

TNO-rapport

**Voorstudie stadsverwarming met combinatie
van STEG warmte/kracht koppeling en
elektrische warmtepompen**

Eindrapport

Referentienummer 94-141
Dossiernummer 112325-25223
Datum april 1994
NP

Auteur
P.J. Collet

Trefwoorden

- stadsverwarming
- warmte/kracht koppeling
- warmtepompen
- koeling
- energie
- kosten
- milieu

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO', dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© TNO

Bestemd voor
Novem B.V.
Sittard
project no. 221323.0100

Samenvatting

Dit rapport geeft de resultaten weer van een studie naar stadsverwarming met warmte-opwekking door middel van een combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen. Kenmerkend voor de bestudeerde uitvoering van dit systeemconcept is het gebruik van de restwarmte in de rookgassen van de STEG WK installatie als effectieve warmtebron voor de elektrische warmtepompen. De warmtepompen zijn onderscheiden in centrale warmtepompen ter plaatse van de STEG WK-installatie en decentrale warmtepompen ter plaatse van onderstations van het warmtedistributiesysteem.

Doelstelling van deze (voor)studie is een nadere verificatie van eerder gestelde verwachtingen voor dit systeemconcept [1] [2]. Op grond hiervan dient te worden beslist over de wenselijkheid voor de uitvoering van vervolgstudies die mede zijn gericht op de uitvoering van een mogelijk demonstratieproject.

De uitgevoerde evaluatie is met name gericht op een beoordeling van de combinatie van STEG warmte-kracht koppeling en elektrische warmtepompen in vergelijking met warmte-opwekking door middel van uitsluitend STEG warmte/kracht koppeling. De vergeleken grootheden betreffen brandstofbesparingen, CO₂- en NO_x- emissiereducties en investerings- en exploitatiekosten. De vergelijking geschiedt aan de hand van een theoretisch voorbeeld van een stadsverwarmingssysteem met een basislastvermogen van 26 MW_{th} voor de warmtevoorziening van circa 13.000 goed geïsoleerde ééngezinshuizen. De aanvoer- en retourtemperaturen van het secundair warmtedistributiesysteem zijn gesteld op 75 °C respectievelijk 45 °C, dus geschikt voor (volledige) tapwateropwarming en ruimteverwarming door middel van 'licht overgedimensioneerde' radiatoren.

Een belangrijke randvoorwaarde voor de uitgevoerde vergelijkingen is dat wordt uitgegaan van een macro-economische beschouwingwijze. Dit betekent met name dat de baten en kosten van elektriciteitsproductie of elektriciteitsverbruik worden bepaald op grond van de vermeden of gemaakte kosten door de (openbare) elektriciteitsproducenten. Eenvoudigheidshalve wordt tevens verondersteld dat dit uitsluitend gasgestookte elektriciteitsopwekking betreft.

Uit de berekeningsuitkomsten blijkt dat voor wat betreft brandstofbesparingen en emissiereducties de combinatie met elektrische warmtepompen een verbetering geeft van circa 6% ten opzichte van uitsluitend warmte/kracht koppeling. Belangrijker dan de omvang van deze verbetering is echter dat dit gepaard gaat met een aanzienlijk vermindering van het warmte/kracht vermogen (voor dit voorbeeld een reductie van 38%). Dit is van groot belang in een lange-termijn perspectief wanneer de maximale omvang van het warmte/kracht vermogen wordt beperkt door de gelimiteerde inpasbaarheid in de landelijke elektriciteitsvoorziening.

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

Voor wat betreft de kosten blijkt op basis van de gekozen uitgangsgegevens de combinatie met warmtepompen tot iets hogere netto investeringen en iets lagere jaarkosten te leiden. Deze uitkomsten zijn echter gevoelig voor de mate waarin de specifieke investeringen (per kW_e) van de opwekkingsinstallaties toenemen als gevolg van schaalvergroting en de combinatie met warmte-opwekking. Hierbij gaat het met name om de specifieke investeringsverschillen tussen (relatief kleinschalige) STEG warmte/krachtinstallaties en grote (250 MW_e) STEG elektriciteitscentrales en om het specifieke investeringsverschil tussen bijvoorbeeld een 17 MW_e en een wat grotere 29 MW_e STEG warmte/krachtinstallatie.

Deze gevoeligheid maakt het echter niet waarschijnlijk dat een eventueel noodzakelijke bijstelling van de gekozen investeringswaarden tot een belangrijk kostennadeel zou leiden (tenminste niet bij beschouwing in een macro-economische context). Dit hangt samen met de kostenvoordelen als gevolg van een aantal aspecten die in het kader van deze studie nog niet zijn gekwantificeerd. Dit betreft met name de volgende aspecten:

- Een verlaging van de aanloopkosten van het stadsverwarmingsproject doordat de installatie van de kleinere STEG WK installatie in een vroeger stadium (van de bouw van het warmte-afnamegebied) economisch wordt. Een belangrijk additioneel voordeel is dat wanneer de uiteindelijke warmtevraag lager uitvalt dan gepland, de toevoeging van elektrische warmtepompen eenvoudigweg achterwege kan worden gelaten. Dit impliceert een belangrijk kostenvoordeel over de gehele looptijd van het stadsverwarmingsproject. Ook de brandstofbesparingen zijn dan relatief hoger.
- Een verhoging van de brandstofkostenbesparingen wanneer de 'achtergrond' elektriciteitsopwekking niet alleen gasgestookte maar ook kolengestookte centrales omvat. Bij een kolenprijs die per GJ_{br} belangrijk lager is dan de gasprijs, zal de brandstofkostenbesparing van elektrische warmtepompen toenemen en die van warmte/kracht koppeling (in veel sterkere mate) afnemen.
- Een hoger kostenniveau van het primaire warmtedistributienet leidt tot grotere kostenreducties als gevolg van een vermindering van de retourtemperatuur van dit net.
- Gebruikmaking van de warmtepompen voor koeldoeleinden kan leiden tot een belangrijke reductie van de aan warmtevoorziening toe te rekenen kosten. Dit betreft zowel het gebruik voor airconditioning koeldoeleinden als voor koeling van de inlaatlucht van de gasturbines van de STEG WK-installaties (resultierend in een verhoging van het beschikbare elektrische vermogen in de zomer).

Op grond van het totaal van deze overwegingen wordt geconcludeerd dat het duidelijk wenselijk is om een vervolg te geven aan deze voorstudie. Dit betreft met name een vervolgstudie gericht op het kwantificeren van bovenstaande verbeteringsmogelijkheden (in samenhang met een nadere verificatie van de voor deze studie gekozen gegevenswaarden).

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

Speciale aandacht dient hierbij te worden besteed aan de keuze van de (economische) randvoorwaarden voor de berekeningen. Dit geldt met name voor de consequenties voor de waardering van de vermogens- en onderhoudskosten van (vermeden) elektrisch vermogen. Tegenover de voor deze voorstudie gekozen macro-economische beschouwingsgrondslag staat het (deels) in rekening brengen van vermogensvergoedingen overeenkomstig de bestaande tariefstructuren. Het laatste is van voordeel voor de economie van warmte/kracht koppeling en van nadeel voor de combinatie met elektrische warmtepompen. Het is redelijk te veronderstellen dat hierin verandering zal komen, vooral omdat vanuit de visie van een qua kosten optimale energievoorziening het stadium van een teveel aan gepland warmte/kracht vermogen lijkt te naderen.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	6
2	Doelstelling	8
3	Beschrijving van het systeemconcept en de hiervan verwachte voordelen	9
4	Definitie vergelijkingsmodel	13
5	Macro-economische randvoorwaarden	16
6	Berekenings- en vergelijkingsuitkomsten	19
7	Conclusies en aanbevelingen	22
8	Literatuur	25
9	Verantwoording	26
<i>Bijlage 1</i>	<i>Gegevenswaarden</i>	
<i>Bijlage 2</i>	<i>Procesberekeningen</i>	
<i>Bijlage 3</i>	<i>Energie- en kostenberekeningen</i>	

1 Inleiding

In een tweetal notities van TNO-ME [1] zijn redenen aangegeven waarom wordt verwacht dat stadsverwarming met een combinatie van STEG warmte/kracht koppeling (STEG WKK) met toegevoegde rookgascondensor en elektrische warmtepompen de voorkeur verdient boven stadsverwarming met uitsluitend STEG WKK. In een later uitgebracht rapport [2] is dit concept verder uitgewerkt en zijn de verwachtingen onderbouwd met de resultaten van kwantitatieve energie- en kostenvergelijkingen.

De waarden van de uitgangsgegevens voor deze berekeningen waren echter voor het overgrote deel slechts gebaseerd op redelijk lijkende veronderstellingen. Er bestond duidelijk behoefte aan een verdergaande kwantitatieve analyse van de energie- en kostenvoordelen, mede op basis van een nadere toetsing van de gehanteerde uitgangsgegevens.

Het hier gerapporteerde onderzoek vormt een eerste stap in deze richting. De doelstellingen zijn nader verwoord in hoofdstuk 2.

De uitgevoerde evaluatie is met name gericht op een beoordeling van de combinatie van STEG warmtekracht koppeling en elektrische warmtepompen in vergelijking met warmte-opwekking door middel van uitsluitend STEG warmte/kracht koppeling. De vergeleken grootheden betreffen brandstofbesparingen, CO₂- en NO_x- emissiereducties en investerings- en exploitatiekosten. De vergelijking geschiedt aan de hand van een theoretisch voorbeeld van een stadsverwarmingssysteem met een basislastvermogen van 26 MW_{th} voor de warmtevoorziening van circa 13.000 goed geïsoleerde één-gezinswoningen.

De waarden van de hierbij aangehouden uitgangsgegevens zijn weergegeven in bijlage 1. Tevens wordt ingegaan op de achtergronden voor de keuzebepaling van deze gegevenswaarden. Dit betreft vooral de gegevenswaarden die voor de vergelijkingsuitkomsten het belangrijkst zijn.

In bijlage 2 zijn procesberekeningen weergegeven die vooral dienen ter bepaling van de vermogens en rendementen van warmte/kracht en warmtepomp apparatuur in het kader van een typerend voorbeeld van een totaal systeemconcept.

Hoofdstuk 3 omvat een beschrijving van het voorgestelde systeemconcept en de hiervan verwachte voordelen. De beschrijving wordt gegeven aan de hand van een vereenvoudigd processchema waarin de uitkomsten van de procesberekeningen uit bijlage 2 zijn opgenomen.

In hoofdstuk 4 is het voor de evaluatie gekozen vergelijkingsmodel nader gedefinieerd. Hoofdstuk 5 gaat in op de implicaties van een vergelijking op basis van macro-economische randvoorwaarden.

De energie- en kostenberekeningen zijn weergegeven in bijlage 3. Dit betreft een bepaling van vergelijkingsgrootheden (brandstofbesparingen, emissiereducties, brandstofkostenbesparingen, investeringen en jaarkosten) voor stadsverwarming met de twee onderscheiden vormen van warmte-opwekking ten opzichte van een referentie-

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

vorm van warmtevoorziening. Opgemerkt wordt dat voor de bepaling van brandstofbesparingen en emissiereducties deze referentievorm anders is dan voor de kostenberekeningen (zie ook hoofdstuk 4).

In hoofdstuk 6 is een overzicht gegeven van de belangrijkste berekeningsresultaten en vergelijkingsuitkomsten. Een gevoeligheidsanalyse geeft aan wat het effect is van enkele voor de vergelijkingsuitkomsten zeer belangrijke gegevenskeuzen.

Tenslotte worden in hoofdstuk 7 conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan voor de uitvoering van vervolgonderzoek.

2 Doelstelling

Doelstelling van het onderzoek is een nadere evaluatie van het voorgestelde energie-concept (uitgaande van [1], [2]) met het oog op een beoordeling van de wenselijkheid voor uitvoering van vervolgstudies gericht op een demonstratieproject en mogelijk perspectiefvolle apparatuurontwikkelingen.

3 Beschrijving van het systeemconcept en de hiervan verwachte voordelen

In figuur 1 is in vereenvoudigde vorm een processchema van het voorgestelde systeemconcept weergegeven.

Naast een centrale STEG warmte/krachtinstallatie (STEG WK) zijn zowel centrale als decentrale elektrische warmtepompen aangegeven. De decentrale warmtepompen staan opgesteld ter plaatse van onderstations en/of hulpketelcentrales van het warmtedistributiesysteem. De centrale warmtepompen zijn opgesteld in de directe nabijheid van de STEG WK-installatie. Niet aangegeven zijn de warmtebuffers en de hulpketels die eveneens onderdeel vormen van een totaal systeemconcept.

Zowel de centrale als de decentrale warmtepompen onttrekken warmte aan de retourwaterstroom van het warmtedistributiesysteem. Dit geeft een temperatuursverlaging die het mogelijk maakt om additionele restwarmte terug te winnen uit de rookgassen van de STEG. Dit betreft met name de latente warmte van de waterdamp in de rookgassen, warmte die als gevolg van een te lage dauwpunttemperatuur (circa 38 °C bij een luchtfactor van 3,5) niet kan worden teruggewonnen bij de gebruikelijke retourtemperaturen van het stadsverwarmingsnet. Deze warmte vertegenwoordigt de effectieve (relatief hoge temperatuur) warmtebron voor de warmtepompen met een opwekkingsvermogen dat bijvoorbeeld de helft van het direct (zonder warmtepompen) terugwinbare warmtevermogen van de STEG WK kan bedragen.

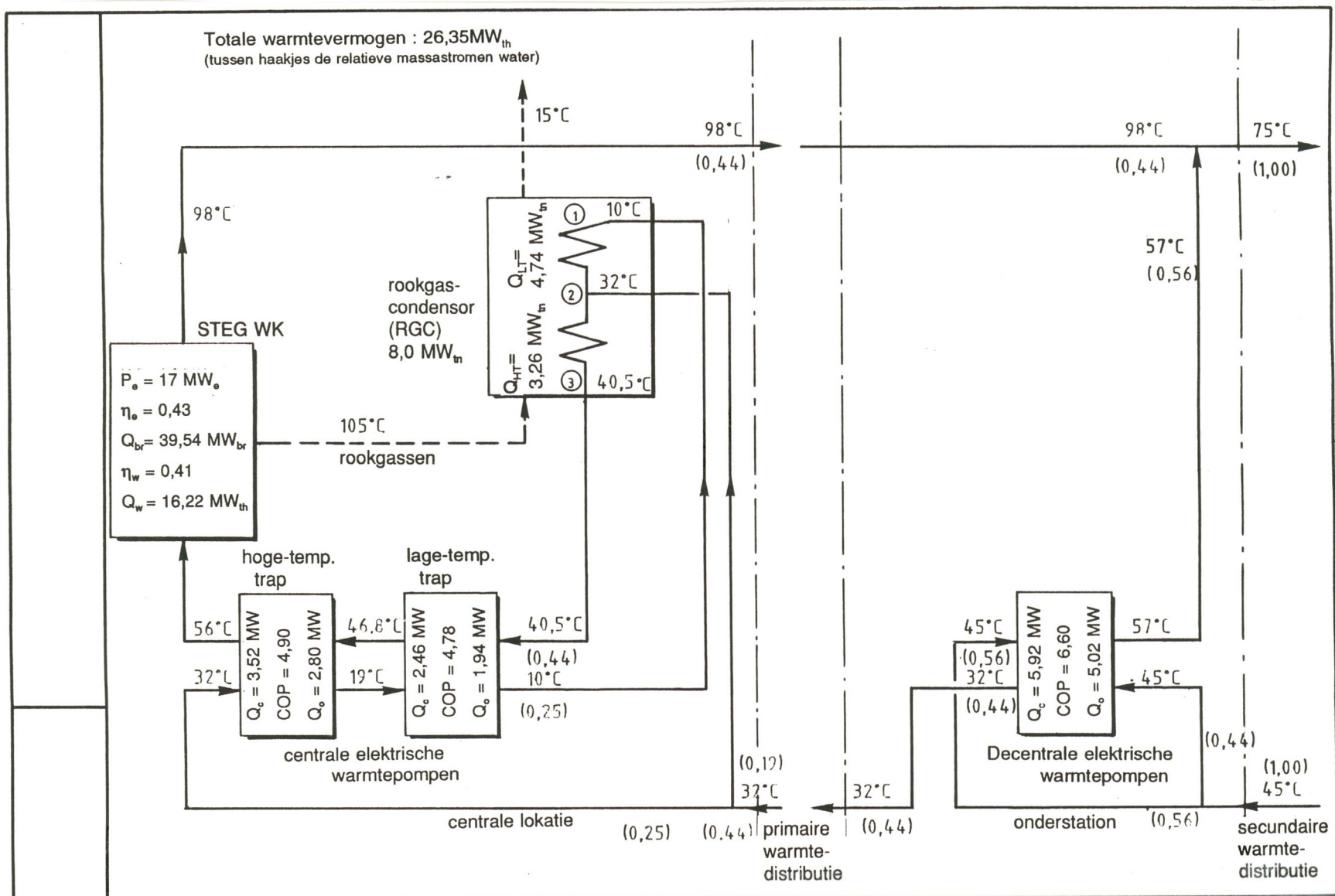
De decentrale warmtepompen produceren warmte op een temperatuurniveau (58 °C) dat beneden de aanvoertemperatuur van het secundair warmtedistributiesysteem ligt (75 °C). De hogere aanvoertemperatuur wordt bereikt door menging met de hogere temperatuur waterstroom (98 °C) afkomstig van het warmte/kracht proces. Op deze wijze wordt bereikt dat ondanks de voor stadsverwarming gebruikelijke (relatief hoge) aanvoertemperaturen, de temperatuurslift toch relatief laag blijft. Dit verklaart de relatief hoge COP-waarde van de decentrale warmtepompen (meer dan 6). Bij de centrale warmtepompen vindt een sterkere afkoeling van de retourwaterstroom plaats (noodzakelijk voor een maximale warmteterugwinning uit de rookgassen). Mede door de relatief lage warmteafgifte-temperatuur (onderste deel van het opwarmingstraject) is de COP-waarde echter toch nog relatief hoog (4,75).

Voordelen als gevolg van de toevoeging van warmtepompen

In het kader van deze 'aanloop'-beschrijving worden de verwachte voordelen puntsgewijs en slechts in het kort aangegeven.

- *Verhoogde brandstofbesparingen en hiermee samenhangende emissiereducties*

Bij de aangegeven COP-waarden zijn de specifieke brandstofbesparingen van elektrische warmtepompen vergelijkbaar met die voor warmte/kracht koppeling. Een verdere verbetering treedt op bij beschouwing van de brandstofbesparingen in een macro-economische context (nader toegelicht in het volgende hoofdstuk).



Figuur 1 Vereenvoudigd processchema stadsverwarming met STEG WKK en centrale en decentrale elektrische warmtepompen

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

Van mogelijk nog groter belang is dat in een lange-termijn perspectief de toepasingsmogelijkheden van warmte/kracht koppeling beperkt zullen worden door de gelimiteerde inpasbaarheid van de bijkomende elektriciteitsproductie in de totale (openbare) elektriciteitsvoorziening. Toevoeging van elektrische warmtepompen impliceert zowel een verhoging van brandstofbesparing per eenheid warmte/kracht capaciteit als een verhoging van de totale besparingen bij stadsverwarming.

— *Verhoogde brandstofkostenbesparingen*

De brandstofkostenbesparingen zijn tenminste evenredig met de bovengenoemde brandstofbesparing. Een verdere verhoging treedt op wanneer rekening wordt gehouden met 'achtergrond' elektriciteitsopwekking door middel van basislast elektriciteitscentrales met lage brandstofkosten (kolen, uranium). Dit impliceert lagere kWh-kosten die tot verlaging van de specifieke brandstofkostenbesparingen van warmte/kracht koppeling en verhoging van de specifieke brandstofkostenbesparingen van elektrische warmtepompen leiden.

— *Mogelijk lagere investerings- en onderhoudskosten*

Deze mogelijke kostenverlaging wordt bepaald door een combinatie van gunstige en ongunstige factoren.

Gunstig zijn:

- lagere kosten van de primaire warmtedistributieleidingen; dit is een gevolg van de verlaging van de retourtemperatuur, wat resulteert in een verkleining van de leidingdiameters en een vermindering van de isolatiebehoefte van de retourleidingen;
- kleinere dus goedkopere warmtebuffers; dit is met name een gevolg van de vermindering van warmte/kracht capaciteit (de verkleining is echter meer dan evenredig met de vermindering van warmte/kracht capaciteit);
- mogelijkheid om de warmtepompkosten deels af te schrijven op een koelfunctie; voor de decentrale warmtepompen betreft dit vooral de gebruikmaking voor airconditioning doeleinden; voor de centrale warmtepompen bestaat hiernaast een mogelijke gebruikmaking voor koeling van de inlaatlucht naar de gasturbine van de STEG installatie (vermogensvergroting in de zomer).

Ongunstig zijn:

- verkleining van het STEG vermogen gaat in het algemeen gepaard met een verhoging van de specifieke investeringen en een verlaging van het elektrisch rendement van de STEG WK installatie;
- bij een hoge waardering van het elektrisch vermogen van de warmte/krachtinstallatie kunnen de netto specifieke investerings- en onderhoudskosten die aan de warmte-opwekkingsfunctie zijn toe te schrijven (aanzienlijk) lager uitvallen dan de specifieke kosten van de elektrische warmtepompen inclusief de bijbehorende kosten van de rookgascondensor.

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

- *Gunstiger afstemming op de ontwikkeling van de warmtevraag van een stadsverwarmingsproject*

Dit betreft met name nieuwbouwprojecten waarbij de groei van de warmtevraag (gekoppeld aan het bouwtempo voor het totale voorzieningsgebied) zich over vele jaren kan uitstrekken.

Het voorgestelde systeemconcept biedt de mogelijkheid om de kleinere STEG WK installatie in een eerder stadium te installeren, wat naast kostenvoordelen ook een toename van brandstofbesparingen en emissiereducties impliceert (eenmalig over de looptijd van het project). De kostenvoordelen met betrekking tot de primaire warmtedistributieleidingen komen reeds bij aanvang van het project aan de orde.

Bovendien bestaat in principe de mogelijkheid om indien de geplande warmtevraag niet wordt gehaald, de installatie van de elektrische warmtepompen geheel achterwege te laten. Dit kan leiden tot energiebesparings- en kostenvoordelen die zich jaarlijks voordoen over de gehele looptijd van het stadsverwarmingsproject.

4 Definitie vergelijkingsmodel

Een vergelijking wordt gemaakt tussen twee opties voor basislast-warmtevoorziening bij stadsverwarming. In het ene geval geschiedt dit uitsluitend door middel van een STEG WK-installatie, in het andere geval door middel van een combinatie van een (kleinere) STEG WK-installatie en zowel centrale als decentrale elektrische warmtepompen. In beide gevallen is het totale basislastvermogen gelijk.

De karakteristieken van het warmte-afname gebied zijn in beide gevallen gelijk. Eenvoudigheidshalve wordt verondersteld dat dit gebied uitsluitend bestaat uit goed-geïsoleerde ééngezinswoningen (of hieraan gelijk te stellen woningequivalenten). Uitgaand van de gekozen installatiecapaciteiten is het aantal (equivalente) wooneenheden gesteld op ruim 13.000.

De jaarbelastingduurkromme die wordt aangehouden voor het bepalen van de jaarlijks door warmte/kracht en warmtepompinstallaties te leveren warmtehoeveelheden is aangegeven in figuur 2. Deze kromme is als representatief beschouwd voor een stadsverwarmingssysteem met voldoende warmtebuffercapaciteit om de warmtebelasting te egaliseren over iedere week in het jaar. De in de figuur aangegeven oppervlakken zijn een maat voor de door de betreffende warmteproductie-installaties geproduceerde warmtehoeveelheden. Naast de netto warmtebehoefte van de woningen betreft dit ook de warmteverliezen van het warmtedistributiesysteem.

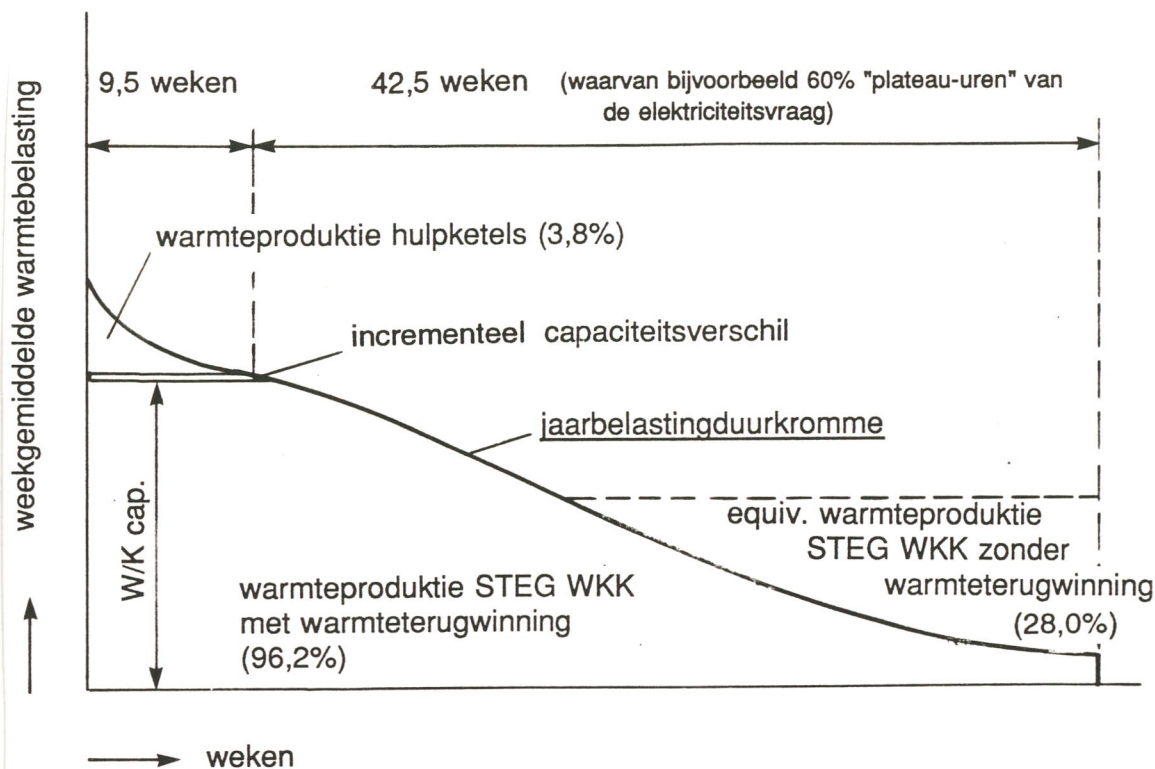
De (elektrische) vermogens van de STEG WK-installaties bedragen 17 MW_e en 29 MW_e voor de opties met en zonder de combinatie met elektrische warmtepompen. Bepalend voor de keuze van dit vermogensniveau is de aansluiting op in de praktijk beschikbare gasturbine-installaties (LM1600 en LM2500 gasturbines). De hiermee overeenkomende waarde van het totale warmtevermogen (26,35 MW_{th}) correspondeert bij een basislastvermogen van 2 kW_{th} per woning met het eerder aangegeven aantal van ruim 13.000 woningen. Op basis van de aangegeven jaarbelastingduurkromme en 15% warmtedistributieverliezen bedraagt de netto warmtebehoefte per woning 31,5 GJ per jaar.

Voor de bepaling van de vermogens en COP's van de centrale en decentrale warmtepompen is uitgegaan van een secundair warmtedistributiesysteem met een aanvoertemperatuur van 75 °C en een retourtemperatuur van 45 °C. Deze keuze is met name ingegeven door de mogelijkheid van volledige tapwateropwarming en ruimteverwarming door middel van relatief goedkope (licht overgedimensioneerde) radiatoren. Voor het primaire distributienet is uitgegaan van een aanvoertemperatuur van 98 °C. Hierbij wordt gedacht aan een direct warmtedistributiesysteem met een aanvoertemperatuur die is afgestemd op warmtelevering uit een warmtebuffer bij atmosferische druk. Voor de bepaling van de restwarmte in de rookgassen wordt uitgegaan van een rookgastemperatuur van 105 °C (bij uitlaat van de STEG WK).

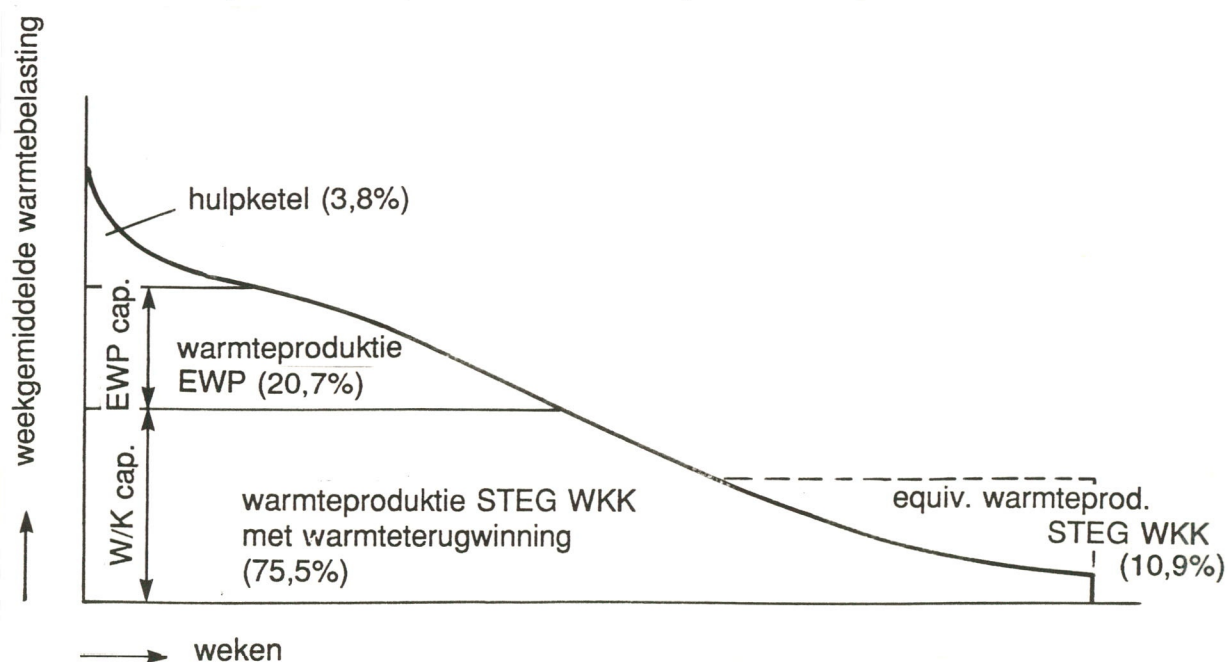
Voor wat betreft het warmtedistributiesysteem verschillen de te vergelijken systemen uitsluitend met betrekking tot de primaire distributieleidingen en de eventueel aanwezige hoofdtransportleidingen. Bij toepassing van decentrale warmtepompen leidt de hierdoor veroorzaakte verlaging van de retourtemperatuur tot een verlaging van de leidingkosten.

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

tussen haakjes het percentage van de totaal gevraagde warmteproductie



Figuur 2a Warmteproductiehoeveelheden bij stadverwarming met alleen STEG WKK



Figuur 2b Warmteproductiehoeveelheden bij stadverwarming met STEG WKK en elektrische warmtepompen (EWP)

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

De berekeningen zijn gericht op een bepaling van de verschillen in energiebesparingen, emissiereducties en kosten van de twee opties. Deze bepaling geschiedt ten opzichte van referenties waarin uitsluitend de voor de vergelijking van belang zijnde aspecten in beschouwing worden genomen. Voor de bepaling van de brandstofbesparingen en emissiereducties wordt hiervoor warmte-opwekking door middel van gasketels per individuele woning als referentie gekozen. Voor de bepaling van verschillen in brandstofkosten wordt echter warmte-opwekking door middel van de centrale hulpketelinstallaties als referentie genomen. Dit heeft het voordeel dat met slechts één gasprijs kan worden gerekend en geen acht hoeft te worden geslagen op het effect van verschillen in het gastarief voor groot- en kleinverbruik.

Dit laatste houdt ook verband met de uitvoering van de vergelijkingen in een macro-economische context. Het belang van deze grondslag voor de vergelijkingsuitkomsten rechtvaardigt een uitgebreide toelichting die separaat wordt gegeven in het volgende hoofdstuk.

5 Macro-economische randvoorwaarden

Uitvoering van de evaluatie in een macro-economische context betreft met name de waardering van de 'achtergrond' elektriciteitsopwekking door de openbare elektriciteitsvoorziening. De achtergrond elektriciteitsvoorziening betreft het deel van de openbare elektriciteitsvoorziening dat wordt beïnvloed door de elektriciteitsproductie bij warmte/kracht koppeling en het elektriciteitsverbruik van elektrische warmtepompen.

Kenmerkend voor de macro-economische benadering is dat deze waardering niet plaats vindt overeenkomstig bestaande tariefstructuren maar wordt gebaseerd op vermeden of gemaakte kosten voor de openbare elektriciteitsvoorziening.

In het volgende wordt separaat ingegaan op de consequenties van deze randvoorwaarden voor warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen. Hieraan voorafgaand wordt eerst ingegaan op de brandstofsoort die hierbij in beschouwing wordt genomen.

— *Aardgas als enige brandstofsoort*

Ter beperking van de omvang van deze studie wordt verondersteld dat de achtergrond elektriciteitsopwekking uitsluitend gasgestookte elektriciteitscentrales betreft. Eenvoudigheidshalve wordt ook verondersteld dat het aardgastarief voor warmte/krachtinstallaties en elektriciteitscentrales gelijk zijn. Zoals eerder opgemerkt speelt het verschil tussen dit groot- en klein-verbruikerstarief geen rol in deze studie.

— *Waardering van elektriciteitsopwekking bij warmte/kracht koppeling*

In het kader van de macro-economische vergelijkingsgrondslag wordt het elektrisch vermogen van (geplande) warmte/kracht capaciteit beschouwd als vervanging voor een gelijk vermogensdeel van een (geplande) 250 MW_e STEG elektriciteitscentrale. Deze 'vermeden' capaciteit zou typisch dienen voor elektriciteitsopwekking gedurende hoofdzakelijk de plateau-uren van de landelijke elektriciteitsvraag. Deze vraag treedt echter ook op gedurende de zomermaanden wanneer de ruimteverwarmingsbehoefte zeer gering is. Indien de warmte/krachtinstallatie ook in deze elektriciteitsbehoefte voorziet dan impliceert dit het bedrijf van deze installatie zonder warmteterugwinning.

De consequenties van een dergelijke macro-economische beschouwingswijze zijn met name de volgende.

- De brandstofbesparing van warmte/krachtkoppeling bij bedrijf met warmteterugwinning wordt bepaald in vergelijking met separate elektriciteitsopwekking door middel van de (vermeden) 250 MW_e STEG elektriciteitscentrale (figuur 3.1a). Het rendement van deze centrale is aanzienlijk hoger dan het gemiddelde rendement van de openbare elektriciteitsopwekking.

- Bij bedrijf van de warmte/krachtinstallatie zonder warmteterugwinning zal het rendement van elektriciteitsopwekking in het algemeen lager zijn dan dat van de vermeden 250 MW_e STEG E-centrale. Dit impliceert een meerverbruik aan brandstof (figuur 3.1b) die (in een macro-economische context) in mindering dient te worden gebracht op de brandstofbesparing bij bedrijf met warmteterugwinning. De netto brandstofbesparing zal afhankelijk zijn van de verhouding tussen de bedrijfstijd met en zonder warmteterugwinning. Zoals in figuur 2a (indicatief) aangegeven voor een marginaal capaciteitsverschil, is dit afhankelijk van zowel de jaarbelastingduurkromme van de warmtebehoefte als het aandeel van de tijd dat de vermeden STEG E-centrale buiten het stookseizoen in bedrijf zou zijn geweest.
 - De netto brandstofkostenbesparing is op basis van de keuze van één aardgas-tarief evenredig met de netto brandstofbesparing.
 - Het vermogens- en onderhoudskosten aandeel in de elektriciteitswaardering is overeenkomstig de vermeden investerings- en (vaste) onderhoudskosten van een 250 MW_e STEG E-centrale.
- *Waardering van elektriciteit voor warmtepompaandrijving*

Een belangrijk aspect bij het waarderen van elektriciteit voor warmtepompaandrijving in een macro-economische context is de mate waarin rekening wordt gehouden met het voordeel van de onvoorwaardelijke afschakelbaarheid van de warmtepompen. Deze afschakelbaarheid (in principe voor onbepaalde tijd) is mogelijk doordat de warmteleverende functie van de warmtepomp kan worden overgenomen door de hulpketelinstallaties.

Bij een extreem (voor de warmtepomptoepassing gunstige) interpretatie van dit voordeel zou kunnen worden gesteld dat in het geheel geen rekening hoeft te worden gehouden met een investerings- en onderhoudskostaandeel in de waardering van dit elektriciteitsverbruik. Dit standpunt zou kunnen worden verdedigd door de mogelijkheid om de aanwezigheid van elektrische warmtepompen buiten beschouwing te laten bij het bepalen van de samenstelling van het opwekkingspark van de openbare elektriciteitsvoorziening. In de zeer zeldzame (calamiteits-)gevallen dat een beroep moet worden gedaan op het reserve vermogen van de openbare elektriciteitsopwekking zouden de warmtepompen eenvoudigweg kunnen worden uitgeschakeld.

Voor wat betreft het rendement van elektriciteitsopwekking dient bij bovenstaande beschouwingwijze echter wel te worden gerekend met een (gewogen) gemiddelde van het rendement voor marginale elektriciteitsopwekking gedurende de uren dat de warmtepompen in bedrijf zijn.

Een alternatieve (voor de kosten van de warmtepomptoepassing minder gunstige) interpretatie behelst het in rekening brengen van slechts een deel van de vermogens- en (vaste) onderhoudskosten van een 250 MW_e STEG E-centrale. Dit deel zou min of meer overeen dienen te komen met het aandeel van een jaar dat de warmtepomp in bedrijf is.

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

Deze benadering houdt impliciet in dat de investerings- en onderhoudskosten waardering in de zomer dezelfde is als in de winter. Wanneer geen rekening zou worden gehouden met de afschakelbaarheid van de elektrische warmtepompen dan zou deze interpretatie als te gunstig voor warmtepomptoepassing kunnen worden beschouwd (de landelijke piekbelasting valt in Nederland nog steeds in de winter). Wanneer echter wél met dit voordeel rekening wordt gehouden, dan lijkt de veronderstelling echter duidelijk gerechtvaardigd.

Voor wat betreft het rendement van elektriciteitsopwekking kan bij deze beschouwingwijze worden gerekend met het (hogere) rendement van de vermeden 250 MW_e STEG E-centrale.

Voor deze studie is uitgegaan van de laatste (voor de kosten van de warmtepomptoepassing dus minder gunstige) interpretatie. Opgemerkt wordt dat hiermee het laatste woord over dit onderwerp nog niet is gezegd. In feite is ook bij warmte/kracht koppeling sprake van een zekere 'afschakelbaarheid' waarvan de voordelen nog niet in rekening zijn gebracht. Dit betreft het verschil in elektrisch vermogen voor de bedrijfssituaties met en zonder warmteterugwinning. Op basis van de voor deze studie gekozen uitgangsgeschiedenis gaat het hierbij echter om een vermogensverschil dat aanzienlijk kleiner is dan het totale elektrische aandrijfvermogen van de warmtepompen.

Tenslotte dient nog te worden vermeld dat de geldswaarde van de op deze wijze bepaalde investerings- en onderhoudskostenwaardering (in deze studie 58 f/a/kW_e) dicht overeenkomt met een kwart van de vermogensvergoeding volgens het landelijk basistarief. Dit in verband met een suggestie om het voordeel van afschakelbaarheid op deze basis te 'belonen'.

6 Berekenings- en vergelijkingsuitkomsten

De belangrijkste berekeningsuitkomsten zijn weergegeven in de onderstaande tabel 1.

Tabel 1 Belangrijkste berekeningsuitkomsten

	Referentie	Eenheden	Alleen STEG WKK	STEG WKK + EWP	Verbetering door EWP (%)
Brandstofbesparing	1)	10 ⁶ m ³ /a	6,122	6,469	5,6
CO ₂ emissiereductie	1)	ton/a	10.848	11.453	5,6
NO _x emissiereductie	1)	kg/a	6.732	7.214	7,2
Brandstofkosten besparing	2)	kf/a	1.908	1.982	3,9
Netto meerinvestering	2)	kf	12.769	13.847	- 8,4 (ongunstiger)
Jaarkostenverlaging	2)	kf/a	380	394	3,7

1) warmte-opwekking per woning

2) stadsverwarming met alleen ketelinstallaties (theoretische referentie)

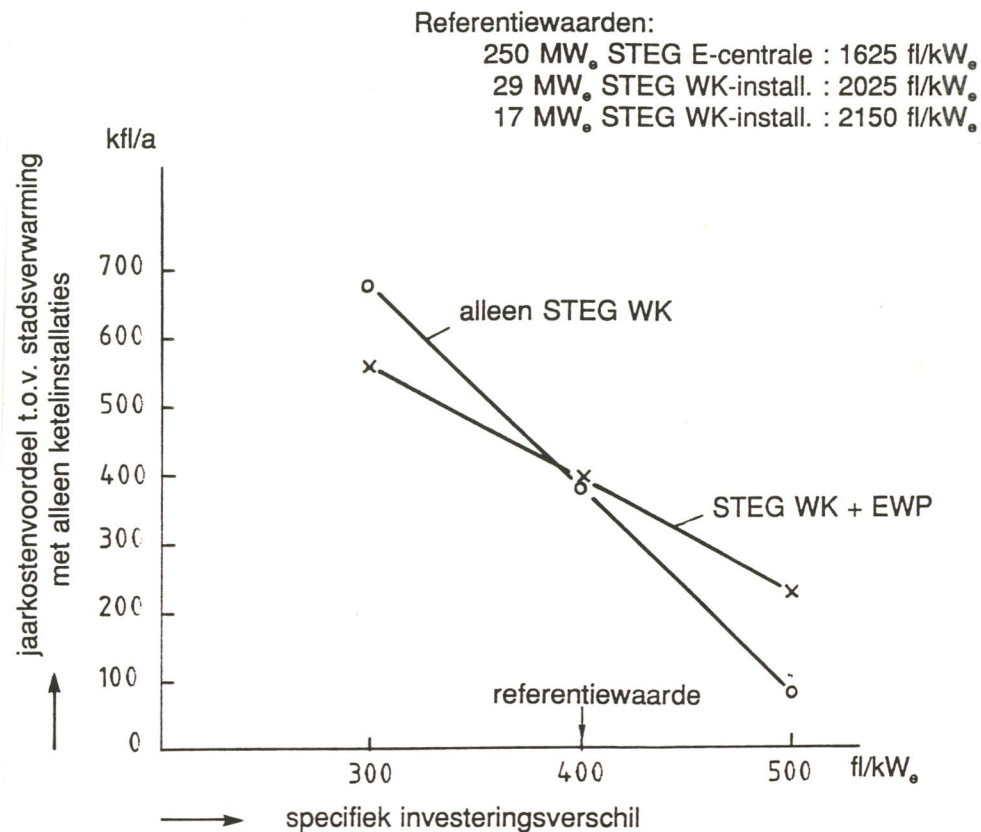
Op basis van de gekozen gegevenswaarden blijkt de combinatie van STEG WKK en elektrische warmtepompen tot een marginale verbetering van de brandstofbesparingen en CO₂ emissiereductie (5,6%) en tot een nog iets hogere reductie van de NO_x emissies (7,2%) te leiden. Het werkelijke belang van deze uitkomsten ligt echter in het feit dat deze verbeteringen tenminste vergelijkbaar zijn met die van warmte/kracht koppeling en dat dit van grote betekenis is voor een toekomstige situatie waarin de penetratie van warmte/kracht aan een limiet is gebonden.

Ook met betrekking tot de brandstofkostenbesparingen is sprake van een lichte verbetering (overeenkomstig de veronderstellingen ten aanzien van de brandstofprijs is deze gelijk aan de 5,6% voor de brandstofbesparing). Uit [2] blijkt echter dat deze verbetering aanzienlijk kan toenemen wanneer wordt uitgegaan van achtergrond elektriciteitsproductie dat ook kolengestookte elektriciteitscentrales omvat.

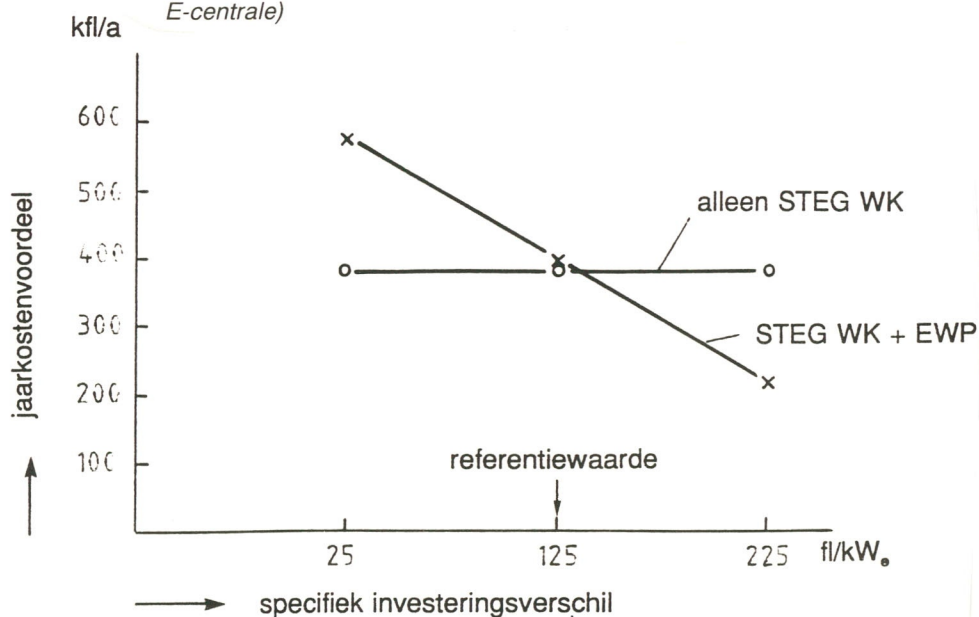
Ten aanzien van meerinvesteringen en jaarkosten blijken de verschillen ook betrekkelijk klein te zijn. De netto meerinvesteringen nemen toe met 8,4% en de netto jaarkosten worden verlaagd met 3,7%. Deze uitkomsten zijn echter in veel sterkere mate afhankelijk van de gekozen waarden van de specifieke investeringen.

Dit betreft met name de verschillen in specifieke investeringen van STEG WK installaties ten opzichte van de 250 MW_e STEG elektriciteitscentrale en van de 17 MW_e ten opzichte van de 29,3 MW_e STEG WK installatie. Dit wordt geïllustreerd door de resultaten van een gevoeligheidsanalyse in figuur 3.

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport



Figuur 3a Gevoeligheid voor specifieke investeringsverschillen tussen STEG WK-installaties en 250 MW_e STEG E-centrale (door verandering in specifieke investeringen voor E-centrale)



Figuur 3b Gevoeligheid voor specifieke investeringsverschillen tussen 29 MW_e en 17 MW_e STEG WK-installaties (door verandering in specifieke investeringen van 17 MW_e-installatie)

Figuur 3a toont het effect van veranderingen in de specifieke investeringen voor de 250 MW_e STEG elektriciteitscentrale. Naarmate de waarde hiervan dichter ligt bij die van de warmte/krachtinstallaties zal de economie van warmte/kracht koppeling gunstiger worden ten opzichte van die van warmtepompen (dus ook de economie van de combinatie van warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen wordt ongunstiger).

Figuur 3b toont het effect van veranderingen in de specifieke investeringen van 17 MW_e ten opzichte van 29,3 MW_e STEG WK installaties. Het zal duidelijk zijn dat naarmate dit verschil groter is, de economie van de combinatie relatief slechter wordt.

Het bovenstaande betoog suggereert dat voor wat betreft de meerinvesteringen en de jaarkosten de voor de warmtepomptoeppassing relatief gunstige vergelijkingssuitkomsten gemakkelijk in het tegendeel zouden kunnen veranderen. Dit wordt echter als onwaarschijnlijk worden beschouwd, met name omdat naast de eerder genoemde verbeteringsmogelijkheid met betrekking tot de brandstofkostenbesparingen nog de volgende voor de warmtepomptoeppassing gunstige aspecten voorlopig buiten beschouwing zijn gelaten.

- Verlaging van de aanloopkosten van het stadsverwarmingsproject doordat installatie van de kleinere STEG WK installatie in een eerder stadium economisch wordt (naast kosten voordelen betekent dit ook een toename van brandstofbesparingen en emissiereducties). Een belangrijk additioneel voordeel is dat wanneer de uiteindelijke warmtevraag lager is dan gepland, de toevoeging van elektrische warmtepompen eenvoudigweg achterwege kan worden gelaten. Dit kan leiden tot een aanzienlijke kostenreductie over de levensduur van het stadsverwarmingsproject.
- De kosten van de primaire warmte-distributieleidingen (en daarmee de kostenreductie bij verlaging van de retourtemperatuur) kunnen belangrijk hoger zijn dan verondersteld voor deze studie. Dat deze kosten hoger kunnen zijn valt af te leiden uit berekeningsformules uit [11].
- Gebruikmaking van de warmtepompen voor koeldoeleinden kan tot belangrijke kostenreducties leiden. Zoals eerder gesteld hoeft dit niet alleen te gelden voor gebruik voor airconditioning doeleinden maar ook voor koeling van de inlaatlucht naar de gasturbines van de STEG WK-installaties (met als resultaat een verhoging van het beschikbare elektrische vermogen, zie ook [12]).

7 Conclusies en aanbevelingen

De berekeningsuitkomsten geven aan dat voor wat betreft brandstofbesparingen en emissiereducties de combinatie met elektrische warmtepompen een verbetering geeft van circa 6% ten opzichte van uitsluitend warmte/kracht koppeling. Belangrijker dan de omvang van deze verbetering is echter dat dit gepaard gaat met een aanzienlijk vermindering van het warmte/kracht vermogen (voor dit voorbeeld een reductie van 38%). Dit is van groot belang in een lange-termijn perspectief wanneer de maximale omvang van het warmte/kracht vermogen wordt beperkt door de gelimiteerde inpasbaarheid in de landelijke elektriciteitsvoorziening.

Voor wat betreft de kosten blijkt op basis van de gekozen uitgangsgegevens de combinatie met warmtepompen tot iets hogere netto investeringen en iets lagere jaarkosten te leiden. Deze uitkomsten zijn echter gevoelig voor de mate waarin de specifieke investeringen (per kW_e) van de opwekkingsinstallaties toenemen als gevolg van schaalvergroting en de combinatie met warmte-opwekking. Hierbij gaat het met name om de specifieke investeringsverschillen tussen (relatief kleinschalige) STEG warmte/krachtinstallaties en grote (250 MW_e) STEG elektriciteitscentrales en om het specifieke investeringsverschil tussen bijvoorbeeld een 17 MW_e en een wat grotere 29 MW_e STEG warmte/krachtinstallatie.

Deze gevoeligheid maakt het echter niet waarschijnlijk dat een eventueel noodzakelijke bijstelling van de gekozen investeringswaarden tot een belangrijk kostennadeel zou leiden (tenminste niet bij beschouwing in een macro-economische context). Dit hangt samen met de kostenvoordelen als gevolg van een aantal aspecten die in het kader van deze studie nog niet zijn gekwantificeerd. Dit betreft met name de volgende aspecten:

- Een verlaging van de aanloopkosten van het stadsverwarmingsproject doordat de installatie van de kleinere STEG WK installatie in een vroeger stadium (van de bouw van het warmte-afnamegebied) economisch wordt. Een belangrijk additioneel voordeel is dat wanneer de uiteindelijke warmtevraag lager uitvalt dan gepland, de toevoeging van elektrische warmtepompen eenvoudigweg achterwege kan worden gelaten. Dit impliceert een belangrijk kostenvoordeel over de gehele looptijd van het stadsverwarmingsproject.
- Een verhoging van de brandstofkostenbesparingen wanneer de 'achtergrond' elektriciteitsopwekking niet alleen gasgestookte maar ook kolengestookte centrales omvat. Bij een kolenprijs die per GJ_{br} belangrijk lager is dan de gasprijs, zal de brandstofkostenbesparing van elektrische warmtepompen toenemen en die van warmte/kracht koppeling (in veel sterkere mate) afnemen.
- Een hoger kostenniveau van het primaire warmtedistributienet leidt tot grotere kostenreducties als gevolg van een vermindering van de retourtemperatuur van dit net.
- Gebruikmaking van de warmtepompen voor koeldoeleinden kan leiden tot een belangrijke reductie van de aan warmtevoorziening toe te rekenen kosten. Dit betreft zowel het gebruik voor airconditioning koeldoeleinden als voor koeling van de inlaatlucht van de gasturbines van de STEG WK-installaties (resultierend in een verhoging van het beschikbare elektrische vermogen in de zomer).

Op grond van het totaal van deze overwegingen wordt geconcludeerd dat het duidelijk wenselijk is om een vervolg te geven aan deze voorstudie. Dit betreft met name een vervolgstudie gericht op het kwantificeren van bovenstaande verbeteringsmogelijkheden.

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

lijkheden (in samenhang met een nadere verificatie van de voor deze studie gekozen gegevenswaarden).

Kort samengevat betekent dit een bepaling van de brandstofbesparingen, emissie-reducties en kosten over de looptijd van een stadsverwarmingsproject, waarbij met name de effecten van de volgende invloedsfactoren in rekening worden gebracht:

- de (kosten-)ontwikkelingen tijdens de aanloopfase van een stadsverwarmingsproject;
- een op de combinatie met warmtepompen toegesneden optimalisatie van het warmtedistributiesysteem (bij voorkeur in aansluiting op een haalbaarheidsstudie voor een specifiek demonstratieproject);
- het betrekken van kolengestookte centrales in de ‘achtergrond’ elektriciteitsvoorziening;
- eventuele bijstellingen van de voor deze voorstudie gekozen gegevenswaarden (onder andere de specifieke investeringen van WK-installaties en van centrale en decentrale warmtepompen);
- gebruikmaking van decentrale warmtepompen voor airconditioning-koeling en centrale warmtepompen voor inlaatluchtcooling van de STEG WK-installatie.

Speciale aandacht dient hierbij te worden besteed aan de keuze van de (economische) randvoorwaarden voor de berekeningen. Dit geldt met name voor de consequenties voor de waardering van de vermogens- en onderhoudskosten van (vermeden) elektrisch vermogen. Tegenover de voor deze voorstudie gekozen macro-economische beschouwingsgrondslag staat het in rekening brengen van vermogensvergoedingen overeenkomstig de bestaande tariefstructuren. Het laatste is van voordeel voor de economie van warmte/kracht koppeling en van nadeel voor de combinatie met elektrische warmtepompen. Het lijkt redelijk te veronderstellen dat hierin verandering zal moeten komen, vooral omdat vanuit de visie van een qua kosten optimale elektriciteitsvoorziening het stadium van een teveel aan gepland warmte/kracht vermogen nu al zou kunnen zijn bereikt.

Het bovenstaande betreft een onderzoek in het verlengde van de reeds uitgevoerde voorstudie. Een toegevoegde waarde wordt verkregen door hiernaast een systeem-optimalisatiestudie uit te voeren die bij voorkeur is afgestemd op een concreet (demonstratie)project. Hierbij gaat het om een bepaling van onder andere de volgende systeemkenmerken:

- de verhouding tussen centraal en decentraal warmtepompvermogen (mede in het kader van een onderzoek naar de mogelijkheid om de aanvoer- en retourtemperaturen van het secundair warmtedistributienet te verhogen tot waarden die voor conventionele 90/70 radiatorenverwarming zijn vereist);
- de locatie van decentrale warmtepompen binnen het verzorgingsgebied (bij onderstations met of zonder hulpketel, eventueel met warmtelevering buiten het verzorgingsgebied van het betreffende onderstation, in de buurt van utiliteitsgebouwen met een koelbehoefte, etc.);
- regeling van de inzet van warmte/kracht- en warmtepomp-installaties (in relatie tot buffercapaciteit en rekening houdend met plateau- en laagtarief-uren van de elektriciteitsvoorziening, opstelling van een hiervoor geëigend rekenmodel, etc.).

Tenslotte wordt nog gewezen op de mogelijkheid om de uitkomsten van deze vervolgstudies mede te gebruiken voor het onderbouwen van perspectievolle (nieuwe) apparatuur-ontwikkelingen. Als voorbeeld wordt gedacht aan speciaal voor deze vorm van

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

stadsverwarming gemodificeerde warmtepompen (geschikt voor zowel warmte- als koude-opwekking). Hierbij is dan sprake van de aanpassing van in principe reeds bestaande apparatuur. Als voorbeeld van nieuwe apparatuur-ontwikkelingen wordt gedacht aan ijsslurry producerende installaties waarmee de kosten van koude-transport en koude-opslag kunnen worden verlaagd.

8 Literatuur

- [1] P.J. Collet, TNO(IMET) notities no. 09342/112325 van 6 september 1993 en no. 010207/112325 van 1 oktober 1993
- [2] P.J. Collet, Combining cogeneration and electric heat pumps for district heating, TNO(IMET) report no 94-019, January 1994
- [3] Interimrapport van de Beleidsadviesgroep Stadsverwarming (eind 1976, begin 1977)
- [4] J. Lindeman, Uitwerking van de aanvullende VESTIN-enquête STADSVERWARMING 1989, KEMA E&C, Arnhem, september 1991
- [5] H.Bresser, W. van der Veen, Vergelijking van centrale verwarming met stadsverwarming en kleinschalige warmtekoppeling, Lucht 94, VROM, Leidschendam, juli 1991
- [6] F.J. de Mandt, W. van der Veen, Actualisatie van milieukosten-effectiviteit van warmtekracht varianten, KEMA-IES, Arnhem, 23 september 1992
- [7] KEMA, mondelinge en schriftelijke communicatie
- [8] Novem, informatie uit een rapport van de KEMA, (WPB-242-83)
- [9] EnergieNed, mondelinge communicatie
- [10] Projectbureau Warmte/Kracht, Standaardisatie W/K-STEG-eenheden tot 20 MW, Driebergen, augustus 1992
- [11] F.J. Rooijers et al, Grootschalige warmtelevering in de bestaande bouw, CE, Delft, maart 1993
- [12] I.S. Ondryas et al, Options in Gast Turbine Power Augmentation Using Inlet Air Chilling, ASME-paper 90-GT-250, Brussels, Belgium, June 11-14 1990.
- [13] Van Dijk heating, produktinformatie betreffende combi condensors, Bunnik, maart 1994
- [14] Algemene Energieraad, Advies over energiebesparing bij ruimteverwarming, AER, advies aan de Minister van Economische Zaken, november 1991
- [15] A.J. Horeman, Warmtebufferbedrijf, Themadag van de VESTIN over Technologische Ontwikkelingen Stadsverwarming, Arnhem, november 1991.

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

9 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever
Novem B.V.
Sittard

Namen en functies van de medewerkers
P.J. Collet

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed
—

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad
1 december 1993 - 29 april 1994

Ondertekening



P.J. Collet
onderzoekleider

Goedgekeurd door



F.M. v. Bergen
afdelingshoofd

Bijlage 1 Gegevenswaarden

1.1 Overzicht gegevenswaarden

Voor energieberekeningen

17 MW_e STEG WKK

– elektrisch vermogen	17 MW _e
– elektrisch rendement (met warmteterugwinning)	0.43
(zonder warmteterugwinning)	0.46
– parasitaire warmteverliezen	0.028
– luchtfactor	3.5
– rookgastemperatuur	105 °C
– watertemperatuur (uitgaand)	98 °C
– water/brandstof verhouding (voor NO _x -reductie)	0

29 MW_e STEG WKK

– elektrisch vermogen	27,5 MW _e
– elektrisch rendement (met warmteterugwinning)	0.442
(zonder warmteterugwinning)	0.472

(verder als voor de 17 MW_e STEG WKK)

Rookgascondensor

– kleinste water/rookgaszijdig temperatuursverschil	5 K
---	-----

Hulpketelcentrale

– rendement (op onderwaarde)	0.90
------------------------------	------

Elektrische warmtepompen

– Installatierendement (verhouding tussen bedrijfs-COP en Carnot-COP op basis van grootste verschil tussen condensor- en verdamper-watertemperaturen)	
– centrale elektrische warmtepompen	0.55
– decentrale elektrische warmtepompen	0.50

Referentie elektriciteitsopwekking

– Gedurende plateau-uren:	
rendement 250 MW _e STEG E-centrale	0.535
– Verhouding plateau-uren/daluren (per week)	0.6

Referentie warmte-opwekking

– Rendement HR-gasketel (per woning)	0.90
--------------------------------------	------

Warmtedistributiesysteem

– Primaire leidingsysteem	
– aanvoertemperatuur	98 °C
– warmteverliezen	0% (eenvoudigheidshalve)
– Secundaire leidingsysteem	

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

- aanvoertemperatuur 75 °C
- retourtemperatuur 45 °C
- warmteverliezen 15%

Voor emissieberekeningen

STEG WKK

- NO_x emissies 45 g/GJ_{br}

Hulpketels

- NO_x emissies 30 g/GJ_{br}

Referentie elektriciteitsopwekking

- 250 MW_e STEG E-centrale
NO_x emissies 45 g/GJ_{br}

HR-gasketels voor woningverwarming

- NO_x emissies 40 g/GJ_{br}

Aardgasverbranding

- CO₂-emissies 56 kg/GJ_{br}

Voor brandstofkostenberekeningen

Aardgasprijs

- grootverbruik (STEG E, STEG WKK, hulpketels) 22 ct/m³
(= 6,95 fl/GJ_{br})
- kleinverbruik (HR-gasketels) niet van toepassing

Voor kostenberekeningen

17 MW_e STEG WKK

- specifieke investeringen 2150 f/kW_e
- specifieke jaarlijkse onderhoudskosten 3,5% van de investering
- levensduur 25 jaren

29 MW_e STEG WKK

- specifieke investeringen 2025 f/kW_e
- specifieke jaarlijkse onderhoudskosten 3,5% van de investering
- levensduur 25 jaren

Referentie elektriciteitscentrale (250 MW_e STEG E)

- specifieke investeringen 1625 f/kW_e
- specifieke jaarlijkse onderhoudskosten 3,1% van de investering
- levensduur 25 jaren

Rookgascondensor (8,0 MW, minimum temperatuur verschil 5 K)

- specifieke investeringen 100 f/kW_{th}
- specifieke onderhoudskosten 3,5% van investering
- levensduur 20 jaren

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

Centrale elektrische warmtepompen

- specifieke investeringen 200 f/kW_{th}
- jaarlijkse onderhoudskosten 2% van investering
- levensduur 20 jaren

Decentrale elektrische warmtepompen

- specifieke investeringen 300 f/kW_{th}
- jaarlijkse onderhoudskosten 3% van investering
- levensduur 20 jaren

Warmtebuffers

- investeringen (3700 m³) kf 1050
- investeringen (2300 m³) kf 750
- jaarlijkse onderhoudskosten 2% van investering
- levensduur 25 jaren

Primaire warmtedistributie-leidingen

- Investeringsvergelijking (13072 woningen, 600 f/woning) kf 7.843
- jaarlijkse onderhoudskosten 2% van investering
- levensduur 25 jaren

Rentepercentage (reëel): 5%

1.2 Toelichting op de gegevenskeuze

De volgende toelichting betreft met name de gegevenskeuzen die voor de vergelijkingsuitkomsten van het meeste belang zijn.

1.2.1 Jaarbelastingduurkromme

De jaarbelastingduurkromme die voor deze studie is aangehouden is weergegeven in figuur 1.1. Deze kromme is (mede) ontleend aan [15] en wordt representatief verondersteld voor een stadsverwarmingssysteem met voldoende buffercapaciteit om de warmtebelasting te egaliseren over iedere week van het jaar. Ter illustratie van het verschil is tevens een jaarbelastingduurkromme op basis van uurbelastingen weergegeven [3].

Ter vergelijking zijn in figuur 1.1 ook de maandelijks gemiddelde belastingen overeenkomstig de standaard jaarbelastingkromme uit figuur 1 uit [4] weergegeven. De afwijkingen ten opzichte van de gekozen jaarbelastingduurkromme lijken redelijk verklaarbaar en zijn zeker acceptabel in relatie tot de voor deze studie beoogde doeleinden.

1.2.2 Specifieke investeringen en rendementen van 17 MW_e en 29 MW_e STEG WK's en van de referentie 250 MW_e STEG elektriciteitscentrale

Specifieke investeringen

De investerings- en onderhoudskosten die aan de warmteproducerende functie van warmte/kracht koppeling zijn toe te schrijven worden in hoofdzaak bepaald door het verschil in specifieke investeringen van de warmte/kracht installatie ten opzichte van die van de referentie elektriciteitscentrale. Hoe groter dit verschil des te ongunstiger voor de economie van warmte/kracht koppeling. Hiernaast is het voor deze studie ook van belang in welke mate dit verschil toeneemt met een verlaging van het vermogen van de warmte/kracht installatie.

In het kader van deze oriënterende studie kan op dit punt geen diepgaande analyse worden uitgevoerd en worden deze gegevens in hoofdzaak afgeleid van waarden die worden vermeld in de literatuur.

Hierbij doet zich echter het probleem voor dat niet altijd even duidelijk is wat in de bepaling van de kosten is meegenomen. Bovendien kan de aard van de bron en het tijdstip van publikatie een belangrijke rol spelen (wat in versterkte mate invloed heeft op kostenverschillen).

Dit komt bijvoorbeeld tot uitdrukking in de waarde die wordt toegekend aan de specifieke investeringen voor een 250 MW_e STEG elektriciteitscentrale. Tot voor kort werd hiervoor in de meeste literatuurbronnen een waarde van circa 1300 f/kW_e opgevoerd [6] [14]. In een recent schrijven van de KEMA [7] (waarbij wordt gerefereerd naar overleg met SEP) wordt een waarde van 1625 f/kW_e genoemd. Bij navraag bleek dat naast gestegen kosten voor het verkrijgen van rendementsverhogingen, deze kostenverhoging ook is toe te schrijven aan marktontwikkelingen met betrekking tot de prijs van gasturbines.

Dit laatste impliceert ook verhogingen ten opzichte van eerder gepubliceerde prijzen voor STEG WK installaties. Dit betreft de waarden die bijvoorbeeld zijn af te leiden uit een PWK rapport over industriële STEG WK installaties [10]. Voor een uitvoering met een 13,5 MW_e LM 1600 gasturbine wordt een investering van 34,5 Mf opgegeven. De stoomturbine werkt in dit geval echter met een tegendruk van 8 bar. Voor de stadsverwarmingstoepassing zou een extra lage-druk stoomturbine sectie benodigd zijn (met expansie tot bijvoorbeeld 0,16 bar wanneer efficiënt bedrijf zonder warmteterugwinning wordt verlangd). Wanneer voor de toevoeging van deze extra stoomturbine sectie een bedrag van 1,2 Mf wordt opgevoerd (voor de stoomturbine met generator en expansie van 60 tot 8 bar was een bedrag van 1 Mf aangegeven), dan leidt dit tot een totale investering van 35,7 Mf. Voor een (berekend) stoomturbine vermogen van 3,5 MW_e (totaal STEG vermogen is dan dus 17 MW_e) komt dit overeen met een specifieke investering van 2100 f/kW_e, een waarde die redelijk overeenkomt met 2050 f/kW_e die uit [8] kan worden afgeleid voor eenzelfde type STEG WK voor stadsverwarmingsdoeleinden.

Deze waarden dienen echter te worden vergeleken met 1828 f/kW_e voor de 250 MW_e STEG bij warmte/kracht bedrijf (impliciet een gevolg van een daling van het elektrisch rendement van 54% tot 48% bij volledige warmteterugwinning). Het verschil

van circa 15% lijkt nogal klein voor een vermogensverandering van 220 MW_e naar 17 MW_e. Het lijkt redelijk te veronderstellen dat dit wordt veroorzaakt door het niet in rekening brengen van het tijdseffect dat ook in dit geval van de kleine STEG WK's tot prijsverhogingen zou leiden.

Om een diepergaande analyse te vermijden is voor deze studie besloten om op enigszins arbitraire basis de specifieke investering voor de 17 MW_e STEG WK op 2150 f/kW_e te stellen en voor een 29 MW_e STEG WK op 2025 f/kW_e (dus een verschil van 125 f/kW_e). Ten opzichte van de 1625 f/kW_e voor een 250 MW_e elektriciteitscentrale is sprake van een verschil van 400 f/kW_e voor de 29 MW_e STEG WK. Vervolgens wordt door middel van een gevoeligheidsanalyse aangegeven wat het effect is van afwijkingen in deze twee verschilwaarden.

De jaarlijkse onderhoudskosten als percentage van de investering is voor de 250 MW_e STEG elektriciteitscentrale op 3,1% gesteld [7]. Voor de STEG WK installaties is een wat hoger percentage (3,5%) aangehouden.

Rendementen

De waarde van 53,5% als rendement van de 250 MW_e STEG elektriciteitscentrale is eveneens uit [7] afgeleid. Er is rekening gehouden met een reductie van 0,5% ter verdiskontering van de hogere transportverliezen ten opzichte van elektriciteitsopwekking door middel van de meer decentraal opgestelde warmte/kracht installaties.

Voor de 17 MW_e STEG WK wordt in principe uitgegaan van gegevens die gelden voor een STEG met een 13,5 MW_e LM1600 gasturbine. Hierover bestaat echter nog wat onzekerheid. In een PWK rapport wordt melding gemaakt van een elektrisch rendement van 35,9%, wat te hoog lijkt in vergelijking met 36,1% voor een 29 MW_e LM4000 en 38,7% voor een 40 MW_e LM6000 gasturbine (bij 5 °C buitenluchttemperatuur). Afhankelijk van een nadere verificatie wordt het elektrisch rendement voor de 13,5 MW_e LM1600 gasturbine op 34% en voor een circa 22 MW_e (LM2500?) gasturbine op 35,5% gesteld.

Ten aanzien van de rendements- en vermogensverhogingen als gevolg van de toevoeging van een stoomturbine kan ook niet zonder meer gebruik worden gemaakt van de gegevens uit het PWK rapport. In dit rapport gaat het om een industriële toepassing met een stoomturbine-tegendruk van 8 bar. Voor de stadsverwarmingstoepassing wordt een (tijdsgemiddelde) tegendruk van 1 bar verondersteld. De rendements- en vermogenswaarden van de STEG installaties zijn daarom berekend. Dit geschiedt op basis van de verder uit het PWK rapport ontleende bedrijfsgegevens (stoominlaatdruk 60 bar, stoominlaattemperatuur 350 °C, stoomturbine-rendement 70%), géén herverhitting van geëxpandeerde stoom en een veronderstelde rookgastemperatuur van 150 °C na de stoomketel. De elektrische rendementen komen hiermee op 43% voor een 17 MW_e en 44,2% voor een 29 MW_e STEG WK.

De waarde van het totale rendement (exclusief rookgascondensor) wordt in beide gevallen berekend op basis van een luchtfactor van 3,5, een rookgastemperatuur van 105 °C en parasitaire verliezen (generatorverlies, pompenergie, verbrandingsverlies, convectieve en stralings-warmteverliezen) die op 2,8% van de verbrandingsenergie van het aardgas worden gesteld.

De waarde van het elektrisch rendement onder bedrijfscondities zonder warmteterugwinning is berekend voor een stoomcondensatiedruk van 0,16 bar (condensatietemperatuur 55 °C). Het elektrisch rendement stijgt hierdoor tot 46% voor de 17 MW_e STEG en tot 47,2% voor de 29 MW_e STEG WK.

1.2.3 Rookgascondensor

De specifieke investeringen zijn voor de 8 MW_{th} rookgascondensor gesteld op 100 f/kW_{th}.

In figuur 1.2 zijn deze veronderstelde waarden getoond in relatie tot een aantal kostengegevens uit de praktijk [13]. Dit betreft specifieke kosten die ook zijn uitgedrukt in f/m² V.O. De gegevens hebben echter betrekking op rookgascondensoren met een aanzienlijk kleinere capaciteit. Er is daarom geëxtrapoleerd op basis van een schaal-exponent van -0,3. Zoals blijkt uit de figuur lijkt deze exponentwaarde bij extrapolatie aan de veilige kant.

Op basis van deze extrapolatie-exponent bedragen de specifieke kosten bij 8 MW_{th} capaciteit ruim 20 f/kW_{th}. Het overblijvend verschil van bijna 80 f/kW_{th} lijkt meer dan genoeg voor het verdiskonterende van de effecten van de additionele montagekosten en van een vergroting van het V.O. in verband met het relatief lage temperatuursverschil voor warmte-overdracht. Voor deze studie is de kleinste waarde van dit temperatuursverschil gesteld op 5K. Uit [13] blijkt dat de kleinste temperatuursverschillen voor de praktijkgevallen een factor 2 à 3 hoger zijn en dat het verhoudingsgetal voor het gemiddelde temperatuursverschil nog belangrijk hoger kan zijn.

1.2.4 Elektrische warmtepompen

De specifieke investeringen van de elektrische warmtepompen zijn gesteld op 200 f/kW_{th} voor de centrale en 300 f/kW_{th} voor de decentrale warmtepompen. In het eerste geval gaat het om vermogenswaarden van 2 à 3 MW_{th}, in het tweede geval dient de gemiddelde vermogenswaarde nog te worden vastgesteld. Om de gedachten te bepalen wordt voorlopig gedacht in termen van circa 0,5 MW_{th}. De genoemde waarden betreffen ruwe schattingen die (mede) zijn afgeleid van kostengegevens van soortgelijke (water/ water) koelmachines. Er is echter nog onvoldoende ingegaan op het effect van een aantal voor warmtepompen typerende aspecten. Dit betreft met name het relatief hogere temperatuurniveau van zowel de verdampings- als condensatie-temperaturen. De temperatuursverschillen wijken niet veel af van die voor koelinstallaties (zoals blijkt uit de berekende COP-waarden).

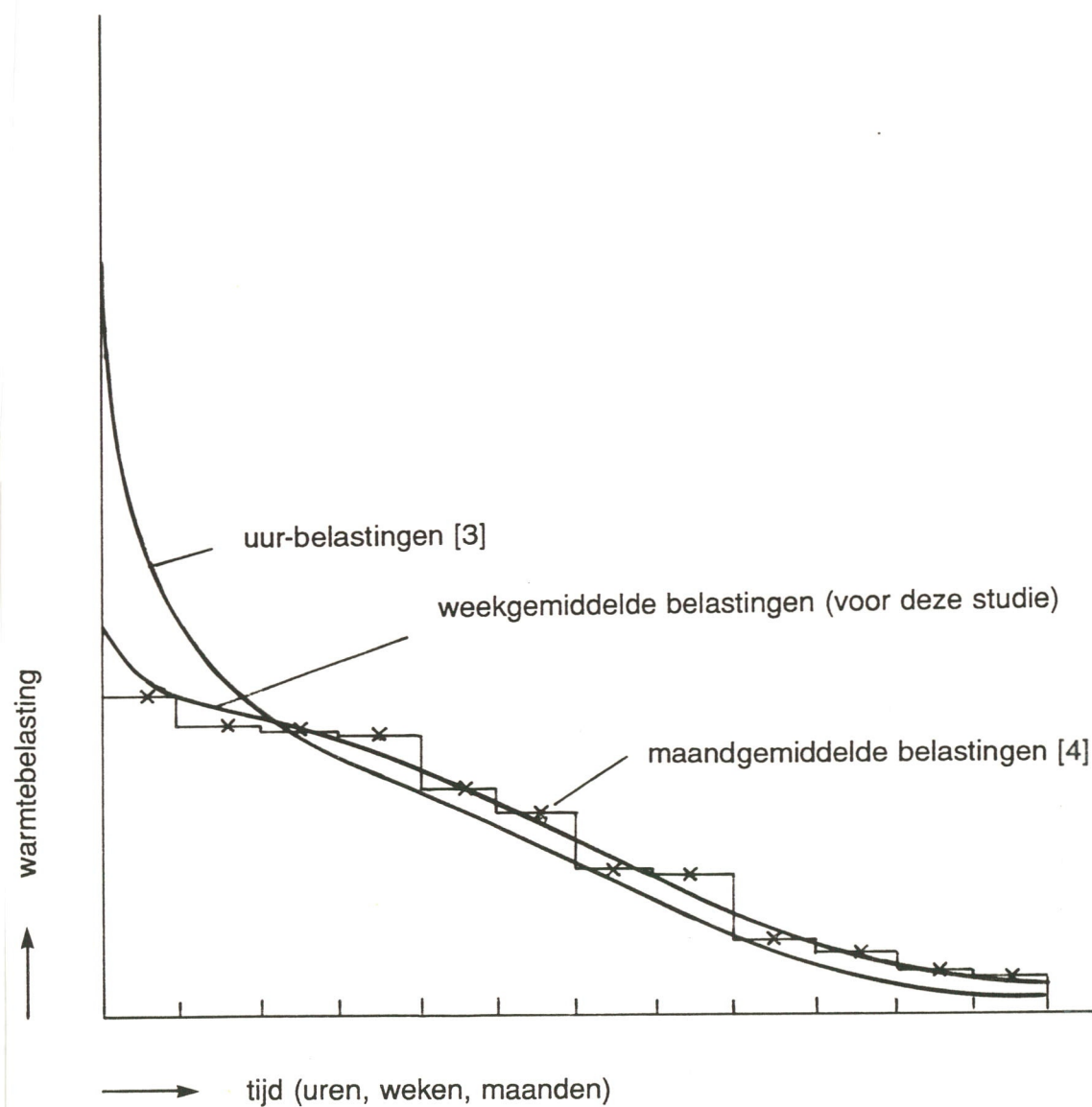
Voor wat betreft het investerings- en onderhoudskosten aandeel in de waardering van elektriciteit voor warmtepompaandrijving wordt overeenkomstig het gestelde in hoofdstuk 5 een deel van de (vaste) investerings- en onderhoudskosten van een 250 MW_e STEG elektriciteitscentrale aangehouden. De gemiddelde bedrijfstijd van de warmtepompen beslaat circa 30% van een jaar. Veiligheidshalve wordt 35% van de betreffende kosten opgevoerd.

1.2.5 Kosten van de primaire distributieleidingen (en eventuele hoofdtransportleiding)

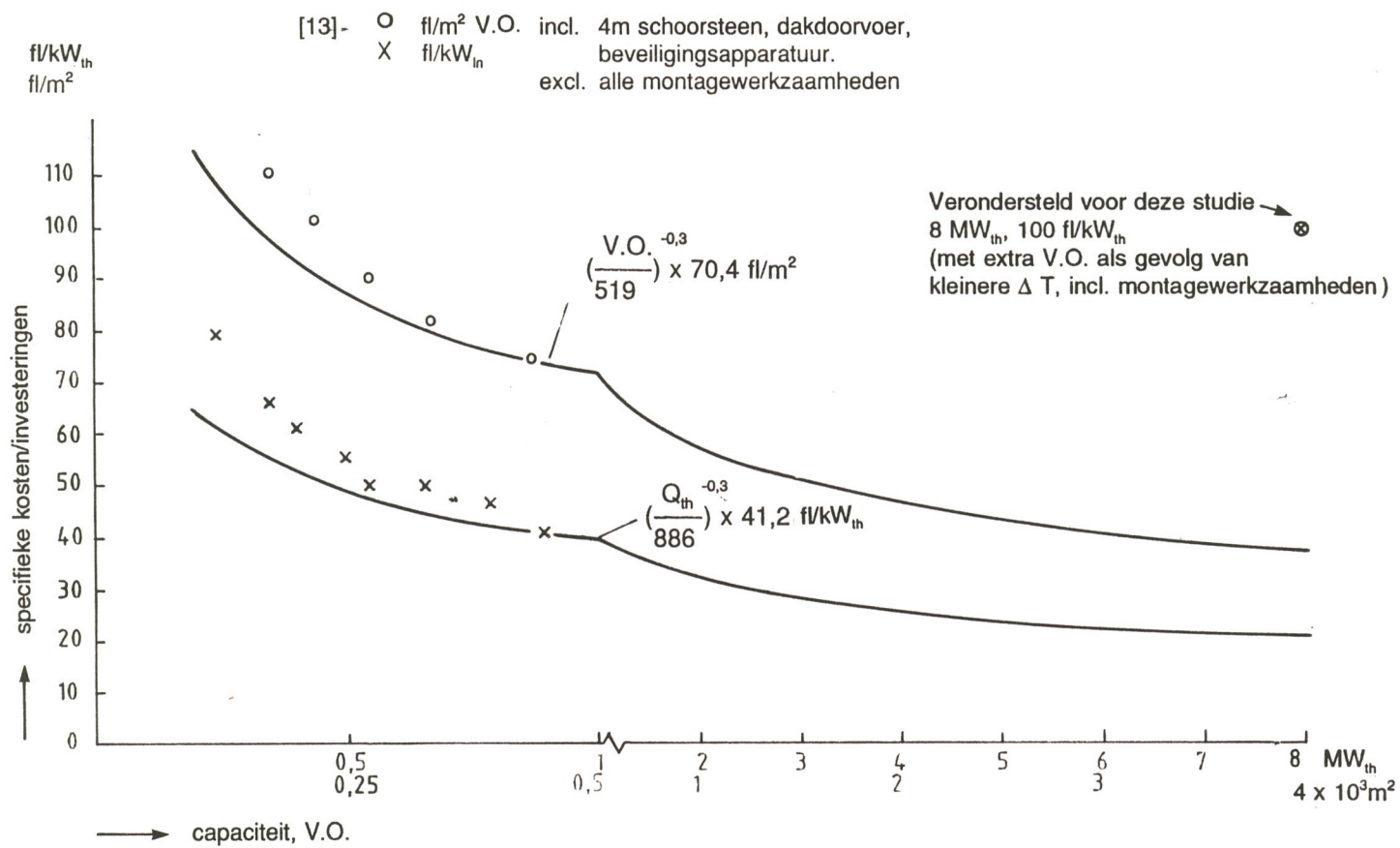
De kosten van de primaire distributieleidingen (en eventuele hoofdtransportleiding) zijn voor deze studie van belang in verband met het effect dat de daling van de retourtemperatuur heeft op de leidingdiameters en daarmee samenhangend op de leidingkosten. De berekende reductie van 45 °C naar 32 °C impliceert een vermindering van de betreffende leidingdiameters met $[1 - \{(98-45)/(98-32)\}^{**0,5}] * 100 = 10,4\%$. Behalve als gevolg van deze verlaging in leidingdiameters is in principe ook een kostenverlaging mogelijk als gevolg van een verminderde isolatiedikte van de retourleidingen.

In het algemeen zijn de kosten van leidingen min of meer proportioneel met de leidingdiameter. Dit impliceert een kostenreductie van ruim 10%.

De vraag is echter 10% van welk bedrag. Voor de studie is uitgegaan van f 600 per woning. Dit is (belangrijk) lager dan wat kan worden berekend met de formules uit [11]. Deze formules zijn echter betrokken op stadsverwarming in de bestaande bouw en toepassing van onderstations met een verzorgingsgebied van circa 150 rijwoningen. Voor de decentrale warmtepompen is vermoedelijk een hoger distributieniveau te verkiezen (zeker bij een gemiddeld warmtepompvermogen van 500 kW_{th}). Mogelijk kan beter worden gekozen voor plaatsing in warmte-onderstations (waar de hulpketels zijn geplaatst). Het zal duidelijk zijn dat dit een aspect is waar in een vervolgstudie nader op in dient te worden gegaan.



Figuur 1.1 Jaarbelastingduurkrommen stadsverwarming



Figuur 1.2 Specifieke investeringen rookgascondensor

Bijlage 2 Procesberekeningen

2.1 Stadsverwarming met STEG WKK en elektrische warmtepompen

Doelstelling van deze procesberekeningen is met name om de uit de rookgassen terug te winnen restwarmte en de vermogens- en COP-waarden van de centrale en decentrale warmtepompen te bepalen.

Deze waarden zijn in belangrijke mate afhankelijk van de temperaturen van het warmte-distributiesysteem. De belangrijkste uitgangsgeschiedenis zijn voor wat dit betreft de aanvoer- en retourtemperaturen van 75 °C respectievelijk 45 °C voor het secundaire warmtedistributienet. Voor het primaire warmte-distributiesysteem is een aanvoertemperatuur verondersteld van 98 °C en een retourtemperatuur die als gevolg van warmte-onttrekking door de decentrale warmtepompen is verlaagd van 45 °C naar 32 °C. Deze laatste veronderstelling legt tot op zekere hoogte de vermogensverhouding tussen decentrale en centrale warmtepompen vast.

Verdere uitgangsgeschiedenis betreffen de rendementswaarden voor de 17 MW_e STEG WK installatie, de rookgastemperatuur van 105 °C aan de inlaat van de condensor en de bij een luchtfactor van 3,5 behorende warmte-inhoud van de rookgassen (zoals aangegeven in figuur 2.1). Voor de berekening van de COP-waarden van de elektrische warmtepompen wordt de Carnot-waarde die is betrokken op de hoogste en laagste watertemperaturen vermenigvuldigd met een (rendements-)factor van 0,55 voor de centrale en 0,5 voor de decentrale warmtepompen.

De procesberekeningen omvatten een aantal stappen die tot op zekere hoogte op iteratieve basis worden uitgevoerd.

- *Direct warmteterugwinningsvermogen van de 17 MW_e STEG WK installatie bij een rookgastemperatuur van 105 °C.*
 Brandstofvermogen van de 17 MW_e STEG bij een elektrisch rendement van 43%:
 $Q_{br} = 17 / 0,43 = 39,54 \text{ MW}_{th}$
 Restwarmte in de rookgassen bij een rookgastemperatuur van 105 °C (figuur 2.1):
 24,2% (inclusief 11% latente warmte, uitgedrukt als percentage van de calorische onderwaarde van aardgas).
 Parasitaire warmteverliezen: 2,8%
 (Direct) warmteterugwinningsrendement: $100 - 43 - 24,2 - 2,8 = 30\%$
 Warmteterugwinningsvermogen $Q_w = 39,54 \cdot 0,30 = 11,86 \text{ MW}_{th}$
- *Warmteterugwinningsvermogen van de rookgascondensor.*
 Verondersteld wordt een wateropwarmingstraject zoals aangegeven in figuur 2.1 (zie ook figuur 1).
 Lage temperatuur sectie: $(0,16 - 0,04) \cdot Q_{br} = 0,12 \cdot 39,54 = 4,74 \text{ MW}_{th}$
 Hoge temperatuur sectie: $(0,242 - 0,16) \cdot Q_{br} = 0,082 \cdot 39,54 = 3,26 \text{ MW}_{th}$
 Totale warmteterugwinningsvermogen $Q_{rgc} = 4,74 + 3,26 = 8 \text{ MW}_{th}$

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

– *Vermogens- en COP-waarden centrale warmtepompen.*

Warmte-onttrekking door de centrale warmtepomp wordt gelijk gesteld aan het warmterugwinningsvermogen van de lage temperatuur sectie van de rookgascondensor: $4,74 \text{ MW}_{\text{th}}$.

Veronderstel een watertemperatuur van 19°C tussen de verdampers van de hoge en lage temperatuur warmtepomptrappen.

Verdampervermogen hoge temperatuur trap: $(32 - 19) * 4,74 = 2,80 \text{ MW}_{\text{th}}$

Verdampervermogen lage temperatuur trap: $4,74 - 2,80 = 1,94 \text{ MW}_{\text{th}}$

Veronderstel COP-waarden van 4,90 voor de hoge temperatuur trap en 4,78 voor de lage temperatuur trap.

Condensorvermogen hoge temperatuur trap: $(4,90/3,90 + 1) * 2,80 = 3,52 \text{ MW}_{\text{th}}$

Condensorvermogen lage temperatuur trap: $(4,78/3,78 + 1) * 1,94 = 2,46 \text{ MW}_{\text{th}}$

De condensorzijdige watertemperaturen worden afgeleid van de temperatuurstijging van 32°C naar 98°C als gevolg van een totaal opgenomen warmtevermogen van $25,46 \text{ MW}_{\text{th}}$ ($3,26 \text{ MW}_{\text{th}}$ door de hoge temperatuur sectie van de rookgascondensor, $2,46 \text{ MW}_{\text{th}}$ + $3,52 \text{ MW}_{\text{th}}$ door de lage en de hoge temperatuur trappen van de warmtepomp en $16,22 \text{ MW}_{\text{th}}$ door de STEG WK installatie)

Uitlaattemperatuur rookgascondensor: $32 + 3,26/25,46 * (98 - 32) = 40,45^\circ\text{C}$

Uitlaattemperatuur lage temperatuur trap warmtepomp: $40,45 + 2,46/25,46 * 66 = 46,83^\circ\text{C}$

Uitlaattemperatuur hoge temperatuur trap warmtepomp: $46,83 + 3,52/25,46 * 66 = 55,95^\circ\text{C}$

Controle COP-waarden:

COP lage temperatuur trap warmtepomp: $(273 + 46,83)/(46,83 - 10) * 0,55 = 4,78$

COP hoge temperatuur trap warmtepomp: $(273 + 55,95)/(55,95 - 19) * 0,55 = 4,90$

– *Vermogen en COP waarde decentrale warmtepompen*

Verdampervermogen: $(45 - 32)/(98 - 32) * 25,46 = 5,02 \text{ MW}_{\text{th}}$

Veronderstel COP waarde van 6,60.

Condensorvermogen: $5,02 * 6,6/5,6 = 5,92 \text{ MW}_{\text{th}}$

Bepaling van watertemperatuur aan de uitlaat van de condensor (t_{wuc}):

– Stel waterstroom van $x \text{ kg/s}$ door de verdamper en $1-x$ door de condensor.

$$(1-x) * (t_{\text{wuc}} - 45) = 5,92/5,02 * x * (45 - 32) = 15,33 x$$

$$t_{\text{wuc}} - 45 = 15,33 * x / (1-x)$$

De aanvoertemperatuur van 75°C van het secundair distributiesysteem wordt verkregen door menging van $x \text{ kg/s}$ water van 98°C met $1-x \text{ kg/s}$ water van $t_{\text{wuc}}^\circ\text{C}$.

$$x * (98 - 45) + (1-x) * (t_{\text{wuc}} - 45) = 75 - 45 = 30$$

$$53x + 15,33x = 30$$

$$x = 0,439$$

$$t_{\text{wuc}} = 45 + 15,33 * 0,439 / (1 - 0,439) = 57^\circ\text{C}$$

Controle COP-waarde: $(273 + 57)/(57 - 32) * 0,5 = 6,6$

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

— *Gemiddelde 'effectieve' vermogens- en COP-waarden van de warmtepompen*

De gemiddelde 'effectieve' vermogens- en COP-waarden van de warmtepompen worden gerelateerd aan het vermogen van de rookgascondensor als effectieve warmtebron van de warmtepompen.

Warmteterugwinningsvermogen van de rookgascondensor: 8 MW_{th}

Elektrische aandrijfvermogens van de warmtepompen:

- hoge temperatuur trap centrale warmtepomp: $3,52/4,90 = 0,718 \text{ MW}_e$
- lage temperatuur trap centrale warmtepomp: $2,46/4,78 = 0,515 \text{ MW}_e$
- decentrale warmtepompen: $5,92/6,60 = 0,897 \text{ MW}_e +$

Totaal elektrisch aandrijfvermogen warmtepompen: $2,13 \text{ MW}_e$

Effectief vermogen warmtepompen: $8,0 + 2,13 = 10,13 \text{ MW}_{\text{th}}$

Gemiddelde effectieve COP-waarde warmtepompen: $10,13/2,13 = 4,75$
 (neem 4,7)

— *Totaal warmtevermogen STEG WKK en elektrische warmtepompen:*

$16,22 + 10,13 = 26,35 \text{ MW}_{\text{th}}$

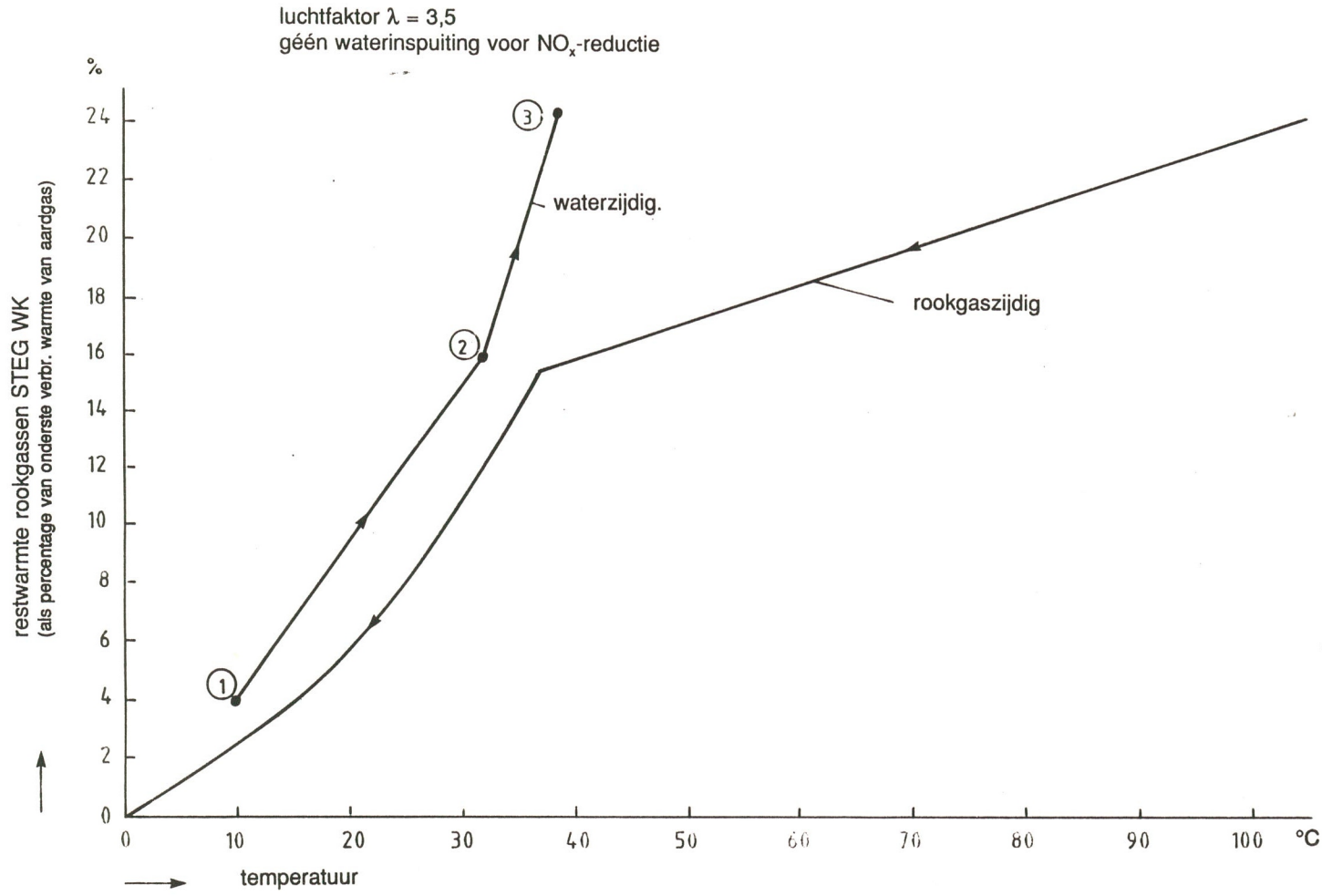
2.2 Stadsverwarming met uitsluitend STEG WKK

Basislast warmtevermogen STEG WK installatie: $26,35 \text{ MW}_{\text{th}}$

Elektrisch rendement STEG WKK: $0,442$

Warmteterugwinningsrendment STEG WKK: $0,398$

Elektrisch vermogen STEG WK installatie: $0,442/0,398 = 29,3 \text{ MW}_e$



Figuur 2.1 Temperatuurtrajecten in rookgascondensor (zie figuur 1)

Bijlage 3 Energie- en kostenberekeningen

3.1 Brandstofbesparingen, emissiereducties en brandstofkostenbesparingen

3.1.1 Referentie warmte-opwekking per woning

Per woning:

- warmtebehoefte: 31,55 GJ_{th}/a
- brandstofverbruik (ketelrendement 90%):
 $31,55 / 0,9 =$ 35,06 GJ_{br}/a
 (= 1108 m³/a)

Totaal voor 13072 (equivalente) wooneenheden:

- brandstofverbruik: $13072 * 35,06 \text{ GJ}_{br}/a =$ 458.300 GJ_{br}/a
 (= $14,480 * 10^6 \text{ m}^3/a$)
- CO₂ emissies: $458.300 * 0,056 \text{ ton/m}^3 =$ 25.663 ton/a
- NO_x emissies: $458.300 * 0,040 \text{ kg/GJ}_{br} =$ 18.332 kg/a

3.1.2 Referentie stadsverwarming met alleen ketelinstallaties (theoretische tussenstap)

Totaal voor 13072 (equivalente) wooneenheden:

- warmteproductie (15% distributieverliezen):
 $13072 * 31,55 / 0,85 =$ 485.200 GJ_{th}/a
- brandstofverbruik (ketelrendement 90%):
 $485.100 / 0,9 =$ 539.100 GJ_{br}/a
 (= $15,330 * 10^6 \text{ m}^3/a$)

Verhogingen ten opzichte van referentie warmte-opwekking per woning:

- brandstofverbruik: $539.100 - 458.300 =$ 80.800 GJ_{br}/a
 (= $2,553 * 10^6 \text{ m}^3/a$)
- CO₂ emissies: $539.100 * 0,056 \text{ ton/GJ}_{br} - 25.665 =$ 4.525 ton/a
- NO_x emissies: $539.100 * 0,03 \text{ kg/GJ}_{br} - 18.332 =$ - 2.159 kg/a

3.1.3 Stadsverwarming met alleen STEG WKK

Besparingen STEG WK bij bedrijf met warmteterugwinning (ten opzichte van referentie stadsverwarming met alleen ketelinstallaties):

- warmteproductie STEG WK (figuur 2a):
 $0,962 \cdot 485.200 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} = 467.080 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a}$
- brandstofbesparing (figuur 3.1a):
 $0,674 \text{ GJ}_{\text{br}}/\text{GJ}_{\text{th}} \cdot 467.080 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} = 314.823 \text{ GJ}_{\text{br}}/\text{a}$
 $(= 9,947 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a})$
- CO₂ emissiereductie (figuur 3.1a):
 $0,0377 \text{ ton}/\text{GJ}_{\text{th}} \cdot 467.080 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} = 17.628 \text{ ton/a}$
- NO_x emissiereductie (figuur 3.1a):
 $0,01367 \text{ kg}/\text{GJ}_{\text{th}} \cdot 467.080 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} = 6.385 \text{ kg/a}$
- brandstofkostenbesparing (figuur 3.1a):
 $0,004684 \text{ kf}/\text{GJ}_{\text{th}} \cdot 467.080 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} = 2.188 \text{ kf/a}$

Besparingsminderingen STEG WK als gevolg van bedrijf zonder warmteterugwinning

- equivalente warmteproductie STEG WK (figuur 2a):
 $0,2804 \cdot 485.200 = 136.050 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a}$
- mindering brandstofbesparing (figuur 3.1b):
 $0,296 \text{ GJ}_{\text{br}}/\text{GJ}_{\text{th}} \cdot 136.050 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} = 40.271 \text{ GJ}_{\text{br}}/\text{a}$
 $(= 1,272 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a})$
- mindering CO₂ emissiereductie (figuur 3.1b):
 $0,0166 \text{ ton}/\text{GJ}_{\text{th}} \cdot 136.050 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} = 2.255 \text{ ton/a}$
- mindering NO_x emissiereductie (figuur 3.1b):
 $0,0133 \text{ kg}/\text{GJ}_{\text{th}} \cdot 130.050 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} = 1.812 \text{ kg/a}$
- mindering brandstofkostenbesparing (figuur 3.1b):
 $0,002057 \text{ kf}/\text{GJ}_{\text{th}} \cdot 136.050 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} = 280 \text{ kf/a}$

Netto besparingen ten opzichte van referentie warmte-opwekking per woning (besparing STEG WK met warmteterugwinning - mindering STEG WK zonder warmteterugwinning - verhoging stadsverwarming referentie ten opzichte van woning referentie):

- brandstofbesparingen: $9,947 - 1,272 - 2,553) \cdot 10^6 = 6,122 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$
 $(42,3\%)$
- CO₂ emissiereductie: $17.628 - 2.255 - 4.525 = 10.848 \text{ ton/a}$
 $(42,3\%)$
- NO_x emissiereductie: $6.385 - 1.812 - (-2.159) = 6.732 \text{ kg/a}$
 $(36,7\%)$

Netto brandstofkostenbesparing ten opzichte van referentie warmte-opwekking per woning (besparing STEG WK met warmteterugwinning - mindering STEG WK zonder warmteterugwinning):

- brandstofkostenbesparing: $2.188 - 280 = 1.908 \text{ kf/a}$

3.1.4 Stadsverwarming met STEG WKK en elektrische warmtepompen

Besparingen STEG WK bij bedrijf met warmteterugwinning (ten opzichte van referentie stadsverwarming met alleen ketelinstallaties):

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

— warmteproductie STEG WK (figuur 2b):	
$0,755 * 485.200 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	366.370 $\text{GJ}_{\text{th}}/\text{a}$
— brandstofbesparing (figuur 3.2a):	
$0,632 \text{ GJ}_{\text{br}}/\text{GJ}_{\text{th}} * 366.370 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	231.546 $\text{GJ}_{\text{br}}/\text{a}$ (= $7,316 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$)
— CO ₂ emissiereductie (figuur 3.2a):	
$0,0354 \text{ ton}/\text{GJ}_{\text{th}} * 366.370 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	12.969 ton/a
— NO _x emissiereductie (figuur 3.2a):	
$0,01178 \text{ kg}/\text{GJ}_{\text{th}} * 366.370 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	4.315 kg/a
— brandstofkostenbesparing (figuur 3.2a):	
$0,004393 \text{ kf}/\text{GJ}_{\text{th}} * 366.370 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	1.609 kf/a

Besparingsminderingen STEG WK als gevolg van bedrijf zonder warmteterugwinning

— equivalente warmteproductie STEG WK (figuur 2b):	
$0,1092 * 485.200 =$	52.984 $\text{GJ}_{\text{th}}/\text{a}$
— mindering brandstofbesparing (figuur 3.2b):	
$0,342 \text{ GJ}_{\text{br}}/\text{GJ}_{\text{th}} * 52.984 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	18.120 $\text{GJ}_{\text{br}}/\text{a}$ (= $0,573 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$)
— mindering CO ₂ emissiereductie (figuur 3.2b):	
$0,01915 \text{ ton}/\text{GJ}_{\text{th}} * 52.984 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	1.015 ton/a
— mindering NO _x emissiereductie (figuur 3.2b):	
$0,01539 \text{ kg}/\text{GJ}_{\text{th}} * 52.984 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	815 kg/a
— mindering brandstofkostenbesparing (figuur 3.2b):	
$0,002377 \text{ kf}/\text{GJ}_{\text{th}} * 52.984 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	126 kf/a

Besparingen EWP (ten opzichte van referentie stadsverwarming met alleen ketelinstallaties):

— warmteproductie EWP (figuur 2b):	
$0,2076 * 485.200 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	100.730 $\text{GJ}_{\text{th}}/\text{a}$
— brandstofbesparing (figuur 3.3):	
$0,713 \text{ GJ}_{\text{br}}/\text{GJ}_{\text{th}} * 100.730 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	71.860 $\text{GJ}_{\text{br}}/\text{a}$ (= $2,270 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$)
— CO ₂ emissiereductie (figuur 3.3):	
$0,03995 \text{ ton}/\text{GJ}_{\text{th}} * 100.730 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	4.024 ton/a
— NO _x emissiereductie (figuur 3.3):	
$0,01544 \text{ kg}/\text{GJ}_{\text{th}} * 100.730 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	1.555 kg/a
— brandstofkostenbesparing (figuur 3.3):	
$0,004958 \text{ kf}/\text{GJ}_{\text{th}} * 100.730 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{a} =$	499 kf/a

Netto besparingen ten opzichte van referentie warmte-opwekking per woning (besparing STEG WK met warmteterugwinning - mindering STEG WK zonder warmteterugwinning + besparing EWP - verhoging stadsverwarming referentie ten opzichte van woning referentie):

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

— brandstofbesparingen:	
$7,316 - 573 + 2,279 - 2,553) \cdot 10^6 =$	$6,469 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (44,6%)
— CO ₂ emissiereductie:	
$12.969 - 1.015 + 4.024 - 4.525 =$	11.453 ton/a (44,6%)
— NO _x emissiereductie:	
$4.315 - 815 + 1.555 - (-2.159) =$	7.214 kg/a (39,4%)

Netto brandstofkostenbesparing ten opzichte van referentie warmte-opwekking per woning (besparing STEG WK met warmteterugwinning - mindering STEG WK zonder warmteterugwinning + besparing EWP):

— brandstofkostenbesparing: $1.609 - 126 + 499 =$	1.982 kf/a
---	----------------------

3.2 Investerings

3.2.1 Stadsverwarming met alleen STEG WKK (meerinvesteringen ten opzichte van theoretische referentie stadsverwarming met alleen ketelinstallaties)

Opwekking

— 29,3 MW _e STEG WK: $29.300 \text{ kW}_e \cdot 2,025 \text{ kf/kW}_e =$	59.332
— Warmtebuffer (3700 m ³):	1.050 +

Bruto investering opwekking:	60.382
— Vermeden investering centrale elektriciteitsopwekking:	
$29.300 \text{ kW}_e \cdot 1,625 \text{ kf/kW}_e =$	47.613 -

Netto investering warmte-opwekking:	kf 12.769

3.2.2 Stadsverwarming met STEG WKK en elektrische warmtepompen (meerinvesteringen ten opzichte van theoretische referentie stadsverwarming met alleen ketelinstallaties)

Opwekking

— 17 MW _e STEG WK: $17.000 \text{ kW}_e \cdot 2,150 \text{ kf/kW}_e =$	36.550
— Warmtebuffer (2300 m ³):	750
— Rookgascondensor: $8.000 \text{ kW}_{th} \cdot 0,100 \text{ kf/kW}_{th} =$	800
— Centrale warmtepompen: $(3.520 + 2.460) \text{ kW}_{th} \cdot 0,2 \text{ kf/kW}_{th} =$	1.200
— Decentrale warmtepompen: $5.920 \text{ kW}_{th} \cdot 0,30 \text{ kf/kW}_{th} =$	1.776 +

Bruto investering opwekking:	kf 41.076

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

— Centrale elektriciteitsopwekking ten behoeve van warmtepompaandrijving	
2.130 * 0,35 * 1.625 =	1.211
— Vermeden investering centrale elektriciteitsopwekking:	
- 17.000 kW _e * 1,625 kf/kW _e =	27.625-

	26.414 -

Netto investering warmte-opwekking:	kf 14.662

Investeringsreductie primaire warmtedistributie (retourtemperatuur
 32 °C in plaats van 45 °C):

$$- \left\{ 1 - \frac{(98 - 45)^{0,5}}{(98 - 32)} \right\} \times 13.072 \text{ woningen} \times 600 \text{ f/woningen} = 815$$

3.2.3 Stadsverwarming met STEG WKK en elektrische warmtepomp ten opzichte van alleen STEG WKK

— Bruto investeringsverschil:	
41.076 - 815 - 60.382 = 40.621 - 60.382 =	- kf 19.761 (verlaging)
— Netto investeringsverschil:	
14.662 - 815 - 12.769 = 13.847 - 12.769 =	+ kf 1078 (verhoging)

3.3 Jaarkosten

3.3.1 Stadsverwarming met alleen STEG WKK (meerkosten ten opzichte van theoretische referentie stadsverwarming met alleen ketelinstallaties)

Verhoging investerings- en onderhoudskosten

$$\{\text{investeringskosten} = \text{investeringen} * (\text{annuïteit} + \text{onderhoudskosten})\}$$

kf/a

— Netto kosten WKK:	
— 29,3 MW _e STEG WK: 59.332 * (0,07095 + 0,035) = 6.286,2	
— vermeden kosten centrale opwekking:	
47.613 * (0,07095 + 0,031) = 4.854,1 -	

netto kosten WKK	1.432,1
— Buffer (3700 m ³): 1.050 * (0,07095 + 0,02) =	95,5 +

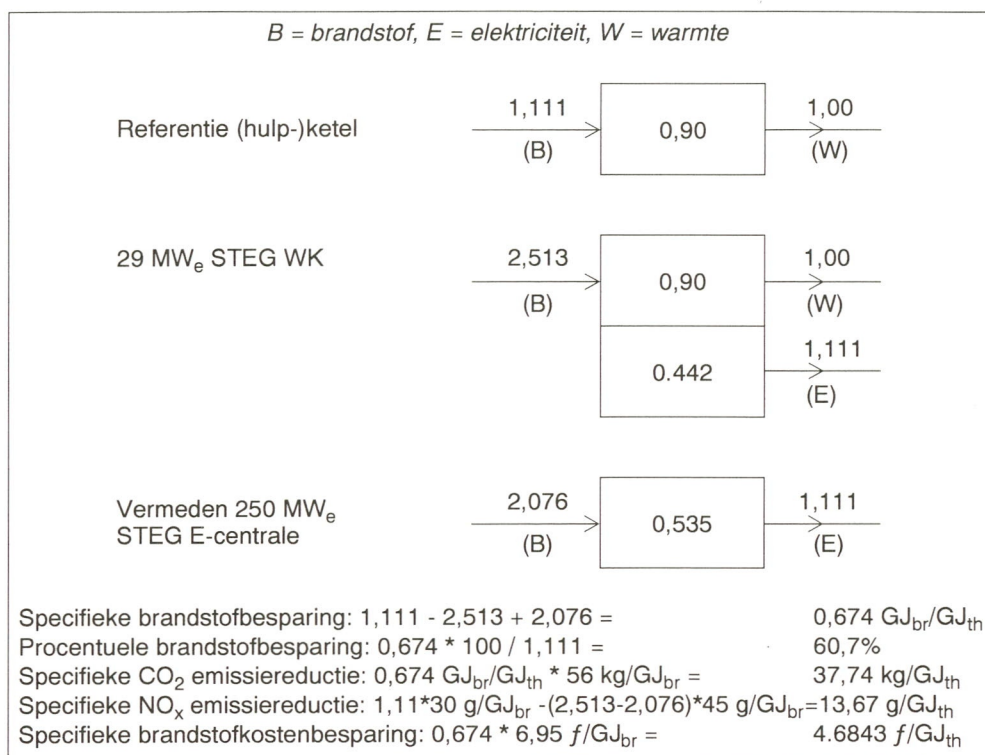
Totale additionele meerkosten voor investering en onderhoud ten opzichte van referentie	1.527,6
Brandstofkostenbesparing (zie 3.1.3)	1.908
Netto jaarlijkse kostenbesparing: 1.908 - 1.528 =	380 kf/a

3.3.2 Stadsverwarming met STEG WKK en elektrische warmtepompen (meerkosten ten opzichte van theoretische referentie stadsverwarming met alleen ketelinstallaties)

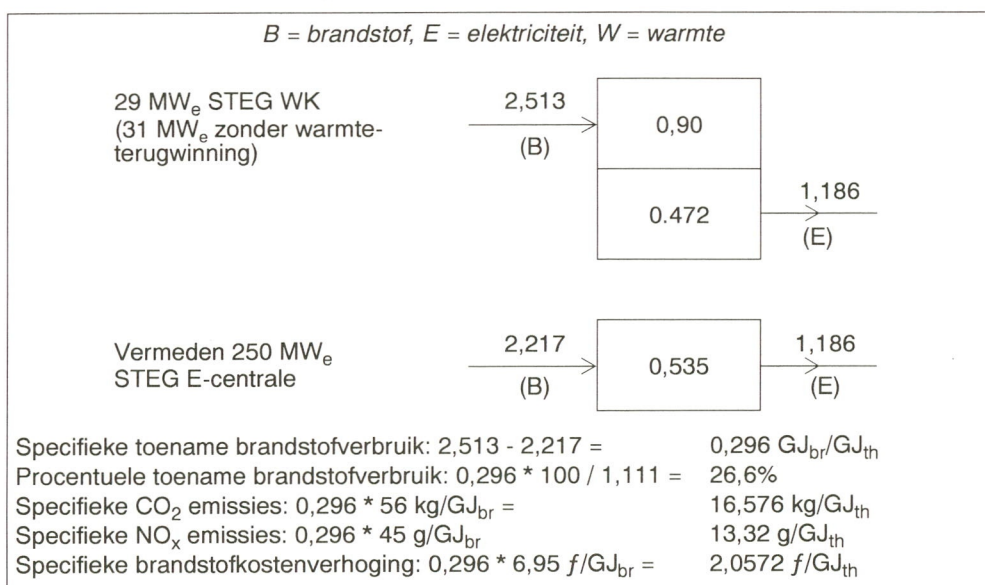
Verhoging investerings- en onderhoudskosten	kf/a
— Netto kosten WKK:	
— 17 MW _e STEG WK: $36.550 * (0,07095 + 0,035) = 3.872,5$	
— vermeden kosten centrale opwekking:	
$27.625 * (0,07095 + 0,031) = 2.816,4$	—
netto kosten WKK	1.056,1
— Buffer (2300 m ³): $750 * (0,07095 + 0,02) =$	68,2
— Rookgascondensor: $800 * (0,08024 + 0,035) =$	92,2
— Centrale warmtepompen: $1200 * (0,08024 + 0,02) =$	122,9
— Decentrale warmtepompen: $1776 * (0,08024 + 0,03) =$	199,6
— Centrale elektriciteitsopwekking ten behoeve van warmtepomp-aandrijving: $1.211 * (0,07095 + 0,031) =$	123,5
— Minderkosten primaire distributieleidingen:	
$(-815) * (0,07095 + 0,020) =$	- 74,1 +

Totale additionele meerkosten voor investering en onderhoud ten opzichte van referentie	1.588,4
Brandstofkostenbesparing (zie 3.1.4):	1.982
Netto jaarlijkse kostenbesparing: $1.982 - 1.588 =$	394 kf/a

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

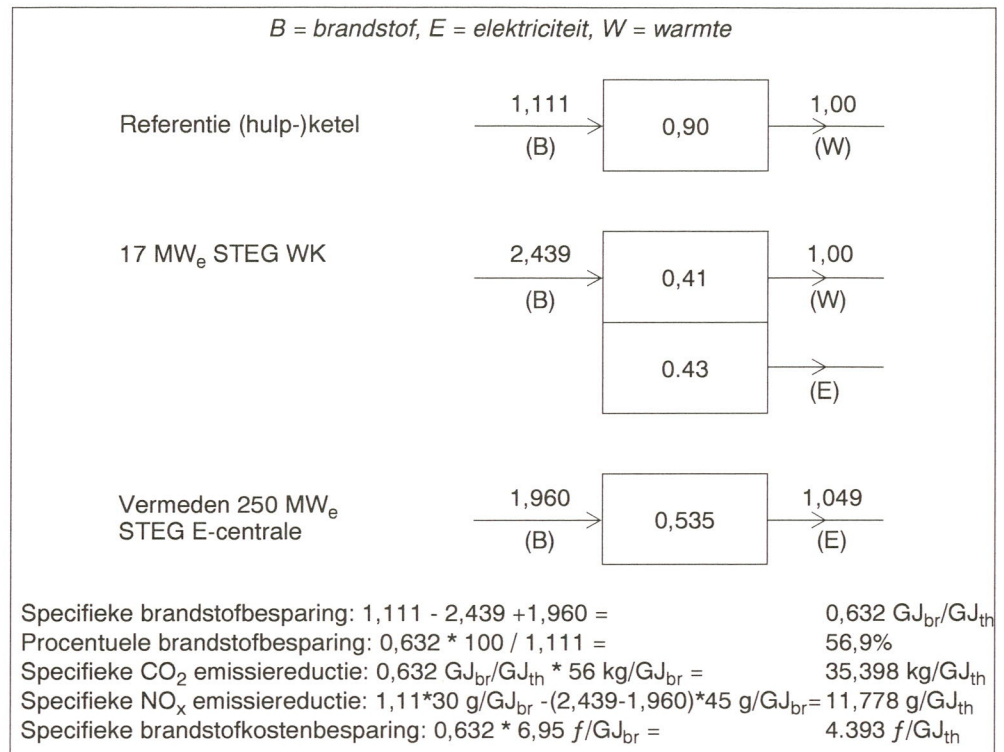


Figuur 3.1a Specifieke besparingen 29 MW_e STEG WK-installatie bij bedrijf met warmteterugwinning

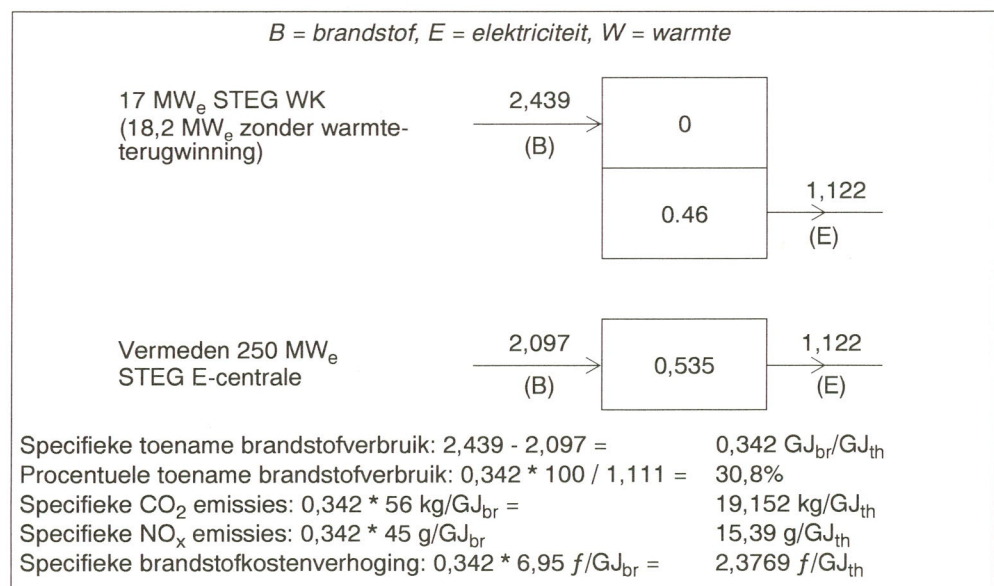


Figuur 3.1b Specifieke besparingsreducties 29 MW_e STEG WK-installatie bij bedrijf zonder warmteterugwinning (per equivalente eenheid warmteproductie)

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport

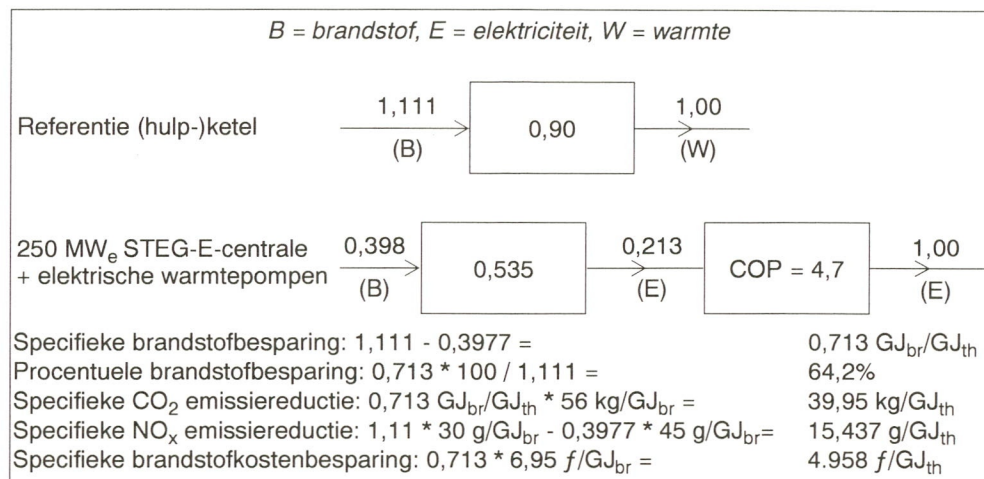


Figuur 3.2a Specifieke besparingen 17 MW_e STEG WK-installatie bij bedrijf met warmteterugwinning



Figuur 3.2b Specifieke besparingsreducties 17 MW_e STEG WK-installatie bij bedrijf zonder warmteterugwinning (per equivalente eenheid warmteproductie)

Voorstudie stadsverwarming met combinatie van STEG warmte/kracht koppeling en elektrische warmtepompen
Eindrapport



Figuur 3.3 Specifieke besparingen elektrische warmtepomp