

Milieu-aspecten warmte/kracht integraal bekeken

Warmte/kracht-koppeling (WKK) staat volop in de belangstelling [1]. Er wordt momenteel in Nederland dan ook flink wat WKK-vermogen gebouwd [2, 3]. Dit is niet zomaar een modegril: de energie- en milieuvoordelen van gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit ten opzichte van gescheiden opwekking zijn aanzienlijk. Er zijn echter nogal wat verschillende WKK-opties. De verschillen tussen deze opties hebben betrekking op de schaalgrootte, het technische concept (gasmotor, gasturbine, STEG), het warmtemedium (stoom of warm water) en het temperatuurniveau van de warmte (zie kader).

Drs. D. Dijk

De auteur is medewerker van de afdeling Planning en Onderzoek van NV Sep te Arnhem.

Ing. J. J. Hof

De auteur is beleidsmedewerker Warmte/Kracht van VEEN-VESTING te Arnhem.

De auteurs bedanken ir. F. Rooijers van het Centrum voor Energiebesparing en Schone Technologie, voor zijn bijdrage in de gevoerde discussies.

De afgelopen tijd zijn verschillende studies gewijd aan het vergelijken van de verschillende WKK-opties [5, 6, 7, 8]. In deze studies worden de opties niet alleen vergeleken met gescheiden opwekking, maar ook nog eens onderling. Eén ding hebben deze studies gemeen, namelijk dat de wijze waarop de milieuconsequenties berekend zijn niet erg transparant is. Een dergelijke vergelijking is ook niet in alle opzichten even eenvoudig. De oorzaak hiervan is gelegen in drie complicaties.

1. Afhankelijk van de gekozen WKK-techniek zijn er, zoals Tabel 1 laat zien, behoorlijke verschillen in warmte- en elektriciteitsproductie. Deze verschillen komen vooral tot uiting in de zogenaamde *warmte/kracht-verhouding*. Dit getal is een maat voor de verhouding waarin een WKK-installatie nuttige warmte en elektriciteit (beide gemeten in GJ) produceert. Zoals nog zal blijken zijn verschillen op dit punt niet zonder consequenties voor de energie- en milieuprestaties van WKK-installaties.

2. Afhankelijk van de concrete toepassing en de locatie, zijn er verschillen in warmtetechnische en elektrotechnische inpassing, en kan ook de schaalgrootte variëren. Dit kan tot grote verschillen in kosten leiden.

3. Ten slotte maakt het uit of WKK primair benaderd wordt vanuit de elektriciteitsvoorziening danwel vanuit de warmtevoorziening, of dat een integrale benadering gevolgd wordt, waarin kosten en milieu-aspecten bezien worden vanuit de landelijke elektriciteitsvoorziening enerzijds en de lokale warmtevoorziening anderzijds.

De beoordeling van WKK-projecten is dus een complexe zaak. De auteurs hebben niet de illusie dat het mogelijk is een eenduidig spoorboekje te ontwerpen, dat als het ware automatisch de weg in

deze materie wijst, zeker niet waar het de kosten betreft. Wel wordt in dit artikel een eenvoudige systematiek gepresenteerd, die het mogelijk maakt feiten over energie- en milieuprestaties van WKK-opties overzichtelijk op een rij te zetten.

Energie en milieu

Hoewel het op het punt van kosten niet mogelijk is in algemene zin uitspraken over WKK-opties te doen en de economische haalbaarheid daarom steeds projectgewijs bekeken dient te worden [9, 10], is dit ten aanzien van de energie- en milieu-aspecten wel mogelijk. Wel is het zaak dat de milieuvoordelen van WKK op een evenwichtige wijze in rekening gebracht worden, zonder dat deze afhangen van wie de installatie nu precies beheert. Het milieu laat zich ten slotte ook niet in compartimenten verdelen. Milieu-aspecten verdienen een integrale beoordeling.

Om een dergelijke beoordeling van de milieu-aspecten van WKK inzichtelijk te maken, wordt hier een systematische vergelijking gepresenteerd van WKK-opties. Omdat de verschillende typen WKK-installaties elektriciteit en warmte in verschillende verhoudingen produceren (zie Tabel 1), kan niet volstaan worden met een vergelijking waarin van slechts één produkt gelijke hoeveelheden geproduceerd worden. Een goed beeld van hoe de verschillende WKK-opties zich tot elkaar verhouden, kan verkregen worden wanneer zowel een vergelijking gemaakt wordt voor de situatie waarin WKK-opties een gelijke hoeveelheid elektriciteit produceren (en dus een verschillende hoeveelheid warmte), als voor de situatie waarin de opties een gelijke hoeveelheid warmte leveren (en derhalve verschillende hoeveelheden elektriciteit). De navolgende berekeningsvoorbeelden hebben daarom betrekking op twee uitersten:

1. *evenveel elektriciteit*. In deze benadering wordt met de verschillende opties telkens 1 TWh (1 miljard kilowattuur) elektriciteit geproduceerd. Terwijl er verschillende hoeveelheden warmte geproduceerd worden;

2. *evenveel warmte*. In deze benadering wordt uitgegaan van de produktie van 1 PJ warmte (ca. 31 miljoen m³ aardgas). Er worden daarbij verschillende hoeveelheden elektriciteit geproduceerd.

Door in beide benaderingen de energie-inzet en de emissies van gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit van de verschillende opties te vergelijken met die van gescheiden opwekking,

WKK-techniek

Een *gasmotor* is een warmte/kracht-installatie op basis van een zuigermotor. In de praktijk gaat het meestal om gemodificeerde (diesel)motoren die geschikt zijn voor het verbranden van aardgas. De motoren zijn voorzien van warmtewisselaars en een afgassenketel, die warmte aan de motor onttrekken. De zuigers drijven via een as een generator aan. In *gasturbines* [4] wordt brandstof met gecompriëerde lucht verbrand. De turbine drijft behalve de compressor een generator aan. In de industrie en de elektriciteitsvoorziening worden *gasturbines* vaak voorzien van afgassenketels waarin de hete afgassen van de gasturbine benut worden om stoom te produceren. Wordt de stoom vervolgens geëxpandeerd in (tegen-druk)stoomturbines dan spreekt men van een *STEG*. Het elektrisch rendement neemt hierbij toe en er wordt dus meer elektriciteit en minder warmte verkregen dan in de gasmotor of de gasturbinevariant. Wordt in een *STEG*-installatie stoom afgetapt voor warmte- of stoomlevering, dan gaat het om een warmte/kracht-centrale of *STEG-WKC*.

ontstaat een beeld van de energie- en milieuprestaties van de verschillende WKK-technieken.

In het navolgende voorbeeld wordt gekeken naar twee typen WKK-installatie met uiteenlopende warmte/kracht-verhoudingen, namelijk *STEG-WKC*'s en gasmotoren. Deze benadering is gekozen in het vertrouwen dat hiermee de overzichtelijkheid gediend is en dat de werkelijkheid altijd ergens tussen de gekozen uitersten zal liggen.

Uitgangspunten

Uiteraard zijn de technische uitgangspunten voor de gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit in de gekozen WKK-opties en die van afzonderlijke productie van warmte en elektriciteit (die gelden als referentie), mede bepalend voor de uitkomsten. De hier gehanteerde uitgangspunten zijn samengevat in Tabel 2a en Tabel 2b en worden hier nog eens kort toegelicht.

A. Als referentie voor de afzonderlijke warmte-opwekking kan gekozen worden voor de gemiddelde aardgasgestookte ketel met een jaargemiddeld omzettingsrendement van rond de 65%. Gaan we uit van de best mogelijke techniek, dan komt een gasgestookte ketel in beeld, die een omzettingsrendement van 90% haalt. Dit cijfer is daarom in de berekeningen gehanteerd. Bedacht moet echter worden dat dit rendement in de dagelijkse gebruikspraktijk van ruimteverwarming en tapwaterbereiding in het algemeen niet gehaald wordt. De NO_x -emissie is voor ketels gesteld op het 'Low NO_x '-niveau van 30 g/GJ.

B. Als referentie voor de afzonderlijke opwekking van elektriciteit kan eveneens uitgegaan worden van de best mogelijke techniek. Met aardgasgestookte *STEG*-eenheden wordt thans een omzettingsrendement van 52% bereikt. Het Besluit Emissie-Eisen Stookinstallaties (Bees WLV) schrijft met ingang van 1992 een NO_x -uitstootnorm van 65 g/GJ voor. Op grond van in de praktijk opgedane ervaringen wordt voor nieuwe eenheden in het 'Plan van aanpak ter uitvoering van het convenant over de emissie van SO_2 en NO_x ' echter een waarde van 45 g/GJ gehanteerd [11]. In de berekeningen is met deze waarde gerekend.

C. Voor de *STEG-WKC*'s is uitgegaan van gasgestookte eenheden met een totaal rendement van 85% (= 46% + 39%). Bij maximale warmtelevering bedraagt het elektrisch rendement 46%. De NO_x -emissie is in de berekeningen, evenals bij de *STEG* zonder warmte-aftap op 45 g/GJ gesteld. Voor de *STEG-WKC* is voorts 10% warmteverlies voor transport en distributie in de berekeningen meegenomen.

D. Voor gasmotoren is uitgegaan van moderne 'lean burn'-machines met een elektrisch rendement van 33% en een totaal rendement van eveneens 85% (= 33% + 52%). Het Besluit Emissie-Eisen Stookinstallaties (Bees WLV) schrijft voor gasmotoren momenteel nog een maximale NO_x -uitstoot van 270 g/GJ voor. Per 1-1-1992 zal dit aangescherpt worden tot 190 g/GJ. Later zal dit niveau mogelijk nog dalen naar 140 g/GJ. In het Milieu Actie Plan (MAP) van de distributiesector is gesteld dat men voor toekomstige gasmotoren streeft naar een niveau van 100 g/GJ [2]. In de berekeningen is hierop reeds geanticipeerd en is deze laatste waarde gehanteerd. De praktijk zal moeten uitwijzen in hoeverre dit een reële waarde is. Het warmteverlies voor deze optie is nul verondersteld. Omdat alle beschouwde varianten gasgestookt zijn, is gerekend met een CO_2 -uitstoot van 56 kg per GJ brandstof.

Milieu-aspecten bij gelijke elektriciteitsproductie

Kijken we eerst naar de resultaten in het geval beide opties een gelijke hoeveelheid elektriciteit van 1 TWh produceren. In Tabel 3 worden de belangrijkste kengetallen van beide WKK-opties vergeleken met die van gescheiden opwekking van 1 TWh in een moderne *STEG*-eenheid.

Tabel 1 Gelijke brandstofinzet, verschillende output

	brandstof (PJ)	elektr. (PJ)	warmte (PJ)	W/K verh.	rendement (%)
STEG-WKC	10	4,6	3,9	0,8	85
GASMOTOR	10	3,3	5,2	1,6	85

Tabel 2a Uitgangspunten m.b.t. de afzonderlijke opwekking van warmte en elektriciteit

	rendement		emissies	
	elektr. (%)	warmte (%)	CO_2 (kg/GJ)	NO_x (g/GJ)
A. ketel	-	90	56	30
B. STEG-E	52	-	56	45

Tabel 2b Uitgangspunten m.b.t. WKK-opties

	rendement		emissies	
	elektr. (%)	warmte (%)	CO_2 (kg/GJ)	NO_x (g/GJ)
C. STEG-WKC	46	39	56	45
D. Gasmotor	33	52	56	100

Tabel 3 Kengetallen verschillende opties voor productie van 1 TWh elektriciteit

	brandstof (PJ)	CO_2 (kton)	NO_x (ton)	warmte (PJ)
STEG-WKC	7,8	438	352	2,8
GASMOTOR	10,9	611	1091	5,7
STEG-E	6,9	388	312	-

Tabel 4 Kengetallen warmteproductie na eliminatie elektriciteitsproductie

	brandstof (PJ)	CO ₂ (kton)	NO _x (ton)	warmte (PJ)
STEG-WKC	0,9	50	41	2,8
GASMOTOR	4,0	233	780	5,7

Tabel 5 Energie-inzet en emissie per PJ warmte

	brandstof (PJ)	CO ₂ (kton)	NO _x (ton)
STEG-WKC	0,3	18	15
GASMOTOR	0,7	39	138
KETEL	1,1	62	33

Tabel 6 Kencijfers bij productie van 1 PJ warmte

	brandstof (PJ)	CO ₂ (kton)	NO _x (ton)	elektr. (TWh)
STEG-WKC	2,8	158	127	0,36
GASMOTOR	1,9	108	192	0,18
KETEL	1,1	62	33	-

Tabel 7 Kengetallen elektriciteitsproductie na eliminatie warmteproductie

	brandstof (PJ)	CO ₂ (kton)	NO _x (ton)	elektr. (TWh)
STEG-WKC	1,7	96	94	0,36
GASMOTOR	0,8	46	159	0,18

Tabel 8 Energie-inzet en emissie per TWh elektriciteit

	brandstof (PJ)	CO ₂ (kton)	NO _x (ton)
STEG-WKC	4,7	267	261
GASMOTOR	4,7	261	903
STEG-E	6,9	388	312

Tabel 9 Energie-inzet en emissie afzonderlijke opwekking

elektr. (TWh)	warmte (PJ)	brandstof (PJ)	CO ₂ (kton)	NO _x (ton)
1	2,8	10,0	559	402
1	5,7	13,2	740	498

De beide WKK-opties gebruiken uiteraard meer brandstof dan een STEG die alleen elektriciteit maakt. In ruil daarvoor wordt echter een, per optie verschillende, hoeveelheid nuttige warmte verkregen. De gasmotoren produceren, naast 1 TWh elektriciteit, 5,7 PJ warmte, terwijl de STEG-WKC-optie 3,1 PJ warmte produceert.

Om een zinvolle vergelijking van de geproduceerde warmte te kunnen maken, is het nuttig om eerst de geproduceerde elektriciteit - die in beide opties immers gelijk is - uit de vergelijking te elimineren. Dit kan door de energie-inzet en de bijbehorende emissies van afzonderlijke opwekking van 1 TWh elektriciteit in een STEG-E in mindering te brengen op die van de gasmotoren, respectievelijk de STEG-WKC. Men krijgt dan het beeld, zoals gegeven in Tabel 4.

Men ziet hieruit dat de gasmotoren weliswaar meer warmte produceren dan de STEG-WKC, maar dat daar ook een hogere brandstofinzet en hogere emissies tegenoverstaan.

Hoe hoog precies, wordt duidelijk als men de cijfers in Tabel 4 vergelijkt met die van gescheiden opwekking van warmte in een ketel. Daartoe worden de brandstofinzet- en emissiecijfers van beide WKK-opties in Tabel 4 gedeeld door de in beide WKK-opties geproduceerde nuttige warmte. Dit resulteert in energie-inzet- en emissiecijfers per geproduceerde PJ, die een directe vergelijking met gelijksoortige kengetallen van een ketel voor afzonderlijke warmte-opwekking mogelijk maakt.

Uit tabel 5 blijkt dat per geproduceerde eenheid warmte de STEG-WKC beter scoort dan de gasmotoren en ook beter dan moderne ketels. De gasmotoren zijn per eenheid geproduceerde warmte zuiniger dan een ketel, maar leiden ook tot een hogere NO_x-uitstoot.

Milieu-aspecten bij gelijke warmteproductie

Kijkt men vervolgens naar de resultaten van de andere benadering waarbij beide opties, na verrekening van transport- en distributieverliezen, evenveel nuttige warmte maken, in dit geval 1 PJ, dan krijgt men de kencijfers die weergegeven zijn in Tabel 6.

De STEG-WKC levert nu, bij dezelfde warmteproductie, tweemaal zoveel elektriciteit als de gasmotoren. De vergelijking wordt echter opnieuw bemoeilijkt door het feit dat er ook verschillende hoeveelheden brandstof verbruikt worden. Omdat in dit geval de warmteproductie gelijk is, kan die uit de vergelijking geëlimineerd worden. Daartoe worden de brandstofinzet en de emissie van afzonderlijke opwekking van 1 PJ warmte in mindering gebracht op de cijfers voor zowel de STEG-WKC als de gasmotor van Tabel 6 (zie Tabel 7).

Deelt men vervolgens deze cijfers nog door de geproduceerde elektriciteit, dan worden weer kengetallen per TWh elektriciteit verkregen, zodat een rechtstreekse vergelijking met de kengetallen van afzonderlijke opwekking van elektriciteit in een STEG-E mogelijk wordt (Tabel 8).

Ook uit deze benadering blijkt weer dat WKK leidt tot een lagere specifieke brandstof inzet dan afzonderlijke opwekking van elektriciteit, terwijl de STEG-WKC het ten aanzien van de specifieke NO-emissie beter doet dan de gasmotoren. Een geheel andere invalshoek leidt niet tot wezenlijk andere conclusies.

Nadere beschouwing van de milieueffecten van WKK

Tot zover hebben beide benaderingen inzicht gegeven in het energiegebruik en de milieu-aspecten per geproduceerde eenheid warmte en elektriciteit. Men kan echter nog een stap verder gaan en zich afvragen wat WKK nu eigenlijk oplevert? Om deze vraag te kunnen beantwoorden, wordt de voorgaande vergelijking nog iets verder uitgewerkt. De totale brandstofinzet en emissies van de WKK-opties worden dan vergeleken met die van afzonderlijke opwekking van warmte en elektriciteit. Eerst wordt daartoe weer het geval beschouwd, dat beide opties 1 TWh elektriciteit maken, maar verschillende hoeveelheden warmte. De kencijfers hiervoor staan in Tabel 3. Wanneer de geproduceerde elektriciteit (beide 1 TWh) en warmte (2,8 PJ respectievelijk 5,7 PJ) afzonderlijk opgewekt zouden worden, dan zou daarmee op basis van de uitgangspunten van Tabel 2 een brandstofinzet en emissie gemoeid zijn zoals in Tabel 9 weergegeven is.

Door hiervan vervolgens de kencijfers voor de gecombineerde opwekking (Tabel 3) van deze hoeveelheden elektrici-

Tabel 10 Milieuprestatie WKK t.o.v. gescheiden opwekking bij gelijke elektriciteit en verschillende warmte

	brandstof (PJ)	broeikasgas (kton CO ₂)	verzuring (ton NO _x)
STEG-WKC	-2,2	-121	-50
GASMOTOREN	-2,3	-129	+593

Tabel 11 Milieuprestatie WKK t.o.v. gescheiden opwekking bij gelijke warmte en verschillende elektriciteit

	brandstof (PJ)	broeikasgas (kton CO ₂)	verzuring (ton NO _x)
STEG-WKC	-0,8	-44	-18
GASMOTOREN	-0,4	-22	+104

teit en warmte af te trekken, krijgt men ten slotte de integrale milieubalans van Tabel 10.

Men ziet dat beide opties bij gelijke elektriciteitsproductie ten opzichte van afzonderlijke opwekking, tot nagenoeg dezelfde brandstofbesparing en beperking van de CO₂-uitstoot leiden, maar dat men daarvoor met de gasmotoren tweemaal zoveel warmte moet afzetten. (5,7 PJ vs. 2,8 PJ). Verder is de NO_x-uitstoot van de gasmotoren 593 ton hoger dan bij afzonderlijke opwekking van warmte en elektriciteit. De STEG-WKC bereikt daarentegen een NO_x-vermindering van 50 ton.

Gaat men anderzijds uit van gelijke warmteproductie en verschillende elektriciteitsproductie, dan wordt op analoge wijze de milieubalans verkregen van Tabel 11.

De STEG-WKC vermijdt in deze benadering 0,8 PJ brandstof en 44 kton CO₂ ten opzichte van afzonderlijke opwekking van warmte en elektriciteit. De gasmotoren komen tot een reductie van 0,4 PJ brandstof en 22 kton CO₂. Bij gelijke warmteproductie bereikt de STEG-WKC vergeleken met de gasmotoren dus een twee keer zo hoge brandstofbesparing en beperking van de CO₂-uitstoot, en dit gaat samen met een eveneens tweemaal zo hoge elektriciteitsproductie (0,36 TWh vs. 0,18 TWh). Ook hier levert de STEG-WKC ten opzichte van afzonderlijke opwekking een netto vermindering van de NO_x-uitstoot op, terwijl de gasmotoren tot een verhoogde NO_x-uitstoot leiden.

Uiteraard kan de hier gevolgde methodiek nog op andere WKK-opties toegepast worden. Ook kan het effect van andere rendementen en specifieke emissies

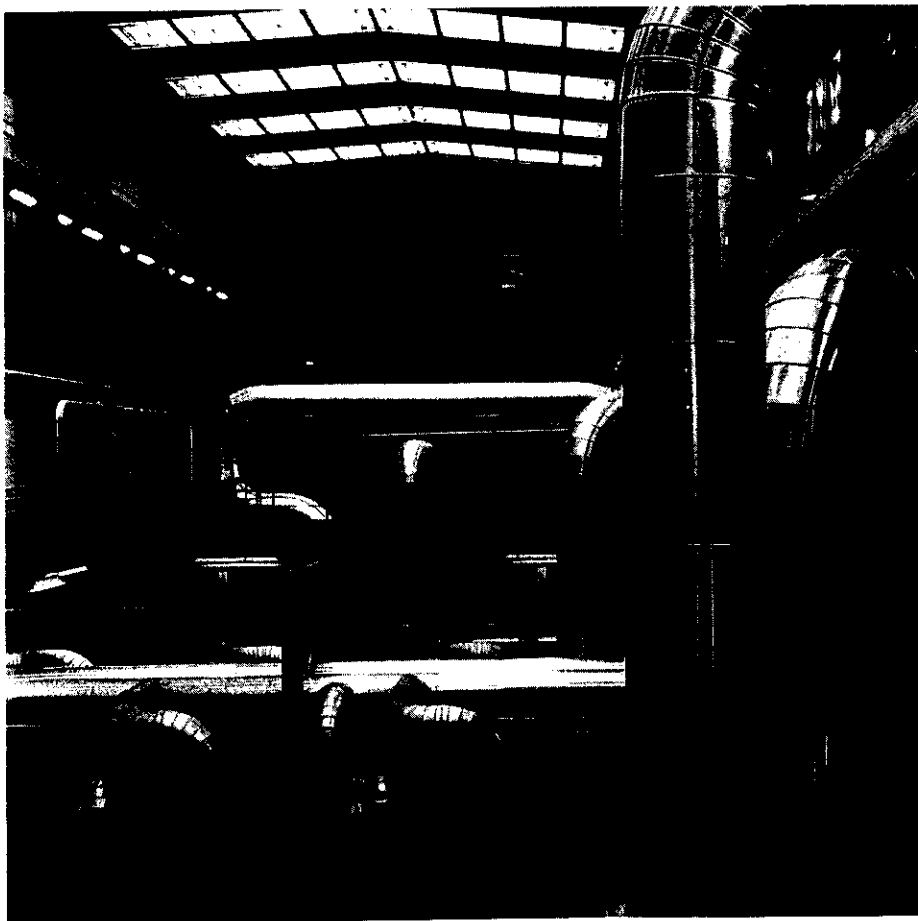
doorgerekend worden. Dit zal iets andere cijfers opleveren, maar onverlet laten dat het elektrisch rendement en de specifieke emissiecijfers van een WKK-installatie voor de milieuprestaties van groot belang zijn.

Conclusies

Anders dan over de kosten, kunnen over de energie- en milieu-aspecten van WKK duidelijke algemene uitspraken gedaan worden. Van belang is dat dit gebeurt vanuit een integrale benadering, waarin beide produkten (elektriciteit en warmte) in de beschouwingen betrokken worden.

In het voorgaande is een eenvoudige en transparante rekenmethodiek aangegeven, die de energie- en milieu-aspecten van verschillende WKK-opties op een integrale wijze benadert. Uit het gekozen rekenvoorbeeld blijkt dat het niet om het even is hoeveel elektriciteit of warmte er nu precies door een WKK-installatie geproduceerd wordt. Het maakt uit of er relatief weinig kracht aan veel warmte gekoppeld is, of juist relatief weinig warmte aan veel kracht.

STEG-WKC-centrale Merwedekanaal 12 te Utrecht.



Literatuur

- [1] Buma, J. T., Ingenieurs kiezen voor stadsverwarming; in: De Ingenieur, jg. 102, nr. 10, oktober 1990.
- [2] Milieu Aktie Plan van de energie-distributiesector, 1991.
- [3] NV Sep Elektriciteitsplan 1991-2000; Arnhem, 1990.
- [4] Buitenen, J.P. van, De gasturbine een intrigerend object; in: De Ingenieur, jg. 103, nr. 6/7, juni/juli 1991.
- [5] Ministerie van VROM, Vergelijking van centrale verwarming met stadsverwarming en kleinschalige warmtekoppeling; publicatieroom Lucht, nr. 94; Den Haag, 1991.
- [6] KEMA, Studie naar warmte/kracht-koppeling in het gebied Amsterdam zuid-Oost, 92356-WPB 90-1227, in opdracht van Energiebedrijf Amsterdam (EBA) en Energieproductiebedrijf UNA; Arnhem, oktober 1990.
- [7] Gasunie, een intern rapport van PWK; Groningen, 1990.
- [8] Spoorboekje voor de ruimteverwarmingsmarkt (verschijnt binnenkort).
- [9] VESTIN, De Toekomst van Warmte; VESTIN-symposium, 28 november 1990.
- [10] Dijk, D., Het warmteplan van Sep: een rendabele milieu-investering; in: De Ingenieur, jg. 103, nr. 5, mei 1991.
- [11] Plan van aanpak ter uitvoering van het Convenant over de Bestrijding van SO₂ en NO_x; Sep, Arnhem, 1991.