel mogelijkheden om energie te besparen. Dit geldt vooral voor oudere gebouwen, van voor de eerste oliecrisis in 1973. Wanneer een energiebesparingsproject wordt uitgevoerd wordt vaak alleen naar bouwkundige- of juist naar installatietechnische maatregelen gekeken. Hierdoor wordt een kans gemist. Wanneer de warmtebehoefte van een gebouw wordt verlaagd, neemt het benodigde verwarmingsvermogen af. Wanneer aan de bestaande radiatoren niets wordt veranderd, kan hierdoor de watertemperatuur van de verwarmingsinstallatie worden verlaagd. Hoe verder de watertemperatuur kan worden verlaagd, des te groter worden de mogelijkheden om warmtepompen in te zetten. Warmtepompen kunnen vaak met een hoger rendement warmte produceren dan HR 107 ketels. Door toepassing van warmtepompen wordt zodoende een vermenigvuldigingsfactor toegepast op het nut van isolatiemaatregelen. In veel gevallen kan de benodigde investering worden terugverdiend uit de besparing op energiekosten die ermee wordt bereikt.

Voor het onderzochte woongebouw aan de Van de Veldelaan in Alkmaar bleek de meest aantrekkelijke combinatie van maatregelen te bestaan uit het aanbrengen van spouwmuurisolatie, vloerisolatie, plaatsen van warmteterugwinning op de ventilatieinstallatie van de gemeenschappelijke gang en het toevoegen van zes gasabsorptiewarmtepompen aan de bestaande HR 107 ketels. Dit pakket van maatregelen kost ca. € 195.000, rekening houdend met subsidie. De energiebesparing bedraagt ca. 2.150 GJ/jaar. Dit komt overeen met 61.000 m³/jaar aardgas en € 40.000/jaar en 40% van het huidige gasverbruik. De benodigde investering wordt door de besparing op energiekosten terugverdiend in zeven jaar. Wanneer geen rekening wordt gehouden met subsidie bedraagt de terugverdientijd tien jaar.

HR 107 ketels zijn een onmisbare warmtebron bij aanvoertemperaturen boven 65°C. Beneden deze aanvoertemperatuur kunnen warmtepompen met een hoger rendement warmte produceren. Wat een gebouweigenaar ook beweegt; de wens om energiekosten te beperken, CO₂ uitstoot te reduceren of spaarzaam met eindige grondstoffen om te springen, het loont om energiebesparingsprojecten uit te voeren. Voorafgaand onderzoek naar het optimale pakket van maatregelen is noodzakelijk, zodat verspilling van geld wordt voorkomen.

6.2 Aanbevelingen

In dit onderzoek heb ik willen laten zien welke energiebesparing in een bestaand collectief woongebouw kan worden gerealiseerd, wanneer bouwkundige maatregelen en installatietechnische maatregelen integraal worden geselecteerd en toegepast.

Volgend hierop zou ik graag willen weten of het doorvoeren van energiebesparende maatregelen het zinvolste is wat kan worden gedaan. Is het wellicht verstandiger om bestaande, slecht geïsoleerde en geïnstalleerde gebouwen zo snel mogelijk te slopen en te vervangen door nieuwe gebouwen, welke naar de huidige stand der techniek worden gebouwd? Wanneer renoveren, wanneer niet?

Analoog aan het dilemma tussen de gloeilamp en de spaarlamp: *mijn gloeilamp is nu eenmaal geproduceerd, nu is het zonde om de nog werkende lamp weg te gooien voordat deze is doorgebrand!* Fout: de hoeveelheid energie die de gloeilamp verspilt, in vergelijking met een gelijkwaardige spaarlamp, is een veelvoud van de energie die ten behoeve van haar productie is gebruikt. Zo snel mogelijk weggooien en vervangen door een spaarlamp!

Bij woongebouwen is de keuze minder duidelijk. Hoe verhoudt de hoeveelheid energie, nodig voor de sloop en nieuwbouw van een woongebouw zich tot de besparing die kan worden gerealiseerd met de in deze scriptie besproken maatregelen? Ik stel aansluitend op deze scriptie de volgende titel voor:

Renoveren of slopen en nieuw bouwen?
Wat te doen met woongebouwen van voor de energiecrisis



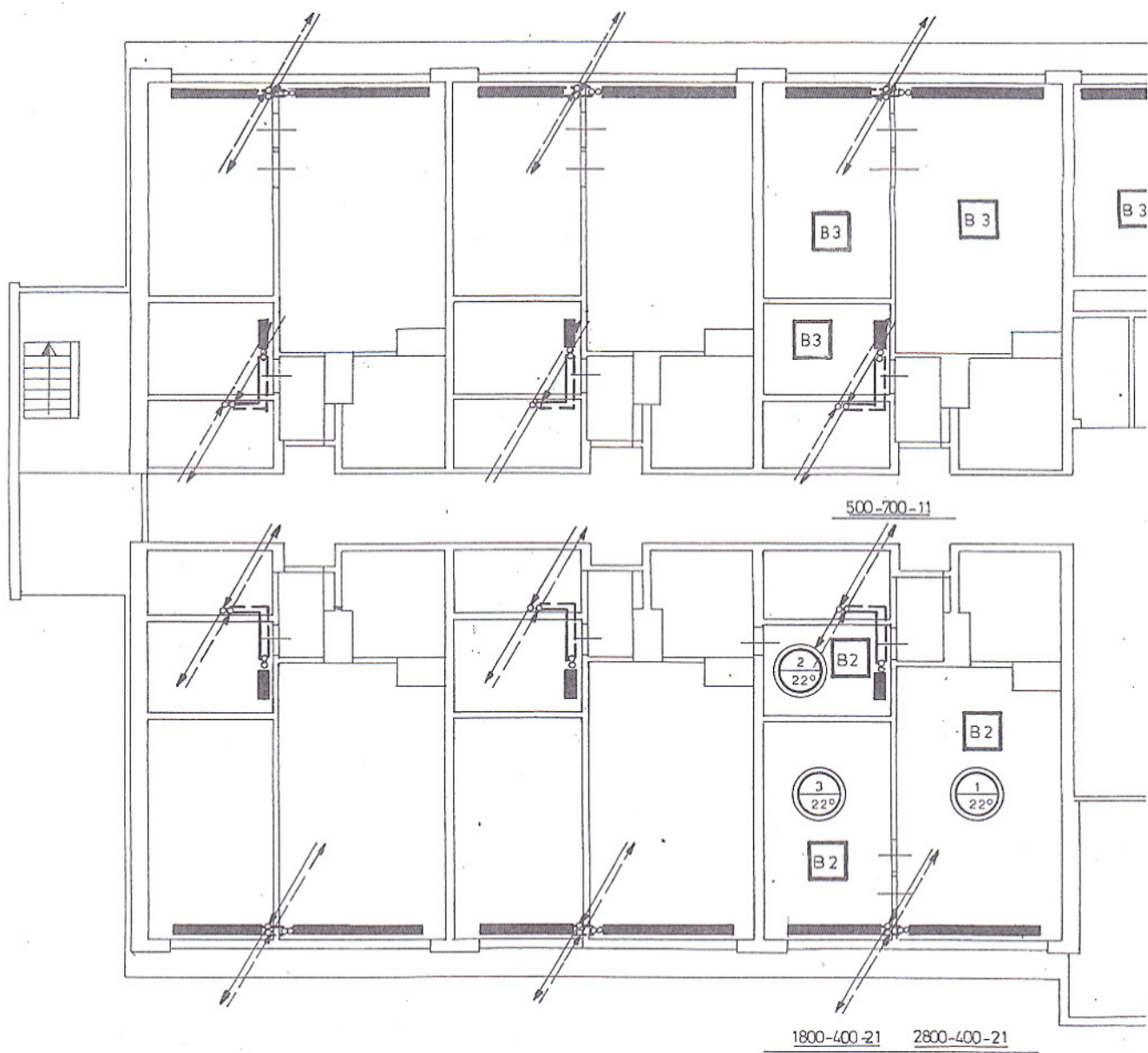
Figuur 20 (JVW, 2010)

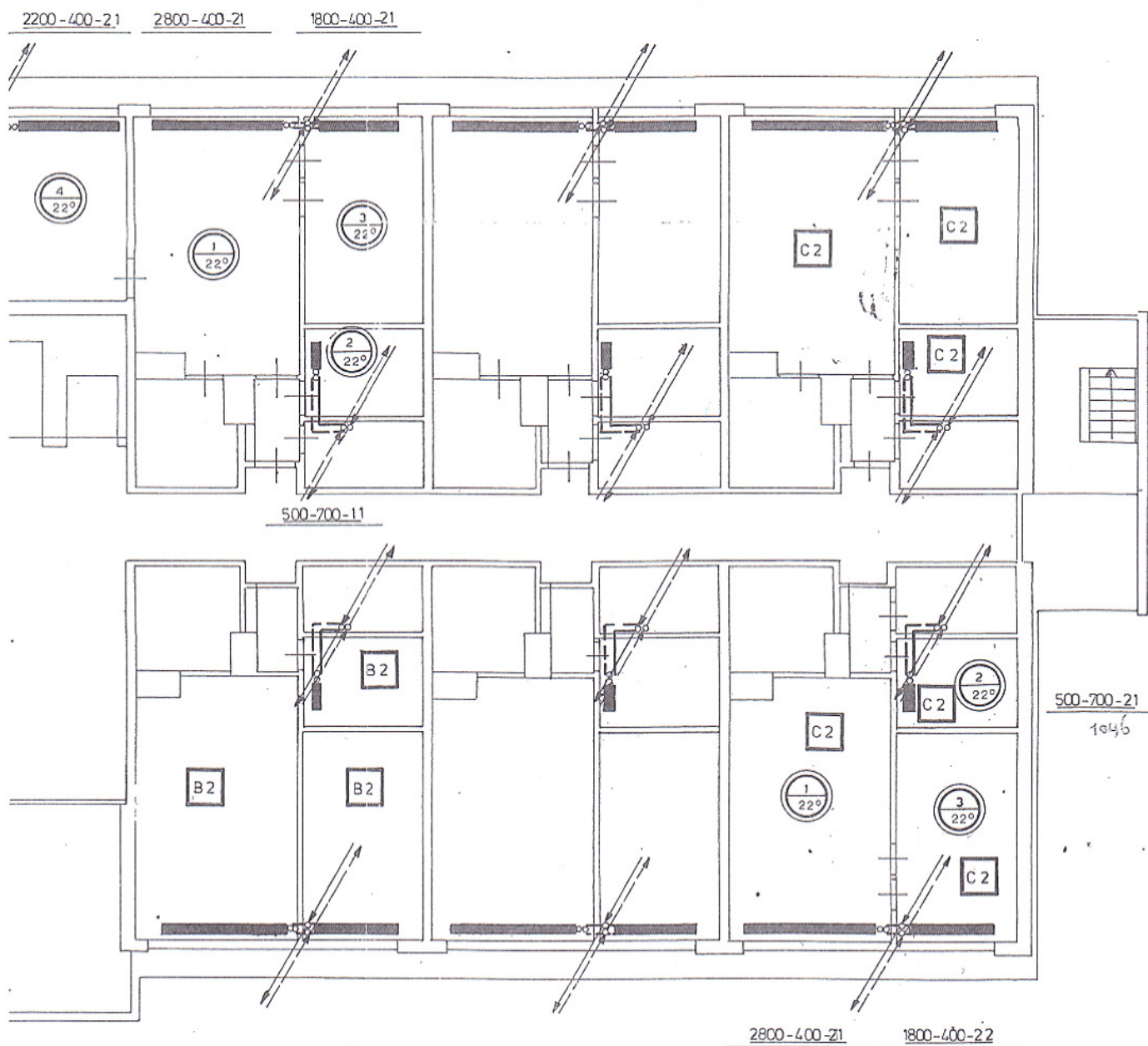
7 Bronnenlijst

- Ing R. van der Aa (2009) *NEN 5128, Energieprestatie van woonfuncties en woongebouwen – Bepalingsmethode*, Delft: NEN.
- Agentschap NL (2010) *Energiesubsidiewijzer*, (<http://www.energiesubsidiewijzer.nl/ZoekRegeling.aspx>) URL bezocht op 9 oktober 2010.
- J. Bakker (2005) *Ontwerpen Koelinstallaties*, Utrecht: HU.
- Daikin (2010) (http://www.daikin.nl/mdm_includes/image.jsp?imageName=EWYD260AJYNP_R_packright) URL bezocht op 17 oktober 2010.
- DWA (2000) *Handleiding PIA-15 Programma voor Installatie Advisering*, Bodegraven: DWA installatie- en energieadvies.
- DWA (2002) *Evaluatie monitoringprojecten met betrekking tot energieopslag in de bodem*, Bodegraven: DWA installatie- en energieadvies.
- Ferroli (2010) *Air-water heat pump, reversible*, San Bonifacio (Verona) Italy: Gruppo Ferroli.
- E. Kort (2010) "Bouwbesluit, thermische isolatie", (<http://www.ekbouwadvies.nl/bouwbesluit/energiezuinigheid/rcwaarde.asp>) URL bezocht op 18 september 2010.
- Google maps (2010) Street view, (<http://maps.google.nl/>) URL bezocht op 11 september 2010.
- Gasengineering (2010) "De motor als bron", (http://www.gasengineering.nl/pdf/artikel_warmtepomp.pdf) URL bezocht op 5 september 2010.
- Hier (2010) "Nederland klimaatneutraal" (<http://www.hier.nu/home/>) URL bezocht op 23 oktober 2010.
- Horos (2010) "Luchtbehandeling en koeling" (<http://www.horos.nl/wp/www.html>) URL geraadpleegd 17 oktober 2010.
- JvW (2010) (http://www.jvw.nl/popup_image/pID/28863) URL geraadpleegd 17 oktober 2010.
- Ir. A.J.M. van Kimmenaede (2004) *Warmteleer voor technici*, Groningen: Wolters-Noordhoff.
- KNMI (2010) "Frequentietabellen temperatuur", (http://www.knmi.nl/klimatologie/frequentietabellen/uur_freq.cgi) URL bezocht op 2 mei 2009.
- Ir. Knoll, W.H. e.a. (2002) *Handboek Installatietechniek II*, Rotterdam: Stichting ISSO.
- David J.C. MacKay (2009) *Sustainable Energy – without the hot air*, Cambridge: UIT Cambridge Ltd.
- KWO Brabant (2010) "Hoe werkt een kwo-systeem?" (<http://www.kwo brabant.nl/index.php?ac=vr&vr=93>) URL bezocht op 17 oktober 2010.
- Ir. J. Ouwehand, ir. T.J.G. Papa, ir. A.C. Taal, ing. E. Post (2008) *Toegepaste energietechniek Deel I*, Den Haag: Sdu Uitgevers bv.
- RBG Warmteservice (2010) (<http://www.rbgwarmteservice.nl/cv.php>) URL bezocht op 23 oktober 2010.
- Reduses (2010) "Specificatieblad", (<http://www.reduses.nl/index.php/specificaties/>) URL bezocht op 5 september 2010.
- M. Rietbergen (2010) *Duurzame energiesystemen*, Utrecht: HU.
- SenterNovem (2007) *Kompas, energiebewust wonen en werken*, Den Haag, Ministerie van VROM.
- Servicekosten.info (2010) "Servicekosten.info", (http://www.servicekosten.info/FAQ/Faq_stookkosten.html) URL bezocht op 5 september 2010.
- Techneco (2010) "Techneco Robur" (<http://www.techneco.nl/producten/Warmtepompen/robur>) URL geraadpleegd 17 oktober 2010.
- E. Timmer (2005) *Warmteoverdracht*, Utrecht: HU.

8 Bijlagen

1	Plattegrond van het referentiegebouw
2 en 3	Berekening warmteverlies
4	Berekening p.e.r. gasmotorwarmtepomp
5	Berekening aanvoertemperatuur als functie van P_{nom}
6	Uitgangspunten bij rendementsberekeningen en verbruiksberekeningen 7 t/m 21
7, 8, 9	Berekening energieverbruik referentieinstallatie
10, 11, 11a, 12	Berekening energieverbruik lucht / waterwarmtepomp
13, 14, 15	Berekening energieverbruik water / waterwarmtepomp + gbww
16, 17, 18	Berekening energieverbruik gasmotorwater / waterwarmtepomp + open bron
19, 20, 20a, 21	Berekening energieverbruik gasabsorptiewarmtepomp lucht / water
22	Budgetprijzen ten behoeve van berekening terugverdientijd en netto contante waarde





1^e+10^e verdieping

(complex 120)

B2 = tussen 2 kamer won.
B3 = tussen 3 kamer won.
C 2 = hoekwoning

cv. installatie

betreft: renovatie flats te alkmaar

got.	VB.	gew.	25 - 5 - 83	gew.		schaal	1:100	projekt	83.823
gez.		gew.		gew.		datum	19-5-'83	blad	1.



technisch bureau

mampaey haarlem b.v.

postbus 510 2003 RM haarlem
j.w. lucasweg 4 2031 BE haarlem
tel.: 023 - 3194 54

Bijlage 2

Warmteverlies referentiegebouw

Berekening volgens ISSO 51

$T_{omg} = -10^{\circ}\text{C}$

Berekeningen Rc waarden [$\text{m}^2\text{K/W}$] $R_c = \sum \frac{d}{\lambda}$

	d1	$\lambda 1$	d2	$\lambda 2$	d3	$\lambda 3$	R_c	
Spouwmuur, ongeïsoleerd	0,11		0,55	0,06	0,35	0,11	0,53	0,58
Spouwmuur, geïsoleerd	0,11		0,55	0,06	0,04	0,11	0,53	2,12
Dak, vloer, ongeïsoleerd	0,25		2,26					0,11
Dak, vloer, geïsoleerd	0,25		2,26	0,08	0,04			2,40
gevelpaneel ongeïsoleerd	0,02		0,18					0,11
gevelpaneel, licht geïsoleerd	0,02		0,18	0,03	0,04			0,97
gevelpaneel, zwaar geïsoleerd	0,02		0,18	0,09	0,04	0,02	0,18	2,74

Berekeningen warmteverlies [kW] $P = A \cdot u \cdot \Delta T$

ORIGINEEL 1969

Transmissieverlies

grensvlak	A [m ²]	T _i [°C]	R _c [m ² K/W]	R _i [m ² K/W]	R _e [m ² K/W]	U [W/m ² K]	P _{tr} [kW]
spouwmuur	1.448,3	22	0,58	0,13	0,04	1,34	62
raamkozijn	1.644,2	22				5,80	305
gevelpaneel in kozijn	436,8	22	0,11	0,13	0,04	2,50	35
dak	88,6	24	0,11	0,10	0,04	2,50	8
vloer	88,6	20	0,11	0,13	0,13	2,70	7
							417

			$Q_{v,10}$ [m^3/sm^2]	
Infiltratieverlies	3.529,3	22	0,00190	257 (*)

			Q_v [m^3/h]	
Ventilatieverlies appartementen		22	45.619	487
Ventilatieverlies gangen				62

Warmteverlies totaal **965 [kW]**

HUIDIGE SITUATIE

Transmissieverlies

grensvlak	A [m ²]	T _i [°C]	R _c [m ² K/W]	R _i [m ² K/W]	R _e [m ² K/W]	U [W/m ² K]	P _{tr} [kW]
spouwmuur	1.448,3	22	0,58	0,13	0,04	1,34	62
raamkozijn	1.644,2	22				2,90	153
gevelpaneel in kozijn	436,8	22	0,97	0,13	0,04	0,88	12
dak	88,6	24	2,40	0,10	0,04	0,39	1
vloer	88,6	20	0,11	0,13	0,13	2,70	7
							235

			$Q_{v,10}$ [m^3/sm^2]	
Infiltratieverlies	3.529,3	22	0,00190	257 (*)

			Q_v [m^3/h]	
Ventilatieverlies appartementen		22	45.619	487
Ventilatieverlies gangen				186

Warmteverlies totaal **908 [kW]**

Bijlage 2

Warmteverlies referentiegebouw
Berekening volgens ISSO 51

VOORSTEL A 2010

spouwmuurisolatie, HR++ glas,
verbeterde isolatie
borstweringspanelen,
vloerisolatie. Gangen voorzien
van wtw in ventilatiesysteem
Transmissieverlies

grensvlak	A [m ²]	T _i [°C]	R _c [m ² K/W]	R _i [m ² K/W]	R _e [m ² K/W]	U [W/m ² K]	P _{tr} [kW]
spouwmuur	1.448,3	22	2,12	0,13	0,04	0,44	20
raamkozijn	1.644,2	22				2,90	153
gevelpaneel in kozijn	436,8	22	2,74	0,13	0,04	0,88	12
dak	88,6	24	2,40	0,10	0,04	0,39	1
vloer	88,6	20	2,40	0,13	0,13	0,38	1
							<u>187</u>

			Q _{v,10} [m ³ /sm ²]		
Infiltratieverlies	3.529,3	22	0,00190		257 (*)

			Q _v [m ³ /h]		
Ventilatieverlies appartementen		22	45.619		487
Ventilatieverlies gangen					74

Warmteverlies totaal **748 [kW]**

VOORSTEL B 2010

spouwmuurisolatie, HR++ glas,
verbeterde isolatie
borstweringspanelen,
vloerisolatie. Appartementen
voorzien van 1st Climarad.
Gangen voorzien van wtw in
ventilatiesysteem
Transmissieverlies

grensvlak	A [m ²]	T _i [°C]	R _c [m ² K/W]	R _i [m ² K/W]	R _e [m ² K/W]	U [W/m ² K]	P _{tr} [kW]
spouwmuur	1.448,3	22	2,12	0,13	0,04	0,44	20
raamkozijn	1.644,2	22				1,64	86
gevelpaneel in kozijn	436,8	22	2,74	0,13	0,04	0,34	5
dak	88,6	24	2,40	0,10	0,04	0,39	1
vloer	88,6	20	2,40	0,13	0,13	0,38	1
							<u>114</u>

			Q _{v,10} [m ³ /sm ²]		
Infiltratieverlies	3.529,3	22	0,00090		122 (*)

			Q _v [m ³ /h]		
Ventilatieverlies appartementen		22	27.371		292
Ventilatieverlies gangen					74

Warmteverlies totaal **480 [kW]**

(*) blijft buiten beschouwing:
van het infiltratieverlies en het
ventilatieverlies wordt bij
natuurlijke toevoer alleen de
grootste waarde meegerekend.

Bijlage 3

Warmteverlies referentiegebouw

Berekening volgens ISSO 51

 $T_{\text{trappenhuis}} = 0^{\circ}\text{C}$

Warmteverlies gangen

ORIGINEEL 1969

Transmissieverlies

grensvlak	A [m ²]	T _i [°C]	R _c [m ² K/W]	R _i [m ² K/W]	R _e [m ² K/W]	U [W/m ² K]	P _{tr} [kW]
glasdeuren noodtrappenhuizen	59,4	20				5,80	7
glaspuis hoofdtrappenhuis	225,7	20				5,80	26
dak	214,7	21	0,11	0,10	0,04	3,99	18
vloer	214,7	19	0,11	0,13	0,13	2,70	11
							62

	Q _v [m ³ /h]	
Ventilatieverlies*	20	45.619
		0

Warmteverlies totaal **62 [kW]**

HUIDIGE SITUATIE

Transmissieverlies

grensvlak	A [m ²]	T _i [°C]	R _c [m ² K/W]	R _i [m ² K/W]	R _e [m ² K/W]	U [W/m ² K]	P _{tr} [kW]
glasdeuren noodtrappenhuizen	59,4	20				5,80	7
glaspuis hoofdtrappenhuis	225,7	20				5,80	26
dak	214,7	21	0,11	0,10	0,04	3,99	18
vloer	214,7	19	0,11	0,13	0,13	2,70	11
							62

Ventilatieverlies:

maximale inblaastemperatuur 35,0 [°C]

gewenste ruimtetemperatuur 20,0 [°C]

benodigd ventilatiedebiet 12.415 [m³/h]

Ventilatieverlies

$$Q_v = \frac{P_{tr} \cdot 3600}{\rho \cdot c \cdot \Delta T}$$

$$P = \frac{Q_v \cdot 1,2 \cdot (34 - -10)}{3600} \quad 186$$

Warmteverlies totaal **186 [kW]**

VOORSTEL A radiatoren

Transmissieverlies

grensvlak	A [m ²]	T _i [°C]	R _c [m ² K/W]	R _i [m ² K/W]	R _e [m ² K/W]	U [W/m ² K]	P _{tr} [kW]
glasdeuren noodtrappenhuizen	59,4	20				5,80	7
glaspuis hoofdtrappenhuis	225,7	20				5,80	26
dak	214,7	21	0,11	0,10	0,04	3,99	18
vloer	214,7	19	0,11	0,13	0,13	2,70	11
							62

Ventilatieverlies	A [dm ³ /m ² s]	A [m ²]	Q _v [m ³ /h]	
debiet	0,7	2.362	5.952	60

Warmteverlies totaal **122 [kW]**

VOORSTEL B warmteterugwinning

Transmissieverlies

grensvlak	A [m ²]	T _i [°C]	R _c [m ² K/W]	R _i [m ² K/W]	R _e [m ² K/W]	U [W/m ² K]	P _{tr} [kW]
glasdeuren noodtrappenhuizen	59,4	20				5,80	7
glaspuis hoofdtrappenhuis	225,7	20				5,80	26
dak	214,7	21	0,11	0,10	0,04	3,99	18
vloer	214,7	19	0,11	0,13	0,13	2,70	11
							62

Ventilatieverlies:

maximale inblaastemperatuur 35,0 [°C]

gewenste ruimtetemperatuur 20,0 [°C]

benodigd ventilatiedebiet 12.415 [m³/h]

Ventilatieverlies

$$Q_v = \frac{P_{tr} \cdot 3600}{\rho \cdot c \cdot \Delta T}$$

$$Q_v = \frac{P_{vent} \cdot 3600}{\rho \cdot c \cdot \Delta T} \quad 186$$

T retour 20

T buiten -10

Opbrengst wtw η=90% $P_{wtw} = Q_v / 3600 \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot \eta_{wtw}$ 112 -/-Warmteverlies totaal **74 [kW]**

Bijlage 4

Carnotrendement gasmotorwarmtepomp

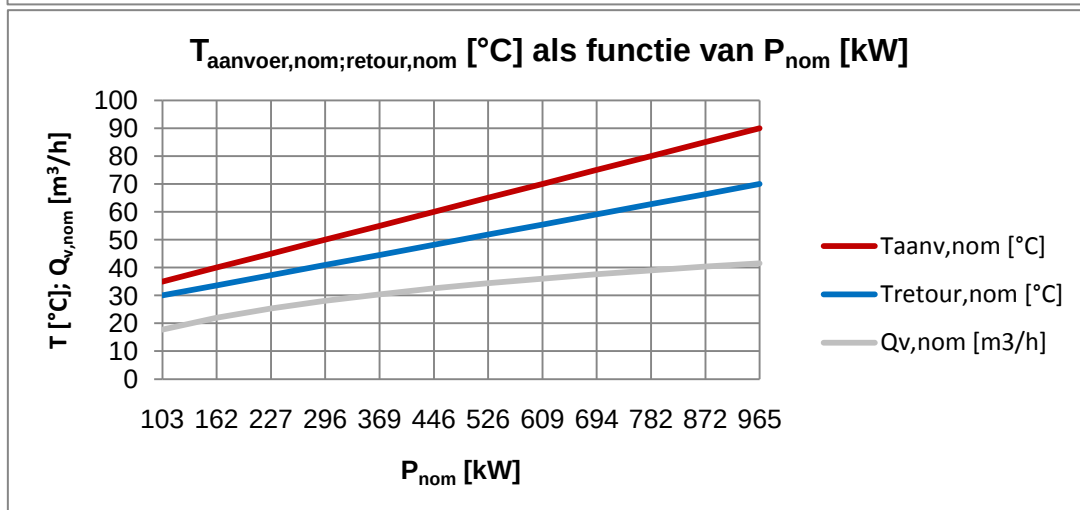
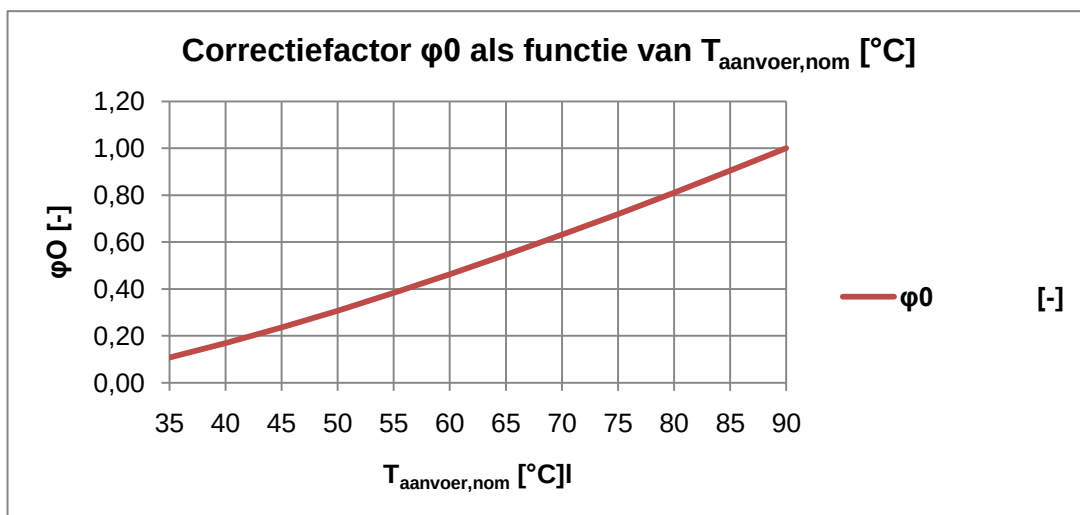
Aanvoerwater cv	80 [°C]		
Positief kringproces			
$T_{\text{verbranding}} T1$	1100 [°C]	1373 [K]	
$T_{\text{omg.}} T2$	80 [°C]	353 [K]	
$\eta_{\text{th}} = W = Q1 - Q2$	0,74 [-]		$1-(T2/T1)$
$Q2$	0,26 [-]		
Negatief kringproces			
$T_{\text{hoog}} T1$	80 [°C]	353 [K]	
$T_{\text{laag}} T2$	10 [°C]	283 [K]	
$\epsilon_{w,C}$	5,04 [-]		$T1/(T1-T2)$
$\eta_{\text{gasmotorwp,C}}$	3,75 [-]		$\eta_{\text{th}} * \epsilon_{w,C}$
Restwarmte positief kringproces	0,26 [-]		$Q2$
$\eta_{\text{max,gasmotorwp}}$	4,00 [-]		
Aanvoerwater cv	45 [°C]		
Positief kringproces			
$T_{\text{verbranding}} T1$	1100 [°C]	1373 [K]	
$T_{\text{omg.}} T2$	80 [°C]	353 [K]	
$\eta_{\text{th}} = W = Q1 - Q2$	0,74 [-]		$1-(T2/T1)$
$Q2$	0,26 [-]		
Negatief kringproces			
$T_{\text{hoog}} T1$	45 [°C]	318 [K]	
$T_{\text{laag}} T2$	10 [°C]	283 [K]	
$\epsilon_{w,C}$	9,09 [-]		$T1/(T1-T2)$
$\eta_{\text{gasmotorwp,C}}$	6,75 [-]		$\eta_{\text{th}} * \epsilon_{w,C}$
Restwarmte positief kringproces	0,26 [-]		$Q2$
$\eta_{\text{max,gasmotorwp}}$	7,01 [-]		

Bijlage 5

Berekening aanvoertemperatuur als functie van het benodigde P_{nom}

Constante n	1,3	[-]
T_{ruimte}	22	[°C]
P_{nom}	965	[kW]

Correctiefactor						
NEN-EN 442 aangepast						
T _{aanv,nom} [°C]	T _{ret,nom} [°C]	φ ₀ [-]	φ ₀ [-]	P _{nom} [kW]	Q _{v,nom} [m ³ /h]	
90	70	1,20	1,00	965	41,6	
85	66	1,09	0,90	872	40,3	
80	63	0,97	0,81	782	39,0	
75	59	0,86	0,72	694	37,6	
70	55	0,76	0,63	609	36,0	
65	52	0,65	0,55	526	34,4	
60	48	0,56	0,46	446	32,5	
55	45	0,46	0,38	369	30,4	
50	41	0,37	0,31	296	28,1	
45	37	0,28	0,24	227	25,3	
40	34	0,20	0,17	162	22,0	
35	30	0,13	0,11	103	17,8	



Bijlage 6

Uitgangspunten berekening rendement opwekinstallaties

Rendement HR 107 ketels

Dit varieert met de retourtemperatuur van het verwarmingswater tussen ca. 85 en 95% op de verbrandingsbovenwaarde. Dit verschil is niet verwaarloosbaar, maar ten opzichte van de verschillen die bij warmtepompen optreden, nauwelijks significant. Voor alle berekeningen is het rendement van HR 107 ketels gesteld op 95%.

COP van warmtepompen.

Deze is gedefinieerd als:

$$\text{c.o.p.} = (T_{\text{cond.}} * F_{\text{Carnot}}) / (T_{\text{cond.}} - T_{\text{verd.}})$$

Van iedere warmtepomp is bij tenmiste een temperatuurpaar de COP bepaald. Door hieruit de carnotfactor te bepalen volgens:

$$F_{\text{Carnot}} = ((T_{\text{cond.}} - T_{\text{verd.}}) * \text{c.o.p.}) / (T_{\text{cond.}})$$

kan vervolgens voor ieder willekeurig temperatuurpaar de c.o.p. worden berekend uit:

$$\text{c.o.p.} = (T_{\text{cond.}}) / ((T_{\text{cond.}} - T_{\text{verd.}}) * F_{\text{Carnot}})$$

Genoemde werkwijze is ontleend aan (Bakker, 2005) en getoetst aan enkele koelmachines, waarvan de c.o.p. bij meerdere condities was gegeven. (Ferroli, 2010)

p.e.r. van gasgedreven warmtepompen en HR 107 ketels

p.e.r. =
nuttige warmte / verbrandingsbovenwarmte aardgas

p.e.r. van elektrisch gedreven warmtepompen

p.e.r. = nuttige warmte /
(benodigde elektrische energie / 0,39)

p.e.r. van gasabsorptiewarmtepompen

Gegeven door Remeha: het rendement onder alle relevante condities (aanvoer- en buitentemperaturen) van de gawp op de onderste verbrandingswaarde van aardgas η_{Ho} .
p.e.r. = rendement op bovenste verbrandingswaarde (Hb).
 $\text{p.e.r.} = \eta_{\text{Ho}} * \text{Ho/Hb}$

brontemperaturen

lucht: de buitentemperatuur
gbww: 5°C
open bron: 15°C

bivalentiepunt elektrisch gedreven warmtepompen

Dit is zo laag gekozen, dat de warmtepomp nog minstens een c.o.p. van 2,56 heeft.

bivalentiepunt gasmotor- en gasabsorptiewarmtepompen

Dit is zo laag gekozen, dat de warmtepomp nog een p.e.r. van 0,95 heeft of de maximale aanvoertemperatuur van de warmtepomp is bereikt.

tarief aardgas

€ 0,65 / m³_n

tarief elektriciteit

€ 0,20 / kWh

Bepaling energieverbruik referentieinstallatie
100 % HR 107 ketels

T aanvoer -10°	87 [°C]
T ruimte	18 [°C]
T bivalentie	20 [°C]

Pnom 908 [kW]

primary energy rate 0,95 [-]

Bijlage 8

Bepaling energieverbruik referentieinstallatie 100 % HR 107 ketels

T condensor-uit 45
T verdamper-uit 7
COP warmtepomp 3,00
Carnot rendement 8,37
Carnot factor 0,36

T aanvoer -10° 74 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie 20 [°C]

Pnom 748 [kW]

Tbui	Taanv	P [kW]	d/jr	warmte/jr	E HR107	E tot	Eprim
20	20,0	0,0	8,7	0			
19	21,9	0,0	11,5	0	0	0	0
18	23,7	0,0	13,9	0	0	0	0
17	25,6	17,6	19,6	8.294	8.731	8.731	31
16	27,5	35,3	18,3	15.488	16.303	16.303	59
15	29,3	52,9	19,2	24.374	25.657	25.657	92
14	31,2	70,5	20,7	35.038	36.882	36.882	133
13	33,1	88,2	20,1	42.527	44.766	44.766	161
12	34,9	105,8	16,9	42.908	45.166	45.166	163
11	36,8	123,4	16,8	49.763	52.382	52.382	189
10	38,7	141,1	21,5	72.783	76.614	76.614	276
9	40,5	158,7	19,9	75.787	79.776	79.776	287
8	42,4	176,3	20,2	85.477	89.976	89.976	324
7	44,3	193,9	24,1	112.178	118.083	118.083	425
6	46,1	211,6	22,1	112.221	118.127	118.127	425
5	48,0	229,2	13,7	75.364	79.330	79.330	286
4	49,9	246,8	13	77.014	81.068	81.068	292
3	51,7	264,5	11,8	74.898	78.840	78.840	284
2	53,6	282,1	7,1	48.070	50.600	50.600	182
1	55,5	299,7	6,7	48.197	50.734	50.734	183
0	57,3	317,4	6,1	46.462	48.908	48.908	176
-1	59,2	335,0	3,8	30.552	32.160	32.160	116
-2	61,1	352,6	3,4	28.775	30.289	30.289	109
-3	62,9	370,3	2,5	22.216	23.385	23.385	84
-4	64,8	387,9	2,1	19.550	20.579	20.579	74
-5	66,7	405,5	1,6	15.572	16.392	16.392	59
-6	68,5	423,2	0,2	2.031	2.138	2.138	8
-7	70,4	440,8	0,9	9.521	10.022	10.022	36
-8	72,3	458,4	0,4	4.401	4.632	4.632	17
-9	74,1	476,0	0,2	2.285	2.405	2.405	9
-10	76,0	493,7	0	0	0	0	0
				<u>1.181.747</u>	<u>1.243.944</u>	<u>1.243.944</u> [kWh/jr]	<u>4.478</u> [GJ/jr]
				<u>0,07</u>		[€/kWh]	
				<u>82.722</u>		<u>82.722</u> [€/jr]	

primary energy rate 0,95 [-]

Bepaling energieverbruik referentieinstallatie
100 % HR 107 ketels

Pnom 480 [kW]

primary energy rate 0,95 [-]

Bijlage 10

Bepaling bivalentiepunt lucht / waterwarmtepomp
Horos 1804 + droge koeler

T condensor-uit 45
T verdamper-uit 7
COP warmtepomp 3,00
Carnot rendement 8,37
Carnot factor 0,36

T aanvoer -10° 87 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie 6 [°C]

Phom 908 [kW]

Tbui	Taanv	P [kW]	dagen/jr	warmte/jr	COP wp	E wp	E HR107	E tot	Eprim		
20	20,0	0,0	8,7	0							
19	22,3	0,0	11,5	0	32,4	0	0	0	0		
18	24,5	0,0	13,9	0	16,4	0	0	0	0		
17	26,7	21,1	19,6	9.936	11,0	900	0	900	8		
16	29,0	42,5	18,3	18.677	8,3	2.237	0	2.237	21		
15	31,2	63,9	19,2	29.458	6,7	4.376	0	4.376	40		
14	33,4	85,3	20,7	42.392	5,7	7.499	0	7.499	69		
13	35,7	106,7	20,1	51.488	4,9	10.547	0	10.547	97		
12	37,9	128,1	16,9	51.972	4,3	12.077	0	12.077	111		
11	40,1	149,5	16,8	60.294	3,9	15.648	0	15.648	144		
10	42,4	170,9	21,5	88.206	3,5	25.252	0	25.252	233		
9	44,6	192,3	19,9	91.864	3,2	28.723	0	28.723	265		
8	46,8	213,7	20,2	103.625	3,0	35.097	0	35.097	324		
7	49,1	235,2	24,1	136.011	2,7	49.555	0	49.555	457		
6	51,3	256,6	22,1	136.076	2,6	53.022	0	53.022	489		
5	53,5	278,0	13,7	91.392	2,4	0	96.202	96.202	346		
4	55,8	299,4	13	93.400	2,3	0	98.316	98.316	354		
3	58,0	320,8	11,8	90.840	2,2	0	95.621	95.621	344		
2	60,2	342,2	7,1	58.305	2,1	0	61.374	61.374	221		
1	62,5	363,6	6,7	58.462	2,0	0	61.539	61.539	222		
0	64,7	385,0	6,1	56.360	1,9	0	59.326	59.326	214		
-1	66,9	406,4	3,8	37.061	1,8	0	39.012	39.012	140		
-2	69,2	427,8	3,4	34.907	1,7	0	36.744	36.744	132		
-3	71,4	449,2	2,5	26.951	1,7	0	28.369	28.369	102		
-4	73,6	470,6	2,1	23.717	1,6	0	24.966	24.966	90		
-5	75,9	492,0	1,6	18.892	1,5	0	19.887	19.887	72		
-6	78,1	513,4	0,2	2.464	1,5	0	2.594	2.594	9		
-7	80,3	534,8	0,9	11.551	1,5	0	12.159	12.159	44		
-8	82,6	556,2	0,4	5.339	1,4	0	5.620	5.620	20		
-9	84,8	577,6	0,2	2.772	1,4	0	2.918	2.918	11		
-10	87,0	599,0	0	0	1,3	0	0	0	0		
				<u>1.432.413</u>	[kWh/jr]	<u>244.934</u>	<u>644.647</u>	<u>889.581</u>	[kWh/jr]	<u>4.582</u>	[GJ/jr]
						<u>0,20</u>	<u>0,07</u>			[€/kWh]	
						<u>48.987</u>	<u>42.869</u>	<u>91.856</u>			[€/jr]

primary energy rate 1,13 [-]

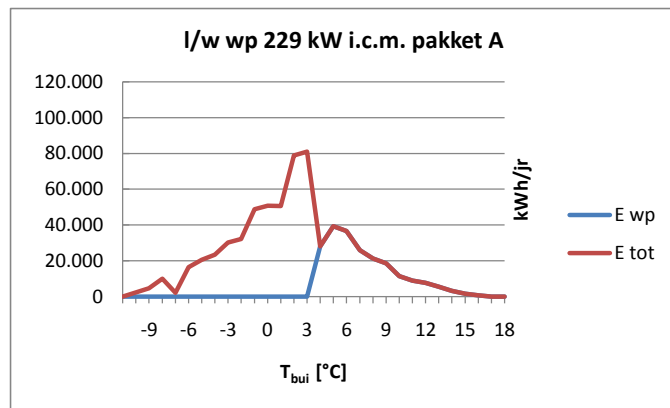
Bijlage 11

Bepaling bivalentiepunt lucht / waterwarmtepomp
Horos 1804 + droge koeler

T condensor-uit 45
T verdamper-uit 7
COP warmtepomp 3,00
Carnot rendement 8,37
Carnot factor 0,36

T aanvoer -10° 74 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie 5 [°C]

Phom 748 [kW]



Tbui	Taanv	P [kW]	d/jr	warmte/jr	dagen wp	COP wp	E wp	E HR107	E tot	Eprim
20	20,0	0,0	8,7	0	0					
19	21,9	0,0	11,5	0	0	36,9	0	0	0	0
18	23,7	0,0	13,9	0	0	18,6	0	0	0	0
17	25,6	17,6	19,6	8.294	19,6	12,4	666	0	666	6
16	27,5	35,3	18,3	15.488	18,3	9,4	1.649	0	1.649	15
15	29,3	52,9	19,2	24.374	19,2	7,6	3.223	0	3.223	30
14	31,2	70,5	20,7	35.038	20,7	6,3	5.526	0	5.526	51
13	33,1	88,2	20,1	42.527	20,1	5,5	7.778	0	7.778	72
12	34,9	105,8	16,9	42.908	16,9	4,8	8.914	0	8.914	82
11	36,8	123,4	16,8	49.763	16,8	4,3	11.560	0	11.560	107
10	38,7	141,1	21,5	72.783	21,5	3,9	18.674	0	18.674	172
9	40,5	158,7	19,9	75.787	19,9	3,6	21.262	0	21.262	196
8	42,4	176,3	20,2	85.477	20,2	3,3	26.006	0	26.006	240
7	44,3	193,9	24,1	112.178	24,1	3,1	36.756	0	36.756	339
6	46,1	211,6	22,1	112.221	22,1	2,9	39.367	0	39.367	363
5	48,0	229,2	13,7	75.364	13,7	2,7	28.161	0	28.161	260
4	49,9	246,8	13	77.014	0	2,5	0	81.068	81.068	292
3	51,7	264,5	11,8	74.898	0	2,4	0	78.840	78.840	284
2	53,6	282,1	7,1	48.070	0	2,3	0	50.600	50.600	182
1	55,5	299,7	6,7	48.197	0	2,2	0	50.734	50.734	183
0	57,3	317,4	6,1	46.462	0	2,1	0	48.908	48.908	176
-1	59,2	335,0	3,8	30.552	0	2,0	0	32.160	32.160	116
-2	61,1	352,6	3,4	28.775	0	1,9	0	30.289	30.289	109
-3	62,9	370,3	2,5	22.216	0	1,8	0	23.385	23.385	84
-4	64,8	387,9	2,1	19.550	0	1,8	0	20.579	20.579	74
-5	66,7	405,5	1,6	15.572	0	1,7	0	16.392	16.392	59
-6	68,5	423,2	0,2	2.031	0	1,6	0	2.138	2.138	8
-7	70,4	440,8	0,9	9.521	0	1,6	0	10.022	10.022	36
-8	72,3	458,4	0,4	4.401	0	1,5	0	4.632	4.632	17
-9	74,1	476,0	0,2	2.285	0	1,5	0	2.405	2.405	9
-10	76,0	493,7	0	0	0	1,5	0	0	0	0
				1.181.747 [kWh/jr]						
							209.542	452.152	661.694 [kWh/jr]	3.562 [GJ/jr]
							0,20	0,07	[€/kWh]	
							41.908	30.068	71.977	[€/jr]

primary energy rate 1,19 [-]

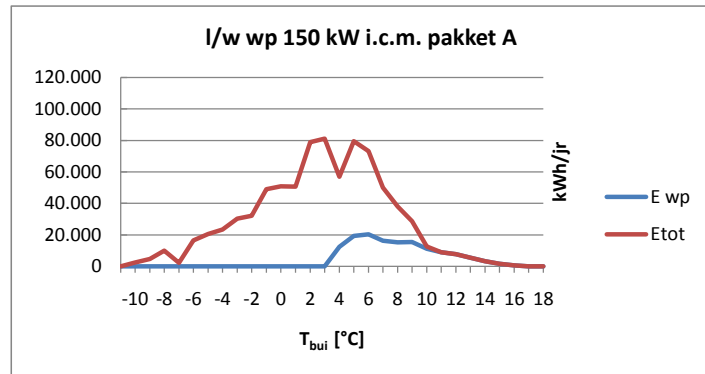
Bijlage 11a

Bepaling bivalentiepunt lucht / waterwarmtepomp
Horos 1804 + droge koeler

T condensor-uit 45
T verdamper-uit 7
COP warmtepomp 3,00
Carnot rendement 8,37
Carnot factor 0,36

T aanvoer -10° 87 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie 5 [°C]
aandeel warmtepomp 0,20 [-]

Pnom 748 [kW]



Tbui	Taanv	P [kW]	d/jr	warmte/jr	COP wp	E wp	E HR107	E tot	Eprim
20	20,0	0,0	87	8,7	0				
19	21,9	0,0	115	11,5	0	36,9	0	0	0
18	23,7	0,0	139	13,9	0	18,6	0	0	0
17	25,6	17,6	196	19,6	8.294	12,4	666	666	6
16	27,5	35,3	183	18,3	15.488	9,4	1.649	1.649	15
15	29,3	52,9	192	19,2	24.374	7,6	3.223	3.223	30
14	31,2	70,5	207	20,7	35.038	6,3	5.526	5.526	51
13	33,1	88,2	201	20,1	42.527	5,5	7.778	7.778	72
12	34,9	105,8	169	16,9	42.908	4,8	8.914	8.914	82
11	36,8	123,4	168	16,8	49.763	4,3	11.238	12.699	109
10	38,7	141,1	215	21,5	72.783	3,9	15.448	28.682	190
9	40,5	158,7	199	19,9	75.787	3,6	15.194	22.767	222
8	42,4	176,3	202	20,2	85.477	3,3	16.240	33.788	272
7	44,3	193,9	241	24,1	112.178	3,1	20.243	53.050	378
6	46,1	211,6	221	22,1	112.221	2,9	19.262	60.328	395
5	48,0	229,2	137	13,7	75.364	2,7	12.315	44.640	274
4	49,9	246,8	130	13	77.014	2,5	0	81.068	292
3	51,7	264,5	118	11,8	74.898	2,4	0	78.840	284
2	53,6	282,1	71	7,1	48.070	2,3	0	50.600	182
1	55,5	299,7	67	6,7	48.197	2,2	0	50.734	183
0	57,3	317,4	61	6,1	46.462	2,1	0	48.908	176
-1	59,2	335,0	38	3,8	30.552	2,0	0	32.160	116
-2	61,1	352,6	34	3,4	28.775	1,9	0	30.289	109
-3	62,9	370,3	25	2,5	22.216	1,8	0	23.385	84
-4	64,8	387,9	21	2,1	19.550	1,8	0	20.579	74
-5	66,7	405,5	16	1,6	15.572	1,7	0	16.392	59
-6	68,5	423,2	2	0,2	2.031	1,6	0	2.138	8
-7	70,4	440,8	9	0,9	9.521	1,6	0	10.022	36
-8	72,3	458,4	4	0,4	4.401	1,5	0	4.632	17
-9	74,1	476,0	2	0,2	2.285	1,5	0	2.405	9
-10	76,0	493,7	0	0	0	1,5	0	0	0
				<u>1.181.747</u>					
						<u>137.697</u>	<u>681.419</u>	<u>819.115</u>	<u>3.724</u>
								[kWh/jr]	[GJ/jr]
						<u>0,20</u>	<u>0,07</u>		
						<u>27.539</u>	<u>45.314</u>	<u>72.854</u>	
								[€/kWh]	
								[€/jr]	

primary energy rate 1,14 [-]

Bijlage 12

Bepaling bivalentiepunt lucht / waterwarmtepomp Horos 1804 + droge koeler

T condensor-uit 45
T verdamper-uit 7
COP warmtepomp 3,00
Carnot rendement 8,37
Carnot factor 0,36

T aanvoer -10° 74 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie 2 [°C]

Phom 480 [kW]

Tbui	Taanv	P [kW]	d/jr	warmte/jr	dagen wp	COP wp	E wp	E HR107	E tot	Eprim	
20	20,0	0,0	8,7	0	0						
19	21,3	0,0	11,5	0	0	45,2	0	0	0	0	
18	22,7	0,0	13,9	0	0	22,6	0	0	0	0	
17	24,1	11,3	19,6	5.322	19,6	15,1	353	0	353	3	
16	25,4	22,6	18,3	9.938	18,3	11,3	876	0	876	8	
15	26,8	33,9	19,2	15.641	19,2	9,1	1.717	0	1.717	16	
14	28,2	45,3	20,7	22.484	20,7	7,6	2.950	0	2.950	27	
13	29,5	56,6	20,1	27.290	20,1	6,6	4.160	0	4.160	38	
12	30,9	67,9	16,9	27.534	16,9	5,8	4.777	0	4.777	44	
11	32,3	79,2	16,8	31.933	16,8	5,1	6.206	0	6.206	57	
10	33,6	90,5	21,5	46.705	21,5	4,7	10.041	0	10.041	93	
9	35,0	101,8	19,9	48.633	19,9	4,2	11.452	0	11.452	106	
8	36,4	113,1	20,2	54.852	20,2	3,9	14.030	0	14.030	130	
7	37,7	124,5	24,1	71.986	24,1	3,6	19.861	0	19.861	183	
6	39,1	135,8	22,1	72.013	22,1	3,4	21.304	0	21.304	197	
5	40,5	147,1	13,7	48.362	13,7	3,2	15.263	0	15.263	141	
4	41,8	158,4	13	49.421	13	3,0	16.566	0	16.566	153	
3	43,2	169,7	11,8	48.063	11,8	2,8	17.045	0	17.045	157	
2	44,6	181,0	7,1	30.847	7,1	2,7	11.534	0	11.534	106	
1	45,9	192,3	6,7	30.929	0	2,5	0	32.557	32.557	117	
0	47,3	203,7	6,1	29.815	0	2,4	0	31.385	31.385	113	
-1	48,7	215,0	3,8	19.605	0	2,3	0	20.637	20.637	74	
-2	50,0	226,3	3,4	18.465	0	2,2	0	19.437	19.437	70	
-3	51,4	237,6	2,5	14.256	0	2,1	0	15.006	15.006	54	
-4	52,8	248,9	2,1	12.545	0	2,1	0	13.206	13.206	48	
-5	54,1	260,2	1,6	9.993	0	2,0	0	10.519	10.519	38	
-6	55,5	271,5	0,2	1.303	0	1,9	0	1.372	1.372	5	
-7	56,9	282,9	0,9	6.110	0	1,9	0	6.431	6.431	23	
-8	58,2	294,2	0,4	2.824	0	1,8	0	2.973	2.973	11	
-9	59,6	305,5	0,2	1.466	0	1,7	0	1.544	1.544	6	
-10	61,0	316,8	0	0	0	1,7	0	0	0	0	
				758.336 [kWh/jr]				158.136	155.065	313.201 [kWh/jr]	2.018 [GJ/jr]
							0,20	0,07	[€/kWh]		
							31.627	10.312	41.939	[€/jr]	

primary energy rate 1,35 [-]

Bijlage 13

Bepaling bivalentiepunt brine / waterwarmtepomp
Horos 1804 + gbww

T condensor-uit 35
T verdamper-uit 7
COP warmtepomp 3,80
Carnot rendement 11,00
Carnot factor 0,35

T aanvoer -10° 87 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie 8 [°C]

Phom 908 [kW]

Tbui	Taanv	P [kW]	d/jr	warmte/jr	dagen wp	COP wp	E wp	E HR107	E tot	Eprim		
20	20,0	0,0	8,7	0	0							
19	22,3	0,0	11,5	0	0	5,9	0	0	0	0		
18	24,5	0,0	13,9	0	0	5,3	0	0	0	0		
17	26,7	21,1	19,6	9.936	19,6	4,8	2.085	0	2.085	19		
16	29,0	42,5	18,3	18.677	18,3	4,4	4.291	0	4.291	40		
15	31,2	63,9	19,2	29.458	19,2	4,0	7.344	0	7.344	68		
14	33,4	85,3	20,7	42.392	20,7	3,7	11.386	0	11.386	105		
13	35,7	106,7	20,1	51.488	20,1	3,5	14.808	0	14.808	137		
12	37,9	128,1	16,9	51.972	16,9	3,3	15.920	0	15.920	147		
11	40,1	149,5	16,8	60.294	16,8	3,1	19.583	0	19.583	181		
10	42,4	170,9	21,5	88.206	21,5	2,9	30.254	0	30.254	279		
9	44,6	192,3	19,9	91.864	19,9	2,8	33.157	0	33.157	306		
8	46,8	213,7	20,2	103.625	20,2	2,6	39.235	0	39.235	362		
7	49,1	235,2	24,1	136.011	0	2,5	0	143.170	143.170	515		
6	51,3	256,6	22,1	136.076	0	2,4	0	143.238	143.238	516		
5	53,5	278,0	13,7	91.392	0	2,3	0	96.202	96.202	346		
4	55,8	299,4	13	93.400	0	2,2	0	98.316	98.316	354		
3	58,0	320,8	11,8	90.840	0	2,2	0	95.621	95.621	344		
2	60,2	342,2	7,1	58.305	0	2,1	0	61.374	61.374	221		
1	62,5	363,6	6,7	58.462	0	2,0	0	61.539	61.539	222		
0	64,7	385,0	6,1	56.360	0	2,0	0	59.326	59.326	214		
-1	66,9	406,4	3,8	37.061	0	1,9	0	39.012	39.012	140		
-2	69,2	427,8	3,4	34.907	0	1,8	0	36.744	36.744	132		
-3	71,4	449,2	2,5	26.951	0	1,8	0	28.369	28.369	102		
-4	73,6	470,6	2,1	23.717	0	1,7	0	24.966	24.966	90		
-5	75,9	492,0	1,6	18.892	0	1,7	0	19.887	19.887	72		
-6	78,1	513,4	0,2	2.464	0	1,7	0	2.594	2.594	9		
-7	80,3	534,8	0,9	11.551	0	1,6	0	12.159	12.159	44		
-8	82,6	556,2	0,4	5.339	0	1,6	0	5.620	5.620	20		
-9	84,8	577,6	0,2	2.772	0	1,5	0	2.918	2.918	11		
-10	87,0	599,0	0	0	0	1,5	0	0	0	0		
				<u>1.432.413</u>	[kWh/jr]		<u>178.063</u>	<u>931.054</u>	<u>1.109.118</u>	[kWh/jr]	<u>4.995</u>	[GJ/jr]
								<u>0,20</u>	<u>0,07</u>	[€/kWh]		
								<u>35.613</u>	<u>61.915</u>	<u>97.528</u>	[€/jr]	

primary energy rate 1,03 [-]

Bijlage 14

Bepaling bivalentiepunt brine / waterwarmtepomp
Horos 1804 + gbww

T condensor-uit 35
T verdamper-uit 7
COP warmtepomp 3,80
Carnot rendement 11,00
Carnot factor 0,35

T aanvoer -10° 87 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie 5 [°C]

Pnom 748 [kW]

Tbui	Taanv	P [kW]	d/jr	warmte/jr	dagen wp	COP wp	E wp	E HR107	E tot	Eprim
20	20,0	0,0	8,7	0	0					
19	21,9	1,0	11,5	0	0	6,0	0	0	0	0
18	23,7	2,0	13,9	0	0	5,5	0	0	0	0
17	25,6	3,0	17,6	8.294	19,6	5,0	1.656	0	1.656	15
16	27,5	4,0	18,3	15.488	18,3	4,6	3.352	0	3.352	31
15	29,3	5,0	19,2	24.374	19,2	4,3	5.679	0	5.679	52
14	31,2	6,0	20,7	35.038	20,7	4,0	8.735	0	8.735	81
13	33,1	7,0	20,1	42.527	20,1	3,8	11.289	0	11.289	104
12	34,9	8,0	16,9	42.908	16,9	3,6	12.074	0	12.074	111
11	36,8	9,0	16,8	49.763	16,8	3,4	14.786	0	14.786	136
10	38,7	10,0	21,5	72.783	21,5	3,2	22.759	0	22.759	210
9	40,5	11,0	19,9	75.787	19,9	3,0	24.863	0	24.863	230
8	42,4	12,0	20,2	85.477	20,2	2,9	29.341	0	29.341	271
7	44,3	13,0	24,1	112.178	24,1	2,8	40.190	0	40.190	371
6	46,1	14,0	22,1	112.221	22,1	2,7	41.870	0	41.870	386
5	48,0	15,0	13,7	75.364	13,7	2,6	29.224	0	29.224	270
4	49,9	16,0	13	77.014	0	2,5	0	81.068	81.068	292
3	51,7	17,0	11,8	74.898	0	2,4	0	78.840	78.840	284
2	53,6	18,0	7,1	48.070	0	2,3	0	50.600	50.600	182
1	55,5	19,0	6,7	48.197	0	2,2	0	50.734	50.734	183
0	57,3	20,0	6,1	46.462	0	2,2	0	48.908	48.908	176
-1	59,2	21,0	3,8	30.552	0	2,1	0	32.160	32.160	116
-2	61,1	22,0	3,4	28.775	0	2,1	0	30.289	30.289	109
-3	62,9	23,0	2,5	22.216	0	2,0	0	23.385	23.385	84
-4	64,8	24,0	2,1	19.550	0	2,0	0	20.579	20.579	74
-5	66,7	25,0	1,6	15.572	0	1,9	0	16.392	16.392	59
-6	68,5	26,0	0,2	2.031	0	1,9	0	2.138	2.138	8
-7	70,4	27,0	0,9	9.521	0	1,8	0	10.022	10.022	36
-8	72,3	28,0	0,4	4.401	0	1,8	0	4.632	4.632	17
-9	74,1	29,0	0,2	2.285	0	1,7	0	2.405	2.405	9
-10	76,0	30,0	0	0	0	1,7	0	0	0	0
				<u>1.181.747</u>	[kWh/jr]		<u>245.819</u>	<u>452.152</u>	<u>697.970</u>	<u>3.897</u>
							<u>0,20</u>	<u>0,07</u>	[€/kWh]	
							<u>49.164</u>	<u>30.068</u>	<u>79.232</u>	[€/jr]

primary energy rate 1,09 [-]

Bijlage 15

Bepaling bivalentiepunt brine / waterwarmtepomp
Horos 1804 + gbww

T condensor-uit 35
T verdamper-uit 7
COP warmtepomp 3,80
Carnot rendement 11,00
Carnot factor 0,35

T aanvoer -10° 87 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie 0 [°C]

Phom 480 [kW]

Tbui	Taanv	P [kW]	d/jr	warmte/jr	dagen wp	COP wp	E wp	E HR107	E tot	Eprim		
20	20,0	0,0	8,7	0	0							
19	21,3	0,0	11,5	0	0	6,2	0	0	0	0		
18	22,7	0,0	13,9	0	0	5,8	0	0	0	0		
17	24,1	11,3	19,6	5.322	19,6	5,4	989	0	989	9		
16	25,4	22,6	18,3	9.938	18,3	5,0	1.970	0	1.970	18		
15	26,8	33,9	19,2	15.641	19,2	4,8	3.292	0	3.292	30		
14	28,2	45,3	20,7	22.484	20,7	4,5	5.006	0	5.006	46		
13	29,5	56,6	20,1	27.290	20,1	4,3	6.406	0	6.406	59		
12	30,9	67,9	16,9	27.534	16,9	4,1	6.793	0	6.793	63		
11	32,3	79,2	16,8	31.933	16,8	3,9	8.257	0	8.257	76		
10	33,6	90,5	21,5	46.705	21,5	3,7	12.625	0	12.625	117		
9	35,0	101,8	19,9	48.633	19,9	3,5	13.712	0	13.712	127		
8	36,4	113,1	20,2	54.852	20,2	3,4	16.099	0	16.099	149		
7	37,7	124,5	24,1	71.986	24,1	3,3	21.951	0	21.951	203		
6	39,1	135,8	22,1	72.013	22,1	3,2	22.776	0	22.776	210		
5	40,5	147,1	13,7	48.362	13,7	3,1	15.839	0	15.839	146		
4	41,8	158,4	13	49.421	13	3,0	16.737	0	16.737	154		
3	43,2	169,7	11,8	48.063	11,8	2,9	16.808	0	16.808	155		
2	44,6	181,0	7,1	30.847	7,1	2,8	11.126	0	11.126	103		
1	45,9	192,3	6,7	30.929	6,7	2,7	11.491	0	11.491	106		
0	47,3	203,7	6,1	29.815	6,1	2,6	11.398	0	11.398	105		
-1	48,7	215,0	3,8	19.605	0	2,5	0	20.637	20.637	74		
-2	50,0	226,3	3,4	18.465	0	2,5	0	19.437	19.437	70		
-3	51,4	237,6	2,5	14.256	0	2,4	0	15.006	15.006	54		
-4	52,8	248,9	2,1	12.545	0	2,4	0	13.206	13.206	48		
-5	54,1	260,2	1,6	9.993	0	2,3	0	10.519	10.519	38		
-6	55,5	271,5	0,2	1.303	0	2,2	0	1.372	1.372	5		
-7	56,9	282,9	0,9	6.110	0	2,2	0	6.431	6.431	23		
-8	58,2	294,2	0,4	2.824	0	2,1	0	2.973	2.973	11		
-9	59,6	305,5	0,2	1.466	0	2,1	0	1.544	1.544	6		
-10	61,0	316,8	0	0	0	2,1	0	0	0	0		
				758.336	[kWh/jr]		203.275	91.124	294.399	[kWh/jr]	2.204	[GJ/jr]
							0,20	0,07	[€/kWh]			
							40.655	6.060	46.715	[€/jr]		

primary energy rate 1,24 [-]

Bijlage 16

Bepaling bivalentiepunt gasmotorwarmtepomp w/w
VDL + open bron

T condensor-uit 35
T verdamper-uit 7
COP warmtepomp 3,80
Carnot rendement 11,00
Carnot factor 0,35

T aanvoer -10° 87 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie 7 [°C]

Phom 908 [kW]

Tbui	Taanv	P [kW]	d/jr	warmte/jr	dagen wp	COP wp	E wp	E HR107	E tot	Eprim
20	20,0	0,0	8,7	0	0					
19	22,3	0,0	11,5	0	0	5,5	0	0	0	0
18	24,5	0,0	13,9	0	0	4,3	0	0	0	0
17	26,7	21,1	19,6	9.936	19,6	3,6	2.731	0	2.731	10
16	29,0	42,5	18,3	18.677	18,3	3,2	5.903	0	5.903	21
15	31,2	63,9	19,2	29.458	19,2	2,8	10.445	0	10.445	38
14	33,4	85,3	20,7	42.392	20,7	2,6	16.560	0	16.560	60
13	35,7	106,7	20,1	51.488	20,1	2,4	21.856	0	21.856	79
12	37,9	128,1	16,9	51.972	16,9	2,2	23.715	0	23.715	85
11	40,1	149,5	16,8	60.294	16,8	2,1	29.320	0	29.320	106
10	42,4	170,9	21,5	88.206	21,5	1,9	45.389	0	45.389	163
9	44,6	192,3	19,9	91.864	19,9	1,8	49.728	0	49.728	179
8	46,8	213,7	20,2	103.625	20,2	1,8	58.718	0	58.718	211
7	49,1	235,2	24,1	136.011	24,1	1,7	80.334	0	80.334	289
6	51,3	256,6	22,1	136.076	0	1,6	0	143.238	143.238	516
5	53,5	278,0	13,7	91.392	0	1,6	0	96.202	96.202	346
4	55,8	299,4	13	93.400	0	1,5	0	98.316	98.316	354
3	58,0	320,8	11,8	90.840	0	1,5	0	95.621	95.621	344
2	60,2	342,2	7,1	58.305	0	1,4	0	61.374	61.374	221
1	62,5	363,6	6,7	58.462	0	1,4	0	61.539	61.539	222
0	64,7	385,0	6,1	56.360	0	1,4	0	59.326	59.326	214
-1	66,9	406,4	3,8	37.061	0	1,3	0	39.012	39.012	140
-2	69,2	427,8	3,4	34.907	0	1,3	0	36.744	36.744	132
-3	71,4	449,2	2,5	26.951	0	1,3	0	28.369	28.369	102
-4	73,6	470,6	2,1	23.717	0	1,3	0	24.966	24.966	90
-5	75,9	492,0	1,6	18.892	0	1,2	0	19.887	19.887	72
-6	78,1	513,4	0,2	2.464	0	1,2	0	2.594	2.594	9
-7	80,3	534,8	0,9	11.551	0	1,2	0	12.159	12.159	44
-8	82,6	556,2	0,4	5.339	0	1,2	0	5.620	5.620	20
-9	84,8	577,6	0,2	2.772	0	1,2	0	2.918	2.918	11
-10	87,0	599,0	0	0	0	1,2	0	0	0	0
				<u>1.432.413</u>			<u>344.698</u>	<u>787.885</u>	<u>1.132.582</u>	<u>4.077</u>
								[kWh/jr]		[GJ/jr]
								0,07		[€/kWh]
								<u>22.922</u>		<u>52.394</u>
										[€/jr]

primary energy rate 1,26 [-]

Bepaling bivalentiepunt gasmotorwarmtepomp w/w VDL + open bron

Pnom 748 [kW]

primary energy rate 1,51 [-]

primary energy rate 1,51 [-]

Bijlage 18

Bepaling bivalentiepunt gasmotorwarmtepomp w/w
VDL + open bron

T condensor-uit 35
T verdamper-uit 7
COP warmtepomp 3,80
Carnot rendement 11,00
Carnot factor 0,35

T aanvoer -10° 87 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie -2 [°C]

Phom 480 [kW]

Tbui	Taanv	P [kW]	d/jr	warmte/jr	dagen wp	COP wp	E wp	E HR107	E tot	Eprim		
20	20,0	0,0	8,7	0	0							
19	21,3	0,0	11,5	0	0	6,2	0	0	0	0		
18	22,7	0,0	13,9	0	0	5,2	0	0	0	0		
17	24,1	11,3	19,6	5.322	19,6	4,5	1.180	0	1.180	4		
16	25,4	22,6	18,3	9.938	18,3	4,0	2.479	0	2.479	9		
15	26,8	33,9	19,2	15.641	19,2	3,6	4.318	0	4.318	16		
14	28,2	45,3	20,7	22.484	20,7	3,3	6.781	0	6.781	24		
13	29,5	56,6	20,1	27.290	20,1	3,1	8.898	0	8.898	32		
12	30,9	67,9	16,9	27.534	16,9	2,9	9.624	0	9.624	35		
11	32,3	79,2	16,8	31.933	16,8	2,7	11.882	0	11.882	43		
10	33,6	90,5	21,5	46.705	21,5	2,5	18.390	0	18.390	66		
9	35,0	101,8	19,9	48.633	19,9	2,4	20.163	0	20.163	73		
8	36,4	113,1	20,2	54.852	20,2	2,3	23.842	0	23.842	86		
7	37,7	124,5	24,1	71.986	24,1	2,2	32.681	0	32.681	118		
6	39,1	135,8	22,1	72.013	22,1	2,1	34.036	0	34.036	123		
5	40,5	147,1	13,7	48.362	13,7	2,0	23.727	0	23.727	85		
4	41,8	158,4	13	49.421	13	2,0	25.104	0	25.104	90		
3	43,2	169,7	11,8	48.063	11,8	1,9	25.220	0	25.220	91		
2	44,6	181,0	7,1	30.847	7,1	1,8	16.686	0	16.686	60		
1	45,9	192,3	6,7	30.929	6,7	1,8	17.215	0	17.215	62		
0	47,3	203,7	6,1	29.815	6,1	1,7	17.047	0	17.047	61		
-1	48,7	215,0	3,8	19.605	3,8	1,7	11.497	0	11.497	41		
-2	50,0	226,3	3,4	18.465	3,4	1,7	11.091	0	11.091	40		
-3	51,4	237,6	2,5	14.256	0	1,6	0	15.006	15.006	54		
-4	52,8	248,9	2,1	12.545	0	1,6	0	13.206	13.206	48		
-5	54,1	260,2	1,6	9.993	0	1,6	0	10.519	10.519	38		
-6	55,5	271,5	0,2	1.303	0	1,5	0	1.372	1.372	5		
-7	56,9	282,9	0,9	6.110	0	1,5	0	6.431	6.431	23		
-8	58,2	294,2	0,4	2.824	0	1,5	0	2.973	2.973	11		
-9	59,6	305,5	0,2	1.466	0	1,5	0	1.544	1.544	6		
-10	61,0	316,8	0	0	0	1,4	0	0	0	0		
				758.336	[kWh/jr]	321.863		51.050	372.913	[kWh/jr]	1.342	[GJ/jr]
						0,07		0,07			[€/kWh]	
						21.404		3.395	24.799			[€/jr]

primary energy rate 2,03 [-]

Bijlage 19

Bepaling bivalentiepunt gasabsorptiewarmtepomp l/w
Remeha HP 35 HT

T aanvoer -10° 74 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie 0 [°C]

Phom 908 [kW]

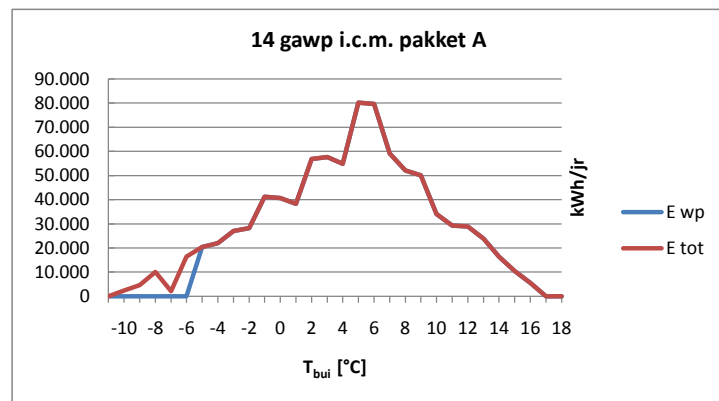
Tbui	Taanv	P [kW]	d/jr	warmte/jr	dagen wp	η wp Ho	η wp Hb	E wp	E HR107	E tot	Eprim			
20	20,0	0,0	8,7	0	0									
19	22,3	0,0	11,5	0	0	1,64	1,48	0	0	0	0			
18	24,5	0,0	13,9	0	0	1,64	1,48	0	0	0	0			
17	26,7	21,1	19,6	9.936	19,6	1,64	1,48	6.708	0	6.708	24			
16	29,0	42,5	18,3	18.677	18,3	1,64	1,48	12.610	0	12.610	45			
15	31,2	63,9	19,2	29.458	19,2	1,64	1,48	19.889	0	19.889	72			
14	33,4	85,3	20,7	42.392	20,7	1,63	1,47	28.797	0	28.797	104			
13	35,7	106,7	20,1	51.488	20,1	1,63	1,47	34.976	0	34.976	126			
12	37,9	128,1	16,9	51.972	16,9	1,62	1,46	35.522	0	35.522	128			
11	40,1	149,5	16,8	60.294	16,8	1,62	1,46	41.211	0	41.211	148			
10	42,4	170,9	21,5	88.206	21,5	1,61	1,45	60.663	0	60.663	218			
9	44,6	192,3	19,9	91.864	19,9	1,61	1,45	63.178	0	63.178	227			
8	46,8	213,7	20,2	103.625	20,2	1,57	1,42	73.082	0	73.082	263			
7	49,1	235,2	24,1	136.011	24,1	1,52	1,37	99.078	0	99.078	357			
6	51,3	256,6	22,1	136.076	22,1	1,50	1,35	100.447	0	100.447	362			
5	53,5	278,0	13,7	91.392	13,7	1,38	1,25	73.329	0	73.329	264			
4	55,8	299,4	13	93.400	13	1,36	1,23	76.043	0	76.043	274			
3	58,0	320,8	11,8	90.840	11,8	1,23	1,11	81.775	0	81.775	294			
2	60,2	342,2	7,1	58.305	7,1	1,21	1,09	53.354	0	53.354	192			
1	62,5	363,6	6,7	58.462	6,7	1,16	1,05	55.804	0	55.804	201			
0	64,7	385,0	6,1	56.360	6,1	1,12	1,01	55.718	0	55.718	201			
-1	66,9	406,4	3,8	37.061	0	1,00	0,90	0	39.012	39.012	140			
-2	69,2	427,8	3,4	34.907	0	1,00	0,90	0	36.744	36.744	132			
-3	71,4	449,2	2,5	26.951	0	1,00	0,90	0	28.369	28.369	102			
-4	73,6	470,6	2,1	23.717	0	1,00	0,90	0	24.966	24.966	90			
-5	75,9	492,0	1,6	18.892	0	1,00	0,90	0	19.887	19.887	72			
-6	78,1	513,4	0,2	2.464	0	1,00	0,90	0	2.594	2.594	9			
-7	80,3	534,8	0,9	11.551	0	1,00	0,90	0	12.159	12.159	44			
-8	82,6	556,2	0,4	5.339	0	1,00	0,90	0	5.620	5.620	20			
-9	84,8	577,6	0,2	2.772	0	1,00	0,90	0	2.918	2.918	11			
-10	87,0	599,0	0	0	0	1,00	0,90	0	0	0	0			
				<u>1.432.413</u>	[kWh/jr]				<u>972.183</u>	<u>172.269</u>	<u>1.144.453</u>	[kWh/jr]	<u>4.120</u>	[GJ/jr]
										0,07	0,07	[€/kWh]		
										<u>64.650</u>	<u>11.456</u>	<u>76.106</u>	[€/jr]	

primary energy rate 1,25 [-]

Bepaling bivalentiepunt gasabsorptiewarmtepomp l/w
Remeha HP 35 HT

T aanvoer -10° 74 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie -4 [°C]

Phom 748 [kW]



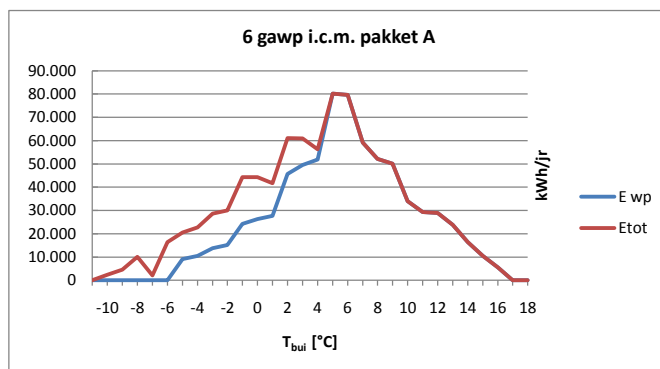
Tbui	Taanv	P [kW]	d/jr	warmte/jr	dagen wp	η wp Ho	η wp Hb	E wp	E HR107	E tot	Eprim		
20	20,0	0,0	8,7	0	0								
19	21,9	0,0	11,5	0	0	1,64	1,48	0	0	0	0		
18	23,7	0,0	13,9	0	0	1,64	1,48	0	0	0	0		
17	25,6	17,6	19,6	8.294	19,6	1,64	1,48	5.600	0	5.600	20		
16	27,5	35,3	18,3	15.488	18,3	1,64	1,48	10.457	0	10.457	38		
15	29,3	52,9	19,2	24.374	19,2	1,64	1,48	16.456	0	16.456	59		
14	31,2	70,5	20,7	35.038	20,7	1,63	1,47	23.801	0	23.801	86		
13	33,1	88,2	20,1	42.527	20,1	1,63	1,47	28.889	0	28.889	104		
12	34,9	105,8	16,9	42.908	16,9	1,62	1,46	29.327	0	29.327	106		
11	36,8	123,4	16,8	49.763	16,8	1,62	1,46	34.013	0	34.013	122		
10	38,7	141,1	21,5	72.783	21,5	1,61	1,45	50.055	0	50.055	180		
9	40,5	158,7	19,9	75.787	19,9	1,61	1,45	52.122	0	52.122	188		
8	42,4	176,3	20,2	85.477	20,2	1,60	1,45	59.153	0	59.153	213		
7	44,3	193,9	24,1	112.178	24,1	1,56	1,41	79.622	0	79.622	287		
6	46,1	211,6	22,1	112.221	22,1	1,55	1,40	80.166	0	80.166	289		
5	48,0	229,2	13,7	75.364	13,7	1,52	1,37	54.899	0	54.899	198		
4	49,9	246,8	13	77.014	13	1,48	1,34	57.618	0	57.618	207		
3	51,7	264,5	11,8	74.898	11,8	1,46	1,32	56.803	0	56.803	204		
2	53,6	282,1	7,1	48.070	7,1	1,39	1,26	38.292	0	38.292	138		
1	55,5	299,7	6,7	48.197	6,7	1,31	1,18	40.738	0	40.738	147		
0	57,3	317,4	6,1	46.462	6,1	1,25	1,13	41.157	0	41.157	148		
-1	59,2	335,0	3,8	30.552	3,8	1,20	1,08	28.191	0	28.191	101		
-2	61,1	352,6	3,4	28.775	3,4	1,18	1,07	27.001	0	27.001	97		
-3	62,9	370,3	2,5	22.216	2,5	1,12	1,01	21.963	0	21.963	79		
-4	64,8	387,9	2,1	19.550	2,1	1,06	0,96	20.421	0	20.421	74		
-5	66,7	405,5	1,6	15.572	0	1,00	0,90	0	16.392	16.392	59		
-6	68,5	423,2	0,2	2.031	0	1,00	0,90	0	2.138	2.138	8		
-7	70,4	440,8	0,9	9.521	0	1,00	0,90	0	10.022	10.022	36		
-8	72,3	458,4	0,4	4.401	0	1,00	0,90	0	4.632	4.632	17		
-9	74,1	476,0	0,2	2.285	0	1,00	0,90	0	2.405	2.405	9		
-10	76,0	493,7	0	0	0	1,00	0,90	0	0	0	0		
				<u>1.181.747</u>	[kWh/jr]		<u>856.742</u>		<u>35.590</u>	<u>892.332</u>	[kWh/jr]	<u>3.212</u>	[GJ/jr]
								<u>0,07</u>		<u>0,07</u>	[€/kWh]		
								<u>56.973</u>		<u>2.367</u>	<u>59.340</u>	[€/jr]	

primary energy rate 1,32 [-]

Bijlage 20a

Bepaling bivalentiepunt gasabsorptiewarmtepomp l/w
Remeha HP 35 HT

T aanvoer -10° 87 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie -4 [°C]
Aantal GAWP 6 [-]
Pnom 748 [kW]



Tbui	Taanv	P [kW]	d/jr	warmte/jr	dagen wp	η wp Ho	η wp Hb	E wp	P _{HR107} [kW]	E HR107	E tot	Eprim	
20	20,0	0,0	8,7	0	0								
19	21,9	0,0	11,5	0	0	1,64	1,48	0	0	0	0	0	
18	23,7	0,0	13,9	0	0	1,64	1,48	0	0	0	0	0	
17	25,6	17,6	19,6	8.294	19,6	1,64	1,48	5.600	0	0	5.600	20	
16	27,5	35,3	18,3	15.488	18,3	1,64	1,48	10.457	0	0	10.457	38	
15	29,3	52,9	19,2	24.374	19,2	1,64	1,48	16.456	0	0	16.456	59	
14	31,2	70,5	20,7	35.038	20,7	1,63	1,47	23.801	0	0	23.801	86	
13	33,1	88,2	20,1	42.527	20,1	1,63	1,47	28.889	0	0	28.889	104	
12	34,9	105,8	16,9	42.908	16,9	1,62	1,46	29.327	0	0	29.327	106	
11	36,8	123,4	16,8	49.763	16,8	1,62	1,46	34.013	0	0	34.013	122	
10	38,7	141,1	21,5	72.783	21,5	1,61	1,45	50.055	0	0	50.055	180	
9	40,5	158,7	19,9	75.787	19,9	1,61	1,45	52.122	0	0	52.122	188	
8	42,4	176,3	20,2	85.477	20,2	1,60	1,45	59.153	0	0	59.153	213	
7	44,3	193,9	24,1	112.178	24,1	1,56	1,41	79.622	0	0	79.622	287	
6	46,1	211,6	22,1	112.221	22,1	1,55	1,40	80.166	0	0	80.166	289	
5	48,0	229,2	13,7	75.364	13,7	1,52	1,37	51.879	13	4.364	56.243	202	
4	49,9	246,8	13	77.014	13	1,48	1,34	49.579	34	11.311	60.890	219	
3	51,7	264,5	11,8	74.898	11,8	1,46	1,32	45.619	52	15.523	61.142	220	
2	53,6	282,1	7,1	48.070	7,1	1,39	1,26	27.609	79	14.117	41.726	150	
1	55,5	299,7	6,7	48.197	6,7	1,31	1,18	26.340	106	17.931	44.271	159	
0	57,3	317,4	6,1	46.462	6,1	1,25	1,13	24.199	131	20.152	44.350	160	
-1	59,2	335,0	3,8	30.552	3,8	1,20	1,08	15.097	156	14.937	30.034	108	
-2	61,1	352,6	3,4	28.775	3,4	1,18	1,07	13.783	173	14.828	28.610	103	
-3	62,9	370,3	2,5	22.216	2,5	1,12	1,01	10.499	193	12.206	22.705	82	
-4	64,8	387,9	2,1	19.550	2,1	1,06	0,96	9.161	214	11.348	20.508	74	
-5	66,7	405,5	1,6	15.572	0	1,00	0,90	0	406	16.392	16.392	59	
-6	68,5	423,2	0,2	2.031	0	1,00	0,90	0	423	2.138	2.138	8	
-7	70,4	440,8	0,9	9.521	0	1,00	0,90	0	441	10.022	10.022	36	
-8	72,3	458,4	0,4	4.401	0	1,00	0,90	0	458	4.632	4.632	17	
-9	74,1	476,0	0,2	2.285	0	1,00	0,90	0	476	2.405	2.405	9	
-10	76,0	493,7	0	0	0	1,00	0,90	0	494	0	0	0	
				1.181.747				743.424			172.305	915.730	3.297
												[GJ/jr]	
				</									

Bijlage 21

Bepaling bivalentiepunt gasabsorptiewarmtepomp l/w
Remeha HP 35 HT

T aanvoer -10° 74 [°C]
T ruimte 18 [°C]
T bivalentie -10 [°C]

Pnom 480 [kW]

Tbui	Taanv	P [kW]	d/jr	warmte/jr	dagen wp	η wp Ho	η wp Hb	E wp	E HR107	E tot	Eprim
20	20,0	0,0	8,7	0	0						
19	21,3	0,0	11,5	0	0	1,64	1,48	0	0	0	0
18	22,7	0,0	13,9	0	0	1,64	1,48	0	0	0	0
17	24,1	11,3	19,6	5.322	19,6	1,64	1,48	3.593	0	3.593	13
16	25,4	22,6	18,3	9.938	18,3	1,64	1,48	6.710	0	6.710	24
15	26,8	33,9	19,2	15.641	19,2	1,64	1,48	10.560	0	10.560	38
14	28,2	45,3	20,7	22.484	20,7	1,63	1,47	15.273	0	15.273	55
13	29,5	56,6	20,1	27.290	20,1	1,63	1,47	18.538	0	18.538	67
12	30,9	67,9	16,9	27.534	16,9	1,62	1,46	18.819	0	18.819	68
11	32,3	79,2	16,8	31.933	16,8	1,62	1,46	21.826	0	21.826	79
10	33,6	90,5	21,5	46.705	21,5	1,61	1,45	32.121	0	32.121	116
9	35,0	101,8	19,9	48.633	19,9	1,61	1,45	33.447	0	33.447	120
8	36,4	113,1	20,2	54.852	20,2	1,60	1,45	37.959	0	37.959	137
7	37,7	124,5	24,1	71.986	24,1	1,60	1,45	49.817	0	49.817	179
6	39,1	135,8	22,1	72.013	22,1	1,59	1,44	50.149	0	50.149	181
5	40,5	147,1	13,7	48.362	13,7	1,59	1,44	33.678	0	33.678	121
4	41,8	158,4	13	49.421	13	1,58	1,43	34.634	0	34.634	125
3	43,2	169,7	11,8	48.063	11,8	1,55	1,40	34.334	0	34.334	124
2	44,6	181,0	7,1	30.847	7,1	1,51	1,36	22.620	0	22.620	81
1	45,9	192,3	6,7	30.929	6,7	1,49	1,35	22.984	0	22.984	83
0	47,3	203,7	6,1	29.815	6,1	1,46	1,32	22.612	0	22.612	81
-1	48,7	215,0	3,8	19.605	3,8	1,44	1,30	15.075	0	15.075	54
-2	50,0	226,3	3,4	18.465	3,4	1,37	1,24	14.924	0	14.924	54
-3	51,4	237,6	2,5	14.256	2,5	1,33	1,20	11.868	0	11.868	43
-4	52,8	248,9	2,1	12.545	2,1	1,27	1,15	10.938	0	10.938	39
-5	54,1	260,2	1,6	9.993	1,6	1,22	1,10	9.069	0	9.069	33
-6	55,5	271,5	0,2	1.303	0,2	1,20	1,08	1.203	0	1.203	4
-7	56,9	282,9	0,9	6.110	0,9	1,14	1,03	5.934	0	5.934	21
-8	58,2	294,2	0,4	2.824	0,4	1,07	0,97	2.922	0	2.922	11
-9	59,6	305,5	0,2	1.466	0,2	1,05	0,95	1.546	0	1.546	6
-10	61,0	316,8	0	0	0	1,04	0,94	0	0	0	0
				758.336 [kWh/jr]				543.154	0	543.154 [kWh/jr]	1.955 [GJ/jr]
								0,07	0,07	[€/kWh]	
								36.120	-	36.120	[€/jr]

primary energy rate 1,40 [-]

Bijlage 22

Budgetprijzen beperking warmtebehoefte

wtw gangventilatie incl extra kanalen	75.000	€
spouwmuurisolatie	30	€/m2
vloerisolatie	80	€/m2
climarad 121 stuks	2.500	€/st
HR++ glas	175	€/m2
borstwering 9 cm isolatie	125	€/m2

Budgetprijzen verhogen opwekrendement

l/w warmtepomp	400	€/kW
w/w warmtepomp	400	€/kW
gbww (wordt niet geregenereerd)	1.000	€/kW
gasmotorwarmtepomp incl. open bron	960	€/kW
droge koeler 680 kW	60	€/kW
gasabsorptiewarmtepomp	16.500	€/st
aansluiting elektriciteit 100 kW	20.000	€
hydraulische aanpassingen	25.000	€
aanpassing regelinstallatie	10.000	€
advieskosten bivalente installatie	5.000	€

Budgetprijzen voor onderhoud

l/w warmtepomp	500	€/(st·jr)
w/w warmtepomp	500	€/(st·jr)
gmwp + open bron	3.500	€/jr
gawp	250	€/(st·jr)