

Avsluttende masteroppgave i Mastergrad i Samfunnsøkonomi.

---

# Bruk av kull i transportsektoren

*Omhandler sentrale faktorer og forhold i forbindelse ved omdanning av kull  
til transportdrivstoff frem til 2020*

Jan Olav Solli

mai 2007

---

**Økonomisk Institutt  
Universitetet I Oslo**

## Forord

Oppgaven ble skrevet på Statistisk Sentralbyrå (SSB) i Oslo og ved Økonomisk Institutt ved Universitetet i Oslo, i perioden våren 2007. Oppgavens modellering er gjennomført med FRISBEE-modell konstruert av SSB for det globale olje, gass og kullmarkedet.

Først og fremst vil jeg takke Knut Einar Rosendahl for å fylle rollen som veileder på en utmerket måte. Jeg har fått inspirasjon og god veiledning gjennom hele prosessen. Takk også til Økonomisk Institutt og meddstudenter for en hyggelig og givende studietid.

## Sammendrag

Sterk økonomisk vekst og vedvarende høy oljepris fører til at substitutter til petroleum stadig blir mer attraktivt. Det er en rekke gode alternative energikilder, men denne oppgaven vil se nærmere på å omdanne kull til drivstoff for vei, båt og flytrafikk (transportsektoren).

Teknologien er kjent helt fra andre verdenskrig der tyskerne benyttet denne i stor skala ettersom de ikke hadde tilgang til olje. Sør-Afrika har også benyttet samme løsning under en langvarig oljeblokade som følge av deres Apartheid regime. Teknologien passer best for land der kull er en lettilgjengelig ressurs, mens olje og gassforekomster er lave.

For kull til væske (KTV) teknologien er det hovedsakelig to alternativer, disse er direkte og indirekte væskedannelse. Den direkte væskedannelsen bevarer rundt 50 % av kulletts energi, men er mer forurensende enn den andre teknologien. Indirekte væskedannelse er den mest etablerte teknologien, men beholder kun rundt 40 % av kulletts energi. Kun i tilfellet der karbonopptaking og lagring forekommer, vil indirekte væskedannelse av kull være på like "lavt" nivå som for petroleumsproduksjon og forbrenning.

Kina og USA er nå i en fase der storsatsning på KTV forekommer og er videre planlagt. Kostnader, effektivitet og andre sentrale forhold blir videre omtalt i oppgaven. Spesielt er miljøkostnader et omdiskutert tema da disse arter seg forskjellig fra petroleumsproduksjon og forbrenning.

Den teoretiske modellen gir et innblikk i markedsdynamikken, der olje og kull produserer samme type drivstoff, men med forskjellig teknologi. Produksjonen fra olje eller kull er sensitivt til endringer i substituttet, der en kostnadsøkning for den ene produsenten, øker substituttets markedsandel.

Bruk av FRISBEE-modellen gir et kvantitativt anslag av endringseffekter i fem definerte scenarier. Det er særlig høy oljepris og teknologiskvekst (kostnads reduksjon) som øker kvantum av kullbasert drivstoff i betydelig grad. I realistiske satsninger er det også fornuftig å

---

forvente subsidiering av kullprisen og dette modelleres og forklares. Modelleringen viser seg å stemme godt for Kina og Afrika, mens kvantumsanslagene er svært høye for USA, uten at det enda har forekommet vesentlig produksjon. USA kommer kostnadmessig godt ut ifra modellen og ville være tjent med kullbasert drivstoff produksjon. Grunnen til at USA fortsatt importerer såpass mye olje som de gjør kan ligge i bl.a. vanedannende mønster og usikkerhet rundt nye investeringsprosjekter. Høy oljepris og økt vekt på sikkerhetspolitiskeforhold rundt energitilførsel, kan være med på å sette USA inn i rollen som et land med tyngre satsning på å omdanne kull til drivstoff for transportsektoren. Det er også grunn til å tolke resultatet med forsiktighet som følge av at modellens kostnadsberegning ikke til fulle reflekterer usikkerheten rundt kostnader for drivstoffproduksjon av kull slik de vil opptre i virkeligheten.

Oppgaven konkluderer med at kullbasert drivstoff vil holde seg relativt lavt selv i 2020, men at det kan være en sentral kilde til transport drivstoff i enkelte nasjonaløkonomier. Det store spørsmålet fremover blir USAs satsning og produksjon av kullbasert drivstoff.

## Innholdsfortegnelse:

<b>1</b>	<b>INNLEDNING</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Bakgrunn for oppgaven</i>	1
1.2	<i>Sentrale momenter for oppgaven:</i>	1
1.2.1	Kull, mengde og lokalisering:	1
1.2.2	Tørsten etter olje:	2
1.2.3	Alternativ energi:	3
1.2.4	Energisikkerhet:	4
1.2.5	Alternativ energibruk i transportsektoren.	5
<b>2</b>	<b>Kull til væske</b>	<b>6</b>
2.1	<i>Generelt om teknologien</i>	6
2.2	<i>Kull til væske prosess: Teknologiske muligheter.</i>	6
2.2.1	Karbonisering & Pyrolyses:	6
2.2.2	Indirekte væskedannelse:	6
2.2.3	Direkte væskedannelse	8
2.3	<i>Hvor effektiv er denne teknologien:</i>	9
2.3.1	Sasol:	10
2.3.1.1	Sasols kostnadsskisse for KTV	11
2.3.2	Utdypning av kostnadsfaktorer:	11
2.3.2.1	Kullprisen:	11
2.3.2.2	Samlede kostnader:	12
2.3.2.3	Miljøskadelige utslipp:	12
2.3.2.4	Energiavkastning:	12
2.3.2.5	Investeringer:	13
2.3.3	Teknologisk utvikling:	13
2.4	<i>Casestudy for planlegging og utbygging.</i>	14
2.4.1	USA:	14
2.4.2	Kina:	14
2.5	<i>Miljøkostnader:</i>	15
2.5.1	CO <sub>2</sub> Utslipp:	15
2.5.2	Naturen:	16
2.5.3	Transportkostnader:	17
2.6	<i>Casestudy for KTV og miljø:</i>	17
2.6.1	Kina	17
2.6.2	USA	18
<b>3</b>	<b>Teoretisk modell for KTV:</b>	<b>20</b>
3.1	<i>Beskrivelse av modellen:</i>	20
3.1.1	Etterspørselen etter drivstoff:	20
3.1.2	Tilbyder av drivstoff basert på olje og produsert med teknologi 1:	21
3.1.3	Tilbyder av drivstoff basert på kull og produsert med teknologi 2:	22
3.2	<i>Markedslikevekt og komparativ statikk:</i>	23
3.2.1	Effekten av teknologisk framskritt innen KTV:	24

---

3.2.2	Virkningen av endringer i modellens parametere: .....	26
<b>4</b>	<b>Numerisk analyse av KTV: .....</b>	<b>28</b>
4.1	<i>Modellens oppbygning: .....</i>	28
4.1.1	Regioner: .....	28
4.1.2	Etterspørsel etter olje og energiprodukter: .....	28
4.1.3	Kullmarkedet: .....	29
4.1.4	Inkludering av KTV i FRISBEE .....	29
4.2	<i>Kjøring av FRISBEE-modellen. ....</i>	31
4.2.1	Referansesceneriet:.....	31
4.2.2	Scenario 2 - Subsidie:.....	31
4.2.3	Scenario 3 - Høy teknologisk vekst: .....	32
4.2.4	Scenario 4 - Høy oljepris:.....	32
4.2.5	Scenario 5 - Alle endringer: .....	32
4.3	<i>FRISBEE resultater i de ulike sceneriene:.....</i>	33
4.3.1	Tidsforløp av KTV kostnader, dieselpris og andel av KTV i drivstoffmarkedet i referansesceneriet: .....	34
4.3.2	Tidsforløp av KTV kostnader, dieselpris og andel av KTV i drivstoffmarkedet i scenariet med middels endring på alle sentrale variabler:.....	35
4.3.3	Virkningen av subsidie:.....	35
4.4	<i>Numeriske resultater sammenliknet med dagens og planlagt KTV produksjon.....</i>	37
4.4.1	Svakheter ved FRISBEE i sammenheng med KTV:.....	39
<b>5</b>	<b>Konklusjoner: .....</b>	<b>41</b>
	<b>Referanser:.....</b>	<b>42</b>
	<b>Appendiks 1: Utvalgte FRISBEE resultater:.....</b>	<b>43</b>

# 1 INNLEDNING

## 1.1 Bakgrunn for oppgaven

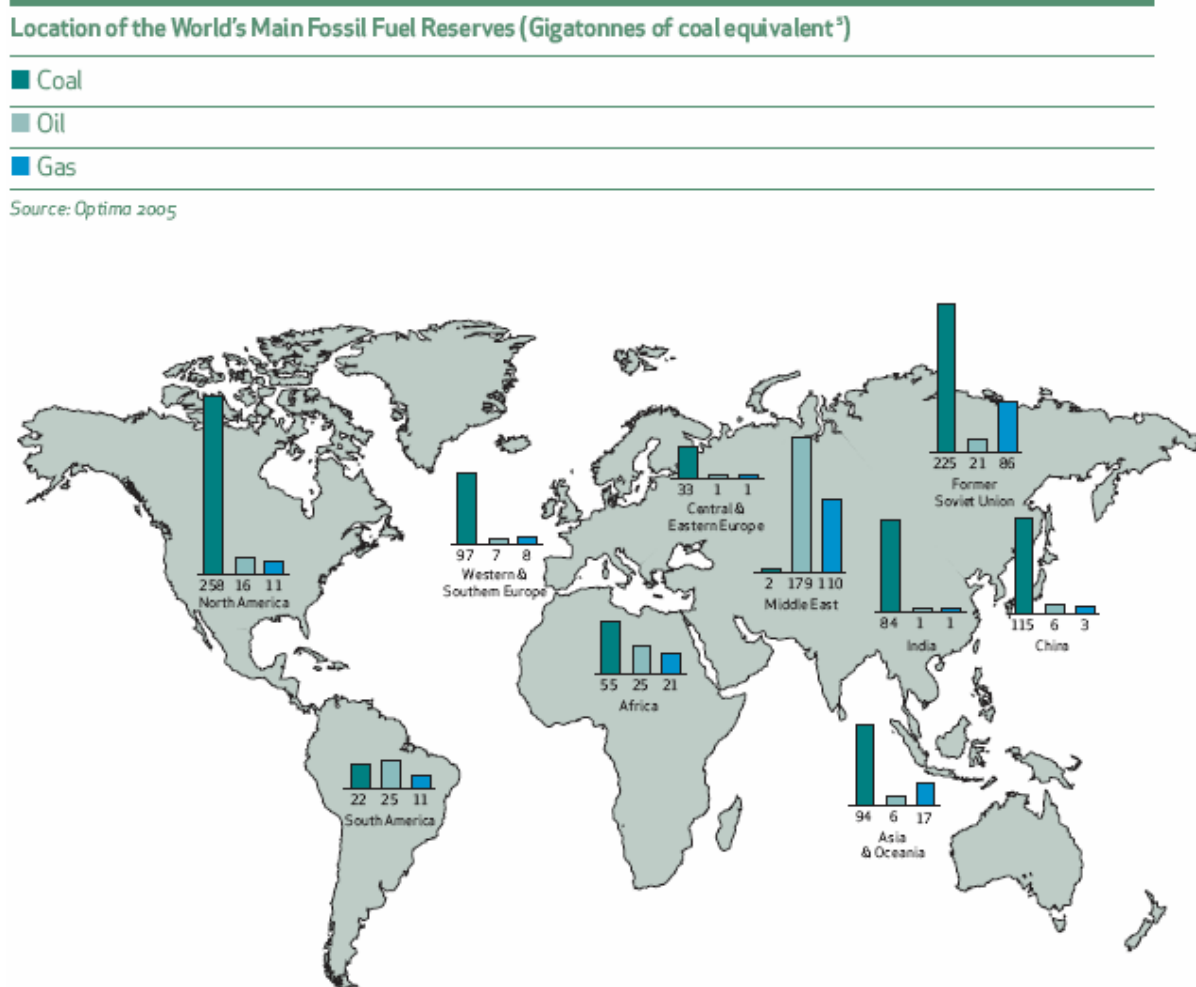
Sterk økonomisk vekst i Asia regionen fører til økt etterspørsel etter drivstoff i transport sektoren. Kina og India har et folketall på mer enn 2 mrd. mennesker totalt og disse etterspør stadig flere biler, flytjenester og mer logistikk. Denne veksten vil fortsette og kan legge enda mer press på oljeprisen enn i dag. I denne oppgaven vil vi se nærmere på om denne økte etterspørselen etter transportdrivstoff kan substitueres ved å omdanne kull til væske (KTV). Teknologien er kjent siden 1920-tallet, men har tidligere vært ansett som for komplisert og dyr for sin tid. Etter to oljekriser på 1970-tallet og prishopp i oljeprisen fra 2005, har USA uttrykket ønske om å i større grad benytte en energiressurs de selv besitter. USA har verdens største enkeltbeholdning av kull, men svært lite olje. Samtidig er USA verdens største importør av olje, og dette gjør dem sårbare dersom oljeeksportørene skulle holde igjen levering, bli utsatt for sabotasje, etc. For USA og andre land i samme situasjon vil det være fordelaktig og i større grad benytte kull i transportsektoren for å være mer energiselvstendig, dette vil også redusere noe av handelsunderskuddet og etablere egne arbeidsplasser i prosessen. For Kina er scenariet stort sett det samme og de starter produksjonen av KTV i stor skala allerede i 2007 (Fairly, P. 2007).

## 1.2 Sentrale momenter for oppgaven:

### 1.2.1 Kull, mengde og lokalisering:

Av de primære energikildene er kull den ressursen det finnes mest av. Påviste reserver ved slutten av 2005 er beregnet til rundt 909 mrd. tonn, like mye som 164 års forbruk av kull med dagens forbruksrate. Rundt halvparten av dette kullet er lokalisert i kun tre land – USA, Russland og Kina. Til sammen finnes det kull i minst 70 andre land, der hver av de 20 største beholdningene er på over en mrd. tonn (IEA 2006). Fordelingen av olje er på en annen side ikke like jevnt fordelt, og ca. 80 % av all olje finnes i kun 11 land (OPEC) (WCI 2006).

Figur 1.1: Fordeling av kull, olje og gass.



Kilde: WCI (2006).

### 1.2.2 Tørsten etter olje:

I starten av 1970 eide verdens befolkning 200 mill. biler, denne eierandelen har nå gått opp til over 700 mill (TRL 2006). IEA sine estimater fra 2006 viser at innen 2030, så vil det være 1,5 mrd. biler i drift. Dette er et potensielt problem ettersom 96 % av all energi som blir benyttet i transportsektoren kommer fra petroleum (WBCSD 2001). Den største veksten i transportsektoren kommer fra bl.a. Kina der økningen i oljekonsum økte med 2,9 % fra 2004 til 2005. Oljeprisen var i august 2006 hele \$79 pr. fat. I det samme året holdt oljeprisen et gjennomsnitt på \$54,5 pr. fat, og det er 40 % høyere enn gjennomsnittet i 2004 (BP 2006). Dette har ført til en enorm fortjeneste for oljeeksporterende land, og tilsvarende en ekstra belastning for de importavhengige landene.



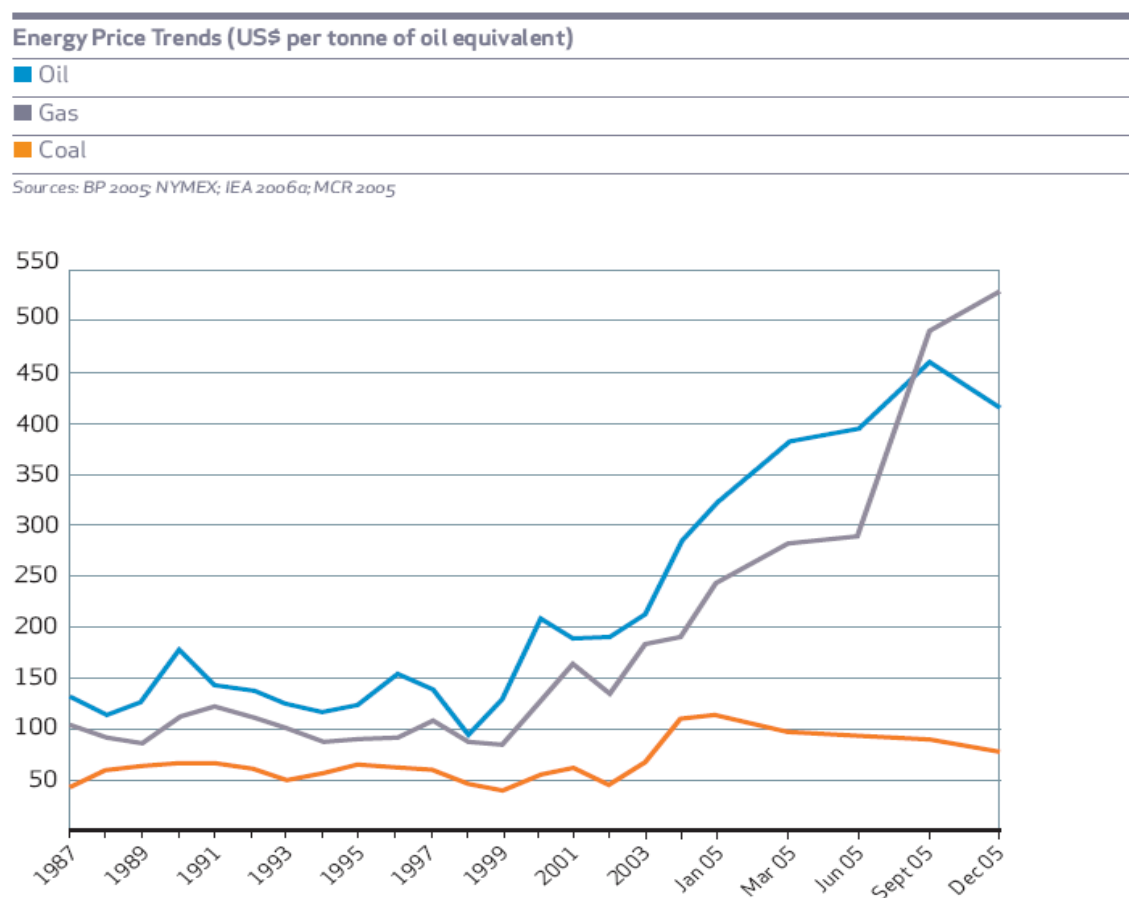
### 1.2.3 Alternativ energi:

Alternativ energi kan by på løsninger fra avhengigheten til olje, men dessverre er den teknologiske utviklingen kommet for kort til å gi et fullgodt substitutt. I de fleste tilfeller så er kostnadene høyere og energiavkastningen lavere enn for oljebasert drivstoff. I følge "World Energy Outlook 2006," så vil bruk av hydrogen som energikilde kun øke marginalt de neste 30 årene. Bruk av biomasse som energi vil synke ettersom u-land går over til moderne energikilder, mest sannsynlig petroleum. Andre fornybare energikilder som vind, sol, geotermisk, bølge, tidevann får den største økningen i etterspørsel, men vil i følge rapporten kun nå 1,7 % av totalt energiforbruk i 2030, dette er en økning på 0,5 % fra i dag. I den samme rapporten hevdes det at kull vil fortsette å være den nest største primære energikilden også i 2030 (IEA 2006).

Atomkraft har igjen fått økende interesse i sammenheng med energisikkerhet, høy oljepris og utslippskvoter. På den andre siden så er atomkraft problematisk i forhold til radioaktivt avfall, spredning av sensitiv teknologi og generell godkjenning fra borgere. Siden 1980, så har det globale gassforbruket steget årlig med 2,4 % frem til 2004 og i ettertid med 2,0 % pr. år. Gass er i likhet med olje lokalisert i et fåtall land, de største beholdningene er i Midtøsten og Russland. Gass er også problematisk å transportere, løsningen til nå har vært å bygge massive rørledninger, noen av disse gassrørene går på kryss og tvers av delvis politisk ustabile regioner. Ved nedkjøling kan også gassen transporteres på skip og dette er et moment som gir gass en litt lysere fremtid. I tillegg så vil det også komme en vesentlig økning i gass til væske (GTV), som kan brukes som drivstoff i transportsektoren. I likhet med olje er gass en ganske konsentrert ressurs og finnes som oftest på samme steder som olje. For nasjoner uten olje og gass, vil det være fordelaktig å subsidiere noe av energiforbruket med energi de selv besitter for å oppnå prisstabilitet. På denne måten kommer de bort fra at energikonsumet deres kommer fra en ressurs andre og ofte politisk ustabile stater kontrollerer (WCI 2006).

Kull er en sentral energiressurs i dagens samfunn, 40 % av all elektrisitetsproduksjon i verden kommer fra kullkraftverk (WCI 2006). Kull finnes som tidligere nevnt i minst 70 land og er sammenlagt den ressursen det finnes mest av. Denne spredningen er med på å holde prisen noe mer stabil enn for andre konkurrenter. Nedenfor viser en graf energiprisene for de tre fossile brensler. Disse tallene inkluderer ikke oljeprisens tangering av \$80 pr. fat (\$590 pr. tons of oil equivalent (Toe)) i august 2006.

**Figur 1.2: Energiprisutviklingen for olje, gass og kull fra 1987 til des. 2005 \$ pr. toe.**



Kilde: WCI (2006).

#### 1.2.4 Energisikkerhet:

Punktene ovenfor indikerer at det for en rekke land vil være fordelaktig å ta i bruk egne kullreserver i stede for å vente på utvikling av teknologi eller oljeavhengighet fra politisk ustabile regioner. Innen oljehandel finnes bl.a. OPEC som er et kartell som samarbeider om å holde oljeprisen på høyt nivå. I både 1973 og 1979 beviste de at de sammen kunne diktere oljeprisen og gi skadelige virkninger på oljeavhengige nasjoner. USA har kun 2 % av verdens oljereserver og hele 27 % av verdensbeholdningen av kull, så etter et så markant sjokk er det fornuftig å vurdere om ikke en mer balansert energibruk ville være fordelaktig (Robinson, K. K. & Tatterson, D. F. 2007). Den høye oljeprisen fra både 2005 og 2006 skyldes hovedsakelig økt etterspørsel, og veksten i Kina var i denne sammenheng en viktig faktor. I tillegg ble etterspørselen påvirket ytterligere av bl.a. kriger og sivilekonflikter, terrortrusseler og terror, ekstremvær, spekulasjon og kriseoppfatning, som ledet til en oljepris langt over det normale (BP 2006). Dette fører åpenlyst til ulemper for oljeavhengige nasjoner.

USA, Kina og India har til sammen rundt 50 % av alt kull i verden og relativt lite olje. Ettersom deres transportsektor er intensiv i bruk av olje, er også disse landene på verdenstoppen i oljeimport for å dekke energibruken. USA importerer mer olje enn noe annet land (BP 2006) og gjør det spesielt utsatt for leveransekkutt og prissvingninger. Ettersom de selv disponerer verdens største kullager, er det grunn til å tro at en mer balansert bruk av kull og olje i transportsektoren kunne vært fordelaktiv. Kina er den nest største importøren av olje og hele 50 % av oljen som benyttes er importert. Dette er nesten en økning på 40 % fra 2004, og indikerer på samme måte som for USA at selv små prissvingninger i oljeprisen får betydelige utslag (WCI 2006).

### 1.2.5 Alternativ energibruk i transportsektoren.

Transportsektoren er først og fremst privatbiler, lastebiler og busser. Men også fly og blåtrafikk er inkludert. Hovedpoenget er at standard motorer basert på petroleum så å si direkte kan benytte flytende drivstoff basert på kull. Dette kan gjøres for bl.a. biomasse, gass og kull. Biomasse er den dyreste konverteringsprosessen og heller ikke spesielt drivstofføkonomisk, men derimot miljøvennlig. Gass til væske (GTV) er hovedsakelig en mulighet for de land som distribuerer store gass reserver og ønsker å benytte denne energiformen. Imidlertid er det høy korrelasjon mellom land som har både olje og gass, slik at det naturlige valget for dem vil være petroleum så lenge de fleste motorer og systemer er designet for oljebasert drivstoff (IEA 2006, WCI 2006).

USA og Australia har noen av de største bilparkene og de mest energikrevende transportsektorene. Veksten i antall biler i Kina og India vil snart også føre disse landene i toppen over etterspørsel etter drivstoff for biler og annen transport. Alle disse landene har relativt lite olje og gass, slik at kull til væske (KTV) fremstår som et gunstig alternativ om oljeprisen skulle stige høyere og når energisikkerhet står sentralt (WCI 2006).

KTV er en omdanningsprosess som er kjent som Fischer-Tropsch (FT) helt siden 1923 og er oppkalt etter de to tyskerne som oppdaget teknologien. Under 2. Verdenskrig var Tyskland delvis isolert fra oljeimport og dermed konverterte de kull til flytende drivstoff og holdt sitt høyt mekaniserte militære i gang. KTV supplerte nasjonen med hele 90 % av energibehovet (Bajura, R. A. & Eyring, E. M 2005)

## 2 Kull til væske

### 2.1 Generelt om teknologien

Det er flere måter å konvertere kull til flytende drivstoff og videre så skal de mest sentrale prosessene presenteres. Grunnen til at teknologien ikke finner sted i større skala henger delvis sammen med at olje kan utvinnes bl.a. i Saudia Arabia for rundt \$2 pr. fat og olje raffinerier er de billigste raffineriene å opprette og drifte. Dermed har det i lange tider med lave oljepriser vært langt mindre lønnsomt å konvertere andre primærkilder til flytende drivstoff. Etter de to oljekrisene på 1970-tallet så økte interessen kraftig rundt teknologien, men dabbet av sammen med fallende oljepris. I forbindelse med ustabil og til tider høy oljepris, samt mer fokus på energisikkerhet, så blir bl.a. kull til diesel stadig en mer attraktiv løsning. I Asia er veksten i automobilmarkedet så stor at deler av den trolig må benytte et alternativ til petroleum for at oljeprisen ikke skal komme ut av kontroll.

### 2.2 Kull til væske prosess: Teknologiske muligheter.

#### 2.2.1 *Karbonisering & Pyrolyses:*

Disse to teknikkene er de eldste og egner seg ikke til å produsere drivstoff for transportsektoren. Kullet utsettes kun en gang for relativt lav varme og trykk, slik at kullet ikke brytes tilstrekkelig ned for å destillere kullet til drivstoff. Prosessene er mer egnet til å produsere impregnering for tak og smøremidler. De mer avanserte teknologiene av denne typen er langt mer intensive i trykk, varme og gjentakelse av prosessen (WCI 2006).

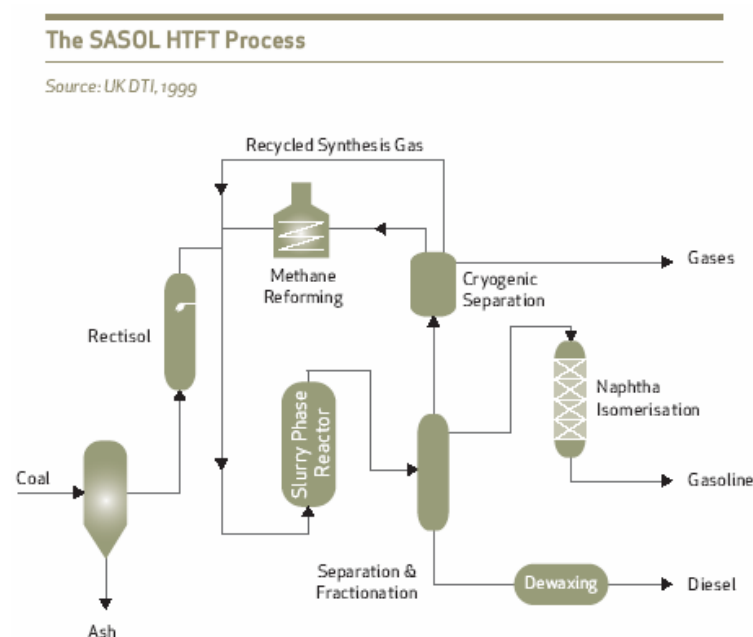
#### 2.2.2 *Indirekte væskedannelse:*

Indirekte væskedannelse omfatter fullstendig nedbryting av kullet til gassform ved bruk Fischer-Tropsh (FT). Kullet blir utsatt for varme og trykk inntil kullet omdannes til en syntetisk gass. Videre blir gassen nedkjølt og renses slik at den avgir en væske konsentrert av

hydrokarboner. Ved å utnytte deler av væskens forskjellige kokepunkt, kan væsken skilles fra hverandre, og der noe benyttes som gass, drivstoff og andre kjemikalier og smøremidler (Fairley, P. 2007) og (Sasol 2005).

Det skilles mellom lavtemperatur FT (LTFT) og høytemperatur FT (HTFT). LTFT er ved lavere temperatur og trykk og produserer 60 % diesel, 15 % Naphta, 5 % LPG og de resterende 20 % er div. kjemikalier. Figur 2.1 viser HTFT som er mer intensiv og destillerer kullet ytterligere, der produktet er 35 % bensin, 20 % diesel, 5 % LPG og 40 % div. kjemikalier. Det eneste kommersielle indirekte KTV raffineriet som nå er operasjonelt er ledet av selskapet Sasol i Sør-Afrika. De har både LTFT og HTFT i drift og supplerer Sør-Afrika med 40 % av deres drivstoff i transportsektoren (Sasol 2005).

**Figur 2.1: Skisse over produksjon med HTFT**



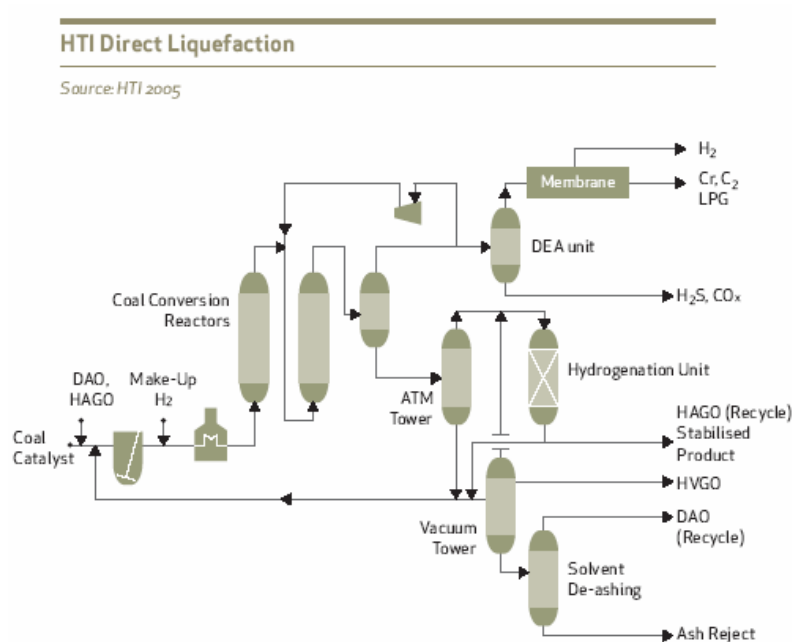
**Kilde: WCI (2006)**

### 2.2.3 Direkte væskedannelse

Direkte væskedannelse går ut på at kullet blir pulverisert og blandet med en syntetisk olje produsert ved samme raffineri, som videre blir behandlet med hydrogen og under trykk varmet opp til 450 °C. Her blir rekken av hydrokarboner brutt ned til kortere rekker som er mer passelige for igjen å settes sammen til raffinert drivstoff. Dette syntetiske produktet blir raffinert til det er en energikonsentrert væske igjen. Kull direkte til væske (KDTV) produserer mer drivstoff pr. tonn kull enn Fischer-Tropsch syntesen. Det kinesiske kullforskningscenter i Beijing har estimert at direkte kull til væske teknologi utvinner 55-56 % av kullets energi mot standard FT som kun beholder 45 % av energien i kullet. På en annen side, så er også denne teknologien langt mer avansert, det krever bl.a. egen kraftkilde og gassproduserende raffineri til å levere varme og hydrogen, samt betydelig resirkulering av den syntetiske oljen som inngår i produksjonsprosessen. Behandlingen av hydrokarbonene for å oppnå eksakt riktig form og størrelse er komplisert og rett type kull må kunne leveres til enhver tid. Teknologien forventes å kunne forbedres betydelig som følge av erfaringsbasert læring i de igangsatte prosjektene, men det er ikke å komme utenom at Kina risikerer mye ved å satse såpass tungt på et prosjekt som er svært krevende for både ingeniører og økonomer på et såpass presset tidsskjema (Fairly, P. 2007).

Hydrocarbon Technology Inc. (HTI) KDTV teknologien blir allerede installert i Kina ved et raffineri til \$1,5 mrd. Det er enda ikke helt klart hvor lønnsom og hvor godt denne tekologien fungerer, så dette tyder på at Kina godtar betydelig risiko for å i større grad benytte sine egne kull reserver fremfor importolje. HTI teknologien består av å pulverisere kull og blande det sammen med en resirkulert del av endreproduktet for så å forvarme det opp sammen med hydrogen (se figur 2.2), deretter plasseres det i den første reaktoren og varmes til ca. 450 °C og 170 bar. Den neste reaktoren gjennomfører væskedannelsen ved høy varme (WCI 2006) og (Fairly, P. 2007).

Figur 2.2: HTI skisse.



Kilde: WCI (2006).

### 2.3 Hvor effektiv er denne teknologien:

FT ble som tidligere nevnt etablert allerede i 1923, og er godt utprøvd i flere nasjoner over tiår. På en annen side så legger petroleumsindustrien tøffe vilkår i konkurransen om drivstoff til transportsektoren. KTV er sensitiv i forhold til oljeprisen og de fleste anslag på lønnsomhet av KTV krever en oljepris over \$30 pr. fat. mens enkelte hevder \$45 pr. fat er mer realistisk (Fairley, P. 2007). Tilsynelatende har oljeprisen vært godt over dette de siste årene og argumentasjonen i pkt. 1.2.2. legger opp til at det er grunn til å forvente en økende etterspørsel etter transport drivstoff og da hovedsaklig petroleum. Dermed burde det være grunnlag for å øke produksjonen av KTV så snart teknologien er på plass.

Tabell 2.1 opplyser følgende om kostnader og hva oljeprisen bør ligge på.

**Tabell 2.1: Anslag over KTV kostnad og hvilke nivå oljeprisen burde ligge på for lønnsom produksjon.**

Kilde:	Hevder kostnadene for KTV pr. fat er:	Oljeprisen burde ligge på følgende pr. fat:
IEA	[\$25, \$30]	[\$29, \$35]
Sasol (Sør-Afrika)	[\$50, \$55]	>\$40
Department of Energy (USA)	[\$40]	-
World Coal institute (UK)	[\$27*, \$45*]	>\$35
American Energy Security	[\$31, \$46]	-

\* inkludert karbon oppfangning og lagring.

Kilde: Gielen, D. & Unander, F. (2005), Scholtz, J. (2005), Miller, C. L. (2007), WCI (2006), AES (2007).

### 2.3.1 Sasol:

Sasol er verdens største produsent av syntetisk drivstoff og produserer daglig 150.000 fat pr. dag i Sør-Afrika. Ved opprettelsen av Sasol og KTV produksjon var det politiske og ikke økonomiske motiver som lå til grunne, det ble gitt statelig lånegaranti, men med en økende oljepris viste selskapet seg å være lønnsomt. Sasol betalte tilbake alle investeringskostnader, uten at skattepenger ble benyttet (Robinson, K. K. & Tatterson, D. F. 2007).

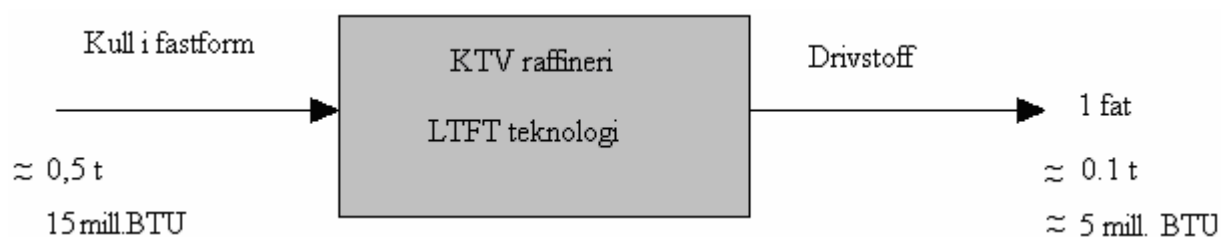
Den senere tid har interessen rundt syntetisk drivstoff økt kraftig og Kina samarbeider med Sasol om å opprette et KTV produksjonsprosjekt som vil kunne produsere 160.000 fat. pr. dag innen få år. Sasol har også avansert teknologi for gass til væske og har stor virksomhet i Qatar. USA er også i planleggingsfasen sammen med Sasol for å starte produksjon av drivstoff ved å benytte kull (Ibid).

Etter å ha vært i direkte kontakt med Sasol mars 2007, har jeg fått tilsendt informasjon over mail angående kostnadene slik at disse kan analyseres nærmere. Kontaktpersonen var "Stefan Opperman" ansatt som KTV teknologiansvarlig i "Sasol Technology (Pty) Ltd."



### 2.3.1.1 Sasols kostnadsskisse for KTV

Figur 2.3: Sasols anslag over kostnader ved LTFT KTV.



Kilde: Sasol (2005) Gitt ved en presentasjon i USA okt. 2005.

<b>Operative kostnader:</b>	<b>US\$/fat</b>
Kullpris (antar kullpris på US\$10/t)	5
Andre variable og faste kostnader	10 – 15

#### **Kapital kostnader:**

For et 50 000 til 80 000 fat pr. dag raffineri, er kapitalkostnadene estimert til å være mellom 60 000 og 90 000 US\$ pr. fat pr. dag.

For eksempel i et tilfelle der fortjenesten på en investering må være 15 % for 80 000 US\$/fat pr. dag, anslår Sasol at kapitalkostnadene utgjør ca. 35 US\$/fat (Sasol 2005).

## 2.3.2 Utdypning av kostnadsfaktorer:

### 2.3.2.1 Kullprisen:

I eksempelet ser vi at prisen på ett tonn kull er antatt å være \$10. Markedsprisen på kull senest i 2005 var \$70 (BP 2006). Prisen på kull avhenger bl. a. av etterspørsel, kostnader ved gruvedrift og logistikk. Den viktigste antakelsen i kostnadsskissen er derimot at kullet ikke kjøpes på det åpne marked. Det er flere mulig grunner til dette, noe av kullet kan være "strandet," dvs. at det ikke lar seg transportere og dermed ikke i samme grad har den samme verdien som annet kull har på det åpne marked. Kullet kan ofte være statlig eid, og på denne måten kan en konsesjon utleveres der den avtalte prisen er langt under markedsprisen. Dette vil ofte skyldes at de nasjonale sikkerhets hensynene kommer foran alternativkostnaden ved å selge kullet på det åpne marked. Selv om produsentene ikke vil betale så mye som \$70 pr. tonn for kull, så er nok \$10 pr. tonn kull noe lavt. I Montana så er kullprisen så lav som \$12

pr. tonn, slik at det finnes regioner der kullet er langt billigere enn markedsprisen (Robinson, K, K & Tatterson, D, F 2007). Hovedpoenget ligger i det at nasjonalkontroll over energitilførsel kan gi en gunstig avtale slik at kostnadene for et KTV raffineri holdes nede ved en type subsidie. Dette vil være sentralt i kjøringen av FRISBEE-modellen senere i oppgaven.

#### 2.3.2.2 Samlede kostnader:

Eksempelet ovenfor gir en indikasjon på at den totale kostnaden pr. fat. med syntetisk drivstoff er mellom \$50 og \$55 pr. fat. Dette hviler på en forutsetning at investeringsfortjenesten er 15 % på selve KTV prosjektet. I et fullstendig kommersielt prosjekt ville denne raten mest sannsynlig vært høyere ettersom eksterne virkninger ikke inkluderes. Staten kan være med på å garantere for prosjektet og på denne måten kan raten for inntjening av investeringer være ganske lav. Årsaken til dette kan være sikkerheten ved nasjonal produksjon av drivstoff mht. prissjokk og leveringssikkerhet, egne arbeidsplasser og teknologisk nyvinning.

#### 2.3.2.3 Miljøskadelige utslipp:

De siste årene har vært preget av økende fokus på utslipp av drivhusgasser og annen forurensning. Selv om det er ønskelig å benytte energityper som har svært små utslipp, ser det ut til at utbredelsen av KTV de neste årene vil øke i regioner som allerede forurenser mye. Spesielt for FT er det mulig å begrense CO<sub>2</sub> utslipp, men for kull direkte til væska (KDTV) er det mer problematisk å "rense." Dersom verdenstrenden går i mot en utvikling der CO<sub>2</sub> utslipp direkte eller indirekte må betales for, så kan vi forvente at de fleste KTV raffineri vil bli utstyrt med CO<sub>2</sub> oppfangning. I kostnadsskissen er ikke karbonoppfangning inkludert, slik at dette ville øke prisen noe. Miljøkostnader kommer inn i seksjon 2.5.

#### 2.3.2.4 Energiavkastning:

I figur 2.1 settes det inn 0,5 t kull med 15 BTU for å produsere et fat med syntetisk drivstoff som igjen inneholder kun 5 BTU. Dette indikerer at kun rundt 33 % av energien fra kullet bevares i transformeringsprosessen fra fast til flytende form (Sasol 2005). Andre kilder anslår at energioverføringen er 45 % for FT og 55 % for KDTV (Fairly, P. 2007).

### 2.3.2.5 Investeringer:

Det er store oppstartskostnader forbundet med oppsetting av KTV produksjonsfasiliteter. Noe av problematikken i forbindelse med dette er at investeringen foregår før produksjonen starter og inntjeningen skjer over lang tid. Fremtidig inntjening diskonteres der rente og verdien av produktet skaper usikkerhet rundt lønnsomheten av prosjektet. Private foretak kan ha problemer med å selv påta seg hele risikoen ettersom de da bærer alle konsekvensene ved en feilslått satsning. For samfunnet totalsett, kan positive eksternaliteter gi avkastning som ikke direkte reflekteres i markedet. Det kan i sammenheng med strategiskhandelsteori være lønnsomt for staten eller andre aktører å garantere for selve prosjektet. På denne måten kan de utvikle avansert teknologi, benytte teknologisk forsprang, skape nasjonale arbeidsplasser, fremme eksport og ha bedre kontroll over eget energiforbruk (Gilpin, R. 2001).

### 2.3.3 Teknologisk utvikling:

Selv om teknologien for å omdanne KTV har vært kjent i snart 100 år, så er det fortsatt stort forbedringspotensialet. Det var ikke før på 1990-tallet at FT ble oppskalert til å produsere syntetisk drivstoff i storskala. Reaktorene for produksjon av syntetisk drivstoff kan nå håndtere 100 ganger mer enn tidligere. Forskere ved Sør-Afrikas "Universitet i Witwatersand" "Centre of Material and Process Synthesis" planlegger å bygge et nytt KTV pilotprosjekt i Shaanxi provinsen i Kina. Dette \$10,5 mill. prosjektet er forventet å være 30 % mer effektivt enn dagens teknologi og vil bestå av hele syv reaktorer mot to som er vanlig (Greencarcongress 2007). Teknologien er som kjent relativt lite utbredt og med tiden vil det sannsynligvis komme flere forbedringer og effektiviseringer. Siden kostnadene er såpass store i forbindelse med KTV produksjon, vil selv små forbedringer i teknologien utgjøre innsparinger på betydelige beløp.

Prosessen med å raffinere olje har blitt såpass mye benyttet at den er stort sett effektiv på alle områder. For KTV er det langt i fra slik, og deler av teknologien er på prøvestadiet. Dette medfører at det er usikkerhet forbundet med å satse på den. I en omfattende rapport fra American Energy Security (AES) så regnes det med en Lærekurve som indikerer at det et stort potensial for innsparinger over tid med KTV. Dette kommer av at erfaringsbasert læring vil bringe kostnadene ned ettersom rutiner og løsninger faller på plass. I antakelsen regner de med en 15 % innsparing ved en akkumulert dobling av produksjonsvolum. Denne raten er ganske standard i slike sammenhenger, og skulle den vise seg å være i nærheten av den virkelige utviklingen er det snakk om enorme beløp (AES 2006).

## 2.4 Casestudy for planlegging og utbygging.

### 2.4.1 USA:

I USA har Department Of Energy (DOE) og andre helt siden oljekrisene på 70-tallet forsket og utarbeidet konkrete planer om å omdanne kull til diesel for den nasjonale transportsektoren. Det ble på 80-tallet opprettet demonstrasjons raffinerier i USA, og etter en rekke forsøk bredte oppfattningen seg om at KTV i seg selv var ustabil og dyrt. Nå er det ny oppstartede prosjekter i flere stater i USA. Pennsylvania er nå i kontakt med Sasol for å opprette et KTV-raffineri. Illinois, Arizona, Montana og Nord Dakota er også i gang med planlegging og tilrettelegging for KTV (WCI 2006). Et av prosjektene som settes i verk allerede i løpet av 2007 er Medicine Bow i Wyoming. Det investeres i overkant av en mrd. dollar i prosjektet, i tillegg til omfattende tilleggsarbeid som utføres i området. Bl.a. må kulltransport, vann og infrastruktur oppgraderes. Det er estimert at dette raffineriet vil kunne produsere 13,000 fat pr. dag med hovedsakelig diesel, mens forhåpningene for prosjektet er å produsere 40,000 fat pr. dag. CO<sub>2</sub> utslippene er i følge prosjektbeskrivelsen svært små ettersom det benyttes karbondioksid oppfangning og CO<sub>2</sub> pumpes ned i jorda eller for å bistå i oljeutvinning. Svovelen som fjernes fra kullet i produksjonsfasen vil benyttes i landbruket (WCI 2006).

### 2.4.2 Kina:

I motsetning til USA så har olje aldri blitt oppfattet som billig i Kina, og samtidig har kull historisk sett vært en sentral ressurs og dermed aldri tapt glansen. Kina er langt på vei til å produsere kullbasert drivstoff og store investeringer har ført dem foran USA i kjennskap til teknologien. Shenhua gruppen er det største kullfirmaet i Kina og vil åpne landets første KTV-raffineri i 2007/2008. Prislappen er \$1,5 mrd og er resultatet av Kinas omlegging for å satse på teknologi og storskalaøkonomi. Dette første raffineriet vil mest sannsynlig produsere hele 50,000 fat pr. dag. Dette er den mest ambisiøse satsingen på KTV siden 2. Verdenskrig. Shenhua planlegger å ha åtte slike raffinerier i drift innen 2020 og produsere 30 millioner tonn drivstoff i året. Kina importerte i 2005 127 millioner tonn olje, noe som setter dem på tredjeplass over oljeimporterende land. KTV produksjonen er nok til å dekke ca. 10 % av Kinas planlagte oljeimport fremover (Fairly, P. 2007). Oil & gas journal opplyser at i tillegg til Kinas kommende produksjon på 200.000 fat pr. dag fra KDTV, ønsker de også en produksjonsenhet basert på FT med en kapasitet på 80.000 fat pr. dag (Robinson, K, K &

Tatterson, D, F 2007). DEO opplyser også om Kinas planlegging av et FT-basert raffineri med kapasitet på 80.000 fat pr. dag (DEO 2007). Dette vil sette Kina i teten over KTV-produsenter og ved å investere i både FT og KDTV kan de få bedre oversikt over hvilken teknologi som passer dem best.

## 2.5 Miljøkostnader:

### 2.5.1 CO<sub>2</sub> Utslipp:

KTV er en prosess som er teknisk sett mer komplisert og langt mer energikrevende enn å raffinere olje. I produksjonsfasen uten karbonoppfangning, slipper KTV ut langt mer CO<sub>2</sub> enn konkurrenten olje. Til gjengjeld, så er potensialet for begrensning av CO<sub>2</sub> utslipp store. Dersom karbondioksidoppsamling benyttes, så er det totale CO<sub>2</sub> utslippet ved hele KTV prosessen basert på FT og forbrenning kun 10 kg pr. GJ høyere enn ved produksjon og forbrenning av petroleum, se tabell 2.2.

**Tabell 2.2: CO<sub>2</sub> utslipp ved produksjon og forbrenning med og uten karbonoppsamling.**

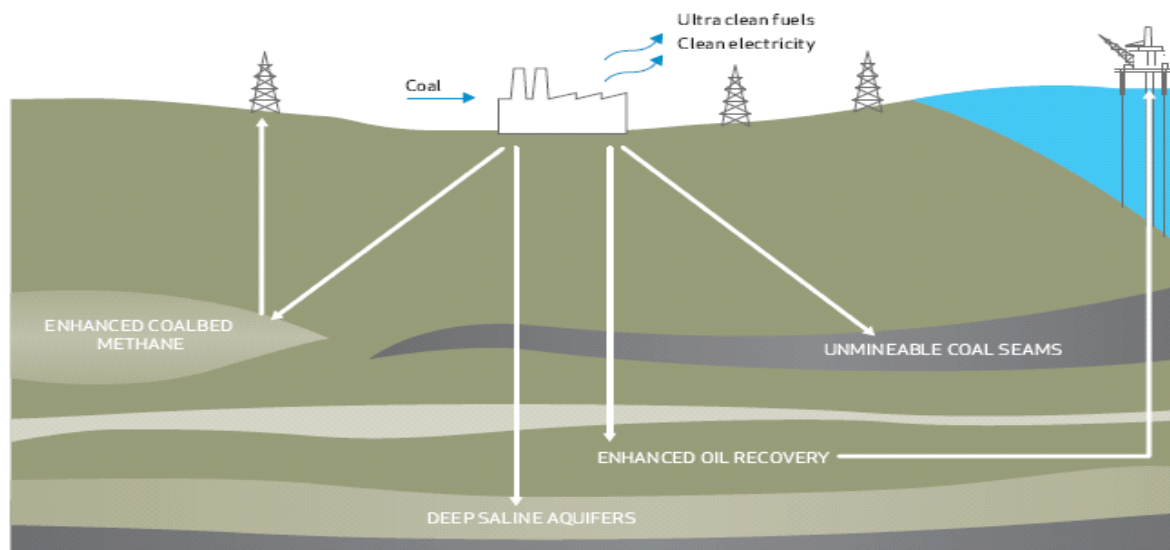
	Process <sup>8</sup> emissions [kg CO <sub>2</sub> /GJ]	Use emissions [kg CO <sub>2</sub> /GJ]	CCS [kg CO <sub>2</sub> /GJ]	Total w/o CCS [kg CO <sub>2</sub> /GJ]	Index	Total with CCS [kg CO <sub>2</sub> /GJ]	Index
<b>With existing vehicle/fuel supply infrastructure</b>							
Gasoline from crude oil	5-10	73	-5-0	78-83	98-102	78	100
Gasoline CO <sub>2</sub> -EOR	5-10	73	-50—100	78-83	98-102	-22-33	-28-42
Gasoline non-conventional	35	73	-30	108	133	78	100
Ethanol (biomass)	10-30	0	-90-0	10-30	12-37	-80-10	-103-13
FT Gasoline/diesel (gas)	25	73	-20	98	126	78	100
FT Gasoline/diesel (coal)	160	73	-145	233	288	88	113
FT Gasoline/diesel (biomass)	5	0	-100	5	6	-95	-122
<b>New vehicle/fuel supply infrastructure needed</b>							
Methanol (gas)	10	65	10	75	93	65	83
DME (gas)	10	67	10	77	95	67	86
CNG (gas)	5-10	56	0	61-66	75-81	61-66	78-85
Hydrogen (electricity) <sup>9</sup>	0-100	0	-90-0	0-90	0-123	0-10	0-13
Hydrogen decentralized (gas)	80-100	0	0	80-100	99-123	80-100	103-128
Hydrogen centralized (gas)	70-90	0	-85—60	70-90	86-111	5-10	6-13
Hydrogen centralized (coal)	134-156	0	-110—145	134-156	165-193	9-24	12-31

**Kilde: IEA (2005)**

CO<sub>2</sub> oppfangning kan føre til at CO<sub>2</sub> utslippene kan benyttes til å trekke ut mer olje fra operative felt. Miljøgevinsten ligger i at CO<sub>2</sub> fra produksjonsfasen holdes under jordoverflaten og dermed ikke når atmosfæren. Allikevel så viser indeksen til høyre i tabellen at dette kan neppe ses på som noen miljøgevinst, der KTV kommer ut med 13 % høyere CO<sub>2</sub> utslipp enn bensin basert på olje fra ”well to wheels.”

**Figur 2.4: Illustrerer hvordan CO<sub>2</sub> utslippene unngår å nå atmosfæren.**

#### Geological Storage Options for CO<sub>2</sub>



**Kilde: WCI (2005).**

CO<sub>2</sub> er selvsagt en viktig faktor i forhold til miljø. I tillegg så er KTV-prosessen FT slik at det med kun små inngrep kan fjernes svovel og andre tungmetaller. Utslippene av NO<sub>x</sub> og SO<sub>x</sub> er ekstremt lave for FT i følge en omfattende rapport av American Energy Security. I den samme rapporten hevedes det som tidligere nevnt at hele 90 % av CO<sub>2</sub> utslippene lar seg fange opp med CO<sub>2</sub> oppfangning. Dette gjør at KTV skiller seg positivt ut i forhold til konvensjonell kullbrenning, som er en svært forurensende prosess pga. kulletts høye karbon innhold (WCI 2006).

#### 2.5.2 Naturen:

Økt bruk av kull vil føre til gruvedrift i stor utstrekning, noe som belaster naturen i nærområdet. Transport og maskineri fører til at naturen i området blir midlertidig eller permanent ødelagt. Det benyttes svært mye vann i gruvedrift og avfallstoffer blander seg med grunnen og også vannet i nærheten. Flora og fauna i området utsettes for giftstoffer og dør samt pådrar seg genetiske misdannelser. Raffineriene for KTV produserer mye kjemikalier og raffineringen krever mye vann. På denne måten kan drikkevann komme i konflikt med drivstoffproduksjon (NRDC 2006).

### 2.5.3 Transportkostnader:

Olje finners som tidligere nevnt på relativt få steder og dermed er det mye ressurser som går med til transport. Kull finnes de fleste steder i verden og trenger dermed ikke den grad av transporterering. Midtøsten transporterer store kvantum til bl.a USA og Japan slik at grunnstøting, ødeleggelse, sabotasje av oljetankere er konstant en overhengende risiko for miljøkatastrofe. Kull oppfattes blant de fleste aktører som mindre risikofylt å transportere (WCI 2006). I forhold til transport så er kull en mindre energiintensiv resurs enn olje, slik større volum må til for å yte samme mengde energi.

## 2.6 Casestudy for KTV og miljø:

### 2.6.1 Kina

Ikke bare pådrar Kina seg stor risiko ved å satse såpass økonomisk tungt på en teknologi som enda ikke er fullt utviklet, miljøet blir på samme måte gamblet med i disse prosjektene (Fairly, P. 2007). Allerede er forurensning den ledende årsaken til død i Kina og kullgruvedrift alene koster over 6000 mennesker livet i året (IEA 2006). I Kina åpnes ett nytt kullkraftverk i uka og disse slipper ut en jevn strøm av sot, svovel dioksid, millioner av tonn CO<sub>2</sub> samt andre skadelige stoffer.

KTV er sammensatt av flere kjemiske prosesser og som tidligere nevnt er vannforbruket enormt. Ettersom kullressursene for det meste befinner seg nord i Kina, så er produksjonen lagt dit. På samme sted er også vann en svært begrenset resurs og dette kan uheldigvis gå hardt ut over de mindre velstående beboerne i området. Kinas kullforskningscenter har beregnet at hvert KTV-raffineri vil konsumere 10 tonn vann for hvert tonn syntetisk drivstoff som blir produsert, det er 1363 liter vann pr. fat, og raten er enda høyere for FT. Løsningen blir muligens å ta vann fra "Den Gule Elv," men mye av vannet i Kina benyttes allerede i vannkraftproduksjon (Fairly, P. 2007).

Dessverre så lar ikke kull direkte til væske (KDTV) seg rense i samme grad som FT-gassproduksjon. Dessverre så satser Kina som sagt på KDTV, og her er det langt mer komplisert å begrense forurensning. Grunnen til dette er at kullet ikke omdannes til gass. Det er nettopp i denne omdannelsen til gass at svovel, hydrogen sulfid og andre tungmetaller forholdsvis enkelt kan fjernes. CO<sub>2</sub> oppfangning er også en effektiv metode for å begrense

utslippene, men kan kun benyttes i begrenset utstrekning for KDTV. Grunnen til at Kina har valgt å satse på KDTV fremfor FT, skyldes mest sannsynlig at KDTV er mer effektiv i å bevare kullet energiinnhold.

Kinesiske geologer har regnet seg frem til at mer enn tre mrd. tonn av CO<sub>2</sub> kan plasseres i gamle oljefelt og under bakken, det er mer enn hva deres kullkraftverk vil slippe ut de neste 100 årene med dagens rate. Dersom CO<sub>2</sub> pumpes ned i bakken blir scenariet litt lysere for Kina, men det meste av deres produksjonskapasitet helt frem til 2020 er allerede fastsatt i KDTV hvor det er mer problematisk å skille ut CO<sub>2</sub>. Oil & Gas Journal melder at Kina også ønsker å opprette produksjonsfasiliteter for FT produksjon basert på kull. Dette er forhåpentligvis et steg i riktig retning (Robinson, K. K. & Tatterson, D. F. 2007).

## 2.6.2 USA

I USA er det naturvernorganisasjoner som legger vekt på at kullutvinning vil ødelegge naturområder på kort og lang sikt, skade økologiskiesirkler, samt å forurense drikkevannskilder. Mye av kullet er lokalisert i fjell, og utvinning gjennom sprengning etterlater seg mengder av mineraler som må transporteres bort. Noe av dette dumpes i elver og fjerning av fjell fører til omplassering av bergarter som forstyrrer nærmiljøet. I Vest-Virignia har sprengning etter kull i fjell ødelagt 500.000 mål av dyrkbar mark, mer enn 300.000 mål i Kentuckey og rundt 100.000 mål i både Virginia og Tennessee. Denne skadevirkningen på miljøet vil eskalere som følge av økt satsning på bruk av kull i USA (Kark, J. 2007).

USA satser på KTV teknologien FT og denne kan med karbonoppfangning og lagring redusere CO<sub>2</sub> utslippet betydelig. På den andre siden er denne teknologien enda mer intensiv i forbruk av vann og dette kan by på problemer for deler av USA. Ferskvann er en knapp resurs i USA og de importerer allerede mengder av dette fra Canada. FT produksjonen av drivstoff vil bruke mye ferskvann samtidig som det også er mer avfall som vil forgifte andre vannkilder.

De fleste miljøvennelige grupper ser med skuffelse på KTV-produksjon ettersom dette langt i fra er noen løsning for aktuelle miljøproblemer. Tidligere ble skadevirkninger på lokalmiljøet presentert i seksjon: 2.5.2, disse står sentralt i argumentasjon imot drivstoffproduksjon av kull. Naturvernere oppgir ca. samme tall som vi har fått fra IEA og bruker dette eksempelet selv. Ren forbrenning av KTV basert drivstoff slipper ut 3,23 kg med CO<sub>2</sub> pr. liter, mens hele



produksjonsprosessen og forbrenningen av KTV slipper ut ca. 6 kg CO<sub>2</sub> pr liter dersom rensing ikke finner sted. Selv om 90 % av CO<sub>2</sub> utslippene fra produksjonen av kullbasert drivstoff fanges opp, så vil det være høyere utslipp totalt sett ettersom KTV produksjonen forurensrer en god del (NRDC 2007). Dette er samme resultat som i 2.5.1.

### 3 Teoretisk modell for KTV:

#### 3.1 Beskrivelse av modellen:

Denne modellen er konstruert kun for denne oppgaven der den tar sikte på å gi en teoretisk fremstilling av benyttelsen av kull og olje i transportsektoren. Det grunnleggende er at energitilbudet er forenklet til to drivstoffprodusenter som hver har enten olje eller kull med tilhørende unike teknologi. Konsumentene kan like godt kan bruke drivstoff produsert fra kull som olje, og tar kun prisen i betraktning i sitt drivstoffkonsum. Produsentene har med unntak av skjæringspunktet mellom dem, individuelle produksjonsvolum til gitte priser. Tilbudet fra dem er en stigende funksjon av pris, mens etterspørselen er en fallende funksjon av pris. Likevekten i markedet defineres som skjæringen mellom tilbud og etterspørsel, enhver annen løsning vil være ustabil og bevege seg mot likevekt.

Historisk sett, så har olje vært dyrere enn kull pr. Toe. Det er også som diskutert tidligere grunn til å tro at veksten i transportsektoren vil føre til en vedvarende høyere oljepris enn kull og også høyere prisvekst. Kull blir i modellen behandlet som billigere og med lavere prisvekst, derimot er konverteringen av kull til drivstoff for transportsektoren betydelig dyrere enn raffinering av olje til petroleum. Det er også slik at konverteringen av olje er mer effektiv i å bevare energien, mens væsken som trekkes ut av kullet kun inneholder i underkant av 50 % av kullets opprinnelige energi.

##### 3.1.1 Etterspørselen etter drivstoff:

Etterspørselen etter drivstoff er en avtakende lineær funksjon av drivstoffprisen  $P^D$

$$(1) \quad E = f(P^D)$$

$$(2) \quad f(P^D) = E_{Max} - \theta P^D$$

Etterspørselen er i markedsliekevten lik samlet tilbud. De to tilbyderne vil til enhver pris tilby hvert sitt bestemte kvantum drivstoff avgjørende av deres teknologi gitt ved (3) og (4). Drivstoffvolum basert på olje og kull er gitt ved hhv.  $B$  og  $K$ . Hver av disse har tilhørende produksjonsfunksjon gitt ved (3) og (4).

$$(3) \quad T = B + K$$

$$(4) \quad B = g(P^D)$$

$$(5) \quad K = h(P^D)$$

Konsumentene vil møte et samlet tilbud ( $T$ ) der drivstoff er å anse som en homogen vare for konsumentene.

### 3.1.2 Tilbyder av drivstoff basert på olje og produsert med teknologi 1:

$$(6) \quad MC = P^O(B)\alpha_B + r = P^D$$

I modellen er det antatt frikonkurransemarked. Dermed vil produsentene tilpasse seg der pris ( $P^D$ ) er lik marginalkostnaden til hver produsent. Videre er marginalkostnaden satt sammen av innkjøp av primærressurs, hhv. olje for den første produsent og kull for den andre produsenten. Kostnaden ved kjøp av olje avhenger av prisen på råolje  $P^O(B)$ , som bestemmes i et oljemarked med lineære tilbuds- og etterspørselsfunksjoner etter olje. I dette markedet vil økt etterspørsel føre til økt pris på råolje. Videre er marginalkostnaden satt sammen av en raffineringkostnad gitt ved  $r$ , som igjen representerer kostnaden ved å konvertere en enhet olje til en enhet drivstoff. Raffineringskostnaden pr. enhet er antatt å være konstant og dette henger sammen med at på lang sikt, så vil kapasiteten justeres i forhold til etterspørselen slik at enhetskostnadene er konstante. Leddet  $\alpha_B$  indikerer hvor mange enheter av olje som må settes inn for å produsere en enhet drivstoff.

$$(7) \quad P^O(B) = PP_0 + \beta B$$

Selve prisen på olje er en lineær funksjon av etterspørselen etter olje til drivstoff ( $B$ ), noe som følger av antakelsen om lineære tilbuds- og etterspørselsfunksjoner i oljemarkedet. I dette markedet vil økt etterspørsel føre til økt pris og lavere etterspørsel vil føre til lavere pris. Prisen på olje blir som følgende i (7). Der angir  $PP_0$  minimumsprisen på råolje (ved  $B=0$ ), og  $\beta$  angir hvor mye oljeprisen stiger når forbruket av  $B$  øker.

For å se bensinvolum som en funksjon av gjeldende drivstoffpris, settes (7) inn i (6) og løses for  $B$ .

$$(8) \quad B = \frac{P^D}{\alpha_B \beta} - \frac{PP_0}{\beta} - \frac{r}{\alpha_B \beta} = g(P^D)$$

3.1.3 Tilbyder av drivstoff basert på kull og produsert med teknologi 2:

$$(9) \quad MC = P^C(K)\alpha_K + t = P^D$$

Den samme antakelsen gjelder her som for produsent av olje. Løsningen med fri konkurranse fører til at produsentene tilpasser drivstoffpris lik marginalkostnaden. Selve prisen på kull er en funksjon gitt i (9) ved  $P^C(K)$ . Kullmarkedet er i likhet med oljemarkedet basert på et lineært tilbud og etterspørselsmarked, der økt etterspørsel igjen øker prisen på kull. Slik som i (6), så indikerer  $\alpha_K$  antall enheter kull som må til for å produsere en enhet drivstoff basert på kull med like mye energi som en enhet drivstoff produsert av olje. Det antas at  $\alpha_B < \alpha_K$ , slik at relativt mer energi går bort i produksjonsprosessen ved bruk av kull. Dette kommer av at kun rundt 50 % av kullets energi i realiteten kan overføres til væskeform. Videre er  $t$  transformasjonskostnaden ved å omdanne kull til væske. På samme måte som for drivstoff basert på olje, så er denne kostnaden konstant pr. enhet. Dette henger sammen med at på lang sikt, så vil transformeringskapasiteten tilpasses slik at tilbud blir lik etterspørsel, og enhetskostnaden blir lik.

$$(10) \quad P^C(K) = PP_1 + \gamma B$$

Prisen på kull er gitt ved (10) og  $PP_1$  er minimumsprisen på kull (ved  $K=0$ ). Ved en økning i etterspørsel etter kull, vil prisen stige med  $\gamma$  enheter når forbruket av  $K$  øker. Denne antas å være lavere enn  $\beta$  (se figur 1.2 for historisk prisutvikling).

For å se kvantum av drivstoff produsert av kull som en funksjon av gjeldende drivstoffpris settes (10) inn i (9) og løses for  $K$ .

$$(11) \quad K = \frac{P^D}{\alpha_K \gamma} - \frac{PP_1}{\gamma} - \frac{t}{\alpha_K \gamma} = h(P^D)$$

### 3.2 Markedsliekevekt og komparativ statikk:

I markedsliekevekten er etterspørsel lik tilbud og dermed gjelder:  $E = T$ .  $E$  er gitt ved (2),  $T$  finner vi ved å sette (8) og (11) inn i (3).  $E = T$  gir følgende:

$$(12) \quad E_{Max} - \theta P^D = \left( \frac{P^D}{\alpha_B \beta} - \frac{PP_0}{\beta} - \frac{r}{\alpha_B \beta} \right) + \left( \frac{P^D}{\alpha_K \gamma} - \frac{PP_1}{\gamma} - \frac{t}{\alpha_K \gamma} \right)$$

For å se nærmere på hva som påvirker drivstoffprisen løser vi for  $P^D$ .

Dette gir oss:

$$P^D \left( \theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma} \right) = \frac{PP_0}{\beta} + \frac{r}{\alpha_B \beta} + \frac{PP_1}{\gamma} + \frac{t}{\alpha_K \gamma} + E_{Max}$$

Deler med parentesen på begge sider og får et selvstendig uttrykk for drivstoffprisen.

$$(12') \quad P^D = \frac{\frac{PP_0}{\beta} + \frac{r}{\alpha_B \beta} + \frac{PP_1}{\gamma} + \frac{t}{\alpha_K \gamma} + E_{Max}}{\theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma}}$$

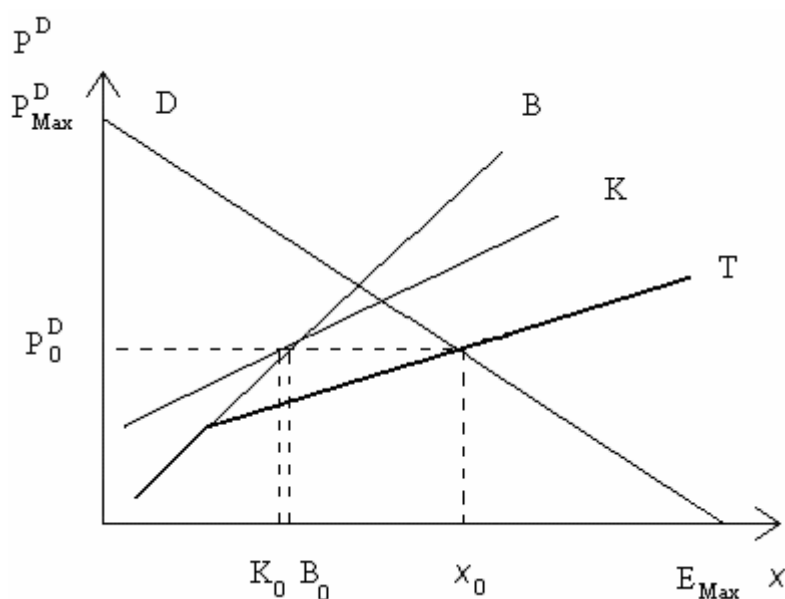
Drivstoffvolum for  $B$  og  $K$  som funksjon av drivstoffprisen  $P_D$  blir som følger:

$$(13) \quad B = \frac{\left( \frac{PP_0}{\beta} + \frac{r}{\alpha_B \beta} + \frac{PP_1}{\gamma} + \frac{t}{\alpha_K \gamma} + E_{Max} \right)}{\theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma}} - \frac{PP_0}{\beta} - \frac{r}{\alpha_B \beta}$$

$$(14) \quad K = \frac{\left( \frac{PP_0}{\beta} + \frac{r}{\alpha_B \beta} + \frac{PP_1}{\gamma} + \frac{t}{\alpha_K \gamma} + E_{Max} \right)}{\theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma}} - \frac{PP_1}{\gamma} - \frac{t}{\alpha_K \gamma}$$

Figur 3.1 illustrerer sammenhengen i modellen. Skjæringen mellom tilbud og etterspørsel gjør at drivstoffprodusentene produserer hhv. kvantum gitt ved  $K_0$  og  $B_0$  til drivstoffprisen  $P_0^D$ .

Figur 3.1: Markedslikevekt i drivstoffmarkedet.



Her er kurven "D" lik etterspørsel og den skjærer kurven gitt ved "T" i likevekten. Kurven "T" angir samlet drivstoffvolum fra begge produsenter. Langs "B" og "K" kan drivstoff leses av i forhold til prisen for en enhet drivstoff gitt ved " $P^D$ ."

### 3.2.1 Effekten av teknologisk fremskritt innen KTV:

Det er bl.a. interessant å se på hvordan et teknologisk fremskritt i KTV prosessen påvirker prisutviklingen. Endringen kan ses på som en reduksjon i mengden kull som trengs for å produsere en drivstoff enhet. Altså  $\Delta\alpha_K < 0$ .

For å se på en slik endring deriveres  $P^D$  mht.  $\alpha_K$ . Her benyttes derivasjons regel for brøk og vi får følgende uttrykk:

$$\frac{\partial P^D}{\partial \alpha_K} = \frac{-\left(\frac{t}{\alpha_K^2 \gamma}\right)\left(\theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma}\right) - \left(\frac{PP_0}{\beta} + \frac{r}{\alpha_B \beta} + \frac{PP_1}{\gamma} + \frac{t}{\alpha_K \gamma} + E_{Max}\right)\left(-\frac{1}{\alpha_K^2 \gamma}\right)}{\left(\theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma}\right)^2}$$

Det kan omskrives slik:

$$\frac{\partial P^D}{\partial \alpha_K} = \frac{\left( \frac{-t + P^D}{\alpha_K^2 \gamma} \right)}{\left( \theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma} \right)} > 0$$

Dette viser at en reduksjon i  $\alpha_K$  gir en negativ virkning på prisen, siden  $P^D > t$  og nevneren er positiv.

For å se direkte effekten på drivstoffvolumet for hver av de to teknologiene, deriveres både  $B$  og  $K$  mhp.  $\alpha_K$ . I den forbindelse benyttes regel for brudde brøk. Først ut er:

$$\frac{\partial B}{\partial \alpha_K} = \frac{\left( -\frac{t}{\alpha_K^2 \gamma} \right) \left( \alpha_B \beta \left( \theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma} \right) \right) - \left( \frac{PP_0}{\beta} + \frac{r}{\alpha_B \beta} + \frac{PP_1}{\gamma} + \frac{t}{\alpha_K \gamma} + E_{Max} \right) \left( -\frac{\alpha_B \beta}{\alpha_K^2 \gamma} \right)}{\left( \alpha_B \beta \left( \theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma} \right) \right)^2} =$$

$$\frac{\left( \frac{-t + P^D}{\alpha_K^2 \gamma} \right)}{\alpha_B \beta \left( \theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma} \right)} > 0$$

Her ser vi økning i drivstoff basert på olje som en følge av at innsatsfaktorbruken i KTV går opp. Virkningen av en økning i kullforbruk for drivstoff basert på kull vises ved:

$$\frac{\partial K}{\partial \alpha_K} = \frac{-\left( \frac{t}{\alpha_K^2 \gamma} \right) \left( \alpha_K \gamma \left( \theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma} \right) \right) - \left( \frac{PP_0}{\beta} + \frac{r}{\alpha_B \beta} + \frac{PP_1}{\gamma} + \frac{t}{\alpha_K \gamma} + E_{Max} \right) \left( \gamma \theta + \frac{\gamma}{\alpha_B \beta} \right)}{\left( \alpha_K \gamma \left( \theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma} \right) \right)^2} + \frac{t}{\alpha_K^2 \gamma} =$$

$$\frac{-\left( \frac{t}{\alpha_K^2 \gamma} \right) - \left( \frac{P^D}{\alpha_K \gamma} \left( \gamma \theta + \frac{\gamma}{\alpha_B \beta} \right) \right)}{\alpha_K \gamma \left( \theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma} \right)} + \frac{t}{\alpha_K^2 \gamma} =$$

$$\frac{-\left( \frac{t \alpha_K}{\alpha_K^2 \gamma} \right) - \left( \frac{P^D \alpha_K}{\alpha_K \gamma} \left( \gamma \theta + \frac{\gamma}{\alpha_B \beta} \right) \right)}{\alpha_K \gamma \left( \theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma} \right) \alpha_K} + \frac{t \left( \theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma} \right)}{\alpha_K^2 \gamma \left( \theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma} \right)} =$$

$$-\left(\frac{t}{\alpha_K \gamma}\right) - \left(P^D \left(\theta + \frac{1}{\alpha_B \beta}\right)\right) + \left(t\theta + \frac{t}{\alpha_B \beta} + \frac{t}{\alpha_K \gamma}\right) = \frac{\alpha_K^2 \gamma \left(\theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma}\right)}{\alpha_K^2 \gamma \left(\theta + \frac{1}{\alpha_B \beta} + \frac{1}{\alpha_K \gamma}\right)} < 0$$

En økning i innsatsfaktorbruk i teknologien som benytter kull, vil senke drivstoffvolum fra kull. Dette viser dermed også det motsatte at en teknologisk fremgang vil øke drivstoffvolum basert på kull.

### 3.2.2 Virkningen av endringer i modellens parametere:

Denne modellen er konstruert for å se nærmere på samspillet og innvirkning mellom parametere i markedet for KTV. Ovenfor ble det vist effekten av en teknologisk fremgang for KTV basert teknologi. Tabell 3.1 gir en oversikt av andre virkninger i modellen (utregningene er ikke tatt med i oppgaven).

**Tabell 3.1: Endringen i drivstoffvolum hhv.  $P^D$ ,  $B$  og  $K$  ved økning i eksogene variabler og parametere.**

	$r$	$t$	$\alpha_B$	$\alpha_K$	$PP_0$	$PP_1$	$\beta$	$\gamma$	$E_{MAX}$	$\theta$
$P^D$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
$B$	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-
$K$	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-

I tabell 3.1 er de første åtte parameterne alle med på å øke kostnadene ved positiv endring.  $E_{MAX}$  angir det høyeste kvantum energienheter det maksimalt vil etterspørres. En økning i  $E_{MAX}$  vil flytte kurven "D" til høyre i figur 3.1 og dermed vil kryssingen av "T" kurven forekomme på et høyere kvantum til en høyere pris.



---

Helningen  $\frac{1}{\theta}$  angir stigningen til den inverse etterspørselskurven "D" fra figur 3.1. Dersom  $\theta$  økes, vil "D" bli slakere for gitt  $E_{MAX}$ , dermed vil "T" kurven skjæres tidligere og likevekten gir en lavere drivstoffpris.

I modellen er oljebasert og kullbasert drivstoff substitutter, så en økning i kostnadene for en av de vil slå ut som økt volum av alternativet. I tabellen ser vi at endringer i  $B$  og  $K$  gir motsatt effekt på hverandre.

For eksempel så vil en reduksjon i transformasjonskostnadene for kull til drivstoff gitt ved  $t$ , reduserer drivstoffprisen, senke drivstoffvolum basert på olje og øke kvantum av drivstoff produsert av kull med tilhørende teknologi. Likeledes kan andre resultater tolkes ut i fra tabellen.

## 4 Numerisk analyse av KTV:

Den teoretiske modellen i forrige kapittel er rimelig oversiktlig og gir en forståelse av hvordan sentrale faktorer virker inn i markedsdynamikken for KTV i konkurranse med standard petroleum. Disse faktorene vil nå bli integrert i en sofistikert modell kalt FRISBEE (Aune et al. 2005). Dette er en rekursiv dynamisk partiell likevektsmodell for det globale olje-, gass- og kullmarkedet. Denne modellen er først og fremst konsentrert om oljemarkedet mens gass- og kullmarked også er inkludert. Modellen lar profittmaksimerende produsenter tilpasse seg en oljepris diktet av OPEC. Videre tekst vil være basert på en publikasjon om FRISBEE-modellen av "Aune et al. 2005."

### 4.1 Modellens oppbygning:

#### 4.1.1 Regioner:

Innen modellen er verden delt opp i 13 regioner, disse er følgende:

**Tabell 4.1: Regioner innen FRISBEE modellen:**

<i>Industrialiserte regioner</i>	<i>Regioner i overgangsfase</i>	<i>Utviklings regioner</i>
Canada	Kaspisk region	Afrika
OECD Oceania	Øst Europa	Kina
USA	Russland/Ukraina/Hviterussland	Latin Amerika
Vest Europa		Kjerne OPEC
		Rest Asia
		Rest OPEC

I hver region produserer oljeselskaper olje og selger denne på det globale oljemarked, konsumentene møter i dette markedet sluttbrukerprisen. Dermed går all handel gjennom det samme marked og markedet klareres for hver periode innen modellen (hver periode er ett år).

#### 4.1.2 Etterspørsel etter olje og energiprodukter:

I modellen er etterspørselen etter energigoder delt inn i to sektorer, husholdning (inkludert tjenester) og industri. Begge sektorene etterspør transportolje og stasjonærolje, så vell som

gass, kull og elektrisitet. Etterspørselen etter andre energigoder er funksjoner av priser og BNP. I tillegg er det inkludert et ledd for uavhengig energieffektivitets forbedring. Modellen inkluderer også en egen kraftsektor som også etterspør olje, kull og gass. Videre skilles det mellom effekter på kort og lang sikt, der de umiddelbare effektene (første året) er reflektert gjennom korttids elastisiteter, og langtidseffekter kommer frem av langtidselastisiteter. Overgangsfasen mellom effekter er angitt gjennom en justeringsparameter.

Modellen er videre utviklet for å avgjøre produksjon innen og utenfor OPEC. I denne forbindelse så spiller kostnader og investeringer en viktig rolle. Diskontering, teknologisk vekst og funn av nye oljefelt er også essensielt i avgjørelsen av fremtidig tilbud, etterspørsel og dermed prisen på energi.

#### 4.1.3 Kullmarkedet:

Kullmarkedet er basert på samme oppdeling i regioner som for oljemarkedet. Hver region har en tilbudsfunksjon basert på data for utvinningskostnader. Dermed er det forskjeller på utvinningsgraden og videre er det høyere transportkostnader for kull sammenliknet mot olje. Dette er fordi kull er en mindre energikonsentrert ressurs enn olje slik at større kvantum må fraktes for å tilby samme energiinnhold. I modellen er kull modellert som et frikonkurransemarked på verdensbasis der kull utvinnes og selges på verdensmarkedet til regjerende priser.

#### 4.1.4 Inkludering av KTV i FRISBEE

For olje er etterspørselen delt opp mot transportsektoren og resterende marked. Modellen har i forbindelse med denne oppgaven blitt videre modifisert for å inkludere KTV som en egen faktor på tilbudsiden, og dermed har kull den samme oppdelingen som for olje. Inkluderingen av KTV i modellen er basert på kostnadsdata samlet inn fra en rekke kilder oppgitt i tabell 2.1. Videre er drivstoff basert på kull i direkte konkurranse med annet drivstoff basert på olje og kan anses som et homogent produkt også her.

Utgangspunktet for produksjon av KTV vil ligge i kullprisen for hvert enkelt region slik at der kull er dyrest vil det være mindre sannsynlig at KTV utbredes.

Funksjonene som benyttes for å uttrykke kostnadene vil se slik ut:

$$(17) \quad \bar{C} = \left( \frac{Coal}{CTL} \right) (P_K - S) + \bar{C}_0 + \bar{C}_1$$

Det første leddet på høyre side uttrykker mengden kull som benyttes for å produsere en enhet drivstoff basert på kull. Prisen på kull er gitt i neste ledd, der  $S$  indikerer et subsidie som kan indikere at staten gjennom sin verdsetting av nasjonal energiproduksjon, direkte subsidierer kullet. Det kan likeledes være et indirekte subsidie som en gunstig avtale for produsenten ved kjøp av kull. Videre så kan  $\bar{C}_0$  betraktes som andre variable kostnader, hhv. logistikk, vann, kjemikalier, vedlikehold og lignende. Det siste leddet gitt ved  $\bar{C}_1$  indikerer kapitalkostnadene pr. enhet forbundet med produksjonen. Dette er investeringene i selve produksjonsfasilitetene og annet.

Det som vil skille regionene fra hverandre er stort sett prisen på kull og størrelsen på subsidie. Både Tyskland og Sør-Afrika startet sin produksjon av drivstoff fra kull ettersom de ikke selv besatt olje og ellers var skjermet fra levering av denne ressursen. Selv har de betydelig kvantum med kull og i en slik presset situasjon produserte de drivstoff basert på kull i stor skala. For andre land, vil liknende scenarier mest sannsynlig legge til rette for KTV. Dersom et land har lav kullpris som følge av lett tilgjengelighet eller store kvantum, fra dette spille inn. Videre så kan det tenkes at subsidie vil være noe større for å kunne garantere for at nasjonen i alle fall har en viss produksjon av egen drivstoffkilde.

Videre er modellen konstruert slik at ikke urimelig store skift forekommer i utbredelsen av KTV. Det er naturlig å tro at det er treghet i systemet her som ellers og at selv om KTV i en periode viser seg å være billigere enn konkurrenten olje, så vil den ikke kapre hele markedet med en gang. Det er dermed lagt inn et ledd der forrige periodes levering av kullbasert drivstoff vil spille en rolle for utbredelsen i neste periode.

Likningen for å inkludere denne effekten er gitt ved:

$$(18) \quad CTL_i = \frac{\ln(5P^D / \bar{C})}{\ln(5)} \cdot CTL_{i-1}$$

Her vil KTV produksjonen i gjeldende periode være en funksjon av drivstoffprisen og kostnadene for produksjon av KTV. Forrige periodes KTV produksjon vil være med på å dempe endringen fra gjeldende periode gjennom leddet  $CTL_{i-1}$ .

Modellen er videre utviklet slik at dersom produksjonen i forrige periode utgjør mindre enn 1 % av totalt drivstofforbruk i regionen, settes produksjonen lik 1 % av forbruket hvis KTV kostnaden er lavere enn dieselpriisen. Dette kommer tydelig fram i figur 4.2, der produksjonen av KTV går direkte opp til 1 % i samme år som kurvene for KTV kostnad og pris på diesel krysser hverandre.

## 4.2 Kjøring av FRISBEE-modellen.

Det vil gjennomføres modellering med fem forskjellige endringer som hver blir angitt som et scenario, disse er følgende.

**Tabell 4.2: Oversikt over de modellerte scenarier, endring uthevet.**

	<i>Oljepris i USD</i>	<i>Teknologisk vekst i % pr. år</i>	<i>Subsidie av kullpris</i>
<i>Referanse scenario</i>	<b>55</b>	<b>2</b>	-
<i>Scenario 2</i>	55	2	<b>50 % av kullpris i 2000</b>
<i>Scenario 3</i>	55	<b>5</b>	-
<i>Scenario 4</i>	<b>75</b>	2	-
<i>Scenario 5</i>	<b>65</b>	<b>3,5</b>	<b>25 % av kullpris i 2000</b>

### 4.2.1 Referansesceneriet:

Referansesceneriet er tatt utgangspunktet i en oljepris på \$55 pr. fat, som er svært nært åregjennomsnittet på \$54,5 pr. fat i 2005 (BP 2006). Den teknologiske veksten er satt til 2% noe som er litt i overkant av middels nivå for andre teknologier. Dette skyldes at det forventes at teknologien kan forbedres ytterligere, den er i et tidlig stadium for storskalaproduksjon. Det er ingen subsidie av kullprisen i dette tilfellet, og dette er for å få en oversikt over hvor levedyktig teknologien er i seg selv.

### 4.2.2 Scenario 2 - Subsidie:

For kun USA, Kina og Sør-Afrika, er subsidie satt til å være 50 % av kullprisen fra 2000, ellers er alt annet identisk som ref. scenariet. I beregningen av energipris og subsidie er det hensiktsmessig og innføre en felles energiberegning. Et tonn olje inneholder rundt 50 % mer energi enn et tonn kull. Dette fører til at kullprisen pr. tonn kan ganges opp med 50 % for å regne i likt energiinnhold, kjent som "tons of oil equivalent" (Toe).

Subsidie er konstant over tid og vil for USA tilsvare: ( $\$46 \text{ pr. toe} * 0,5 = \$23 \text{ pr. Toe}$ ). Dette betyr at produsenten av KTV kun betaler \$23 pr. Toe i år 2000. Dette subsidie er innen modellen konstruert slik at det er konstant over tid, så når kullprisen endrer seg, så er forstøtt subsidie konstant.

Subsidie kan forsvares ved at KTV produksjon er ønskelig av nasjonale energisikkerhets hensyn og gis statelig støtte i form av lånegaranti, billig kull eller direkte innbetaling av midler.

#### 4.2.3 Scenario 3 - Høy teknologisk vekst:

I dette tilfellet er det kun den teknologiske veksten som er endret for å gi en indikasjon om hvordan KTV utvikler seg i tilfellet der kostnadene reduseres raskt. Det er åpenbart grunn til å tro at kostnadene vil bringes ned som en følge av erfaringslæring underveis. En teknologisk vekst på 5 % er kun en naturlig antakelse på kort sikt, etter hvert så vil det være nærmest umulig å redusere kostnadene ytterligere.

#### 4.2.4 Scenario 4 - Høy oljepris:

Dette er muligens det mest realistiske scenariet ettersom oljeprisen etter 2005 har vært høyere enn \$55 som er benyttet i modellen. I denne delen vil effekten av en oljepris på \$75 modelleres.

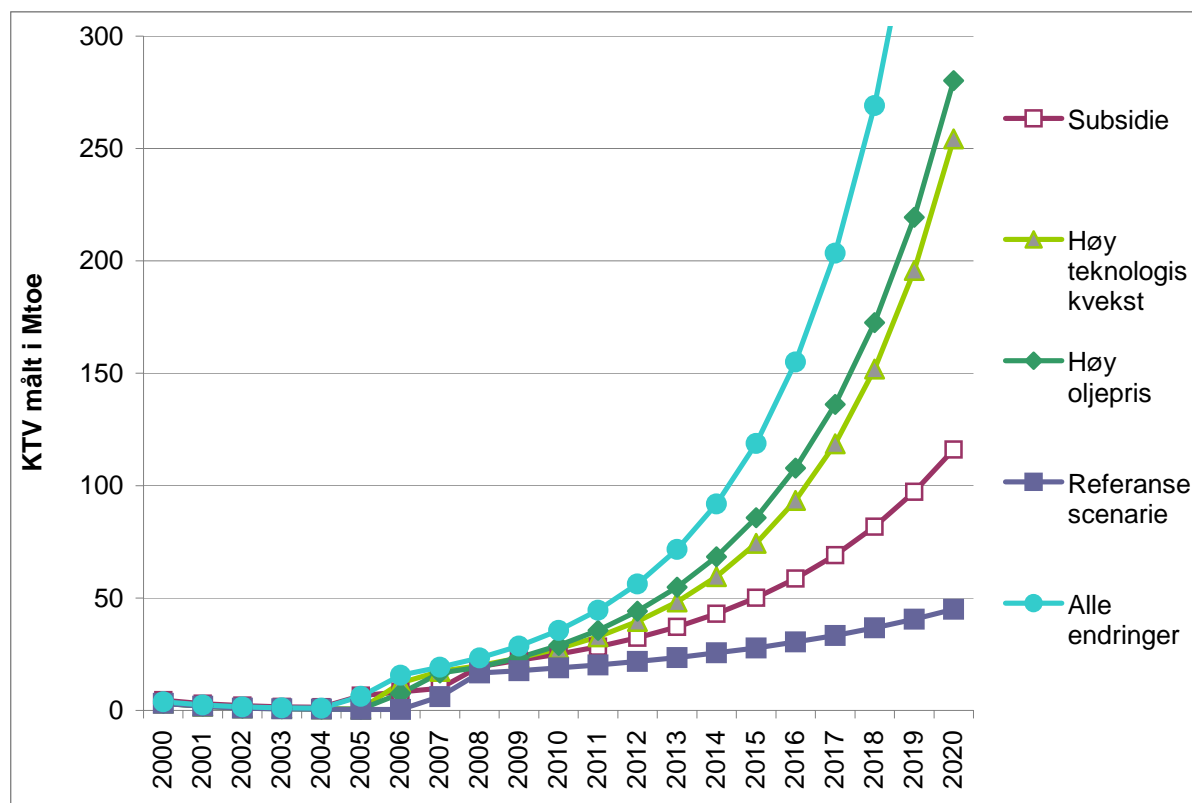
#### 4.2.5 Scenario 5 - Alle endringer:

I dette scenariet settes nivået på subsidie, teknologiskvekst og oljepris til middelverdien av differansen mellom referansescenariet og de andre modellerte scenarier. Dermed får vi sett effektene av en oljepris på \$65 dollar, ca. samme nivå som i mars 2007. En teknologisk vekst på 3,5 % som er noe høyt, men med det fordi det forventes at KTV teknologien vil forbedres betydelig de nærmeste år. Subsidie vil ligge på 25 % av kullprisen i 2000 og dette er også et nivå som kan forventes utenfor modellen.

### 4.3 FRISBEE resultater i de ulike scenariene:

De tidligere definerte scenariene ble kjørt i FRISBEE modellen og ga følgende resultater, se figur 4.1:

**Figur 4.1: Verdens produksjon av KTV under gitte scenario:**

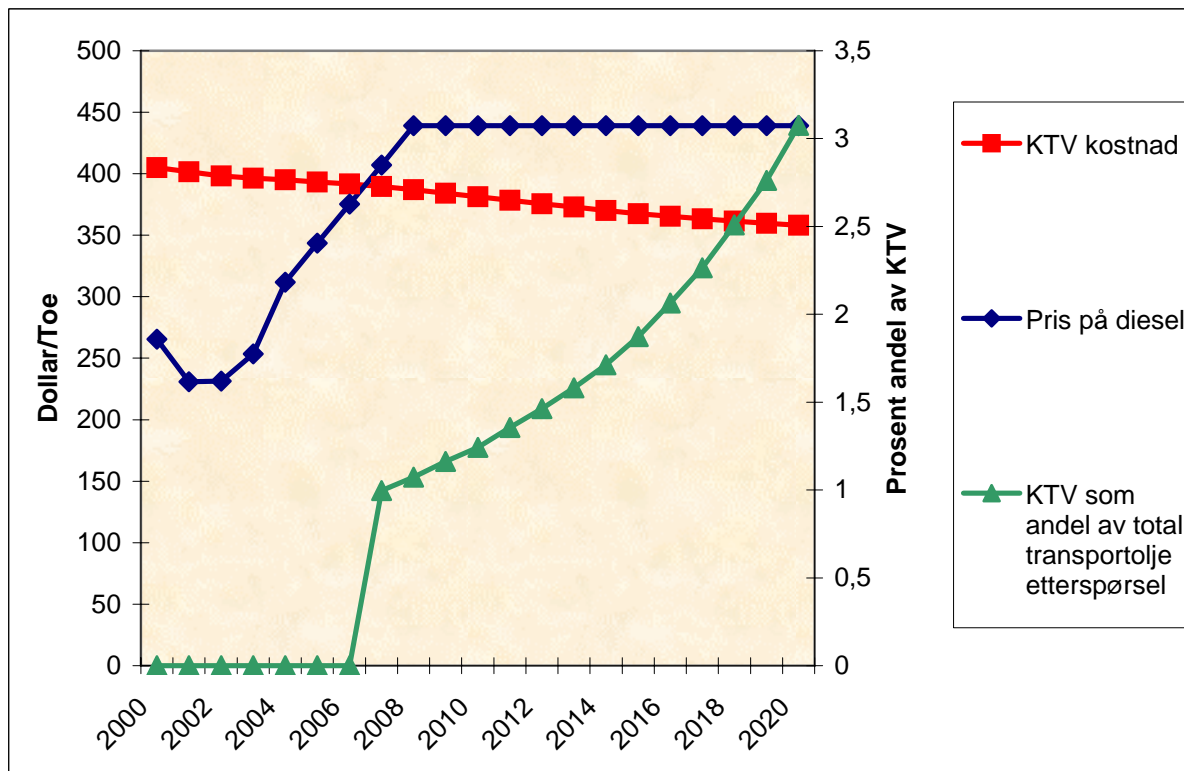


Simuleringen av de forskjellige scenarioene viser verdens totale produksjon av KTV. Til sammenlikning var verdens totale forbruk av transportolje 1409 mtoe. i år 2000 for hvert scenariet. Her kommer det frem at referansescenariot gir lavest produksjon i alle tilfeller. Videre er det i scenariet 5 at produksjonen av KTV blir høyest. Vi kan videre se av de individuelt simulerte scenarioene, er det høy oljepris som leder til sterkest vekst i KTV produksjon, og nest størst produksjonsvolum forekommer i scenariet med høy teknologiskvekst. Denne teknologiske veksten skal tolkes med litt forsiktighet ettersom det er naturlig å forvente at kostnadene går ned i starten av produksjonsfasen for en teknologi, men det er usikkert hvor mye kostnadsreduksjonen blir over tid. Scenariet med subsidie viser seg å gi minst økning i KTV drivstoffvolum i lengden, men er den faktoren som gir størst økning i initialfasen. Fra 2000-2006 er produksjonen for subsidie scenariet mellom 40 % og 2000 % høyere enn ved referansescenariet.

#### 4.3.1 Tidsforløp av KTV kostnader, dieselpris og andel av KTV i drivstoffmarkedet i referansescenariet:

Figur 4.2 viser KTV kostnader som en fallende funksjon av tida. Prisen på diesel (olje basert drivstoff) øker kraftig fra 2003 til 2008 for så å holde seg på dette nivået. I 2008 så faller kostnadene på KTV under prisen på diesel og dermed tar dette drivstoffet over markedsandeler fra ordinert petroleum. Som tidligere nevnt blir all KTV produksjon over 0 %, men mindre en 1 %, satt lik 1 %. KTV overgangen går gradvis, og dette skylds delvis uttrykket (18):  $CTL_i = \frac{\ln(5P^D / \bar{C})}{\ln(5)} \cdot CTL_{i-1}$ . Dette henger som kjent sammen med at leddet  $CTL_{i-1}$  representerer forrige periodes drivstoffvolum, som igjen virker inn på gjeldende periodes produksjonsvolum. Denne effekten er motsyklisk ved at den reduserer effekten av nye endringer. Dette er ment for å gjenspeile konsumenters vaner og tregheter i organisering av økonomiske forhold, slik at prisen ikke er fullstendig avgjørende for markedsandeler på kort sikt.

**Figur 4.2: Tidsforløp av kostnader, dieselpris og andel av KTV i drivstoffmarkedet i USA, gitt referansescenariet.**



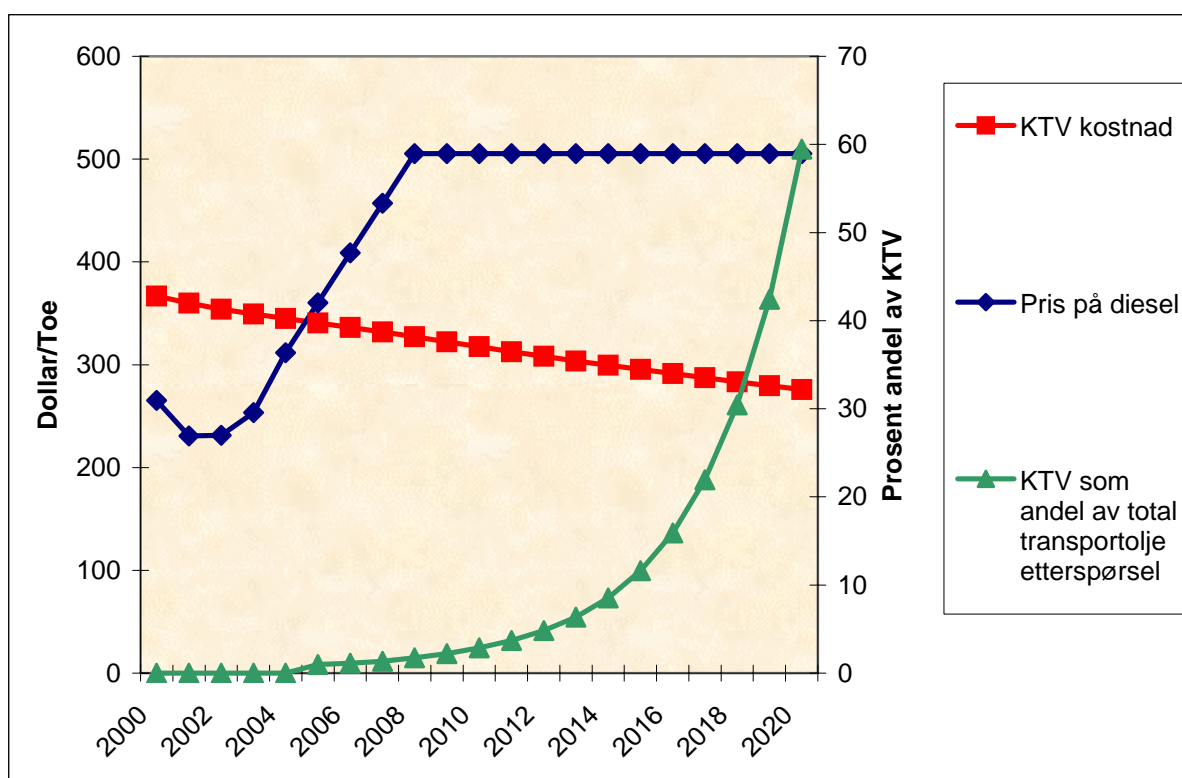
I referansescenariet for USA i år 2020 har KTV kun 3 % av drivstoffmarkedet.



#### 4.3.2 Tidsforløp av KTV kostnader, dieselpris og andel av KTV i drivstoffmarkedet i scenariet med middels endring på alle sentrale variabler:

I scenariet 5 der sentrale parametere som subsidie, teknologisk vekst, oljepris er satt til et ”middels” nivå, er det betydelige endringer fra referansescenariet. KTV kostnadene faller raskere som følge av teknologisk vekst og dieselprisen stiger raskere pga. økt råoljepris. I figur 4.3 vises det at KTV som andel er vesentlig høyere i forhold til referansescenariet ettersom subsidie øker forbruket av KTV helt fra 2000. For USA er det optimistisk å tro at hele 60 % av forbruket vil komme fra KTV. Noe av forklaringen kommer av at USA sine enorme kullagre og høye etterspørsel etter energi fører til at modellen predikerer store kvantum KTV for dem.

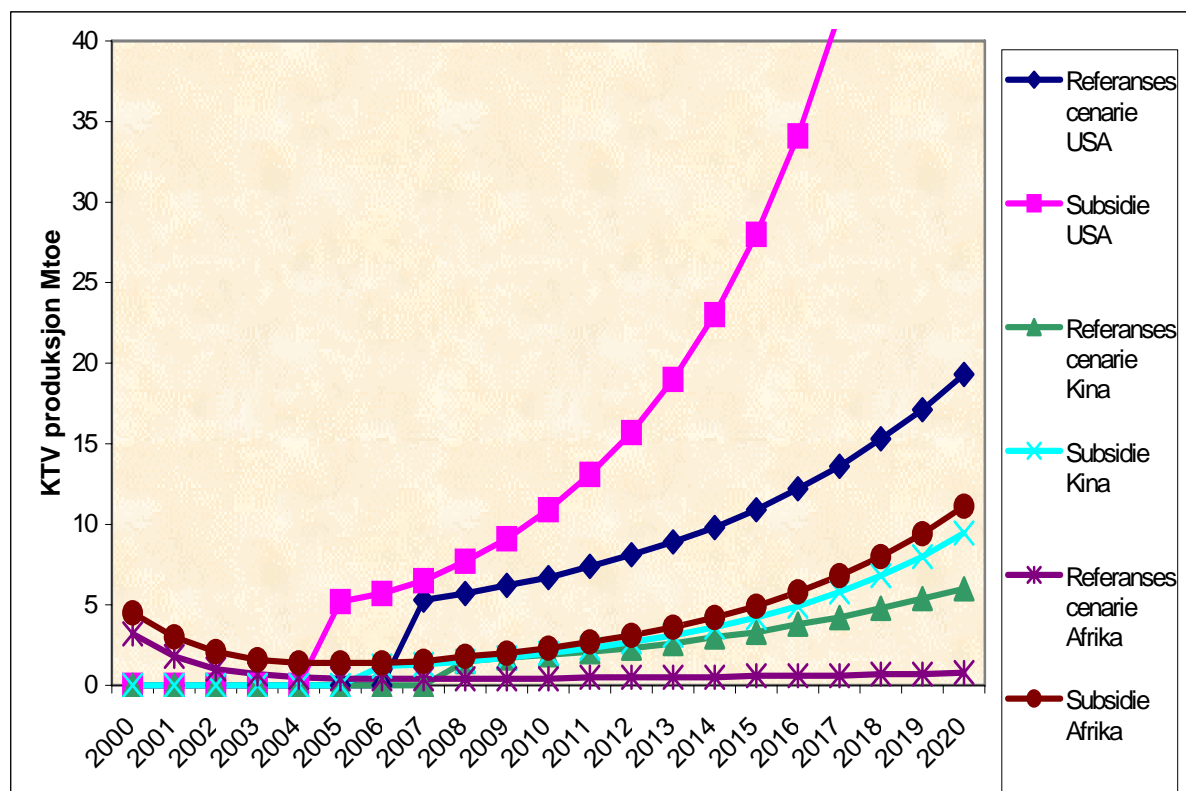
Figur 4.3: Tidsforløp av kostnader, dieselpris og andel av KTV i drivstoffmarkedet i scenariet 5.



#### 4.3.3 Virkningen av subsidie:

I denne kjøringen av modellen blir tre land gitt et subsidie i produksjonen av KTV. Disse er USA, Kina og Afrika. Figur 4.4 nedenfor viser referansescenariet og scenariet 2 der et subsidie er gitt ved at KTV produsentene får et fratrekk i innkjøpsprisen på kull lik 50 % av kullprisen fra 2000 i tilhørende region.

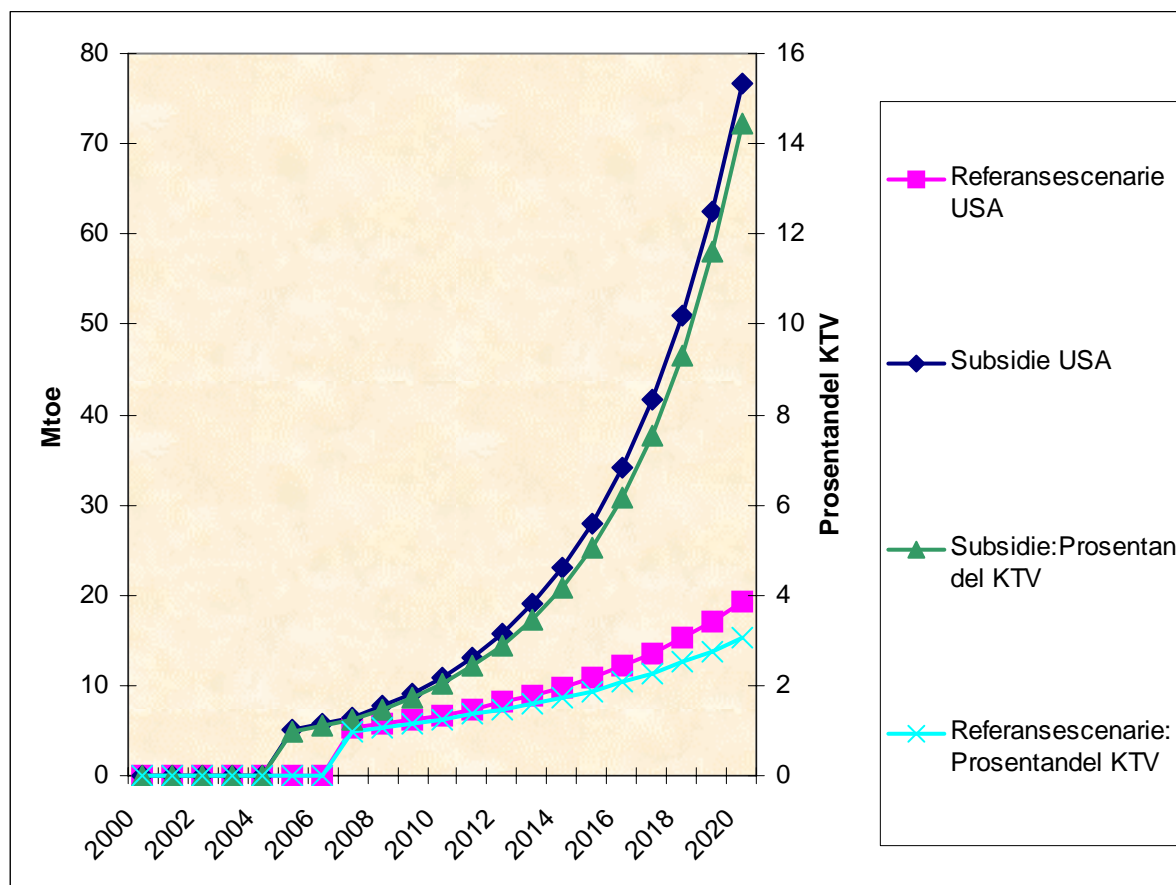
Figur 4.4: KTV produksjon med og uten subsidie.



Her kommer det tydelig frem at effekten av subsidie er sterk i USA og Afrika, mens mer moderat i Kina. Årsaken til at effekten i USA blir såpass sterk er begrunnet i at kostnadene for KTV senkes av subsidie og siden etterspørselen etter energi i USA er såpass stor som den er, så blir utslaget i produksjonsvolum også stort. For Afrika henger den sterke effekten av subsidie sammen med at de starter med en initialbeholdning. Denne beholdningen representerer kapasiteten Sør-Afrika har utviklet under oljeblokaden mot dem tidligere og den vedvarende produksjonen i ettertid. Dersom KTV produksjonen i Afrika hadde vært i nærheten av 0 %, ville den blitt satt lik 1 % slik som tidligere forklart. Et slikt lavt nivå for en periode ville ført til at (18) hadde vært med på å begrenset videre økningen betydelig mer enn hva den allerede gjør i denne modelleringen. Produksjonen blir aldri såpass lav, og dermed økes den raskere igjen når det blir lønnsomt å produsere. Denne effekten kan i ettertid gjenspeile konsumentenes vaner, infrastruktur og aksept for produktet.

Figur 4.5 nedenfor viser også andel KTV i USAs marked. Her ser vi at i referansescenariet år 2020 er andelen KTV drivstoff i overkant av 3 % og i scenariet 2 med subsidie er andelen litt i overkant av 14 % i år 2020.

Figur 4.5: Andel KTV i USA gitt referansescenariet og scenariet med subsidie.



#### 4.4 Numeriske resultater sammenliknet med dagens og planlagt KTV produksjon.

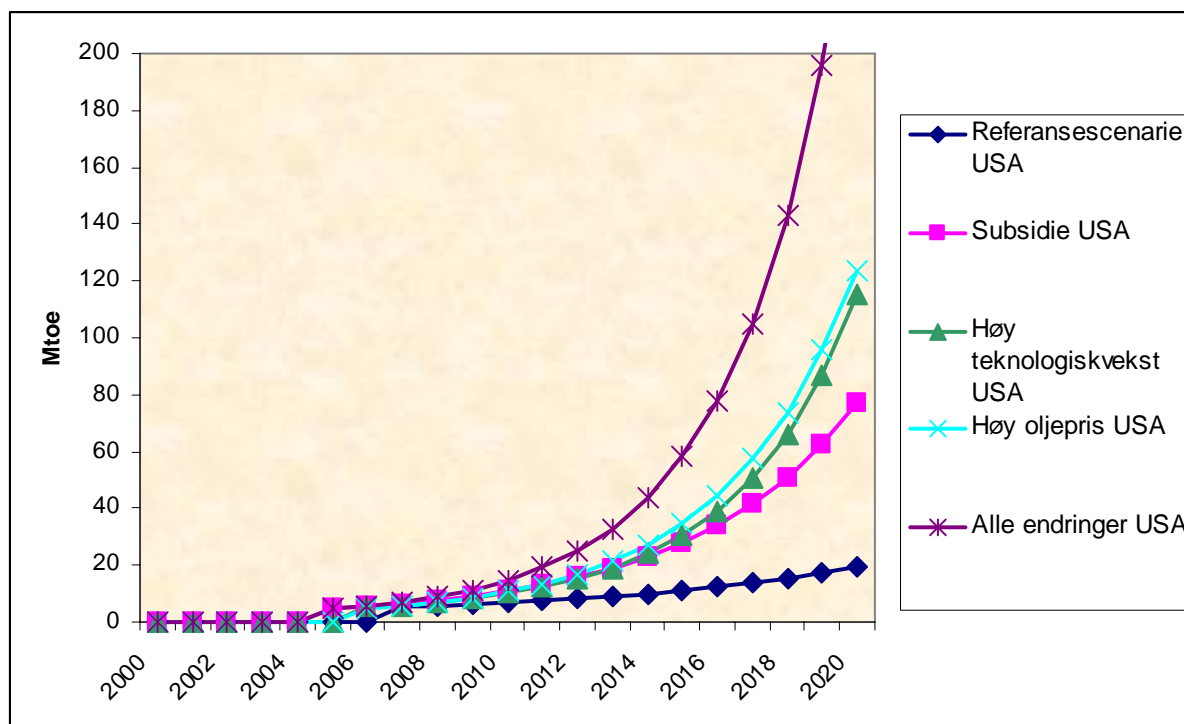
Det er kun Sasol som har kommersielle produksjonsfasiliteter for KTV pr dags dato og de produserer i Sør-Afrika 150.000 fat pr. dag. Pr. år blir dette 54,75 Mill. fat pr. år, dette igjen er lik 7,47 Mtoe. pr. år. Dette er akkurat det samme resultatet som FRISBEE-modellen gir i scenario 5 for Afrika i 2015. Grunnen til at Sør-Afrika historisk sett har produsert såpass mye KTV er oljeblokaden under Apartheidregimet. Denne effekten modelleres ved at Sør-Afrika har fått en eksogen tilførsel av KTV produksjonsvolum tilsvarende produksjonsnivå rett før år 2000.

Kina vil innen 2020 mest sannsynlig produsere 240.000 fat pr. dag, som er 87,60 mill. fat pr. år som tilsvarer 11,95 Mtoe. pr. år. Dette volumet vil Kina ifølge scenario 5 produsere innen 2017.

Sammenlagt vil Kina og Sør-Afrika mest sannsynlig produsere 19,4 Mtoe av kullbasert drivstoff innen 2020. I scenariet 5 så vil de produsere dette drivstoffvolumet innen 2016, slik at modellresultatet passer rimelig godt med virkeligheten.

I modellen så predikeres det en svært sterk økning i KTV i USA. Dette kommer av USA sitt store kullager, høye etterspørsel etter energi, forventninger om vedvarende høy oljepris og teknologisk fremgang for KTV. I USA starter kommersiell drift av KTV i 2007 og en rekke prosjekter er langt på vei i planleggingsstadiet. Allikevel tar slike prosjekter såpass my tid, så det er grunn til å forvente lavere produksjonsvolum for USA enn hva modellen oppgir i hvert av scenariene. Ser vi nærmere på USA ser vi dette i figur 4.6:

**Figur 4.6: KTV produksjon i USA for de ulike scenariene:**



Her slår høy oljepris og høy teknologisk vekst kraftig ut på produksjonsvolum. I scenariet 5 blir summen ganske mye høyere enn hva vi kan forvente i virkeligheten. Dette kunne vært et aktuelt scenario om teknologien allerede var standardisert og like effektiv som petroleum på de fleste områder. Da ville det vært hensiktsmessig for USA å benytte sin egen energiressurs

fremfor å importere olje, men siden det er betydelige risiko forbundet med effektivitet og miljø, er det urimelig å forvente en slik økning.

#### 4.4.1 Svakheter ved FRISBEE i sammenheng med KTV:

Et annet fenomen som forekommer i modellen er at den anslår KTV produksjon for regioner som også har mye olje og gass. KTV er som drøftet i oppgaven først og fremst et alternativ for de land som ønsker å benytte drivstoff basert på en energiressurs de selv besitter. De land som har betydelige olje og gass reserver vil nok heller benytte disse før de setter i gang en noe usikker og kostnadskreven KTV produksjon. Dermed så er det grunn til å tro at en rekke av disse litt mindre produsentene muligens kan ses fullstendig bort i fra, ettersom de heller vil holde fast ved petroleum.

Dette kan bety at kostnadene for KTV har blitt undervurdert i modelleringen. Det er høye kostnader forbundet med å starte produksjonen og enda mer komplekst er satsningen ettersom teknologien enda ikke er fullt utviklet for storskala produksjon. Dette indikerer at denne typen satsning ikke er noe for stater som har et gunstig alternativ. USA og Kina er begge store økonomiske aktører og avhengig av energi, vi kan forvente at disse har midler og vilje til å gjennomføre en slik satsning. Like naturlig er det at andre land som har olje, gass eller kan tillate seg import av disse to, heller vil satse på disse resursene enn foreløpig usikre KTV prosjekter. Modelleringen kunne med fordel vært slik at de aktuelle landene trengte et kvantumsanslag på et betydelig nivå før man kunne forvente KTV produksjon innen modellen.

Andre usikkerhetsmomenter og svakheter ligger i miljøkostnader. Disse er ikke modellert og kostnadene inneholder ikke karbonopptak og lagring. For at CO<sub>2</sub> utslippene fra KTV ved produksjon til forbrenning skal være på samme nivå som oljebasert drivstoff, så trengs det å fange opp over 90 % av CO<sub>2</sub> utslippene. Ettersom det er stadig økende fokus på miljø, kan vi forvente at kostnadene for KTV vil være høyere nettopp for å redusere utslippene. Vann kan selvsagt vise seg å bli et problem i både USA og Kina og dette er heller ikke modellert. Giftige utslipp kan også forventes og i USA er det bekymring for grunnvann og skogområder i nærheten. Dette kan medføre uforutsette rensekostnader for nærmiljøet.

Det er mange usikkerheter rundt denne teknologien når det kommer til storskalaproduksjon. Allikevel så er det tydelig at USA, Sør-Afrika og Kina tross alt godtar disse for å selv produsere mer transportdrivstoff.

Alt i alt er det naturlig å forvente at økningen i KTV på verdensbasis vil ligge nærmere referansescenariet enn scenario 5 kalt "alle endringer." Allikevel så stemmer scenariet 5 langt bedre med virkeligheten enn hva referansescenariet gjør for Kina og Afrika. Etter hva modellen fremskriver blir det interessant å se utviklingen i USA.

## 5 Konklusjoner:

KTV har først blitt tatt i bruk i stor skala ved tidligere definerte krisesituasjoner som 2. Verdenskrig og oljeblokaden mot Sør-Afrika under apartheid regime. Etter ytterlige forbedringer av teknologien og erfaringsbasert læring, vil det vise seg om teknologien er et gunstig alternativ for å minske oljeimport og kostnader som følge av økende oljepris. Hvorvidt teknologien er kommersielt sett godt nok utviklet vil først og fremst vise seg de nærmeste år når Kina vil produsere muligens så mye som 200,000 fat pr. dag. Allerede supplerer Sasol 40 % av Sør-Afrikas bilpark, og har vist seg å være lønnsomt. Oppstartede prosjekter i USA vil også være med på å danne grunnlaget for videre satsning på KTV produksjon.

FRISBEE-modellen anslår også en vesentlig økning i utbredelse av KTV, og da særlig for USA. For USA er det av økonomiske så vel som sikkerhetspolitiske årsaker grunn til å forvente økt satsing på teknologien og produksjon. Det er variasjon mellom scenariene, og prediksjonene for USA blir i scenariet 5 i meste laget av hva vi kan forvente. Subsidie av kullprisen viser seg å ha en betydelig effekt i oppstartsfasen. På sikt vil teknologisk vekst bringe kostnadsnivået ned og med stigende oljepris så skyter dette fart på KTV produksjonen.

KTV er sensitivt ovenfor oljeprisen men det er liten grunn til å tro at oljeprisen vil gå betydelig mye lavere de neste årene enn hva den er nå. Dette er begrunnet med veksten som nå foregår i Kina og India og ellers i andre land som tidligere ikke har hatt råd til biler og som fremover vil øke sitt forbruk av oljebasert drivstoff. I tillegg så vil den teknologiske utviklingen gå fremover og prosessen vil effektiviseres som følge av erfaringsbasert læring.

Miljøkostnadene er omfattende i form av vannressurser, forurensning og skadevirkninger fra kullgruver. Flere kilder opplyser at KTV er mye bedre enn konvensjonell kullforbrenning, og dette stemmer, men KTV er en energiform for transportsektorene og dermed er konkurrenten petroleum. KTV er kun på samme utslippsnivå som petroleum med karbonoppfangning og lagring, slik at det er neppe noen miljøforbedring. KTV drivstoff bidrar ikke til noen effektivitetsgevinst i forbindelse med bilens drivstofføkonomi.

Bruk av kull i transportsektoren er langt i fra å være noen løsning på miljøproblemer som følge av økende etterspørsel etter transportdrivstoff. Det er en teknologi som i større grad kan gi trygghet rundt et lands energitilførsel ved å benytte kull isteden for olje. Kostnadene for teknologien er høye, men det er liten tvil om at produksjonen av KTV basert drivstoff vil øke betydelig frem mot 2020. Dette kommer hovedsakelig fra allerede igangsatte prosjekter i Kina og USA.



## Referanser

- AES (2007): "A legislative initiative to provide market risk insurance for domestic coal, oil shale, and biomass alternative liquid fuel producers" American Energy Security, URL: <http://www.americanenergysecurity.org/AES%20Appendices.pdf>
- Aune, F. R., Glomsrød, S., Lindholt L., Rosendahl, K. E. (2005): "Are high oil prices profitable for OPEC in the long run?" Discussion Papers No. 416, Statistics Norway.
- Bajura, R. A. & Eyring, E. M (2005): "Coal and liquid fuels", Presentasjon gitt av National Research Center for Coal and Energy ved University of Utah
- BP (2006): "Quantifying energy", British Petroleum, Statistical Review of World Energy June 2006, London
- IEA (2006): "World Energy Outlook 2006" International Energy Agency, OECD/IEA, Paris
- Gilpin, R. (2001): "Political Economy – Understanding the International Economic Order", Princeton University Press, Princeton
- Miller, C. L. (2007): "Coal Conversion – Pathway to Alternative Fuels", Department of Energy kongress utredning, Washington jan. 19, 2007
- Gielen, D. & Unander, F. (2005): "Alternative Fuels: An Energy Technology Perspective" IEA working paper jan. 2001.
- Greencarcongress (2007): " South African Researchers Planning Coal-to-Liquids Plant in China" URL: [http://www.greencarcongress.com/2007/02/south\\_african\\_r.html#more](http://www.greencarcongress.com/2007/02/south_african_r.html#more)
- NRDC (2006): "Why Coal Liquids Are Not a Viable Option to Move America Beyond Oil", Natural Resources Defence Council, URL: <http://www.nrdc.org/globalwarming/coal/liquids.pdf>
- Kark, J. (2007): "Coal-to-liquid fuels carry too steep a price", URL: <http://www.roanoke.com/editorials/letters/wb/wb/xp-110045>
- Robinson, K. K. & Tatterson, D. F. (2007): "Fischer-Tropsch Gets a New Look", *Oil & Gas Journal* 26. feb 2007 s. 20-30
- Fairley, P. (2007): "China's Coal Future", *Technology Review* 08.jan 2007
- Scholtz, J. (2005): "The strive for US energy Independence: How Fischer-Tropsch processes could be part of the answer", Tilsendt etter direkte kontakt med Sasol.
- TRL (2006): "Uncertainties in Road Transport Emissions in Developing Countries", presentasjon av Ian McRae til "UK Stern Review" London, 21 January 2006
- WBCSD (2001): "Mobility 2001: World mobility at the end of the twentieth century and its sustainability", World Business Council for Sustainable Development, Geneva
- WCI (2006): "Coal: Liquid fuels" World Coal Institute, London

## Appendiks 1: Utvalgte FRISBEE resultater:

**Tabell A1.1:** Kull til væske produksjon i referansescenariet, angitt i Mtoe.

År	WEU	EEU	USA	CAN	OEP	RUB	CAR	OPC	OPR	CHI	RAS	AFR	LAM	World
2000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	0,0	3,2
2001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	1,8
2002	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0
2003	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7
2004	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5
2005	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,4
2006	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,4
2007	0,0	0,0	5,3	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	6,1
2008	2,6	0,3	5,7	0,4	1,4	0,5	0,1	0,7	0,4	1,5	1,4	0,4	1,2	16,7
2009	2,7	0,3	6,2	0,5	1,5	0,5	0,1	0,7	0,4	1,7	1,4	0,4	1,2	17,7
2010	2,9	0,4	6,7	0,5	1,6	0,6	0,1	0,7	0,4	1,9	1,4	0,4	1,3	18,9
2011	3,0	0,4	7,4	0,6	1,7	0,6	0,1	0,7	0,5	2,1	1,5	0,5	1,4	20,2
2012	3,2	0,4	8,1	0,6	1,8	0,6	0,1	0,7	0,5	2,3	1,5	0,5	1,5	21,8
2013	3,4	0,4	8,9	0,7	1,9	0,6	0,1	0,7	0,5	2,6	1,6	0,5	1,5	23,5
2014	3,6	0,4	9,8	0,7	2,1	0,6	0,1	0,8	0,5	3,0	1,7	0,5	1,7	25,6
2015	3,8	0,5	10,9	0,8	2,2	0,7	0,2	0,8	0,6	3,3	1,7	0,6	1,8	27,8
2016	4,1	0,5	12,2	0,9	2,4	0,7	0,2	0,8	0,6	3,8	1,8	0,6	1,9	30,5
2017	4,4	0,5	13,6	1,0	2,6	0,7	0,2	0,9	0,7	4,2	1,9	0,6	2,1	33,4
2018	4,8	0,6	15,3	1,1	2,9	0,8	0,2	0,9	0,7	4,8	2,0	0,7	2,2	36,8
2019	5,2	0,6	17,1	1,2	3,1	0,8	0,2	1,0	0,8	5,4	2,2	0,7	2,4	40,6
2020	5,6	0,7	19,3	1,3	3,4	0,8	0,2	1,0	0,8	6,0	2,3	0,8	2,6	45,0

Forklaring på forkortelser av region:

**WEU:** Vest Europa

**EEU:** Øst Europa

**USA:** USA

**CAN:** Canada

**OEP:** OECD Oceania

**RUB:** Russland/Ukraina/Hviterussland

**CAR:** Kaspisk region

**OPC:** Kjerne OPEC

**OPR:** Resten av OPEC

**CHI:** Kina

**RAS:** Resten av Asia

**AFR:** Afrika

**LAM:** Latin America

**World:** Summen av alle regioner.

**Tabell A1.2:** Kull til væske produksjon i scenarieret 2, angitt i Mtoe.

År	WEU	EEU	USA	CAN	OEP	RUB	CAR	OPC	OPR	CHI	RAS	AFR	LAM	World
2000	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	0,0	4,5
2001	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	3,0
2002	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	2,1
2003	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	1,6
2004	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	1,4
2005	0	0	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	6,6
2006	0	0	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	1,4	0,0	8,3
2007	0	0	6,5	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	1,5	0,0	9,8
2008	2,6	0,3	7,7	0,4	1,4	0,0	0,1	0,7	0,4	1,5	1,4	1,8	1,2	19,5
2009	2,7	0,3	9,1	0,5	1,5	0,5	0,1	0,7	0,4	1,7	1,4	2,0	1,2	22,3
2010	2,9	0,4	10,9	0,5	1,6	0,6	0,1	0,7	0,4	2,0	1,4	2,3	1,3	25,1
2011	3	0,4	13,1	0,6	1,7	0,6	0,1	0,7	0,5	2,3	1,5	2,7	1,4	28,4
2012	3,2	0,4	15,7	0,6	1,8	0,6	0,1	0,7	0,5	2,7	1,5	3,1	1,5	32,4
2013	3,4	0,4	19,0	0,7	1,9	0,6	0,1	0,7	0,5	3,1	1,6	3,6	1,5	37,2
2014	3,6	0,4	23,0	0,7	2,1	0,6	0,1	0,8	0,5	3,6	1,7	4,2	1,7	43,0
2015	3,8	0,5	28,0	0,8	2,2	0,7	0,2	0,8	0,6	4,2	1,7	4,9	1,8	50,1
2016	4,1	0,5	34,1	0,9	2,4	0,7	0,2	0,8	0,6	4,9	1,8	5,8	1,9	58,7
2017	4,4	0,5	41,7	1,0	2,6	0,7	0,2	0,9	0,7	5,8	1,9	6,8	2,1	69,1
2018	4,8	0,6	51,0	1,1	2,9	0,8	0,2	0,9	0,7	6,8	2,0	8,0	2,2	81,8
2019	5,2	0,6	62,5	1,2	3,1	0,8	0,2	0,9	0,8	8,0	2,2	9,4	2,4	97,3
2020	5,6	0,7	76,8	1,3	3,4	0,8	0,2	1,0	0,9	9,4	2,3	11,1	2,6	116,2

**Tabell A1.3:** Kull til væske produksjon i scenarieret 3, angitt i Mtoe.

År	WEU	EEU	USA	CAN	OEP	RUB	CAR	OPC	OPR	CHI	RAS	AFR	LAM	World
2000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	3,3
2001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	1,9
2002	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	1,2
2003	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,8
2004	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7
2005	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,6
2006	2,7	0,3	5,3	0,4	1,4	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,6	1,2	12,3
2007	2,9	0,3	5,9	0,5	1,5	0,5	0,1	0,7	0,4	1,3	1,3	0,7	1,3	17,4
2008	3,3	0,4	7,0	0,5	1,8	0,6	0,1	0,7	0,5	1,5	1,5	0,8	1,4	20,0
2009	3,7	0,4	8,3	0,6	2,0	0,6	0,1	0,8	0,6	1,7	1,7	0,9	1,7	23,3
2010	4,4	0,5	10,1	0,8	2,4	0,7	0,1	0,9	0,6	2,0	1,9	1,0	1,9	27,5
2011	5,2	0,6	12,3	0,9	2,9	0,8	0,2	1,1	0,8	2,4	2,2	1,2	2,3	32,8
2012	6,2	0,7	15,2	1,1	3,5	0,9	0,2	1,3	0,9	2,8	2,6	1,4	2,8	39,6
2013	7,4	0,9	19,0	1,4	4,2	1,1	0,2	1,5	1,1	3,4	3,1	1,7	3,3	48,3
2014	9,1	1,0	24,0	1,8	5,2	1,3	0,2	1,8	1,3	4,1	3,7	2,1	4,1	59,6
2015	11,2	1,3	30,5	2,2	6,4	1,6	0,3	2,1	1,6	5,0	4,5	2,5	5,0	74,3
2016	13,9	1,6	39,2	2,8	8,1	1,9	0,4	2,6	2,0	6,1	5,5	3,1	6,3	93,5
2017	17,4	2,0	50,7	3,6	10,2	2,3	0,4	3,2	2,5	7,6	6,8	3,9	7,9	118,7
2018	21,9	2,5	66,2	4,7	13,0	2,9	0,5	3,9	3,2	9,6	8,5	4,9	10,0	151,8
2019	27,9	3,2	87,0	6,1	16,7	3,6	0,6	4,8	4,1	12,1	10,6	6,2	12,8	195,7
2020	35,7	4,1	115,1	8,0	21,6	4,5	0,8	6,1	5,2	15,5	13,4	7,9	16,4	254,3

**Tabell A1.4:** Kull til væske produksjon i scenariet 4, angitt i Mtoe.

År	WEU	EEU	USA	CAN	OEP	RUB	CAR	OPC	OPR	CHI	RAS	AFR	LAM	World
2000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	0,0	3,2
2001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	1,8
2002	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0
2003	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7
2004	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5
2005	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5
2006	0,0	0,0	5,2	0,4	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	7,5
2007	2,6	0,3	5,8	0,5	1,5	0,5	0,1	0,6	0,4	1,3	1,3	0,5	1,2	16,6
2008	3,0	0,4	6,9	0,5	1,8	0,6	0,1	0,7	0,4	1,5	1,5	0,6	1,3	19,2
2009	3,6	0,4	8,6	0,7	2,1	0,7	0,1	0,9	0,5	1,8	1,8	0,7	1,6	23,5
2010	4,4	0,5	10,8	0,8	2,6	0,8	0,1	1,0	0,7	2,2	2,1	0,8	2,0	28,9
2011	5,4	0,6	13,5	1,0	3,2	0,9	0,2	1,2	0,8	2,7	2,5	1,0	2,4	35,6
2012	6,6	0,8	17,0	1,3	4,0	1,1	0,2	1,5	1,0	3,3	3,1	1,2	3,0	44,1
2013	8,1	1,0	21,6	1,6	5,0	1,4	0,3	1,8	1,2	4,0	3,7	1,5	3,7	54,8
2014	10,0	1,2	27,4	2,1	6,2	1,7	0,3	2,2	1,5	4,9	4,6	1,8	4,6	68,4
2015	12,4	1,5	34,9	2,7	7,8	2,1	0,4	2,7	1,9	6,0	5,6	2,2	5,7	85,8
2016	15,4	1,9	44,7	3,4	9,7	2,5	0,4	3,3	2,3	7,5	6,9	2,8	7,1	107,9
2017	19,2	2,3	57,3	4,3	12,3	3,1	0,5	4,0	2,9	9,3	8,5	3,4	9,0	136,2
2018	24,0	2,9	73,9	5,5	15,5	3,8	0,7	5,0	3,6	11,6	10,5	4,3	11,3	172,5
2019	30,2	3,6	95,5	7,1	19,7	4,7	0,8	6,1	4,6	14,6	13,0	5,4	14,2	219,4
2020	38,0	4,6	123,9	9,1	25,0	5,8	1,0	7,6	5,8	18,3	16,2	6,8	18,0	280,2

**Tabell A1.5:** Kull til væske produksjon i scenariet 5, angitt i Mtoe.

År	WEU	EEU	USA	CAN	OEP	RUB	CAR	OPC	OPR	CHI	RAS	AFR	LAM	World
2000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	0,0	3,8
2001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	2,4
2002	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	1,6
2003	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	1,1
2004	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0
2005	0,0	0,0	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	6,2
2006	2,6	0,3	5,8	0,4	1,4	0,0	0,0	0,0	0,4	1,2	1,3	1,0	1,2	15,7
2007	2,9	0,3	7,0	0,5	1,6	0,5	0,1	0,6	0,4	1,4	1,4	1,2	1,3	19,2
2008	3,4	0,4	8,9	0,6	1,9	0,6	0,1	0,7	0,5	1,7	1,6	1,4	1,5	23,4
2009	4,1	0,5	11,4	0,7	2,2	0,7	0,1	0,9	0,6	2,1	1,9	1,8	1,8	28,7
2010	4,9	0,6	14,7	0,9	2,7	0,8	0,1	1,0	0,7	2,6	2,2	2,2	2,2	35,6
2011	5,9	0,7	19,1	1,1	3,3	0,9	0,2	1,2	0,9	3,3	2,7	2,8	2,7	44,6
2012	7,2	0,8	24,9	1,3	4,0	1,1	0,2	1,4	1,1	4,1	3,2	3,6	3,2	56,3
2013	8,8	1,0	32,8	1,7	5,0	1,3	0,2	1,7	1,3	5,2	3,9	4,5	4,0	71,6
2014	10,9	1,3	43,5	2,1	6,3	1,6	0,3	2,1	1,6	6,7	4,7	5,8	5,0	91,9
2015	13,6	1,6	58,0	2,7	7,9	1,9	0,4	2,6	2,0	8,7	5,8	7,5	6,2	118,8
2016	17,0	2,0	77,9	3,5	10,0	2,3	0,5	3,2	2,5	11,3	7,2	9,8	7,8	154,9
2017	21,5	2,5	105,2	4,5	12,7	2,9	0,6	4,0	3,2	14,8	8,9	12,8	9,9	203,4
2018	27,4	3,2	143,0	5,8	16,3	3,6	0,8	4,9	4,0	19,4	11,2	16,8	12,6	269,1
2019	35,0	4,1	195,6	7,6	21,1	4,5	0,9	6,2	5,2	25,8	14,1	22,3	16,2	358,7
2020	45,2	5,3	269,3	10,0	27,4	5,6	1,2	7,9	6,7	34,3	18,0	29,8	21,0	481,6