

# **CO-PRODUCTIE VAN METHANOL EN ELEKTRICITEIT OP BASIS VAN KOLENVERGASSING**

P. LAKO

In het kader van de koleninzetstudie (KIS-project), die het ESC in opdracht van de NOVEM uitvoert, is een deelstudie uitgevoerd naar de perspectieven van gecombineerde productie van elektriciteit en methanol met behulp van kolenvergassing.

## SAMENVATTING

Bij poederkoolcentrales is het rendement beperkt tot ca. 42%. Kolenvergassing, geïntegreerd met een STEG-eenheid (KV-STEG), biedt perspectief op een hoger rendement door toepassing van de nieuwste generatie gasturbines. Ook zijn de emissies van zwaveldioxyde en stikstofdioxide bij KV-STEG lager dan bij poederkoolcentrales. Een variant op deze vorm van elektriciteitsopwekking is de gecombineerde productie van methanol en elektriciteit op basis van kolenvergassing. Deze coproductie biedt economische voordelen ten opzichte van gescheiden productie.

In dit rapport staat centraal de coproductie van methanol en elektriciteit met een zogenaamd Once Through Methanol proces (KV-STEG/OTM). Het proces kent een relatief hoge omzettingsgraad van synthesegas in methanol. Het resterende gas wordt aan de gasturbines van de STEG geleverd. Het OTM-proces bevindt zich nog in het ontwikkelingsstadium. In dit rapport is verondersteld dat de synthesesreactoren een zodanige capaciteit hebben dat 50% van het synthesegas van de vergassers kan worden benut. Bij deellast wordt zo methanol en elektriciteit geproduceerd. Wanneer de elektriciteitsvraag toeneemt, wordt de methanolsynthese-unit afgeschakeld en gaat de totale gashoeveelheid rechtstreeks naar de gasturbines van de STEG.

Berekeningen wijzen uit dat het rendement van een grote KV-STEG installatie met de nieuwste generatie gasturbines 44-45% bedraagt, uitgaande van kolenvergassingsprocessen van British Gas/Lurgi en Shell. Bij coproductie van methanol en elektriciteit in een KV-STEG/OTM installatie bedraagt het rendement van elektriciteitsopwekking 30-31%, het rendement van methanolproductie 17-16% en het overall rendement circa 47%. Aangenomen is dat de installatie 5000 uur/jaar 30% van de maximale elektriciteitsproductie levert (dit correspondeert met 42-45% belasting van de vergassers) en 3000 uur/jaar op vollast draait. Bij een KV-STEG/OTM installatie op basis van het Shell-kolenvergassingsproces kan zo maximaal 980 MWe worden geleverd en op jaarbasis circa 155.000 ton 'fuel grade' methanol. Het rendement van de methanolproductie bedraagt 69-70%, aangenomen dat het additionele kolengebruik ten opzichte van een KV-STEG aan de methanolproductie wordt toegerekend. Het rendement van een kolenvergassingsinstallatie met een conventioneel methanolsyntheseprocess bedraagt circa 53%.

De variatie in de gassamenstelling heeft weinig invloed op het rendement en de emissies van de gasturbines. Voor methanolsynthese is een zeer laag zwavelgehalte vereist. Aan deze eis kan worden voldaan met bestaande ontzwavelingsprocessen, zoals Rectisol. De regelbaarheid van een KV-STEG/OTM installatie kan in beginsel gelijk zijn aan die van een KV-STEG. Voordat van commerciële toepassing sprake is, zal het OTM-proces op voldoende grote schaal moeten zijn gedemonstreerd en ook de coproductie van methanol en elektriciteit in een KV-STEG/OTM installatie.

De additionele investeringen van een KV-STEG/OTM installatie worden geschat op 5% van de investeringskosten van een KV-STEG (2495 fl/kWe respectievelijk 2375 fl/kWe). Deze additionele investeringen hebben betrekking op de methanolsynthese, gascompressor, expansieturbine, extra ontzwavelingscapaciteit, aanpassingen aan de STEG etc. De kosten van onderhoud en bediening worden geschat op 97 fl/kWe/jaar voor KV-STEG/OTM en 87 fl/kWe/jaar voor KV-STEG. Bij een afschrijvingstermijn van 25 jaar en een reële rentevoet van 5% bedragen de methanolproductiekosten 250 fl/ton. Bij afschrijving van de additionele investeringen in 15 jaar en tegen een marktrente van 10% bedragen de productiekosten 295 fl/ton; dit is circa 20% beneden de wereldmarktprijs voor methanol. Overigens kan ook het rendement van methanolproductie op basis van aardgas of kolen toenemen door de toepassing van geavanceerde synthesesprocessen.

Methanolproductie behoort voor elektriciteitsbedrijven niet tot hun 'core business'. Bij economische levensvatbaarheid van het KV-STEG/OTM concept zal men moeten bezien hoe de economische eigendom kan worden geregeld.



# INHOUD

1. INLEIDING	7
2. KOLENVERGASSING GECOMBINEERD MET STEG	8
2.1 Inleiding	8
2.2 Kolenvergassingsprocessen	9
2.3 KV-STEG op basis van het British Gas/Lurgi proces	9
2.3.1 Vergasser	9
2.3.2 Gasreiniging	9
2.3.3 Reiniging proceswater	10
2.3.4 Koppeling met STEG	10
2.3.5 Opbouw KV-STEG	10
2.3.6 Rendement	10
2.4 KV-STEG op basis van het Shell-proces	11
2.4.1 Vergasser	11
2.4.2 Gasreiniging	12
2.4.3 Reiniging proceswater	12
2.4.4 Koppeling met STEG	12
2.4.5 Opbouw KV-STEG:	12
2.4.6 Rendement	12
3. KV-STEG GECOMBINEERD MET OTM-PROCES	14
3.1 Inleiding	14
3.2 OTM-proces	15
3.3 KV-STEG/OTM op basis van het British Gas/Lurgi proces	15
3.4 KV-STEG/OTM op basis van het Shell-proces	17
3.5 Ontwikkelingsstadium	18
4. KOSTEN VAN KV-STEG/OTM	20
4.1 Kolenverbruik en methanolproductie	20
4.2 Investeringskosten	20
4.3 Kosten van onderhoud en bediening	21
4.4 Kosten methanolproductie	22
LITERATUUR	23



# 1. INLEIDING

In het kader van de koleninzetstudie (KIS-project), die het ESC in opdracht van de NOVEM uitvoert, is een deelstudie uitgevoerd naar de perspectieven van gecombineerde productie van elektriciteit en methanol met behulp van kolenvergassing, het zogenaamde KV-STEG/OTM proces (Once Through Methanol). Dit proces kan worden gezien als een uitbreiding van kolenvergassing-STEG; de commerciële introductie van kolenvergassing-STEG wordt in de tweede helft van de jaren negentig verwacht. De uitbreiding bestaat hierin dat het kolengas zonder zogenaamde shift-reactie aan de methanolsynthesereactie wordt onderworpen, waarna het niet gereageerde gas in de STEG wordt omgezet in elektriciteit. Deze combinatie van methanol- en elektriciteitsproductie vindt plaats, als de STEG in deellast wordt bedreven. Bij vollast wordt het kolengas rechtstreeks aan de STEG geleverd.

Ter vergelijking zijn twee typen KV-STEG centrales beschreven op basis van het British Gas/Lurgi kolenvergassingsproces en het Shell kolenvergassingsproces. Dezelfde kolenvergassingsprocessen zijn ook gebruikt voor het KV-STEG/OTM concept. Op deze wijze kan worden berekend met welke efficiency de methanol kan worden geproduceerd. Andere aspecten, die aan de orde komen, zijn:

- Zuiverheid van het kolengas voor methanolsynthese;
- De verhouding methanol/elektriciteit;
- Het overall rendement;
- Invloed op rendement/emissies van variaties in gassamenstelling;
- Mogelijke invloed van verdere ontwikkelingen bij de methanolsynthese;
- Kostenraming.

## 2. KOLENVERGASSING GECOMBINEERD MET STEG

### 2.1 Inleiding

De kolenvoorraden in de wereld zijn omvangrijk in verhouding tot die van olie en aardgas en bieden de mogelijkheid tot grootschalige inzet voor elektriciteitsopwekking. De hiervoor gebruikte techniek is de poederkoolcentrale met rookgasontzwaveling, eventueel aangevuld met katalytische verwijdering van stikstofoxiden. Het rendement van een dergelijke poederkoolcentrale is beperkt tot circa 42% bij toepassing van superkritische stoomcondities (250 bar/540°C/566°C) [1]. Met de bestaande ontzwavelingsprocessen ligt de grens voor een economische vorm van rookgasontzwaveling bij circa 95% [2]. Er zijn overigens processen in ontwikkeling, zoals een gecombineerd SO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-verwijderingsproces, die een nog hogere ontzwavelingsgraad mogelijk maken [3].

Een alternatief voor de poederkoolcentrale vormt de optie van een kolenvergassingsinstallatie, geïntegreerd met een STEG. Deze optie biedt het perspectief van een hoger rendement dan de poederkoolcentrale en een lagere SO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-uitworp. Bij de introductie van een nieuwe techniek voor grootschalige elektriciteitsopwekking zijn de volgende criteria van belang [4]:

- Rendement van elektriciteitsopwekking;
- Milieuconsequenties;
- Investeringskosten en kosten van bediening en onderhoud;
- Beschikbaarheid en gedrag bij deellast;
- Acceptatie door bedieningspersoneel en publiek.

De techniek van kolenvergassing, waarbij kolen onder druk met stoom en zuurstof worden omgezet in een middencalorisch kolengas, biedt niet alleen perspectief voor elektriciteitsopwekking maar ook voor produktie van methanol en pijpleidinggas uit synthesegas. Op grond van het lagere prijsniveau van olie en gas in de laatste jaren is produktie van synthesegas niet economisch haalbaar. Daarom is de aandacht van de industrie, die zich met de ontwikkeling van kolenvergassing bezighoudt, gericht op de optie kolenvergassing-STEg [5]. Kolenvergassing-STEg begint nu steeds meer in de belangstelling te komen door de ontwikkeling van de gasturbinetechnologie. De beschikbaarheid van grote industriële gasturbines met een vermogen van circa 150 MW, een hoog rendement en een grote bedrijfszekerheid betekent een doorbraak voor deze techniek [6]. Bij gebruik van aardgas als brandstof is het mogelijk in een STEg-centrale met nu beschikbare tweede generatie gasturbines (gasinlaattemperatuur circa 1100°C, rendement 33-34%) een rendement van circa 52% te bereiken [7,8,9]. Dit rendement van een aardgasgestookte STEg kan nog een procentpunt hoger uitvallen bij toepassing van de nu in ontwikkeling zijnde gasturbines met een vermogen van 150-200 MW, een inlaattemperatuur van 1200-1260°C en een rendement van circa 34,5% [10,11]. Hiermee is het eind van de gasturbinetechnologie nog niet in zicht. In de jaren negentig wordt de introductie verwacht van geavanceerde tweede generatie gasturbines met een gasinlaattemperatuur van circa 1300°C, waarmee het rendement van een aardgasgestookte STEg kan worden opgevoerd tot circa 55% [12]. Opvoering van de gasinlaattemperatuur tot 1400-1500°C in zgn. derde generatie gasturbines wordt mogelijk geacht [13].

De techniek van kolenvergassing maakt het mogelijk de inzet van een relatief goedkope energiedrager als kolen te koppelen aan een zeer efficiënte vorm van elektriciteitsopwekking, de STEg. Daarbij kan de gevormde zwavelwaterstof (H<sub>2</sub>S) voor 99% of meer worden verwijderd met beproefde processen, zoals Rectisol. De NO<sub>x</sub>-uitworp kan bij toepassing van gasturbines die nu in ontwikkeling zijn beperkt blijven tot 25 ppm, overeenkomend met circa 45 g/GJ [10,11]. Daarmee onderscheidt KV-STEg zich van de poederkoolcentrale, waar dergelijke lage emissiewaarden voor SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> niet of slechts tegen hoge kosten



haalbaar zijn. De lage emissies van SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> bij KV-STEg zijn aangetoond met de demonstratie-eenheid van 100 MW te Cool Water (VS) op basis van het Texaco-kolenvergassingsproces [14]. Van belang is dat kolenvergassing door elektriciteitsbedrijven als een chemisch bedrijf wordt beschouwd, wat een zekere verandering van denken vereist [6]. In Nederland blijkt deze verandering uit het besluit van de SEP om een demonstratie KV-STEg van 250 MW te bouwen, op basis van het Shell-kolenvergassingsproces, die eind 1993 bij Buggenum in gebruik zal worden genomen.

## 2.2 Kolenvergassingsprocessen

Voor KV-STEg worden veelal de volgende processen in beschouwing genomen [15,16]:

- 'Entrained bed' processen, zoals Texaco (TCGP), Shell (SCGP), Prenflo (Krupp-Koppers) en het Dow Syngas-proces van Dow Chemical;
- Het 'fixed bed' proces van British Gas/Lurgi (BGL).

Het Texaco- en het Dow Syngas-proces werken met slurry-voeding, in tegenstelling tot het Shell- en het Prenflo-proces waarbij kolen in poedervorm aan de vergasser worden toegevoerd. Door dit verschil in kolenvoeding is het rendement van een KV-STEg op basis van de twee eerstgenoemde processen lager dan bij toepassing van het Shell- of Prenflo-proces [4,16,17,18]. KV-STEg op basis van het British Gas/Lurgi proces kan qua rendement wedijveren met KV-STEg op basis van het Shell- of Prenflo-proces.

Als referentie KV-STEg-centrales is gekozen voor KV-STEgs op basis van het British Gas/Lurgi proces, als representant van 'fixed bed' processen, en het Shell-proces, als representant van de 'entrained bed' processen. Voor beide KV-STEgs is globaal aangegeven hoe het proces verloopt en welk rendement kan worden bereikt.

## 2.3 KV-STEg op basis van het British Gas/Lurgi proces

### 2.3.1 Vergasser

De British Gas/Lurgi vergasser is een tweede generatie vergasser die werkt volgens het 'fixed bed' principe. Kolen worden in de watergekoelde vergasser gebracht en doorlopen van boven naar beneden de stadia van pyrolyse, vergassing en verbranding. Warmte wordt in tegenstroom uitgewisseld met het geproduceerde gas. Stoom en zuurstof worden met blaaspijpen midden in de reactor gebracht. De vergassingsdruk bedraagt 20-40 bar.

De warmte-overdracht in tegenstroom leidt tot een hoog thermisch rendement, dat wil zeggen gemeten als de verbrandingswaarde van het koude gas ten opzichte van die van de kolen. Dit rendement bedraagt voor bitumineuze steenkool circa 89% (19). De koolstofomzetting is meer dan 99%. Vloeibare koolwaterstoffen en meegesleurde asdeeltjes worden direct van het ruwe gas gescheiden en teruggevoerd in de reactor. De vergasser werkt bij een zodanige temperatuur dat vloeibare slakafval plaatsvindt.

De tot nu toe grootste vergasser van het type British Gas/Lurgi in het Engelse Westfield heeft een capaciteit van 500 ton/dag. Voor een commerciële KV-STEg installatie wordt opschaling tot 825 ton/dag mogelijk geacht. Typische waarden voor het stoomverbruik zijn 0,36-0,41 ton/ton droge asvrije kolen en voor het zuurstofverbruik 0,52-0,57 ton/ton droge en asvrije kolen. Het ruwe gas verlaat de vergasser bij 400-500°C.

### 2.3.2 Gasreiniging

Het hete gas wordt afgekoeld, waarbij stoom wordt opgewekt. Vloeibare koolwaterstoffen en vlieggas worden afgescheiden en teruggevoerd naar de vergasser. Het afgekoelde ruwe gas wordt gereinigd, dat wil zeggen H<sub>2</sub>S en COS worden verwijderd met het Rectisol- of Purisol-proces. Het zure gas wordt in een Claus-proces behandeld, waarbij zuiver zwavel wordt gevormd. Het restgas, dat CO, H<sub>2</sub> en geringe hoeveelheden zwavelverbindingen

(H<sub>2</sub>S) bevat, wordt teruggevoerd naar de stroom van ruw gas. Op deze wijze kan een ontzwavelingsgraad van 99% of meer worden bereikt. Het gereinigde gas is verzadigd met waterdamp en verlaat de gasreiniging bij een druk van 25 bar en een temperatuur van 120°C.

Dit gas, dat een verbrandingswaarde heeft van circa 13,2 MJ/m<sup>3</sup>, wordt toegevoerd aan de verbrandingskamers van de gasturbines.

Tabel 1. Samenstelling gereinigd gas BGL-vergasser [6]

Component	Vol.%
CO	60
H <sub>2</sub>	27
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	7,5
N <sub>2</sub>	4
CO <sub>2</sub>	1,5

### 2.3.3 Reiniging proceswater

De proceswaterstromen worden verzameld en aan een thermisch oxidatieproces onderworpen. De vergassingsinstallatie produceert geen effluent. Het enige afvalproduct is het chloorzout dat als een vaste afvalstof beschikbaar komt.

### 2.3.4 Koppeling met STEG

Kenmerkend voor het British Gas/Lurgi kolenvergassingsproces is de hoge thermische efficiency (89% op basis van de verbrandingswaarde van het koude gas) en de geringe stoomproductie. Daardoor is het mogelijk kolenvergassing en STEG zoveel mogelijk gescheiden te houden, hetgeen voordelen kan bieden, bijvoorbeeld bij gefaseerde bouw (gasturbines, STEG, KV-STEg). Om een hoog rendement te kunnen bereiken is integratie dus niet nodig. Wel blijft het uit economische overwegingen interessant om de systemen voor ketelwater, koelwater, stoom en condensaat te integreren.

### 2.3.5 Opbouw KV-STEg

De KV-STEg installatie bestaat uit:

- 8 BGL-vergassers met een capaciteit van 825 ton/dag elk, dat wil zeggen een totale capaciteit van 6600 ton/dag;
- Drie gasturbines van het type KWU V94.3; vermogen per gasturbine 204 MW, gasinlaattemperatuur 1200°C, rendement 34,6% [10];
- Eén stoomturbine met een vermogen van 315 MW;
- Een luchtscheidingsinstallatie;
- Een gasreinigingsinstallatie met Rectisol-/Purisol-proces en Claus-plant.

### 2.3.6 Rendement

De acht vergassers verbruiken 274,4 ton kolen/uur. De kolen zijn Australische Wambo kolen met een verbrandingswaarde van 26,08 GJ/ton [4]. Dit komt overeen met een energiestroom van 1988 MWth. De kolen worden met een rendement van 89% omgezet in schoon gas. Het gas vertegenwoordigt, op basis van de onderste verbrandingswaarde, een energiestroom van 1769 MWth.

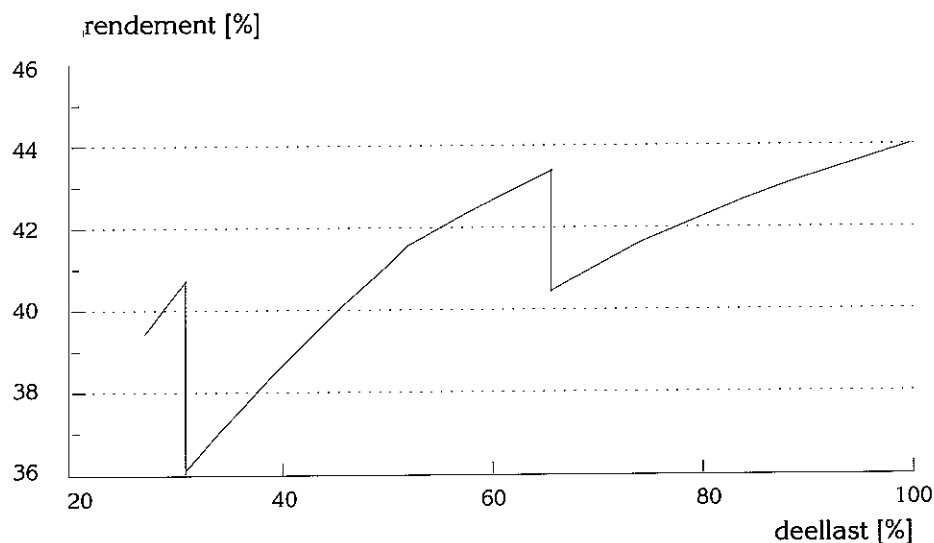
De omzetting in elektrische energie in de gasturbines gebeurt met een rendement van 34,6%. De afgassenketel levert hoge druk stoom aan een stoomturbine van 315 MW. De verhouding gasturbinevermogen: stoomturbinevermogen is 1,95 [6]. Het totale bruto vermogen bedraagt 927 MW.

De British Gas/Lurgi vergassers hebben een relatief laag zuurstofverbruik. Daardoor is het eigen verbruik voor de luchtscheidingsinstallatie beperkt. Een minimale capaciteit voor luchtcompressie is nodig in aanvulling op de gecomprimeerde lucht van de compressoren van de gasturbines. Het eigen verbruik wordt geschat op 5,6% van het bruto vermogen [17], wat overeenkomt met 52 MW.

Het netto vermogen van de KV-STEg is 875 MW. Het rendement bij vollast bedraagt 44,0%. Het deellastrendement is 41,7 % bij 75% deellast, 41,0% bij 50% deellast en 40,5% bij 30% deellast. Het verloop van het rendement als functie van de belasting wordt weergegeven in figuur 1. Deze zaagtandfunctie wordt verklaard door het in- of uitschakelen van gasturbines bij belastingverhoging respectievelijk belastingverlaging.

Typische waarden voor de snelheid van belastingveranderingen met een KV-STEg op basis van British Gas/Lurgi vergassers zijn:

- Maximaal 10% momentane belastingverhoging;
  - 3%/minuut betrokken op het maximale vermogen.
- De opstarttijd bedraagt voor koude start (bijvoorbeeld na revisie) 5-8 uur, voor koude of warme stand-by toestand 1-2 uur respectievelijk minder dan een uur [6]



Figuur 1. Rendement KV-STEg op basis van het British Gas/Lurgi proces

## 2.4 KV-STEg op basis van het Shell-proces

### 2.4.1 Vergasser

De Shell-vergasser is een tweede generatie vergasser die werkt volgens het 'entrained bed' principe. Kolen worden fijngemalen en gedroogd. Vanuit een opslagsysteem wordt de poederkool pneumatisch aan diametraal tegenover elkaar geplaatste branders van de vergasser toegevoerd. Ook zuurstof en stoom worden via de branders toegevoerd. De vergassingstemperatuur bedraagt 1400-1700°C, de druk bedraagt 20-40 bar [20].

De relatief hoge vergassingstemperatuur betekent dat methaan en hogere koolwaterstoffen nauwelijks worden gevormd. De koolstofomzetting bedraagt ca. 99%. Van de totale hoeveelheid as komt 40-60% vrij als vloeibare slak onderin de vergasser, de rest wordt als vliegslak uit het ruwe gas verwijderd [21]. Het rendement, gemeten als de verbrandingswaarde van het koude gas ten opzichte van die van de kolen, bedraagt 80-83%. Daarnaast komt 16-17% van de oorspronkelijke energie vrij als hoge druk stoom bij de koeling van de reactorwand en van het ruwe gas.

De tot nu toe grootste vergasser van dit type te Deer Park, Texas, heeft een capaciteit van 230 ton/dag. Voor een grote KV-STEg installatie zoals de demonstratie-eenheid van SEP te Buggenum, wordt opschaling met een factor 8 tot 1810 ton/dag mogelijk geacht.

Typische waarden voor het stoom- en zuurstofverbruik zijn 0,08 respectievelijk 0,59 ton/ton droge en asvrije kolen. Het ruwe gas verlaat de vergasser bij 1450°C.

## 2.4.2 Gasreiniging

Het hete gas wordt afgekoeld met koud gas zodat de vliegslak vast wordt en kan worden verwijderd. In de syngas-koeler wordt het gas verder afgekoeld, waarbij oververhitte hoge druk stoom wordt geproduceerd. Een deel van het afgekoelde gas wordt gecomprimeerd en gerecirculeerd.

Het ruwe gas wordt gereinigd van chloriden, HCN, ammoniak en zwavel (H<sub>2</sub>S en COS). Het zure gas wordt in een Claus-proces behandeld, waarbij zuiver zwavel wordt gevormd. Een ontzwavelingsgraad van 99% of meer is haalbaar.

Dit gas, dat een verbrandingswaarde heeft van circa 10,8 MJ/m<sup>3</sup>, wordt toegevoerd aan de verbrandingskamers van de gasturbines.

Tabel 2. Samenstelling gereinigd gas Shell-vergasser

Component	Vol.%
CO	63,0
H <sub>2</sub>	26,8
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	<0,01
N <sub>2</sub>	8,0
CO <sub>2</sub>	2,2

## 2.4.3 Reiniging proceswater

Het proceswater wordt gereinigd van ammoniak, cyaniden en zwavelverbindingen. Het effluent wordt biologisch gezuiverd. Indien nodig kan deze kleine stroom afvalwater met lage temperatuur warmte worden ingedampt, waarbij een residu van chloorzouten overblijft.

## 2.4.4 Koppeling met STEG

Bij het Shell-kolenvergassingsproces wordt 16-17% van de energieinhoud van de kolen bij de koeling van de vergasser en de syngaskoeler omgezet in hoge druk stoom. Deze stoom wordt evenals de stoom die wordt geproduceerd in de afgassenketel van de gasturbines geleverd aan de stoomturbine. Bij het Shell-kolenvergassingsproces is het dus noodzakelijk de stromen van ketelwater, stoom en condensaat van de vergasser en de STEG te integreren.

## 2.4.5 Opbouw KV-STEG:

- 4 Shell-vergassers met een capaciteit van 1810 ton/dag elk, d.w.z. een totale capaciteit van 7240 ton/dag;
- Drie gasturbines van het type KWI V94.3; vermogen per gasturbine van 204 MW, gasinlaattemperatuur 1200°C, rendement 34,6% [10];
- Eén stoomturbine met een vermogen van 460 MW;
- Een luchtscheidingsinstallatie;
- Een gasreinigingsinstallatie met Claus-plant.

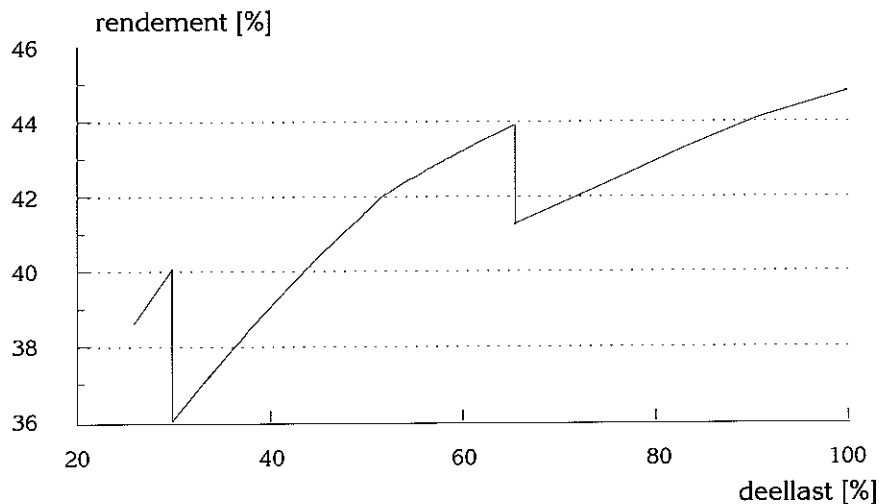
## 2.4.6 Rendement

De 4 vergassers verbruiken 301,7 ton kolen/uur. De kolen zijn Australische kolen met een verbrandingswaarde van 26,08 GJ/ton [4]. Dit komt overeen met een energiestroom van 2186 MWth. De kolen worden met een rendement van 80,9% omgezet in schoon gas. Het gas vertegenwoordigt, op basis van de onderste verbrandingswaarde, een energiestroom van 1768 MWth.

De omzetting in elektrische energie in de gasturbines gebeurt met een rendement van 34,6% ( $3 \times 204$  MW). De vergassers, syngas-koeler en de afgassenketel van de gasturbines leveren stoom aan een stoomturbine van 460 MW. Dit komt overeen met de verhouding gasturbinevermogen: stoomturbinevermogen van 1,28, wanneer KWU V94.2 gasturbines (rendement 33,4%) waren toegepast [17]. Het totale bruto vermogen bedraagt 1072 MW.

De Shell-vergassers hebben een zuurstofverbruik dat representatief is voor 'entrained bed' vergassers. In aanvulling op de gecomprimeerde lucht van de compressoren van de gasturbines is een beperkte capaciteit voor luchtcompressie nodig ten behoeve van de luchtscheidingsinstallatie. Het eigen verbruik wordt geschat op 8,6% van het bruto vermogen [17], wat overeenkomt met 92 MW.

Het netto vermogen van de KV-STEG is 980 MW. Het vollastrendement bedraagt 44,8%. Het deellastrendement is bij 75% deellast 42,2%, bij 50% deellast 41,5% en bij 30% deellast 40,1%. Het rendement als functie van de belasting wordt weergegeven in figuur 2. De zaagtandfunctie is het gevolg van het in- en uitschakelen van gasturbines.



*Figuur 2. Rendement KV-STEG op basis van het Shell-proces*

## 3. KV-STEAG GECOMBINEERD MET OTM-PROCES

### 3.1 Inleiding

In diverse studies is gerapporteerd over de economische voordelen die gecombineerde productie van methanol en elektriciteit op basis van kolenvergassing levert. Het gaat dan in de regel om een conventioneel methanol-synthese proces dat in daluren van de elektriciteitsvraag wordt ingezet om de resterende capaciteit van de kolenvergassingsinstallatie te benutten. Afhankelijk van de uitwerking kan methanol het hoofdprodukt zijn (zogenaamd AA grade methanol) of een bijprodukt, dat desgewenst kan worden gebruikt voor bijstoken in de gasturbines van de KV-STEAG/methanol installatie in piekuren [22,23].

Een andere mogelijkheid is onderzocht door Fluor Engineers and Constructors Inc. in opdracht van EPRI [24]. Hierbij worden methanol en elektriciteit gecombineerd in basislast geproduceerd met een zgn. Once Through Methanol-proces (OTM). Het betreft hier een nieuw methanol-synthese-proces, dat nog in het ontwikkelingsstadium is. Een belangrijk verschil met de andere ontwerpen is dat het synthese gas éénmaal door de synthesereactor gaat, waarbij een hoge omzettingsgraad wordt bereikt, en het gas dat niet gereageerd heeft als stookgas voor de gasturbines wordt gebruikt. Verder kan bij dit proces, behalve recompressie van het niet-gereageerde gas, ook de zgn. CO-shift reactie en de verwijdering van CO<sub>2</sub> achterwege blijven.

Waar bij de meeste studies dus de nadruk ligt op de economische voordelen van gecombineerde productie van methanol en elektriciteit op basis van kolenvergassing, wordt in de EPRI-studie ook veel aandacht gegeven aan de efficiency-voordelen van het zgn. KV-STEAG/OTM proces. In de volgende tabel wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste parameters van de verschillende ontwerpen.

Tabel 3. Belangrijkste parameters KV-STEAG /methanolproductie

	Conventioneel KV-STEAG methanol proces [23]	KV-STEAG/OTM [24]
Kolengebruik (10 <sup>6</sup> GJ/jaar)	97,1	86,4
Elektriciteitsproductie (GWh/jaar)	5800	7103
Methanolproductie (10 <sup>3</sup> ton/jaar)	1400	756,6
Rendement op basis van elektriciteit (%)	21,5	29,6
Rendement op basis van methanol (%)	28,8	17,8
Overall rendement (%)	50,3	47,4
Rendement referentie KV-STEAG (%)	43,1	40,4
Rendement additionele methanolproductie (%)	57,4	66,4

Bij gecombineerde productie van methanol en elektriciteit volgens het conventionele methanol-synthese-proces wordt in daluren methanol van 'AA grade' kwaliteit gemaakt. Elektriciteit wordt in middenlast geproduceerd (4380 uur/jaar). Het overall rendement bedraagt circa 50%. Dit overall rendement is gedefinieerd als de som van elektrische energie en methanol-energie (onderste verbrandingswaarde), gedeeld door de energie in de vorm van toegevoerde kolen (onderste verbrandingswaarde). Wanneer de additionele hoeveelheid kolen t.o.v. gescheiden elektriciteitsopwekking met KV-STEAG (rendement 43,1%) aan de methanolproductie wordt toegerekend, is het rendement van methanolproductie uit kolen te becijferen op 57,4%. Dit ligt hoger dan het rendement van een 'dedicated coal to methanol plant' in het EPRI-rapport, dat 53,5% bedraagt (57,86% bij gebruik van bovenste verbrandingswaarden).

Gecombineerde methanol-/elektriciteitsproductie volgens het KV-STEAG/OTM proces levert 'fuel grade' methanol en elektriciteit in basislast. Het overall rendement bedraagt hier 47,4%, terwijl het rendement van gescheiden opwekking 40,4% is. Toerekening van de additionele hoeveelheid kolen aan de methanolproductie levert een rendement op van 66,4%. Dit is veel hoger dan het rendement bij conventionele methanol-synthese op basis van kolenvergassing (53,5% volgens het EPRI-rapport). Hiermee wordt geïllustreerd dat uitbreiding van KV-STEAG met methanolproductie behalve economische ook efficiencyvoordelen kan bieden. Verder is coproductie van methanol en elektriciteit op basis van KV-STEAG/OTM ook relatief gunstig wat betreft CO<sub>2</sub>-productie [28].

### 3.2 OTM-proces

Het Once Through Methanol proces is gebaseerd op technologie die ontwikkeld is door Chem Systems. Bij dit proces, een zogenaamd 'liquid fase methanol-synthese proces', stroomt het synthesegas naar boven en wisselt warmte uit met een stroom van inerte olie met gefluïdiseerde katalysatordeeltjes, die onderin de reactor wordt verwijderd en gerecirculeerd. Door de efficiënte warmte-overdracht kan het evenwicht van de synthesesreactie in de richting van methanol worden verlegd. Methanol wordt in een flash-sectie gescheiden van opgeloste gassen, waarbij 'fuel-grade' methanol resteert.

Het ontzwavelde gas komt bij een druk van circa 60 bar in de synthesesreactor, zonder CO-shift en CO<sub>2</sub>-verwijdering. Een klein gedeelte van het gas (7-17%) reageert tot methanol, de rest van het gas wordt niet gerecirculeerd, maar na expansie aan de gasturbines van de STEG toegevoerd. De voordelen t.o.v. een conventioneel methanol-synthese proces zijn:

- In het 'once through' concept wordt het gas dat niet gereageerd heeft niet gerecirculeerd, waardoor recompressie niet nodig is;
- Het gas uit de vergassers behoeft niet een CO-shift te ondergaan om een H<sub>2</sub>: CO-verhouding van 2:1 te verkrijgen; ook behoeft geen CO<sub>2</sub>-verwijdering te worden toegepast;
- Door integratie van het 'once through' methanol-synthese concept met een STEG kan maximaal gebruik worden gemaakt van de stoom die bij de exotherme methanol-synthesereactie wordt opgewekt (de stoom wordt in de verbrandingskamers van de gasturbines geïnjecteerd).

Het OTM-concept is tot nu toe op beperkte schaal gedemonstreerd. Er zijn plannen ingediend om 10% van de capaciteit van de kolenvergassingsinstallatie bij Great Plains (North Dakota) om te bouwen van SNG- op methanolproductie (500 ton fuel-grade methanol/dag) [25].

### 3.3 KV-STEAG/OTM op basis van het British Gas/Lurgi proces

De opbouw van de KV/STEAG/OTM installatie is in grote lijnen dezelfde als de KV-STEAG op basis van het British Gas/Lurgi proces volgens paragraaf 2.3:

- 8 BGL-vergassers met een capaciteit van 825 ton/dag elk, d.w.z. een totale capaciteit van 6600 ton/dag;
- Een luchtscheidingsinstallatie;
- Een Rectisol-gasreinigingsinstallatie met Claus-Plant;
- Twee methanol-synthesereactoren volgens het OTM-proces van Chem Systems met compressor en expansieturbine voor het synthesegas;
- Drie gasturbines van het KWI V94.3; vermogen per gasturbine van 204 MW, gasinlaattemperatuur 1200°C, rendement 34,6% [10];
- Eén stoomturbine met een vermogen 315 MW.

De twee methanol-synthesereactoren hebben gezamenlijk een zodanige capaciteit dat 50% van het gas kan worden verwerkt. Deze capaciteit past bij de belasting in de daluren van

de elektriciteitsvraag. Bij vollast wordt de synthese-capaciteit niet benut en gaat het gas rechtstreeks naar de gasturbines.

Het ruwe gas bevat (gemeten op watervrije basis) circa 170 ppm H<sub>2</sub>S en COS. Voor de methanol-synthese is maximaal 0,5 ppm H<sub>2</sub>S toelaatbaar (99,7% ontzwaveling). Met het Rectisol-proces kan het zwavelgehalte tot minder dan 0,1 ppm worden teruggebracht. Met dit proces kan dus aan de eis worden voldaan [19]. H<sub>2</sub>S wordt in de Claus-plant omgezet in zwavel.

Voor compressie van 50% van het gas, na reiniging en drogen, van 25 tot 60 bar is circa 14,4 MW vermogen nodig. Aangenomen is dat de methanol-conversie ongeveer even groot is als bij synthesegas uit Texacovergassers, dat verhoudingsgewijs meer waterstof bevat.

Tabel 4. Massabalans methanol-synthese bij BGL-vergassing

	In Synthesegas		Spuigas		Uit Methanol		Flash-gas	
	Vol. %	10 <sup>3</sup> mol/hr	Vol. %	10 <sup>3</sup> mol/hr	Vol. %	10 <sup>3</sup> mol/hr	Vol. %	10 <sup>3</sup> mol/hr
CO	60	6467,1	69,1	551,5			40,0	11,6
H <sub>2</sub>	27	2910,2	13,7	1100,9			4,5	1,3
CH <sub>4</sub>	7,5	808,4	10,0	804,0			15,0	4,4
N <sub>2</sub>	4	431,1	5,3	430,4			2,5	0,7
CO <sub>2</sub>	1,5	161,7	1,9	151,7	0,1	0,9	31,5	9,1
CH <sub>3</sub> OH					98,5	876,9	6,5	1,9
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH					1,4	12,6		
Totaal		10778,5		8038,5		890,4		29
kg/hr		219176		189352		28718		879
H (kJ/mol)		295,26		308,8		630,4		288,82
H <sub>0</sub> (kJ/m <sup>3</sup> )		13173		13777				12886
MWth (H <sub>0</sub> )		884,0		689,5		155,9		2,3

Het synthesegas, dat van onder naar boven door de reactor stroomt, wisselt warmte in tegenstroom uit met de olie waarin katalysatordeeltjes zijn opgelost. Bovenin de reactor worden de vaste, vloeibare en gasvormige fasen gescheiden. De katalysatordeeltjes blijven in de reactor. De olie wisselt warmte uit met ketelwater, waarbij verzadigde stoom van 20,3 bar wordt opgewekt. Daarna wordt de olie gerecirculeerd. Het spuigas, gemengd met methanoldamp en koolwaterstoffen, wordt afgekoeld, waarbij ook stoom van 20,3 bar wordt opgewekt. Door verdere koeling, waarbij lage druk stoom wordt opgewekt, kunnen olie en ruwe methanol worden afgescheiden. De olie wordt gerecirculeerd, de methanol wordt in de flash-sectie gescheiden van opgeloste gassen.

In totaal wordt 50,5 ton stoom per uur van 20,3 bar geproduceerd. Deze stoom wordt in de verbrandingskamers van de gasturbines geïnjecteerd. Expansie van het spuigas levert een vermogen van 9,0 MW. Het flash-gas wordt in de afgassenketels van de gasturbines bijgestookt.

De vergassers werken op 42,2% van de maximale capaciteit. Er wordt 115,9 ton kolen/uur vergast, corresponderend met een energiestroom van 839 MWth. Het synthesegas verteegenwoordigt, op basis van de onderste verbrandingswaarde, een energiestroom van 747 MWth. Het spuigas levert in combinatie met de geïnjecteerde stoom een vermogen van 206,4 MW van de gasturbines. Het stoomturbinevermogen bedraagt 91,3 MW. Het totale bruto vermogen van gasturbines, stoomturbine en expansieturbine is 305 MW.



Het eigen verbruik, inclusief compressie van synthegas is circa 43 MW. Het netto vermogen is dus 262 MW. Het netto elektrisch rendement is 31,2%, het rendement van methanolproductie 15,7%. Het overall rendement bedraagt 46,9%.

### 3.4 KV-STEG/OTM op basis van het Shell-proces

De KV-STEG/OTM installatie heeft in grote lijnen dezelfde opbouw als de KV-STEG op basis van het Shell-proces volgens paragraaf 2.4:

- 4 Shell-vergassers met een capaciteit van 1810 ton/dag elk, dat wil zeggen een totale capaciteit van 7240 ton/dag;
- Een luchtscheidingsinstallatie;
- Een Rectisol-gasreinigingsinstallatie met Claus-plant;
- Twee methanol-synthesereactoren volgens het OTM-proces van Chem Systems met compressor en expansieturbine voor het synthegas;
- Drie gasturbines van het type KWU V 94.3; vermogen per gasturbine 204 MW, gasinlaattemperatuur 1200°C, rendement 34,6% [10];
- Eén stoomturbine met een vermogen van 460 MW.

De twee methanol-synthesereactoren hebben gezamenlijk een zodanige capaciteit dat 50% van het gas kan worden verwerkt. Deze capaciteit past bij de belasting in de daluren van de elektriciteitsvraag. Bij vollast wordt geen methanol geproduceerd.

Het ruwe gas bevat circa 170 ppm H<sub>2</sub>S en COS (gemeten op watervrije basis). Met het Rectisol-proces kan het zwavelgehalte worden teruggebracht tot 0,5 ppm, zelfs tot 0,1 ppm [19]. H<sub>2</sub>S wordt in de Claus-plant omgezet in zwavel.

Voor compressie van 50% van het gas, na reiniging en drogen, van 25 tot 60 bar is ca. 18,4 MW nodig. Aangenomen is dat de methanol-conversie ongeveer even groot is als bij synthegas uit Texaco-vergassers.

Tabel 5. Massabalans methanol-synthese bij Shell-vergassing

	In Synthegas		Spuigas		Uit Methanol		Flash-gas	
	Vol.%	10 <sup>3</sup> mol/hr	Vol.%	10 <sup>3</sup> mol/hr	Vol.%	10 <sup>3</sup> mol/hr	Vol.%	10 <sup>3</sup> mol/hr
CO	63	6467,1	73,1	7131,8			40,0	17,8
H <sub>2</sub>	26,8	2910,2	13,4	1310,2			4,5	2,5
CH <sub>4</sub>							15,0	
N <sub>2</sub>	8,0	1047,3	10,7	1045,7			2,5	1,6
CO <sub>2</sub>	2,2	288,0	2,8	275,6	0,1	1,0	31,5	11,4
CH <sub>3</sub> OH					98,5	1065,0	6,5	2,3
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH					1,4	15,3		
Totaal		13091,3		9763,3		1081,3		35,6
kg/hr		280104		243830		34874		1124
H (kJ/mol)		243,09		239,17		630,4		200,94
H <sub>0</sub> (kJ/m <sup>3</sup> )		10846		10671				8965
MWth (H <sub>0</sub> )		884,0		648,6		189,4		2,0

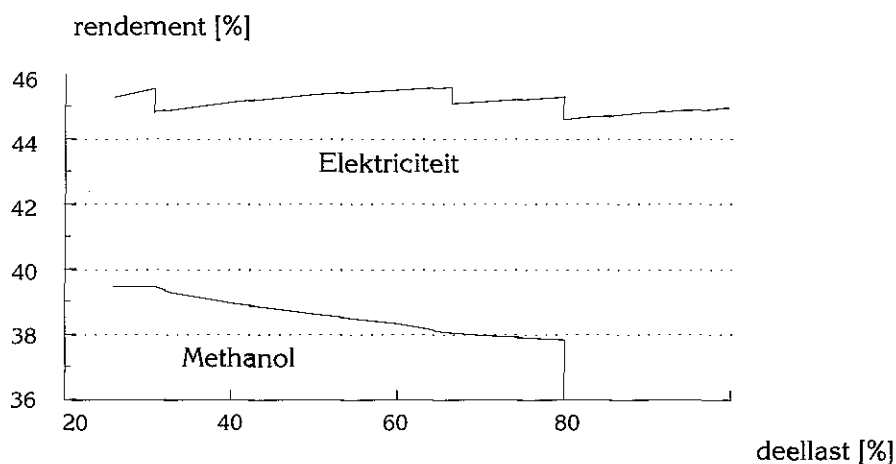
Het synthesesegas wisselt warmte uit met de olie, waarin katalysatordeeltjes zijn opgelost. De katalysatordeeltjes blijven in de reactor. De olie wisselt warmte uit met ketelwater, waarbij stoom van 20,3 bar wordt opgewekt. Het spuigas, gemengd met methanoldamp en koolwaterstoffen, wordt afgekoeld, waarbij ook stoom van 20,3 bar wordt opgewekt. Ruwe methanol wordt in de flash-sectie gescheiden van opgeloste gassen.

In totaal wordt 61,3 ton stoom/uur van 20,3 bar geproduceerd, die in de verbrandingskamers van de gasturbines wordt geïnjecteerd. Expansie van het spuigas levert een vermogen van 11,6 MW. Het flash-gas wordt in de afgassenketels van de gasturbines bijgestookt.

De vergassers werken op 44,6% van de maximale capaciteit. Er wordt 134,4 ton kolen/uur vergast, corresponderend met een energiestroom van 974 MWth. Het synthesesegas vertegenwoordigt, op basis van de onderste verbrandingswaarde, een energiestroom van 788 MWth.

Het spuigas levert in combinatie met de geïnjecteerde stoom een vermogen van 206 MW. Het vermogen van de stoomturbine bedraagt 150 MW. Het totale bruto vermogen van gasturbines, stoomturbine en expansieturbine bedraagt 366 MW.

Het eigen verbruik, inclusief compressie van synthesesegas, bedraagt circa 72 MW. Het netto vermogen is dus 294 MW. Het netto elektrisch rendement is 30,2%, het rendement van methanolproductie 17,3%. Het overall rendement is 47,5%. Het rendement van methanol- en elektriciteitsproductie is in figuur 3 weergegeven als functie van de belasting.



Figuur 3. Rendement KV-STEG/OTM op basis van het Shell-proces

### 3.5 Ontwikkelingsstadium

Wanneer de resultaten van het demonstratieproject KV-STEG te Buggenum omstreeks 1995 bekend zijn, kan rond de eeuwwisseling sprake zijn van de commerciële introductie van KV-STEG. Voor de optie KV-STEG/OTM is van belang dat het 'once through' methanol proces op voldoende grote schaal wordt gedemonstreerd. Dan zal ook de combinatie met elektriciteitsopwekking nog moeten worden gedemonstreerd.

Een aantal technieken staat al ter beschikking. Met bestaande ontzwavelingsprocessen (Rectisol) kan de gewenste zuiverheid van het synthesesegas (0,5 ppm  $H_2S$ ) worden bereikt. Bij combinatie met elektriciteitsopwekking wordt een zeer lage  $SO_2$ -uitworp bereikt, als het het gas een restgasbehandeling ondergaat (SUPERClaus of SCOT). Het spuigas van het 'once through' methanol proces bevat meer CO in verhouding tot  $H_2$  dan het oorspronkelijke synthesesegas (5:1 respectievelijk 2:1). Ondanks het feit dat de verbrandingswaarde van het gas lager is dan van het synthesesegas, zijn de verbrandingseigenschappen gunstiger. De variaties in de gassenstelling bij KV-STEG/OTM zullen geen grote invloed

hebben op het rendement van de gasturbines of op de  $\text{NO}_x$ -emissie. Gasturbines die geschikt zijn voor KV-STEG installaties zijn dus ook toepasbaar bij KV-STEG/OTM.

Bij de gekozen capaciteit van de methanolsynthese is de verhouding methanol:elektriciteit bij het British Gas/Lurgi-proces maximaal 0,50 en bij het Shell-proces 0,57. Bij 80% deellast zijn de minimale verhoudingen 0,22 bij het BGL-proces en 0,24 bij het Shell-proces. Het verschil wordt verklaard door het methaangehalte (circa 7,5 volume %) van het synthesesegas van BGL-vergassers.

De regelbaarheid van het KV-STEG/OTM proces is vergelijkbaar met die van een KV-STEG. Door beneden 50% deellast over te schakelen op gecombineerde methanol- en elektriciteitsproductie, kan het op- en afregelen tussen 50 en 100% deellast worden ontkoppeld van de methanolproductie, zodat eventuele storingen hierin alleen bij inzet in de daluren invloed kunnen hebben.

## 4. KOSTEN VAN KV-STEG/OTM

### 4.1 Kolenverbruik en methanolproductie

Voor het British Gas/Lurgi- en het Shell-proces is berekend wat het additionele kolenverbruik van het KV-STEG/OTM concept is in vergelijking met KV-STEG. Dit additionele kolengebruik kan worden toegerekend aan de methanolproductie.

Aangenomen is dat elke installatie 5000 uur/jaar op 30% van de maximale elektriciteitsproductiecapaciteit werkt en 3000 uur/jaar op vollast (omgerekend 4500 vollasturen, belastingfactor circa 51%). De resultaten zijn als volgt:.

Tabel 6. Parameters KV-STEG/OTM op basis van het British Gas/Lurgi en het Shell-proces

	KV-STEG/OTM		KV-STEG	
	BGL	Shell	BGL	Shell
Kolengebruik ( $10^6$ GJ/jaar)	36,60	41,13	33,14	36,82
Elektriciteitsproductie (GWh/jaar)	3937,5	4410	3937,5	4410
Methanolproductie ( $10^3$ ton/jaar)	121,5	155,3	-	-
Rendement op basis van elektriciteit (%)	38,73	38,6	42,77	43,12
Rendement op basis van methanol (%)	6,49	7,38	-	-
Overall rendement (%)	45,22	45,98	42,77	43,12
Rendement additionele methanolproductie (%)	68,8	70,4		

Het berekende rendement van de omzetting van kolen in methanol (69-70%) is indicatief, omdat het 'once-through' methanolsyntheseproces nog niet is gedemonstreerd op voldoende grote schaal. Ter vergelijking: het rendement van een kolenvergassing-methanolsynthese-installatie wordt geschat op circa 53%. Toepassing van KV-STEG/OTM kan dus een aanzienlijk hoger rendement opleveren dan een conventioneel methanolsyntheseproces op basis van kolen.

### 4.2 Investeringskosten

Voor een KV-STEG/OTM- en een KV-STEG-installatie op basis van het Shell-proces zijn de investeringskosten geraamd in guldens van 1988. Aangenomen is dat bij de KV-STEG-installatie het geproduceerde gas voor 95% wordt ontzwaveld. Voor de KV-STEG/OTM-installatie is aangenomen dat de helft van het gas voor 99,7% wordt ontzwaveld (dit deel gaat naar de synthese-reactor), de andere helft voor 95%. De ontzwaveling bij de KV-STEG/OTM-installatie bedraagt dus bij 30% deellast 99,7%, bij vollast 97,3%.

Voor de berekening van de bouwrente is uitgegaan van de spreiding van de kosten gedurende de 4-jarige bouwperiode conform het rapport van Fluor-Daniel [16]. De rentekosten bedragen 9,39% van de bouwkosten bij een rentevoet van 5%. De investeringskosten zijn als volgt geschat:

Tabel 7. Investeringskosten (fl 1988) van KV-STEg en KV-STEg/OTM op basis van het Shell-proces (980 MWe)

	KV-STEg		KV-STEg/OTM	
	mln. fl	fl/kWe	mln. fl	fl/kWe
Kolenopslag	50		50	
Luchtscheiding	225		225	
Vergassing en gaskoeling	460		460	
Ontzwaveling	125		140	
Methanolsynthese			70	
Chemicaliën en katalysatoren	15		20	
STEg	900		902	
Algemene bouwkundige kosten	250		260	
	2025		2127	
Reservering voor escalatie 5%	101		106	
	2126		2233	
Bouwrente 9,39%	200		210	
Totaal	2326	2375	2443	2495

Bij beide typen installaties zijn de kosten van STEg en algemene bouwkundige kosten ruim de helft van de totale kosten. Andere grote kostenfactoren zijn vergassing, gaskoeling en luchtscheiding. Alle kosten zijn indicatief. De kosten van methanolsynthesereactor, gas-compressor en expansieturbine zijn geschat op 70 mln gulden, de additionele kosten van ontzwaveling op 15 mln gulden. Daarnaast is gerekend met additionele bouwkundige kosten, extra kosten voor stoominjectie van de gasturbines en katalysatoren en chemicaliën voor de methanolsynthese. Inclusief reservering voor escalatie en bouwrente worden de additionele investeringen voor de methanolsynthese geraamd op 117 mln gulden.

De totale investeringskosten van KV-STEg zijn indicatief te becijferen op 2375 fl/kWe, inclusief reservering voor escalatie en bouwrente. Voor KV-STEg/OTM zijn deze kosten 2495 fl/kWe.

### 4.3 Kosten van onderhoud en bediening

De onderhouds- en bedieningskosten zijn als volgt geschat:

Tabel 8. Kosten van onderhoud en bediening (fl 1988) van KV-STEg en KV-STEg/OTM op basis van het Shell-proces (980 MWe, 4500 vollasturen/jaar)

	KV-STEg		KV-STEg/OTM	
	mln. fl	fl/kWe	mln. fl	fl/kWe
Bediening	10		10,5	
Onderhoudspersoneel	19		20,5	
Materialen	28		30,5	
Administratie en staf	9		9,5	
Chemicaliën en katalysatoren	12		16	
Afvalzouten	7		7,9	
Water	1,6		1,9	
Opbrengst zwavel	-1,6		-1,8	
Totaal	85	86,7	95	96,7

De belangrijkste kostenfactoren zijn de personeelskosten en de kosten van materialen. Deze kosten bedragen ca. 3% van de investeringskosten op jaarbasis. In sommige andere studies wordt gerekend met 4% van de investeringskosten [26]. Daarnaast zijn de kosten van chemicaliën en katalysatoren van belang, waaronder brandstofkosten voor het opstarten van de gasturbines. Bij KV-STEG/OTM is het kolengebruik hoger dan bij KV-STEG, waardoor een aantal kosten navenant hoger is. De opbrengst van zwavel is gesteld op 240 fl/ton [16]. Ook voor de kosten van onderhoud en bediening geldt dat de berekeningen indicatief zijn.

#### 4.4 Kosten methanolproductie

Op grond van de investeringskosten en de kosten van onderhoud en bediening in de paragrafen 4.2 en 4.3 kunnen de kosten van methanolproductie worden berekend. Uitgegaan is van een levensduur van 25 jaar en een reële rentevoet van 5%. De kolenprijs is 4,66 fl/GJ. De kosten van methanolproductie zijn als volgt:

Tabel 9. Kosten methanolproductie KV-STEG/OTM (fl 1988) op basis van het Shell-proces

	KV-STEG mln. fl/jaar	KV-STEG/OTM mln. fl/jaar	fl/ton
Afschrijvingen en rente	165,0	173,3	
Kolen	171,6	191,7	
Onderhoud en bediening	85	95	
Totaal	421,6	460,0	
Additionele kosten Methanolsynthese		38,4	250

De berekende produktiekosten (250 fl/ton) verhouden zich gunstig ten opzichte van de wereldmarktprijs van methanol (350 fl/ton). Dit valt ten dele te verklaren door de gebruikte afschrijvingsduur en rentevoet. Bij afschrijving van de additionele investeringskosten van 117 mln gulden in 15 jaar tegen een marktrente van 10% zouden de produktiekosten circa 295 fl/ton bedragen; dit is circa 20% lager dan de wereldmarktprijs.

Het berekende kostenvoordeel van methanolproductie in combinatie met elektriciteitsopwekking is indicatief, gezien de nog bestaande onzekerheid wat betreft de commerciële toepassing van het 'once through' methanolsyntheseproces. Als dit proces commercieel toepasbaar zou blijken, dan lijkt het KV-STEG/OTM concept economisch interessant. Dan zal men moeten bezien welke verhouding tussen methanol- en elektriciteitsproductie optimaal is en hoe de exploitatie van een dergelijke installatie dient te zijn (particulier of nutsbedrijf).

Bij grootschalige methanolproductie zal op den duur ook toepassing van geavanceerde methanolsyntheseprocessen kunnen plaatsvinden, met dit verschil dat hierbij de verschillende onderdelen zoals CO-shift, CO<sub>2</sub>-verwijdering en recompressie van het spuigas gehandhaafd zullen blijven. Hierbij gaat het dan om procesverbeteringen die het gebruik van aardgas per ton methanol kunnen verminderen. Het rendement van methanolproductie op basis van aardgas zal daardoor kunnen toenemen van momenteel maximaal 70 % tot 75-80%. Ook bij productie van methanol uit kolen valt te verwachten dat het rendement toeneemt als gevolg van de toepassing van geavanceerde methanolsyntheseprocessen [27].

## LITERATUUR

- [1] A. Lezuo, K. Riedle, E. Wittchow: "Entwicklungstendenzen steinkohlebefeuerter Kraftwerke".  
Brennstoff Wärme Kraft 1/2 (1989), 13
- [2] J. Ando: "Recent developments in SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> abatement technology for stationary sources".  
Lucht en omgeving 3 (1989), 115
- [3] Energie Spectrum dec. 1989, 22
- [4] K. Riedle, G. Baumgärtel: Technische Mitteilungen Krupp 2 (1987), 59
- [5] K. Weinzierl: "Weiterentwicklung des kombinierten Gas-/Dampfturbinenkraftwerkes mit integrierter Kohlevergasung".  
VGB Kraftwerkstechnik 7 (1989), 635
- [6] R. Kehlhofer, C. Greil, H. Vierrath, B.H. Thompson: "Kombi-Kraftwerk mit BGL-Kohlevergasung für die Mittellast im Vergleich zu konventionellen Kohlekraftwerken".  
VGB Kraftwerkstechnik 12 (1988), 1264
- [7] W.K.F. Keller: "Der GUD-Prozeß".  
Brennstof Wärme Kraft 9 (1989), 413
- [8] Diesel & Gasturbine Worldwide 4 (1989), 12
- [9] W. Gajewski, A. Lezuo, R. Nürnberg, B. Rukes, H. Vesper: "Der Kalina-Prozeß".  
VGB Kraftwerkstechnik 5 (1989), 477
- [10] "A new generation of Siemens/KWU Gas Turbines".  
Diesel & Gasturbine Worldwide 1 (1989), 37
- [11] R. Smock: "Gasturbines dominate new capacity ordering".  
Power Engineering 8 (1989), 23
- [12] E. Jeffs: "Japan's 124 MW high-temp pilot plant ready for test",  
Gasturbine Turbine World, Sept.-Oct. 1983, 14
- [13] R. Gusso: "Advanced Generation Gas Turbines".  
Diesel & Gasturbine Worldwide 3 (1989), 10
- [14] "Cool Water Coal Gasification Program: Fith Progress Report", October 1988.  
EPRI AP-5931
- [15] "Elektriciteit uit kolen, poederkoolstoken of vergassen?"  
Comprimo BV (1987)
- [16] "Resultaten van een studie over grootschalige elektriciteitsproductie middels KV-STEAG technologie"  
Fluor Daniel BV, Ministerie van Economische Zaken (1988)
- [17] J.F. Tummers, J.L. Raas, J.A. Toebes, H.T.P. Bos, A.C. v.d. Voorde: "Integration of coal gasification and combined cycle (IGCC) for electricity generation and supply".  
Coaltech '88, Amsterdam (1988)
- [18] R. Müller, U. Schiffers: "Kohledruckvergasung für den Kombi-Prozeß".  
VGB Kraftwerkstechnik 10 (1988), 1022
- [19] B.H. Thompson, H.E. Vierrath: "BGL gasification: clean, efficient power from coal".  
Coaltech '88, Amsterdam (1988)

- [20] T. Hope, M.J. v.d. Burgt, R.K. Malcharek, R.T. Perry: "The Shell gasification process for power generation".  
Coaltech '88, Amsterdam (1988)
- [21] N. Steward: "Shell Coal Gasification".  
EPRI Journal 4 (1989), 38
- [22] H. Frewer: "Strukturwandel in der Technik fossielbeheizter Kraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland".  
VGB Kraftwerkstechnik 4 (1986), 303
- [23] J.P.J.M. Kerkhof, H.A. Droog: "Electricity from coal, gasification and combustion alternatives for intermediate load".  
Coaltech '88, Amsterdam (1988)
- [24] "Economic evaluation of the coproduction of methanol and electricity with Texaco gasification-combined-cycle systems".  
Fluor Engineers and Constructors Inc., January 1982. EPRI-AP-2212
- [25] Oil & Gas Journal 38 (1989), 44
- [26] E. Worell, E. Nieuwlaar, W. van Gool: "Mogelijkheden van kolenvergassing in Nederland".  
Project Energiekunde RU Utrecht (1989)
- [27] D. Boutacoff "Methanol a fuel for the future?".  
EPRI Journal 7 (1989), 24
- [28] P.A. Okken: "The case for alternative transportation fuels in the context of greenhouse gas constraints".  
5th Conference on oxygenated fuels in Europe, London, (1990)