



Vestlandsforskning

Boks 163, 6851 Sogndal

Tlf. 57 67 61 50

Internett: www.vestforsk.no

VF-rapport 2/2003

Energi og miljødata for alternative og konvensjonelle drivstoffer – år 2010

Erling Holden, Vestlandsforskning

VF Prosjektrapport

Rapport tittel Energi og miljødata for alternative og konvensjonelle drivstoffer – år 2010	Rapportnr. 2/2003
	Dato Februar 2003
	Gradering Open
Prosjekttittel Prosjekt energi- og miljødata for samferdsel	Tal sider 78 + vedlegg
	Prosjektnr 2215
Forskarar Erling Holden	Prosjektansvarleg Karl Georg Høyer
Oppdragsgjevar Statens Forurensningstilsyn	Emneord Alternative drivstoffer Livsløpsstudier Well-to-Wheel Hydrogen
Samandrag <p>I rapporten har vi gjennomført en såkalt ”well-to-wheel” analyse av 18 ulike energikjeder. Hovedproblemstillingen med analysene har i første rekke vært: Har hydrogen i kombinasjon med brenselcelle de miljømessige egenskapene som gjør det til fremtidens drivstoff? <i>Dessverre – får man vel nesten si - er det ingen av de 18 energikjedene som samtidig kommer best ut målt etter alle de tre kriterier vi har anvendt her.</i> En helhetlig vurdering må dermed basere seg på en vurdering av hva man oppfatter som det viktigste miljøproblemet. Konklusjonene må dermed bli som følger:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hvis målsetningen er å <i>øke energieffektiviteten</i> i kjedene, fremstår hydrogen og brenselcelle som et av flere alternativer for økt effektivitet i forhold til baskjeden. • Hvis målsetningen er å <i>reduere utslippene av klimagasser</i>, har bruk av naturgassbasert hydrogen i en brenselcelle et stort potensial. • Hvis målsetningen er å <i>reduere utslipp av lokale luftforurensninger</i> i våre byer og tettsteder, fremstår brenselcelle i kombinasjon med hydrogen som et svært godt alternativ. Her må brenselcellen imidlertid finne seg i å konkurrere med gange, sykkel, elbiler og kollektive transportmidler. 	
Andre publikasjoner frå prosjektet	
ISBN nr 82-428-0229-7 ISSN: 0803-4354	Pris

Forord

På oppdrag fra Statens Forurensningstilsyn har vi i denne rapporten laget en kunnskapsstatus om energi- og miljødata for alternative drivstoffer i år 2010. Målsetningen har vært å vurdere hvordan de ulike drivstoffene kommer ut målt etter et sett av miljømessige indikatorer.

Vi skal altså se fremover i tid, noe som ufravikelig vil innebære usikkerhet. Datagrunnlaget som er tilgjengelig nasjonalt og internasjonalt er likevel av en slik karakter at det er forsvarlig å gjøre slike anslag. Særlig gir nye *datasimuleringer* av drivstoffenes forbruks- og utslippsegenskaper grunnlag for å si noe tydelig om hvordan de ulike drivstoffene kommer ut i forhold til hverandre. Like interessant som å dokumentere robuste og objektive data, har det imidlertid vært å kartlegge hvor slike data ikke finnes. Det har altså vært en ambisjon både å finne det som finnes og det som ikke finnes.

En slik kunnskapsstatus vil likevel alltid bære preg av å være et øyeblikksbilde av hva vi *i dag tror vil være situasjonen i fremtiden*. Vi gjengir det som vi etter beste evne mener kommer til å gjelde om 10 år. Det kommer imidlertid nye data om alternative drivstoffer hele tiden. Særlig er tilgangen på nye data stor nå, noe som først og fremst har sammenheng med den økende interessen for hydrogen og brenselcelleteknologi. Datagrunnlaget kommer – etter vår vurdering - til å øke både når det gjelder bruk av alternative drivstoffer i et større spekter av transportmidler og ikke minst vil det komme data om nye miljøindikatorer, såkalte ”ikke-regulerte utslipp” (som sannsynligvis kommer til å bli regulert innen få år). Det er også rimelig å anta at det vil dukke opp ”nye” drivstoffer.

Vi mener derfor at det er svært viktig å fortsette arbeidet med å bygge opp en base med solide, objektive og robuste data om de alternative drivstoffene. På denne bakgrunnen har vi derfor utviklet en modell som lett kan utvides både med flere drivstoffer, flere kjøretøykategorier og ikke minst nye miljøindikatorer.

Rapporten er skrevet av Dr.ing. Erling Holden, forsker ved miljøgruppa på Vestlandsforskning. Forskingsleder, Dr. Karl Georg Høyer, har hatt det overordnede faglige ansvaret for rapporten. Takk til Otto Andersen på Vestlandsforskning og ikke minst Peter Ahlvik ved VEF Tec (Sverige). Ahlvik har bidratt med uvurderlig bistand knyttet til innsamling og tolkning av data.

Erling Holden

Vestlandsforskning, Sogndal

Innhold

1.	INNLEDNING.....	4
1.1.	Målsetning	6
2.	METODE OG DATAGRUNNLAG.....	7
2.1.	Livsløpsanalyser	7
2.2.	Drivstoffenes livsløp.....	8
2.3.	Well-to-wheel	9
2.4.	Kilder	13
3.	FORUTSETNINGER	16
3.1.	Tidshorisont	16
3.2.	Kjøretøykategorier	16
3.3.	Valg av energikjeder.....	17
4.	ENERGIKJEDENE	19
4.1.	Beskrivelse av og data for energikjeder – WTT	19
4.2.	Beskrivelse av energikjeder - TTW	26
5.	RESULTATER - PERSONBILER.....	34
5.1.	Virkningsgrader og energibruk.....	34
5.2.	Utslipp av CO ₂	43
5.3.	Utslipp av CO ₂ -ekvivalenter.....	46
5.4.	Utslipp av NO _x	49
5.5.	Utslipp av partikler	51
5.6.	Oppsummering.....	55
6.	BUSSER, LASTEBILER OG GODSBÅTER	60
7.	KONKLUSJON.....	67
7.1.	Og vinneren er.....	67
7.2.	Kunnskapsstatus.....	69
7.3.	Forslag til videre arbeid	71
	REFERANSER / LITTERATUR	73

VEDLEGG 1: DATA FOR MILJØPARAMETRENE FOR DE ULIKE ENERGIKJEDENE

1. INNLEDNING

Forskning om og utprøving av alternative drivstoffer har i flere tiår vært en viktig del av myndighetenes strategi for å redusere miljøproblemene knyttet til transport. Med alternative drivstoffer mener vi her alle andre drivstoffer enn bensin og diesel produsert fra råolje. De to sistnevnte omtaler vi her som de konvensjonelle drivstoffene. Bak oss har vi en lang historie med prosjekter og programmer hvor ulike drivstoffer har vært utredet og delvis også demonstrert gjennom større eller mindre demonstrasjonsprosjekter. I alle disse prosjektene har tilgang på objektive og robuste data om de energi- og miljømessige konsekvensene knyttet til ulike drivstoffer vært helt sentrale for de vurderinger som har vært gjort.

Vi går nå inn i en periode hvor hydrogen fremstår som et spesielt interessant alternativ til bensin og diesel. I den sammenheng er det helt avgjørende å ha tilgang på data som kan synliggjøre de miljømessige aspektene ved nettopp hydrogen. Selv om hydrogen er i hovedfokus i denne studien, inkluderer vi imidlertid også enkelte andre alternative drivstoffer i tillegg til de konvensjonelle. Det dreier seg om bruk av naturgass direkte i konvensjonelle motorer, elbilen og ulike former for biologiske drivstoffer. Hydrogen må sammenliknes med bensin og diesel, men også med disse andre alternativene.

I studien oppsummerer vi kjente energi- og miljødata som per i dag foreligger i nasjonal og internasjonal litteratur knyttet til transport og alternative drivstoffer generelt og hydrogen spesielt. En slik analyse må nødvendigvis se fremover i tid. Mye av den teknologien som må til for å understøtte hydrogendrift av kjøretøy for ikke å snakke om et "hydrogensamfunn" – er fremdeles umoden. Vi har valgt å gå frem til år 2010, og gi et bilde av hvordan situasjonen mellom de ulike alternative drivstoffene kan være da.

Det finnes naturlig nok ingen sikre tall for hva som vil være gjeldende i år 2010. Derfor må vi estimere eller basere oss på andres antagelser. Nå innebærer ikke det at man opererer helt i blinde. Det foreligger mye litteratur som gjør denne former for antagelser om fremtiden betydelig mer sikker enn hva man kunne frykte. Det er særlig en rekke *datasimuleringer* som har bedret datagrunnlaget de senere årene. Disse studiene har etter vår vurdering betraktelig styrket de data man har å støtte seg på når man skal få frem potensialet til ulike alternative (og konvensjonelle) drivstoffer. Imidlertid er denne metoden brukt på sterkt avgrensede felt av transportsektoren, noe som innebærer at vi ikke finner alle de data vi ønsker oss med samme presisjonsnivå. I seg selv er det for øvrig interessant å vite hva man ikke vet. Det er også en av målsetningene med denne studien.

En slik studie må nødvendigvis starte med en rekke avgrensninger, forutsetninger og metodiske overveiinger. Disse er gjort rede for i de innledende kapitlene. La oss imidlertid kort gjøre rede for de viktigste momentene her. Som vi allerede har vært inne på velger vi *år 2010* som utgangspunkt for analysen. Det innebærer en avveining mellom to forhold. På den ene siden må man gå så langt frem i tid at alternative drivstoffene får tid til å modnes og utvikle seg. På den andre siden er det viktig å ikke gå så langt frem i tid at det hele renner ut i rene spekulasjoner.

Vi har lagt hovedfokus på *personbilen ved en blandet by- og landeveiskjøring*. Denne avgrensningen av transportmidler og kjøremønster kan begrunnes med

manglende datagrunnlag. Det er lite gode og robuste data når det gjelder transportmidler som busser, lastebiler og båter (som opprinnelig var oppdragsgivers ønske). Vi finner det dessuten vanskelig å operere med gode data for personbiler ved henholdsvis bykjøring og landeveiskjøring (som også var oppdragsgivers ønske). Vi har imidlertid satt av et eget kapittel til data for tyngre kjøretøyene og også skip. Datagrunnlaget er per i dag ikke av samme kvalitet som for personbiler, men det er vår oppfatning at det innen få år også vil finnes et tilsvarende solid datagrunnlag her.

Vi har i alt tatt for oss 18 såkalte *energikjeder*. En energikjede er en sammenkobling av alle prosesser som leder fra det utvinnes en energikilde til et kjøretøy har forflyttet seg fra A til B. Vi har med andre ord tatt i bruk såkalt livsløpsmetodikk, eller ”Well-to-Wheel-analyser” som det nå er vanlig å kalle slike studier. 14 av energikjedene omfatter ulike alternativer til morgendagens konvensjonelle bensin- og dieselskjeder, hvilket innebærer at vi har sammenliknet 16 energikjeder i år 2010. I tillegg har vi tatt med de to konvensjonelle energikjedene i år 2000 for sammenlikningens skyld. Uten å gå nærmere inn på energikjedene her, kan vi nevnte at det dreier seg om moderne bensin- og dieslbiler, naturgass, biomasse, alkoholer, elektriske biler, hybrider og ikke minst hydrogen og brenselceller.

Energi- og miljødata kan være så mangt. I denne studien har vi avgrenset datagrunnlaget til å omfatte følgende indikatorer: energibruk (inkludert virkningsgrader), utslipp av klimagasser (CO₂, CH₄ og N₂O) og utslipp av NO_x og partikler. En del indikatorer vil nok savnes her, men det er en ambisjon å utvide datagrunnlaget med flere indikatorer ved en senere anledning. Ikke minst gjelder dette for såkalte ”ikke-regulerte” utslipp og arealbruk.

En av hovedkildene for data om energi- og miljødata er de kommende, såkalte *utslippskrav*. Her måles utslippene av regulerte utslipp etter nøye spesifiserte kjøresykluser. For personbiler måles utslippene i gram utslipp per kilometer (g/km), noe som både er lett å forstå og samtidig takknemlig for dem som skal bruke dataene til noe. For de tyngre kjøretøyene er det verre. Her måles gjerne utslippene i g/kWh. For å komme fra dette noe ukurante målet til den samme måleenheten som for personbiler, må man gjennom en nokså komplisert regneoperasjon. Foruten drivstoffspesifikasjoner for det aktuelle drivstoffet og en detaljert beskrivelse av selve kjøresyklusen, må man ha data for spesifikt energiforbruk og drivstofforbruk under kjøring. Tar man i betraktning av at det er et utall ulike kjøresykluser for tyngre kjøretøyer og at det akkurat nå er usikkerhet om hvilke sykluser som skal anvendes i fremtiden, er det ikke et helt lett terreng å orientere seg i. Poenget vårt er ikke å klage på kompleksiteten, men kun å peke på at omregningene gjør datagrunnlaget magrere enn det kunne ha vært. Det finnes mange kilder til utslipp i g/kWh, *men færre kvalifiserte omregninger til g/km*. Som det da vi fremgå av vedleggene har vi flere kilder for personbiler enn for tyngre kjøretøyer. De nevnte problemene er en viktig årsak til dette.

Rapporten er bygd opp på følgende måte. I kapittel 2 gjør vi rede for den metoden vi har anvendt. Vi har fulgt metodeutviklingen på dette området i snart 15 år og gir derfor en historiske inngang til ulike metoder og kildegrunnlag. I kapittel 3 ser vi nærmere på de forutsetningene som er lagt til grunn til studien, mens vi i kapittel 4 ser nærmere på de i alt 18 energikjedene som vi analyserer.

Kapittel 5 er rapportens hovedkapittel. Der gjøres det rede for resultatene fra analysene av *personbilene*, det vil si en oppsummering av og sammenlikning av energi- og miljødata for de 18 energikjedene. Hver miljøindikator har fått sitt kapittel og det er dessuten gitt en innledende redegjørelse for den detaljerte beregningsmetoden. Hele datagrunnlaget ligger i en Excelbasert regnemodell og kan lett oppdateres eller utvides med flere energikjeder eller miljøindikatorer. Utskrift av data ligger i vedlegg 1, mens det finnes et omfattende noteapparat i tilknytning til regnearket. Det kan være verdt å merke seg at vi har gjennomført WTW-analyser av energi, klimagasser og utslipp av NO_x. Disse er alle presentert i kapittel 5. Når det gjelder utslipp av partikler, har vi i dette kapitlet gjort rede for de metodiske. Data for utslipp – som for øvrig ikke er WTW, men kun for kjøretøyet - er flyttet til neste kapittel.

Kapittel 6 er et samlekapittel for tilgjengelige data for andre transportmidler enn personbiler ved blandet kjøring. Som allerede nevnt er data for partikkelutslipp inkludert her, også for personbiler. I den grad vi har kommet over tilgjengelige data, har vi skilt mellom forbruk og utslipp ved ulike kjøremønstre (henholdsvis bykjøring, forstedskjøring og landeveiskjøring).

I kapittel 7 oppsummerer vi resultatene fra WTW-analysene, samtidig som vi peker på de områder hvor det eksisterer kunnskapshull i datagrunnlaget. Vi gir her også forslag til videre arbeid på området.

For å presisere målsetningen med denne studien er den nevnt under:

1.1. Målsetning

Følgende to overordnede målsetninger gjelder for studien:

- Oppsummering av kjente energi- og miljødata for de viktigste transportmidler og alternative drivstoffer i år 2010
- Kartlegging av områder hvor grunnlaget for energi- og miljødata er mangelfullt.

2. METODE OG DATAGRUNNLAG

2.1. Livsløpsanalyser

Det er etter hvert blitt en etablert praksis at energi- og miljøanalyser av ulike produkter¹ må basere seg på et "livsløpsperspektiv". Det gjelder enten man skal kartlegge de totale miljøkonsekvensene til et produkt eller når to eller flere produkter skal sammenliknes. Et livsløpsperspektiv innebærer at man analyserer alle prosesser som leder frem til et gitt produkt og dessuten videre etter at produktet er (opp)brukt. Det betyr en kartlegging som strekker seg fra utvinning av de råstoffene som inngår i produktet, via produksjon og bruk av produktet og til produktet deponeres eller gjenvinnes til annet bruk. Dessuten krever livsløpsperspektivet at man i analysene inkluderer den transport som er nødvendig mellom de ulike leddene i produktets livsløp.

Når slike analyser etter hvert har fått et så stort omfang, er det ikke overraskende at det har dukket opp mange ulike navn på denne typen analyser. Delvis er dette mangfoldet et resultat av at ulike fagdisipliner har tatt prinsippet til seg, og delvis skyldes det at prinsippet har vært anvendt på ulike sektorer. For eksempel har analyser innenfor transportsektoren andre begreper enn de som gjennomfører tilsvarende analyser innenfor mat- og byggesektoren. Likevel er det slik at begrepet *livsløpsanalyser* har etablert seg som et overordnet begrep, og som benyttes av de fleste når livsløpsperspektivet skal omsettes i konkrete analyser.² Vi skal her holde fast på det begrepet. Det er også viktig å slå fast at selv om livsløpsanalyser er en bestemt *metode* som ivaretar ambisjonene knyttet til et livsløpsperspektiv, er det rom for tilpasninger i forhold til hver konkret analyse.³

Når det gjelder bruk av livsløpsanalyser innenfor transportsektoren, dukker det opp nye begreper. Her er det viktig å være klar over hva man snakker om. Vi skal ta det i tur og orden. Ser man på hele transportsektoren samlet, kan man snakke om tre nokså klart atskilte livsløp (Høyer og Heiberg 1993, Blinge 1993). Hvert av disse livsløpene kan gi grunnlag for egne livsløpsanalyser.

For det første har vi *drivstoffenes livsløp*. Denne omfatter alle ledd fra utvinning av en energikilde (for eksempel råolje) til og med sluttbruken i transportmidlene (for eksempel en personbil). For det andre har vi *transportmidlenes livsløp*. Her

¹ I stadig større grad gjelder dette også for tjenester.

² På engelsk er det vanlig å bruke betegnelsen LCA (Life Cycle Assessments). På norsk vil det bli livsløpsvurderinger. Nå kan det imidlertid settes et skille mellom livsløpsanalyser og livsløpsvurderinger. I "livsløpsvurderinger" ligger en implisitt ide om at man skal kartlegge et bredt spekter av ulike miljøkategorier og dessuten gjennomføre en vurdering av viktigheten disse kategoriene i mellom (såkalt vekting). Særlig gjorde ISO et poeng ut av dette gjennom sine forsøk på å standardisere livsløpsmetodikken på 90-tallet. Ambisjonene om vekting av ulike miljøkategorier er imidlertid lagt på vei forlatt av alle som i dag driver med livsløpsanalyser (også av ISO selv). En står dermed igjen med begrepet livsløpsanalyser, og det ligger ingen krav eller føringer om vekting som en del av disse analysene. Imidlertid er betegnelsen LCA beholdt og brukes også i norsk terminologi.

³ Det viktige her er å ivareta livsløpsperspektivet og ikke gå seg bort i detaljerte metodiske spissfindigheter.

inngår alle ledd knyttet til produksjon og vedlikehold av transportmidlene (for eksempel produksjon og vedlikehold av en buss eller trikk). Endelig kan vi snakke om *infrastrukturens livsløp*. Her analyseres alle ledd relatert til produksjon og vedlikehold av transportmidlenes infrastruktur (for eksempel veier, tunneler, bruer, parkeringsplasser etc.).

Hvilke livsløp man legger til grunn for sine livsløpsanalyser, er avhengig av den problemstillingen man har. Er målsetningen å kartlegge den totale energibruken og de samlede miljøkonsekvensene for et eller flere drivstoffer, kan man nøye seg med en analyse av drivstoffenes livsløp.⁴ Er målsetningen å sammenlikne ulike transportmidler, bør man ta for seg alle tre livsløpene (drivstoffets, transportmidlenes og infrastrukturens). Det samme er tilfelle om man har ambisjoner om å kartlegge transportsektorens samlede miljøbelastning.

I denne studien skal vi gjennomføre en sammenlikning av ulike drivstoffer (konvensjonelle og alternative), hvilket innebærer at vi skal basere oss på drivstoffenes livsløp.

2.2. Drivstoffenes livsløp

Analyser av drivstoffenes livsløp har hatt- og har fremdeles – mange navn. Den betegnelsen som i dag er mest anvendt i den internasjonale litteraturen er ”Well-to-Wheel” analyser. På norsk ville det bli noe slik som ”brønn-til-hjul”. Vi finner det imidlertid ikke hensiktsmessig å etablere en egen norsk betegnelse, og vil derfor bruke Well-to-Wheel, forkortet WTW. Det første man må gjøre når man skal gjennomføre WTW-analyser av drivstoffer, er å koble sammen en kjede av ulike prosesser fra utvinning av en energikilde til et bestemt kjøretøy. En slik kjede vil vi her kalle en *energikjede*. Et eksempel på en energikjede kan være: utvinning av råolje, transport av råolje til raffineri, produksjon av bensin fra råolje i raffineriet, distribusjon av bensin til lokale fyllestasjoner og endelig bruk av bensinen i en personbil. Som vi skal komme tilbake til, har vi analysert i alt 15 slike energikjeder i denne studien.

I denne sammenhengen kan det være nyttig å trekke fram to andre begreper som brukes mye i tilknytning til WTW. Det første er ”Well-to-Tank” (WTT), som binder sammen alle prosesser fra utvinning av energikilde til drivstoffet befinner seg på kjøretøyets tank. Det andre er ”Tank-to-Wheel” (TTW), og tar for seg energibruk og miljøkonsekvenser som et resultat av at kjøretøyet flytter seg fra A til B. Det er to grunner for å gjøre et slikt skille. For det første utgjør forholdene knyttet til bruk av drivstoffet i transportmidlet en så stor andel av den samlede energibruken og miljøkonsekvensene, at det er hensiktsmessig å skille det ut for seg. For det andre har det med dataenes karakter å gjøre. Alle data relatert til TTW (særlig gjelder dette kjøretøy) er tilknyttet bilindustrien og et tilhørende lovverk for utslipp. Data som hentes fra WTT kommer fra olje- og energiselskapene og kan knyttes til et eget lovverk.

⁴ Om transportmidlene går på bensin og hydrogen påvirker ikke transportinfrastrukturen i nevneverdig grad. Det er heller ikke vesentlige forskjeller i energi- og miljøkonsekvensene knyttet til produksjon og vedlikehold av et og samme transportmiddel som går på ulike former for drivstoff (det kan imidlertid være noen forskjeller, for eksempel knyttet til elbiler).

Sammenhengen mellom de tre betegnelse WTW, WTT og TTW er som følger:

$$(1) \text{ "WTW} = \text{WTT} + \text{TTW} \text{ "}$$

Det er hensiktsmessig for sammenlikningene å etablere et fast sett av *delprosesser* som inngår i en energikjede. Gjennom de siste tiårene har det utviklet seg en typologi for inndeling av energikilder i delprosesser, som vi også skal benytte her. En energikilde kan således deles inn i seks delprosesser:

- (1) **UTVINNING:** Utvinning/produksjon av energikilde
- (2) **TRANSPORT:** Transport av energikilde fra utvinnings-/produksjonssted til mottaksanlegg for produksjon av drivstoff
- (3) **PRODUKSJON:** Produksjon av drivstoff
- (4) **DISTRIBUSJON:** Distribusjon av drivstoff fra produksjonssted til lokale fyllestasjoner
- (5) **SLUTTBEHANDLING/TANKING:** Eventuell sluttbehandling (reforming, komprimering/nedkjøring) av drivstoff og tanking på kjøretøy
- (6) **KJØRETØY:** Omvandling av kjemisk/elektrisk energi i drivstoffet til mekaniske energi i kjøretøyet

2.3. Well-to-wheel

Når man skal gjennomføre en "Well-to-Wheel-analyse" (WTW) av ulike alternative drivstoffer, kan man gå frem på ulike måter. Hvilken fremgangsmåte man velger er i første rekke avhengig av hvor mye tid man har til rådighet, men også i hvilken grad man har tilgang på pålitelige og objektive analyser og data.

Før vi går videre skal vi kort gjøre rede for hva vi legger i "objektive data". Det vil ofte være slik at enkelte aktører som står bak dataproduksjon, har en eller annen spesiell interesse av å fremstille et bestemt drivstoff i et positivt lys (og alternativene i et tilsvarende dårlig lys). Begrepene "oversell" og "overkill" kan knyttes til slike prosesser. Med "oversell" menes at en aktør fremstiller et visst alternativ i et spesielt gunstig lys, hvilket gjerne innebærer at man kun presenterer positive data. For eksempel opereres det i litteraturen med virkningsgrader for en brenselcelle mellom 25-80 prosent. "Oversell" innebærer at man konsekvent snakker om 80%, uten å redegjøre for hva som ligger i de lavere alternativene. Tilsvarende vil "overkill" bety at man kun referer de svake data for brenselcelle, uten å gjøre rede for variasjoner i data i den andre retningen. Det kan være mange ulike mekanismer bak en slik skjev fremstilling av data, og måtene det gjøres på kan også være mange. Vi skal ikke gå inn på dette her. Det er imidlertid avgjørende for oss å presenter hele spennet i dataene i de tilfeller litteraturen inneholder slikt.

Det går et hovedskille mellom hvorvidt man baserer seg på primærdata eller om man ved en kritisk gjennomgang samler inn sekundærdata. Skjønt det er vel egentlig riktigere å vektlegge i *hvilken grad* man har basert seg på sekundærdata.

En WTW-analyse er ekstremt datakrevende, og det vil i praksis ikke være mulig å innhente primærdata fra alle ledd i energikjedene.

Et annet viktig skille går på *i hvilken grad* man går inn på delprosessene når man søker etter data i den analytiske fasen. Man står overfor valget mellom å hente inn data fra de enkelte delprosessene i livsløpet, eller man henter inn ferdig bearbejdede livsløpsdata. Fordelene med å basere seg på ferdige analyser er at man ikke trenger å bruke så mye tid på å innhente data fra hver enkelt delprosess. Ulempen er - og den er etter vårt skjønn ganske stor - at man i liten grad får ”kontroll” over analysene. Det gjelder både detaljer knyttet til data fra delprosessene, men også mulighetene til å etablere og analysere energikjeder som ikke er behandlet i de ferdige analysene man har tilgang til.

I figur 1 er vist en typologi for ulike metoder for innsamling av data til WTW-analyser av alternative drivstoffer.

Well-To-Tank (WTT)

Ved en delprosesstilnærming er det vanlig å skille mellom data som refererer til delprosessene som ligger før drivstoffet er på kjøretøyet og omvandling av drivstoffet (kjemisk eller elektrisk) til mekanisk energi i kjøretøyet. Disse leddene omfatter delprosesser fra kilde (”Well”) til drivstofftanken på kjøretøyet (”Tank”), altså ”Well-To-Tank” (WTT).

Figur 1.

Ulike metoder for innsamling av data til WTW-analyser av alternative drivstoffer.

Datakilder	Delprosesstilnærming		Syntesedata
	Well-to-Tank (WTT)	Tank-to-Wheel (TTW)	Well-to-Wheel (WTW)
Sekundærdata	WTT/sekundær: En kritisk gjennomgang av litteraturen.	TTW/sekundær: En kritisk gjennomgang av litteraturen	WTW/sekundær: En kritisk gjennomgang av litteraturen
Primærdata	WTT/primær: Simuleringer (evt laboratoriemålinger)	TTW/primær: Simuleringer Målinger utført i laboratorium	

I forhold til den inndeling av energikjedene som vi har gjort tidligere (se kapittel 2.2) omfatter WTT følgende fem delprosesser:

- (1) Utvinning av energikilde
- (2) Transport av energikilde
- (3) Produksjon av drivstoff
- (4) Distribusjon av drivstoff
- (5) Sluttprosessering, evt. reformering av drivstoff

Det er her fullt mulig å tenke seg at man gjennomfører undersøkelser hvor man simulerer eller måler karakteristika knyttet til den enkelte delprosess. Hvor stort energiforbruk trengs for å utvinne olje og gass fra Nordsjøen? Hvor store utslipp kommer fra oljeraffinerier? Hva med energiforbruk og utslipp fra produksjonsanlegg for hydrogen fra naturgass? Det er imidlertid ingen overdrivelse å si at en slik jobb vill være bortimot uoverkommelig. I de aller fleste tilfeller må man derfor støtte seg på sekundærdata. Disse kan ha litt ulik karakter. For det første kan man beregne for eksempel energiforbruket selv, basert på tilgjengelig statistikk. For det andre kan man gå inn i litteraturen å finne de data man trenger. For eksempel vil en artikkel om energibruk ved produksjon av metanol fra hurtigvoksende energiskog gi en del informasjonen man trenger. For det tredje kan man få de nødvendige data fra eventuelle konsesjonssøknader eller utslippstillatelser. Endelig kan man gjennom andre WTW-analyser finne data fra delprosessene (hvis disse er rapportert).

Tank-To-Wheel (TTW)

TTW omfatter konvertering av kjemisk eller elektrisk energi lagret på kjøretøyet til et utført arbeid (dvs at kjøretøyet har flyttet seg fra A til B). I følge kapittel 1.3 handler det her om den sjette og siste delprosessen: (6) kjøretøyet. Den mest pålitelige og mest rettferdige måten å fremskaffe data for energiforbruk og utslipp fra kjøretøyet, er å gjennomføre såkalte utslippsmålinger. Her plasseres kjøretøyet på et såkalt chassisdynamometer i et avgasslaboratorium.⁵ Kjøretøyet følger så et nøye spesifisert kjøremønster (kalt kjøresyklus) og energibruk og en rekke utslippskomponenter måles. På denne måten er det mulig å sammenlikne egenskapene fra ulike kjøretøy med ulike drivstoffer.

Her oppstår det imidlertid et problem når vi snakker om fremtidige forbruks- og utslippsdata. Det er vanskelig å måle på kjøretøyer som ikke er tilgjengelig før i 2010. Da står man igjen med to muligheter. Enten baserer man seg på ekspertvurderinger av hva som kommer til å bli resultatet om en 10-15 år (det er slik man går frem når avgasskravene fastsettes), eller man simulerer seg frem til resultatene ved hjelp av spesialutviklede dataprogrammer. Om man gjennomfører målinger, simuleringer eller føler seg kvalifisert til å foreta ekspertvurderinger, er det i alle fall snakk om å fremskaffe primærdata. For de av oss som ikke har tilgang på chassisdynamometer, simuleringsprogram eller ekspertkunnskap, er alternativene å fremskaffe disse dataene sekundært, gjennom å lese litteratur eller snakke med personer som er involvert i produksjon av primærdata.

Well-To-Wheel (WTW)

Det er etter hvert gjennomført så mange WTW-analyser, at man kan komme langt med å gjennomføre en kritisk vurdering av data fra disse analysene. Dette er en metodisk fremgangsmåte som står i sterk kontrast til delprosesstilnærmingen, hvor man altså går til de enkelte delprosessene i datainnsamlingen. Det ligger i denne metodens natur at man utelukkende baserer seg på sekundærdata.

⁵ For tyngre kjøretøy som busser og lastebiler tas motoren ut av kjøretøyet og plasseres i et eget dynamometer.

Nå er det gjerne slik at de større WTW-analysene gjør rede for data fra delprosessene (og gjerne en vurdering av ulike datakilder for hver delprosess). På denne måten er det mulig i gode WTW-analyser å få mye data fra delprosessene.

Vår fremgangsmåte

Vår fremgangsmåte er her utelukkende basert på en kritisk gjennomgang av sekundærkilder. Vi har ikke tilgang på laboratorium (verken for kjøretøy eller andre prosesser som inngår i energikjedene) eller simuleringsprogrammer. Kildebruken blir dermed svært viktig i vår analyse.

Vi har lagt en delprosessstilnærming til grunn, hvilket innebærer at vi henter data fra den enkelte delprosess. Ferdig bearbejdede WTW-data er dermed nokså verdiløst for oss. Som vi har vært inne på er det imidlertid en del av de større WTW-analysene som har en grundig dokumentasjon av energibruk og utslipp fra de enkelte delprosessene. Dette har vært et viktig kildegrunnlag for oss.

Med kritisk gjennomgang legger vi her to kriterier til grunn. For det første er det en gransking av de *forutsetninger* som ligger bak data. Ulike forutsetninger kan naturlig nok gi svært ulike verdier på nøkkeldata. Forutsetningene kan være knyttet til teknologivalg, distribusjonssystemer, kjøresykluser etc. Disse vurderingene er svært viktige for analysenes kvalitet. Det andre kriteriet er *triangulering*. Vårt krav er at alle vitale data skal basere seg på minst to – helst flere – ulike kilder. Bare på denne måten er det mulig å få robuste data. Her skal en imidlertid være klar over at det i mange analyser kun dreier seg om en ”resirkulering” av data. Fire ulike analyser kan representere tilsynelatende fire ulike datasett. En gransking av kildene kan imidlertid fort vise at det her er snakk om en og samme hovedkilde som er benyttet i alle analysene. For oss gjelder det å få tak i flere enn en hovedkilde, eller eventuelt flere vurderinger av samme hovedkilde.⁶

Som det altså fremgår av dette er den kritiske vurderingen av forutsetninger og kilder, helt sentralt i kvaliteten på *denne analysen*. Hvilke forutsetninger har vi så for å gjennomføre slike kritiske vurderinger? Forfatteren av denne rapporten har arbeidet i nær 15 år med bruk av alternative drivstoffer i transportsektoren. Mye av dette arbeidet har vært rettet mot WTW-analyser.⁷ Flere andre medarbeidere på Vestlandsforskning har også i lengre tid vært involvert i analyser knyttet til bruk av alternative drivstoffer i transportsektoren.⁸ I tillegg har Vestlandsforskning nær kontakt med Ecotraffic AB i Sverige, noe som supplerer vår kunnskap med den unike kompetansen Ecotraffic har på kjøretøyteknologi.

⁶ Hvis to anerkjente institutter kommer fram til samme konklusjon basert på sine respektive vurderinger av en og samme måleserie, er dette etter vår mening å oppfatte som to kilder.

⁷ Bang og Holden (1991); Bang, Figenbaum og Holden (1992a, 1992b, 1992c); Holden (1992a, 1992b); Holden (1993); Bang og Holden (1993); Figenbaum, Bang og Holden (1995); Holden (1996a, 1996b); Holden (1997a, 1997b); Holden (1998a, 1998b, 1998c, 1998d).

⁸ Blant annet Høyer og Heiberg (1993).

2.4. Kilder

Vi skal her dele kildene i to hovedgrupper: henholdsvis den gamle og den nye gruppen. De to gruppene referer til to grupper av arbeider som ble gjennomført nasjonalt og internasjonalt med ca. ti års mellomrom, hhv. rundt 1990 og 2000. Som vi skal vise skiller de to gruppene seg fra hverandre på en del vesentlige punkter.⁹

Den "gamle" gruppen

På slutten av 80 tallet og begynnelsen av 90-tallet ble det gjennomført en rekke store WTW-analyser av alternative drivstoffer i transportsektoren både nasjonalt og internasjonalt.¹⁰ I disse analysene ble riktignok ikke begrepet "Well-to-Wheel" benyttet. Isteden var det "livsløpsanalyse", "livsløpsvurderinger", "fra-vugge-til-grav-analyser", "energikjedeanalyse", "Öko-bilanz" etc. som ble brukt. Det mest vanlige var nok likevel "livsløpsvurderinger", eller på engelsk "Life Cycle Assessments (LCA)".

Disse analysene hadde en del fellestrekk. De hadde en analyseform som ivaretok det såkalte livsløpsperspektivet. Dette skilte seg klart ut fra en rekke analyser som hadde vært gjennomført på 80-tallet hvor fokus hadde vært på energibruk og utslipp fra selve kjøretøyet.¹¹ De tidligste analysene i denne gruppen var preget av fokus på energibruk og utslipp av CO₂. Analysene brakte etter vår vurdering til å øke forståelsen av de samlede miljøkonsekvensene av ulike alternative drivstoffer. Tre forhold bidro imidlertid til at denne gamle gruppen av analyser etter hvert mistet sin aktualitet.

For det første kom det stadig krav om at livsløpsanalysene måtte inneholde flere kategorier av miljøeffekter enn energi og CO₂. Det dukket opp studier med livsløpsanalyser av NO_x, CO, partikler, materialbruk, miljøgifter og en rekke helsemessige indikatorer. Til slutt kom da også endelig kravet om at livskvalitet måtte inn. Da var det gjort! Ingen hadde muligheter (verken ressursmessig eller faglige forutsetninger) til å gjennomføre dette.

⁹ Det er selvfølgelig ikke slik at det er et skarpt skille mellom disse to gruppene av analyser. De går delvis over i hverandre, og en finner elementer fra den ene i den andre og omvendt. Slik sett kan det like gjerne være snakk om en glidende overgang. Likevel er det slik at en inndeling i de to gruppene får frem noen karakteristiske trekk ved de analysene som ble gjennomført og gjennomføres nå og som er *typiske* for hver gruppe.

¹⁰ Se DeLuchi 1991 og 1993; Ecotrafic 1992; Blinge 1993; Høyer og Heiberg 1993; Holden 1991, 1997; Bang og Holden 1993; Bang, Holden og Figenbaum 1992a, 1992b, 1992c; Figenbaum 1995.

Det ble også gjennomført en rekke livsløpsstudier hvor målsetningen ikke var spesifikt rettet mot alternative drivstoffer, men snarere å avdekke de totale miljøeffektene av en *bil* (Holden 1993; UPI 1993; COWI 1994), et *nasjonalt transportsystem* (COWI 1992; Kjeldgaard 1992) eller de *konvensjonelle drivstoffene* (Keiserås Bakkane 1994)

¹¹ Her skal det riktignok legges til at det allerede på 70-tallet ble gjennomført flere såkalte energi- og materialstrømsanalyser. Disse var motivert fra de internasjonale oljekrisene og behovet for å tenke rasjonalisering av disse sårbare ressursene. Etter at krisen var "over", dabbet interessen for slike analyser. Interessen for livsløpsanalyser lå således i dvale frem til 1987, hvor FN-rapporten *Vår felles fremtid* (VFF 1987) satte begrepene bærekraftig utvikling og livsløpsanalyser på dagsordenen atter en gang.

Parallelt med denne utvikningen skjedde det noe annet som etter vår vurdering også bidro til å svekke livsløpsanalysene. Stadig flere av ”livsløpsforskerne” kom i kontakt med ISO sitt forsøk på å standardisere livsløpsanalyser. Resultatet var at analysene ble tvunget inn i en metodemessig tvangstrøye som i større grad bidro til å ødelegge de enkle og oversiktlige analysene man hadde hatt til da. Isteden satt man igjen med uhyre kompliserte prosedyrer for allokering av data, etablering av systemgrenser, rigide regler for etablering av miljøkategorier, og mye, mye, mye mer. Når man så satte kronen på verket med å opprette en standard for vektning av ulike miljøproblemer i forhold til hverandre, hadde man skutt seg selv i foten.¹² Ønsker om ”standardisert gjennomsiktighet” endte etter vår oppfatning i ”standardisert ørkenvandring”.

Den viktigste grunnen til at denne gruppen livsløpsanalyser mistet mye av sin aktualitet, skyldes imidlertid at de benyttede energikjedene gikk av moten. Verden hadde gått lei av elektriske biler, biodiesel fra rapsplanter og til en viss grad også alkoholer og naturgass i konvensjonelle forbrenningsmotorer. Det var ikke noe spennende over disse alternativene lengre. Dessuten hadde disse energikjedene enten et for lavt ressurspotensial (raps), prestasjonsproblemer i forhold til bensin- og dieslbiler (elbilen) eller innebar kun marginale miljøforbedringer i forhold til de konvensjonelle drivstoffene (LPG, metanol/etanol og naturgass).

Den ”nye” gruppen

Helt på slutten av 90-tallet og i løpet av de første årene etter århundreskiftet dukket det opp en rekke nye analyser. De skilte seg ut fra de som var gjennomført rundt 10 år tidligere på flere måter. For det første var tilknytningen til ISO-systemets livsløpsanalyser borte. ISO er ikke nevnt i noen av de analysene det her er snakk om. For det andre er man tilbake til energi og CO₂, altså der man startet i den forrige runden. I flere av analysene er det imidlertid varslet at man har ambisjoner om å følge opp med flere utslippskomponenter. Vi er usikre på om det er en god ide.

Det som imidlertid først og fremst skiller denne nye gruppen med analyser fra den tidligere, er nye energikjeder. Vi skal peke på fire karakteristika ved de nye energikjedene. For det første har *brenselcellen* dukket opp. Det lages nå ikke livsløpsanalyser av alternative drivstoffer, uten at brenselcellen inngår i en eller (helst) flere av energikjedene. For det andre opplever vi i denne gruppen en ”*hydrogenania*”, eller det vi kan karakterisere som en ekstrem fokusering på hydrogen som den naturlige arvtageren til de konvensjonelle drivstoffene. Hydrogen som drivstoff befinner seg i kjernen av denne nye gruppen av livsløpsanalyser. De andre – enten det gjelder de konvensjonelle drivstoffene eller andre alternative drivstoffer – er gjerne med som et sammenlikningsgrunnlag for hydrogen. Og det er kombinasjonen hydrogen-brenselcelle som nå er midtpunktet.

Det tredje karakteristiske trekket ved de nye analysene – eller skal vi kanskje kalle det *mottrekket* – er de konvensjonelle drivstoffenes svar til ”trusselen” fra hydro-

¹² Forfatteren satt som norsk representant i den internasjonale arbeidsgruppen som jobbet med denne standarden.

gen. Sørensen (2002) omtaler dette som *seilbåteffekten*.¹³ Denne effekten går i korthet ut på at når en konvensjonell teknologi opplever sterk konkurranse fra ulike alternativer, skjerper den seg betydelig. Den gjør teknologiske forbedringer som tilsynelatende ikke var mulig bare kort tid i forveien. Dette har etter vår vurdering skjedd med de vanlige bensin- og diesebilene, og dette reflekteres i de data som benyttes for konvensjonelle drivstoffer i de nye livsløpsanalysene. To ulike former for mottrekk har vi sett den seneste tiden. For det første er det en utvikling av forbrenningsmotoren. For det andre ser vi ulike former for hybridisering av forbrenningsmotoren, hvilket innebærer at kjøretøyet utstyres med både en konvensjonell motor og en elektrisk motor (og batterier).¹⁴

Det siste fellestrekk ved de nye analysene er – som vi allerede har vært inne på – at man er tilbake til energibruk og utslipp av klimagasser (særlig CO₂). Det er imidlertid ikke bare for enkelthets skyld, slik tilfellet var for de første analysene som ble gjennomført 10 år tidligere. I mange av de nyere analysene pekes det på at for såkalte regulerte avgasser¹⁵, er forskjellene mellom de ulike alternative drivstoffene i ferd med å viskes ut. Det gjenspeiler seg i de kommende avgasskravene, hvor alle teknologier (og drivstoffer) må innfri de samme kravene. Det er altså de samme kravnivåene som gjelder, enten man kjører med bensin, naturgass eller metanol. Dermed blir det lite hensiktsmessig å gjennomføre store og ressurskrevende studier for å avdekke forskjeller som ikke lengre eksisterer.

For eksempel heter det i en omfattende studie gjennomført ved Massachusetts Institute of Technology (MIT 2000:ES-4):

”We assume that, aided by the introduction of low-sulfur fuels, all technologies will be able to reduce emission of air pollutants at or below US Federal Tier 2 [kommende amerikanske avgassbestemmelser] requirements; *therefore, non GHG emissions have not been considered...*” (vår uthevning)

Tilsvarende kan man lese i en omfattende svensk studie (Ecotrafic 2000a:5):

”Det är trolig att emissionskraven [til de regulerte avgassene] kommer att ytterligare skärpas vesentlig i framtiden i Europa för alla typer av drivmedel. Därigenom kommer eventuella *skilnader i emissioner att få en mindre betydelse* än de har i dag” (vår uthevning)

Ecotrafic tar forbehold om at denne påstanden kun gjelder dersom det rent teknisk er mulig å innfri avgasskravene for alle alternativene, samt at det kan gjøres innenfor akseptable kostnader. De konkluderer imidlertid med at de finner ingen grunn for at dette ikke skal la seg gjøre for alle alternativene i deres studie.

¹³ Professor Knut Holtan Sørensen (2002) omtaler en økt effektivisering av konvensjonell teknologi som opplever press fra alternative konkurrenter som ”seilbåteffekten”. Begrepet skriver seg fra den gangen da dampbåtene dukket opp og konkurrerte med seilbåtene ved transport til sjøs. Da utviklere av seilbåtene så at dampbåtene tok over markedet, skjedde det i en perioden en rivende og akselerert utvikling av seilbåtteknologien. Det er grunn til å anta at dette ikke hadde skjedd i like stor grad, hadde det ikke været for det presset seilbåtmakerne opplevde fra annet hold,

¹⁴ Se Ecotrafic (1999) og Ecotrafic (2001a) for en god gjennomgang av nye konvensjonelle teknologier og ulike typer av hybrider.

¹⁵ Per i dag er følgende avgasser regulert gjennom utslippskrav: HC, CO, NOx og partikler.

3. FORUTSETNINGER

3.1. Tidshorisont

En sammenlikning av alternative drivstoffer bør gå framover i tid. Dette har to grunner. For det første befinner det meste av teknologien knyttet til produksjon, distribusjon og bruk av alternative drivstoffer seg fremdeles på utviklingsstadiet.¹⁶ Det er avgjørende for en rettferdig sammenlikning at disse prosessene antas å være ferdig utviklet før de sammenliknes med de konvensjonelle drivstoffsyste-
mene. For det andre er det slik at også de konvensjonelle drivstoffene nå gjennomgår en hurtig utvikling. Bensin- og dieselmotorer kjenner pusten fra de alternative drivstoffene i nakken, samtidig som stadig strengere avgasskrav tvinger frem nye løsninger for lavere drivstofforbruk og mindre utslipp.¹⁷

Hvor langt frem i tid skal man gå? Man må gå så langt frem i tid at teknologiene får utvikle seg og modnes. Samtidig er det viktig å ikke bevege seg for langt frem i tid. Da mister man muligheten til ”ekstrapolere” den teknologiske som i dag befinner seg på laboratoriene. Vår tidshorisont er her et sted mellom 2010 og 2015. Vi vet mye om hva som har potensial til å være kommersielt tilgjengelig i denne perioden, samtidig som vi ikke går så langt frem at det hele ender opp i rene spekulasjoner. Dette er for øvrig i tråd med en rekke andre analyser av alternative drivstoffer (VF/TI 2002, MIT 2000, Ecotraffic 2001a, GM 2001a).

3.2. Kjøretøykategorier

Alternative drivstoffer kan i prinsippet anvendes i alle typer kjøretøy. Det er imidlertid slik at enkelte drivstoffer passer bedre til visse kjøretøykategorier enn andre (med kjøretøykategori menes her en type kjøretøy med et bestemt kjøremønster). For eksempel kan elbilen være et godt alternativ for personbiler i bytrafikk, men er neppe et godt alternativ for store lastebiler på langtransport. Det er altså praktiske grunner knyttet til forhold som kjørelengder, distribusjonssystemer og tanking som avgjør hvor de alternative drivstoffene passer eller ikke passer.

I denne rapporten skal vi gå frem til år 2010. Den litteraturen som går inn på alternative drivstoffer med hovedvekt på hydrogen og brenselceller i dette tidsperspektivet (det som vi har omtalt som ”den nye gruppen”) har i liten grad analysert andre kjøretøyer enn personbilen. Det foreligger kort og godt lite data for brenselcelledrevne busser og lastebiler. For de andre transportmodusene (sjø, bane og luft) er det enda mindre data. De data som finnes er demonstrasjonsprosjektet og prototyper og ikke på det samme kvalitative nivået som de *simuleringsdata* som foreligger i den nye gruppen av livsløpsstudier. Vi skal derfor konsentrere oss om personbiler her (med hovedvekt på blandet kjøring, da det finnes lite data som er splittet opp i hhv. bykjøring og landeveiskjøring).¹⁸

¹⁶ Dette gjelder ikke for alle alternativene.

¹⁷ Jamfør den tidligere omtalte ”seilbåteffekten” (fotnote 13).

¹⁸ Én studie (MIT 2000) har splittet data for de to kjøretøysykluser. Vi vurderer imidlertid én kilde til å være for lite for å produsere robuste data. Det er imidlertid grunn til å tro at det innen kort tid

I enkelte studier vises det til at når det gjelder de relative forskjellene i energi- og miljøforhold, er det imidlertid lite som skiller de ulike kjøretøykategoriene fra hverandre. Dette innebærer at hvis et drivstoff har miljømessige fortrinn fremfor et annet drivstoff for en kjøretøykategori, er det ingen ting som tilsier at det ikke også gjelder for en annen kjøretøykategori. Med andre ord: det som gjelder for personbiler, gjelder også for lastebiler og busser. Det er imidlertid grunn til å være varsom med slike generaliseringer. Elbilen er et godt eksempel. Elbilen kan være et godt alternativ for små biler i bytrafikk, men har neppe en fremtid for tyngre lastebiler i langtransport. Liknende forhold kan gjøre seg gjeldende for eksempel når det gjelder brenselceller og ulike hybridkjøretøy.

Vi skal her altså konsentrere oss om personbiler i blandet kjøring, men legge frem data for andre kjøretøykategorier der vi finner grunnlag for det.

3.3. Valg av energikjeder

Basert på tilgjengelig litteratur og ulike teknologiske løsninger, er det mulig å analysere mer enn hundre ulike energikjeder. Det er imidlertid etter vår oppfatning ønskelig å begrense antallet av to grunner. For det første er ikke alle energikjeder relevante for norske forhold. For det andre vil for mange alternativer gjøre analysen uoversiktlig, og interessante budskap kan lett drukne i mangfoldet.

Vi har derfor etablert følgende kriterier når det gjelder valg av energikjeder.

- Det skal kun inkluderes energikjeder som tar utgangspunkt i energikilder som er tilgjengelige i Norge.
- Det skal kun inkluderes energikjeder som inneholder teknologi som kan gjøres kommersielt tilgjengelig innen 2010/2015.
- Det skal kun inkluderes energikjeder som har et potensial for vesentlige energi- og/eller miljøforbedringer i forhold til de konvensjonelle energikjedene.
- Det skal kun inkluderes energikjeder som har et potensial til å overta mer enn 10 prosent av det eksisterende drivstoffmarkedet.¹⁹
- Det kan gjøres unntak fra kriteriene over i den grad et alternativ befinner seg langt fremme på et politisk nivå.

Basert på disse kriteriene har vi inkludert 16 energikjeder i analysen. Alle disse refererer til en tenkt fremtidssituasjon etter 2010. I tillegg har vi tatt med to energikjeder som gjenspeiler dagens situasjon, slik at vi i alt har 18 energikjeder. Disse er med som et sammenlikningsgrunnlag. Dataene for disse to sistnevnte energikjedene hentet fra det nyeste som er tilgjengelig i dag, såkalt "best available technology" (BAT). Det gjelder både kjøretøyet og for de ulike delprosessene som leder frem til kjøretøyet. De 18 energikjedene er vist i figur 2.

vil foreligge mer simuleringsdata som gir grunnlag for både å si noe om tyngre kjøretøy og ulike kjøretøysykluser.

¹⁹ Hvilket innebærer at såkalte nisjedriverstoffer ikke inkluderes.

Figur 2.
Energikjeder som er inkludert i analysen.

Energikilde	Drivstoff ⁽¹⁾	Drivssystem ⁽²⁾	År	Nr.	Navn ⁽³⁾
Råolje	Bensin	Konvensjonell	2000	(1)	KONV-BENS
	Diesel	Konvensjonell	2000	(2)	KONV-DIESEL
	Bensin	Konvensjonell	2010	(3)	KONV-BENS
	Bensin	Hybrid	2010	(4)	HYB-BENS
	Diesel	Konvensjonell	2010	(5)	KONV-DIESEL
	Diesel	Hybrid	2010	(6)	HYB-DIESEL
Naturgass	CNG	Konvensjonell	2010	(7)	KONV-CNG
	CNG	Hybrid	2010	(8)	HYB-CNG
	LNG	Konvensjonell	2010	(9)	KONV-LNG
	LNG	Hybrid	2010	(10)	HYB-LNG
	GH2	Brenselcelle	2010	(11)	FCHYB-GH2
	LH2	Brenselcelle	2010	(12)	FCHYB-LH2
Vannkraft	El	Batteri	2010	(13)	EL-BATT
	GH2	Brenselcelle	2010	(14)	FCHYB-GH2
Biomasse (skog)	Metanol	Reformer + brenselcelle ⁽⁴⁾	2010	(15)	FCHYB-MET
	Metanol	Konvensjonell	2010	(16)	KONV-MET
Biomasse (skog)	Etanol	Reformer + brenselcelle	2010	(17)	FCHYB-ET
	Etanol	Konvensjonell	2010	(18)	KONV-ET

(1) CNG= komprimert naturgass; LNG= flytende naturgass; GH2= komprimert hydrogen; LH2= flytende hydrogen; El= elektrisitet.

(2) Drivssystemer består av (i) energiomvandler (fra kjemisk/elektrisk energi til mekanisk energi, en forbrenningsmotor og en brenselcelle er eksempler på energiomvandler), (ii) energioverføring (for eksempel en mekanisk girkasse eller et elektrisk drivssystem) og (iii) eventuelt energilager (for eksempel batteri). Konvensjonell= konvensjonell forbrenningsmotor; Hybrid= konvensjonell forbrenningsmotor og elmotor.

(3) KONV= konvensjonell forbrenningsmotor; HYB= hybrid; FC= Brenselcelle (Fuel cell); Batt= batterier;

(4) Det antas altså her at metanol reformeres til hydrogen på kjøretøyet (REF= ”on board reformering”). Alternativt kan metanol brukes i såkalte direkte metanol-brenselceller, hvor man ikke går veien om hydrogen. Denne teknologien er usikker og ikke vurdert her.

I det neste kapitlet skal vi nærmere gjøre rede for de enkelte energikjedene i studien. Vi skal i liten grad gå inn på detaljer i hver delprosess, men nøye oss med å skissere hovedlinjene i hver energikjede. Vi skal gjøre det i to trinn. Først skal vi beskrive de enkelte delprosessene i hver enkelt energikjede fra energikilde og

frem til tanken på kjøretøyet (WTT). Deretter skal vi presentere de ulike drivsystemene (TTW). Kapitlene vil i liten grad inneholde data, disse finnes i Vedlegg 1.

4. ENERGIKJEDENE

4.1. Beskrivelse av og data for energikjeder – WTT

I de påfølgende kapitler er gjort en gjennomgang av de enkelte energikjedene vi har inkludert i studien. Det finnes et tilnærmet ubegrenset antall energikjeder, for eksempel har GM inkludert ikke mindre enn 240 (!) energikjeder i sin siste studie (GM 2002). Nå skal det legges til at mange av energikjedene er varianter rundt samme kjede. For eksempel handler det om bruk av gass fra ulike kilder (noe som riktignok gir ulike energikjeder, men svært små forskjeller i resultat), sentral produksjon av LNG eller produksjon av LNG på lokale anlegg etc.

For sluttresultatene vil det ikke spille så stor rolle om gassen er produsert her eller der, eller om drivstoffproduksjonen foregår sentralt eller lokalt. Vi har grunn til å anta at eventuelle usikkerheter i datagrunnlaget er langt større enn de forskjeller som ligger i to ”varianter” av en og samme energikjede. Vi skal derfor ikke være så strenge med energikjedene her. Om to kilder tar for seg bruk av LNG som drivstoff, skal vi ikke se på det som to separate energikilder, selv om den ene produserer LNG i sentrale anlegg og distribuerer den i tankbil mens den andre distribuerer gassen i rørledninger og produserer LNG lokalt. De to ”LNG-variantene” vil ende opp med nokså like verdier for energibruk og utslipp fra kilde til hjul.

Det viktigste med beskrivelsene av energikjedene i de påfølgende kapitlene er dermed å få med alle boksene (delprosessene), og ikke nødvendigvis hvor i energikjeden de er plassert. Beskrivelsen av energikjedene – for eksempel at råoljen er utvunnet fra Nordsjøen - fungerer dermed som et eksempel for å få en forståelse av hvordan energikjeden er bygget opp. Dette innebærer selvfølgelig en forenkling. En slik forenkling mener vi er nødvendig av fire grunner.

- For det første – slik vi allerede har vært inne på – er feilen man gjør sannsynligvis liten.
- For det andre er dette nødvendig for å spare tid. En full WTW analyse er en enorm oppgave, og overhode ikke mulig å gjennomføre innenfor rammene av vårt prosjekt.
- For det tredje gir en slik tilnærming muligheter for å bringe inn data fra flere WTW-analyser. Skal man være metodisk streng på at de data man henter inn må referere til nøyaktig den samme energikjeden som man selv har spesifisert, ender man opp med én kilde (hvis man finner en). Som vi tidligere har vært inne på er det en målsetning for oss å hente inn robuste tall, noe en enkelt kilde neppe vil gi oss.
- For det tredje er det en fordel for formidlingen av resultatene at man ikke kommer trekkende med alt for mange energikjeder. GM har med sine analyser av 240 energikjeder nok gjort en grundig jobb, men vi ser for oss store prob-

lemer med å formidle et slikt enormt materiale. Det er etter vår vurdering bedre å konsentrere seg om noen ”kjerne-energikjeder”.

I en virkelig situasjon vi imidlertid forskjellen på de ulike variantene kunne være enorm. Distribusjon av naturgass i rørledninger krever en infrastruktur som er svært kostbar, mens distribusjon av LNG på tankbiler eller tankbåter lar seg gjøre innenfor dagens infrastruktur med dagens teknologi.

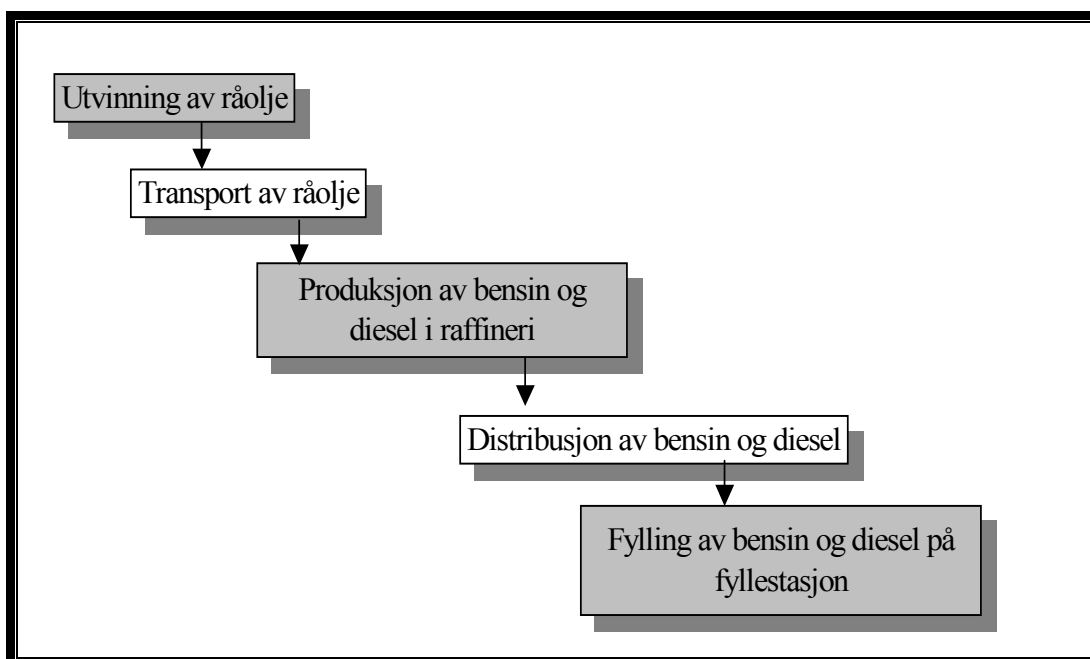
De råoljebaserte energikjedene (nr.1 – 6)

De råoljebaserte energikjedene tar utgangspunkt i utvinning av råolje i Nordsjøen. Fra plattformene transporteres oljen i tankbåter til landbaserte raffinerier. Her produseres bensin og diesel, som siden fraktes i tankbiler ut til fyllestasjonene.

Energikjeden er vist skjematisk i figur 3. Data for miljøparametrene for den enkelte delprosess er vist i vedlegg 1.

Figur 3.

De råoljebaserte energikjedene.



Naturgass til CNG og LNG (nr.7 – 10)

Disse fire energikjedene starter med utvinning av naturgass i Nordsjøen. Den kan hentes fra rene gassfelt eller tas ut sammen med råolje. Fra plattform ledes naturgassen (sammen med råolje) til mottaksanlegg på land. På mottaksanlegget skilles korrosive elementer og tyngre hydrokarboner ut, og den ferdige tørrgassen går videre til distribusjon. Eventuelt kan prosesseringen foregå på plattform.

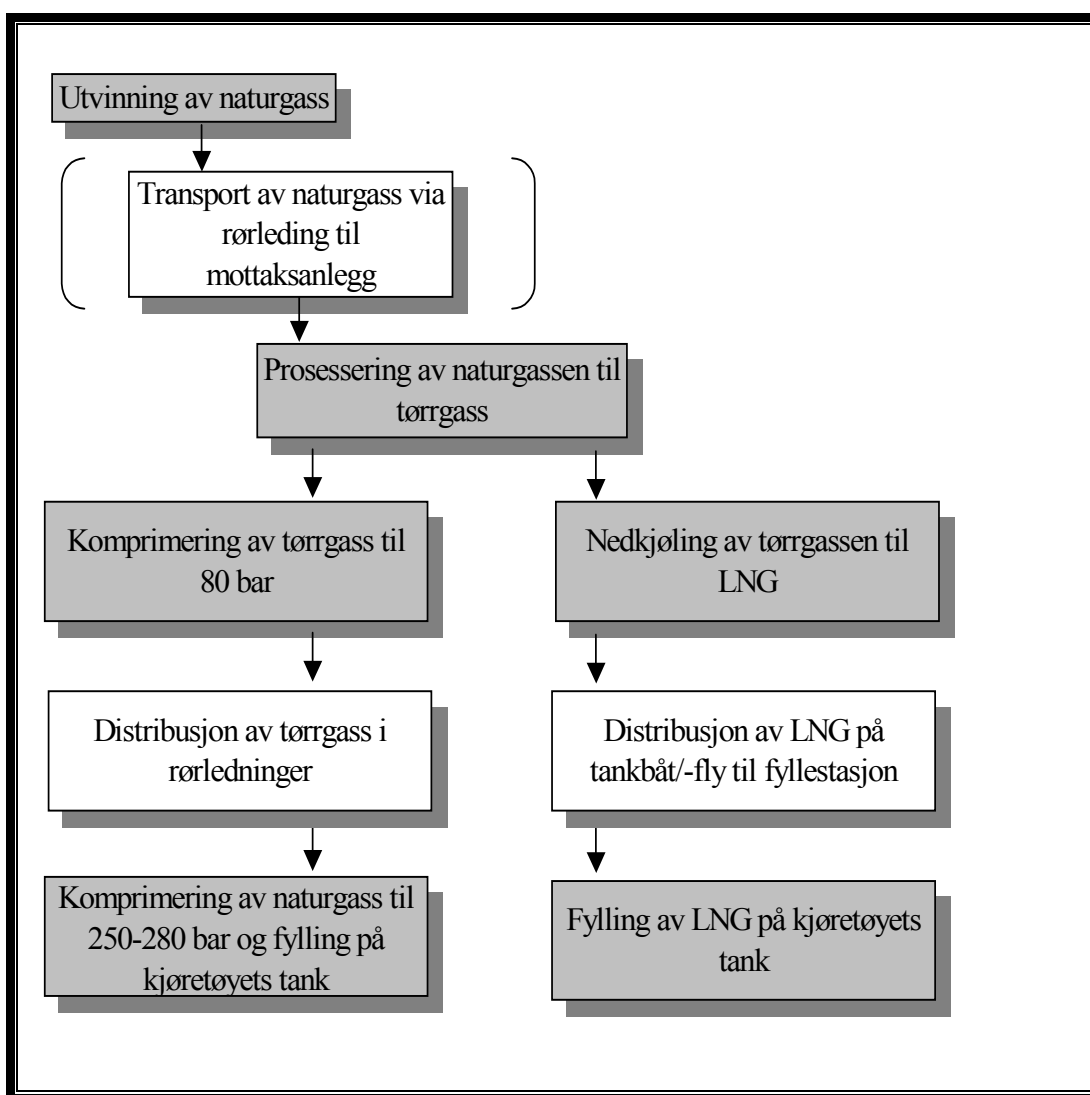
Veien videre fra prosessering av tørrgass til tanking på kjøretøyet kan skje på to ulike måter. For det første kan tørrgassen komprimeres til rundt 80 bar og ledes til fyllestasjon i rørledninger. Dette fordrer et eget rørledningsnett for distribusjon av

naturgass. På fyllestasjonen må gassen komprimeres ytterligere – til rundt 250-280 bar – for hurtig fylling på kjøretøyets tanker (CNG). Den andre veien går via flytende naturgass. På mottaksanlegget kjøles tørrgassen ned til rundt -160 grader C og antar dermed flytende form (LNG) og distribueres deretter på tankbåter eller tankbiler til fyllestasjon.

Energikjedene er vist skjematisk i figur 4. Data for miljøparametrene for den enkelte delprosess er vist i vedlegg 1.

Figur 4.

Naturgass til CNG og LNG.



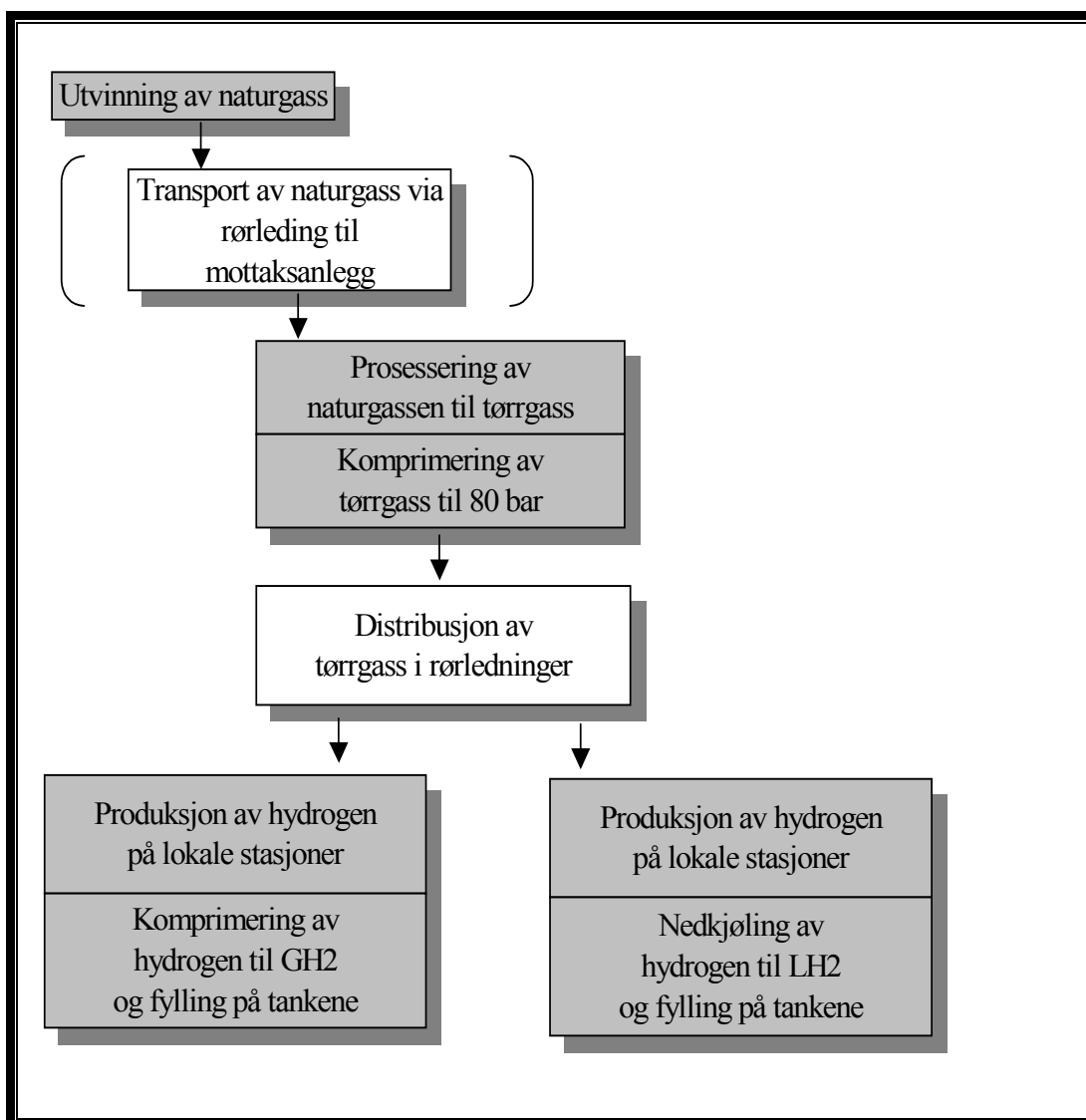
Naturgass til GH_2 og LH_2 (nr.11 – 12)

Disse to kjedene leder fra naturgass til bruk av hydrogen i kjøretøyet. Det som skiller de to er at i det ene tilfellet (GH_2) distribueres hydrogen og lagres på kjøretøyet i komprimert form, mens det i det andre tilfellet benyttes flytende hydrogen (LH_2).

Det hele startet imidlertid med utvinning av naturgass i Nordsjøen. Også her havner tørrgassen etter transport og prosessering på et mottaksanlegg. Her er det to veier videre. For det første kan man produsere hydrogen i et sentralt anlegg for deretter å distribuere hydrogen i komprimert eller flytende form til fyllestasjoner. Den andre muligheten er å distribuere naturgassen videre til fyllestasjonene og produsere hydrogen lokalt. Vi velger her den siste løsningen. Årsaken til det er først og fremst de enorme kostnadene forbundet med det å etablere et eget nett for distribusjon av komprimert hydrogen og de store fordampningstapene man får ved å transportere flytende hydrogen.

Figur 4.

Naturgass til CH₂ og LH₂.



Dermed forlater tørrgassen prosessanlegget i komprimert form med et moderat trykk på rundt 80 bar. På de lokale fyllestasjonene produseres det hydrogen gjennom en reformeringsprosess. Deretter har vi sett på to ulike konsepter. I det ene tilfellet komprimeres hydrogen til drøyt 400 bar for hurtig fylling på kjøretøyet

ved 350 bar. I det andre tilfellet kjøles hydrogen ned til flytende form og tankes på kjøretøyet i den tilstanden.

Energikjedene er vist skjematisk i figur 5. Data for miljøparametrene for den enkelte delprosess er vist i vedlegg 1.

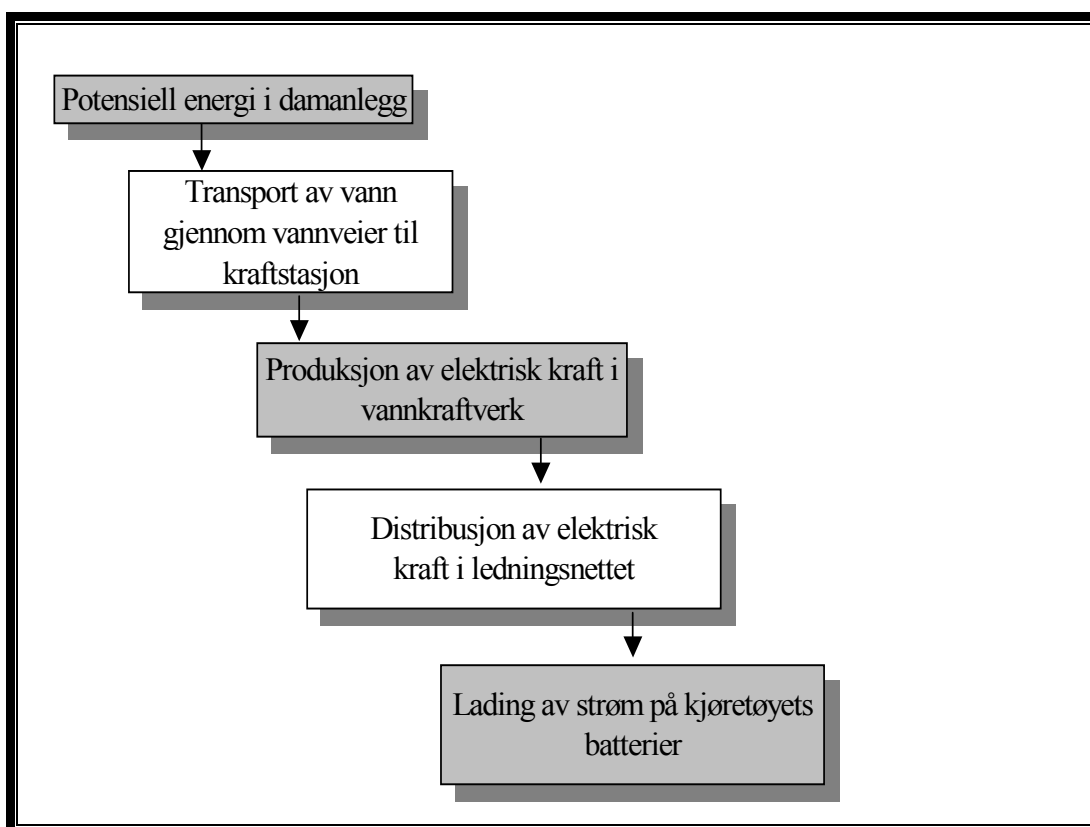
Vannkraft til el (nr.13)

I denne energikjeden tar vi utgangspunkt i vannets potensielle energi i dammanlegget. Fra dammanlegget går vannet gjennom vannveier til kraftstasjon. Via turbin/generator/transformator produseres elektrisk kraft som siden distribueres i ledningsnett til brukere.

Energikjeden er vist skjematisk i figur 6. Data for miljøparametrene for den enkelte delprosess er vist i vedlegg 1.

Figur 6.

Vannkraft til elektrisitet.

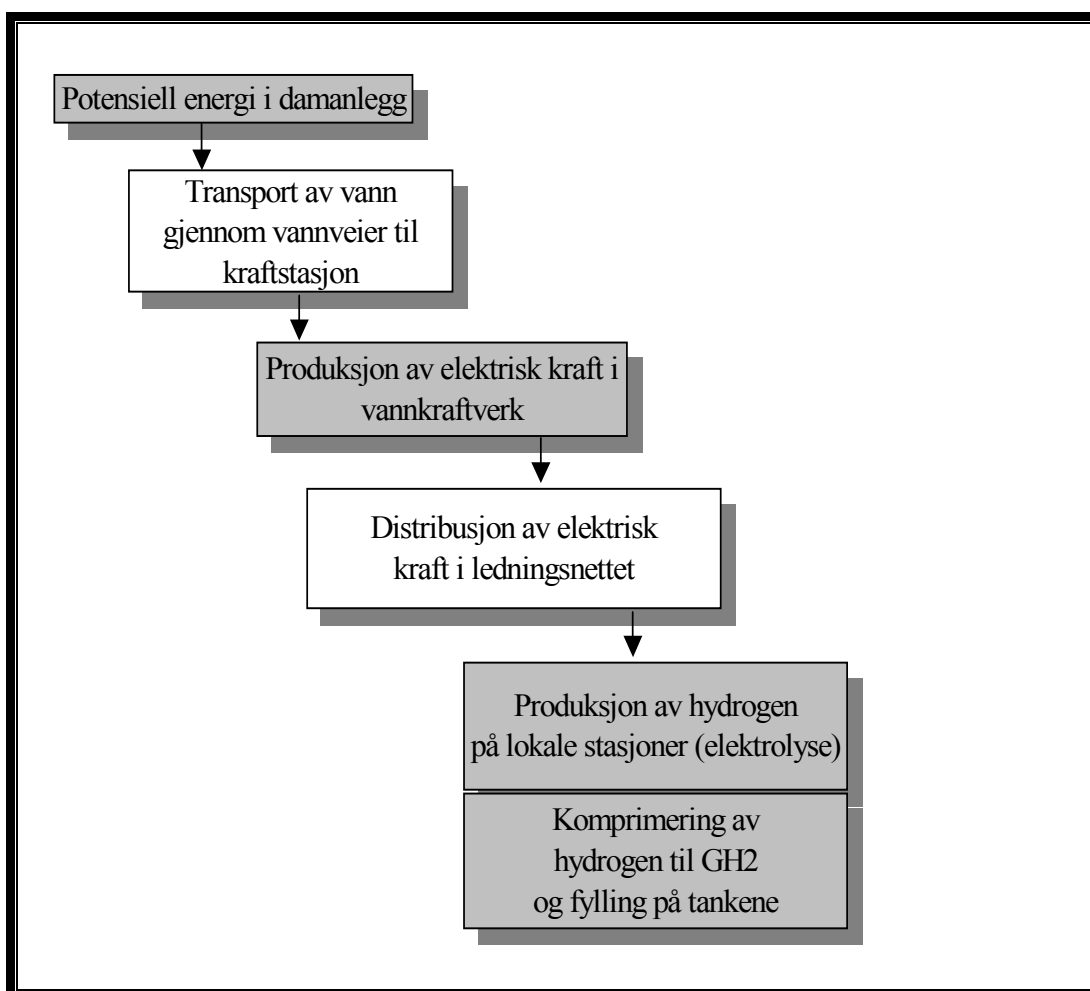


Vannkraft til GH₂ (nr.14)

Denne energikjeden er identisk med "vannkraft til el", men her benyttes elektrisiteten til å produsere hydrogen på lokale fyllestasjoner som siden tankes på kjøretøyet. Hydrogen produseres lokalt ved hjelp av elektrolyse av vann. Det produserte hydrogenet komprimeres deretter til drøyt 400 bar for hurtig fylling på kjøretøyet ved 350 bar.

Energikjeden er vist skjematisk i figur 7. Data for miljøparametrene for den enkelte delprosess er vist i vedlegg 1.

Figur 7.
Vannkraft til GH₂.



Biomasse (skog) til metanol og etanol (nr.15-18)

Trerester fra skogsbruk og skogsindustri er en stor biomasseressurs og utgjør utgangspunktet for denne energikjeden. Innsamling av trerester krever energi i form av drivstoff til skogsmaskiner. Det forutsettes at dette drivstoffet er fossilbasert diesel. Alternativt kan biomassen bestå av hurtigvoksende energiskog (Salix), hvilket medfører et større energiforbruk i tilknytning til uttak av råvaren.²⁰

Biomassen (trerestene) transporteres til konverteringsanlegg med lastebiler. Også disse kjøretøyene forutsetter vi bruker fossilbasert diesel. Fra biomassen produseres metanol i anlegg som forutsettes å være selvforsynt med energi. Det innebærer

²⁰ Ved produksjon av Salix oppgir Ecotraffic (2001) energibruket til gjødsling og innsamling til rundt det dobbelte av innsamling av trerester fra normal skogbruk.

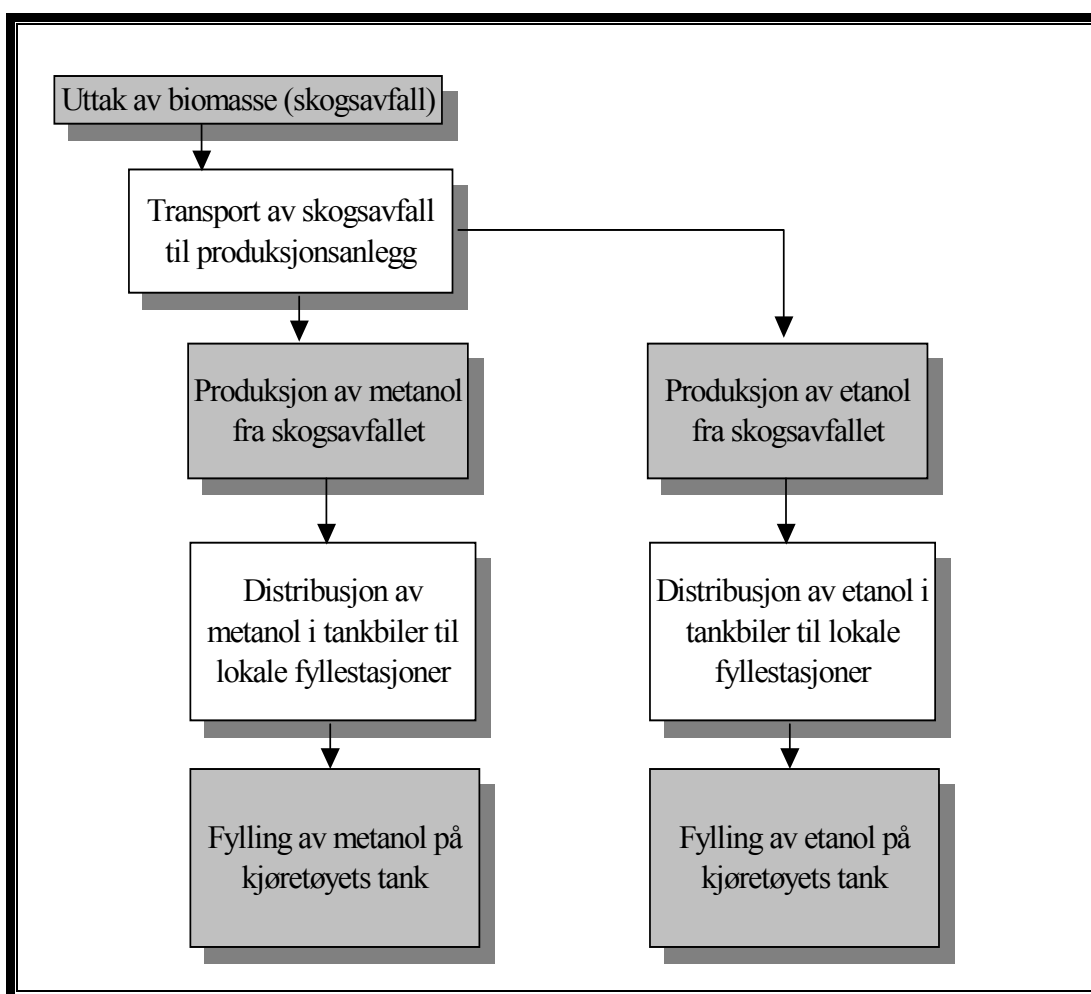
at det ikke tilføres energi i form av elektrisitet eller fossile drivstoffer. Metanolen distribueres til lokale fyllestasjoner med tankbiler hvor den tankes på kjøretøy.²¹

Vi antar at også etanol produseres fra skogsavfall. Kjeden blir dermed identisk med metanol, men produksjonsprosessen er forskjellig. Blant annet er det mer energikrevende å produsere etanol enn metanol og utslippene er også annerledes.

Energikjedene er vist skjematisk i figur 8. Data for miljøparametrene for den enkelte delprosess er vist i vedlegg 1.

Figur 8.

Biomasse til metanol og etanol.



²¹ Her er det verdt å merke seg at metanolen konverteres (i en reformer som altså befinner seg på kjøretøyet) i kjøretøyet til hydrogen før den tilføres brenselcellen. Energitalet (og eventuelle utslipp legges her til TTW).

4.2. Beskrivelse av energikjeder - TTW

I det foregående kapitlet tok vi for oss energikjedene fra energikilde (råstoff) og frem til drivstoffet befinner seg på kjøretøyets tanker. I dette kapitlet skal vi se nærmere på det som foregår i kjøretøyet. Det handler altså om de prosesser som omvandler den kjemiske eller elektriske energien i drivstoffet til et mekanisk arbeid som deretter overføres til hjulene. Den samlede prosessen i kjøretøyet skal her omtales som et *drivsystem*. Et drivssystem består i hovedsak av tre ulike ledd (Ecotrafic 2001): energikonvertering, energioverføring og energilager. Med energikonvertering mener vi her en anordning for omvandling av den kjemiske eller elektriske energien i drivstoffet til mekanisk energi. En forbrenningsmotor eller en brenselcelle er to eksempler på slike energikonvertere. Med energioverføring menes her for eksempel en mekaniske girkasse eller et elektrisk overføringssystem. Med energilager menes her for eksempel et kjemisk batteri.

Et kjøretøy kan ha et enkelt drivssystem eller den kan inneholde flere ulike drivsystemer. Eksempel på dette er såkalte hybrider, som kan ha både en forbrenningsmotor og en elektrisk motor i et og samme kjøretøy. Vi står altså ikke bare overfor ulike drivsystemer, men ulike *konsepter* av drivsystemer. Vi her skal kalle et bestemt konsept for *kjøretøyarkitektur*.²²

I denne studien har vi i alt fem slike kjøretøyarkitekturer.

- Konvensjonelt drivsystem
- Rent elektrisk drivsystem
- Parallell hybrid
- Brenselcelle hybrid
- Brenselcelle hybrid med reformering av drivstoff på kjøretøyet (OBR="On-board-reforming").

Vi skal her kort gi en skjematisk beskrivelse av de fem kjøretøyarkitekturene. Mye av beskrivelsene er hentet fra Åhman (1999). Når det gjelder brenselcellen er materialet dessuten hentet fra Andersen (2002).

Konvensjonelt drivsystem

Det bærende elementet i et konvensjonelt drivsystem er en forbrenningsmotor. I en forbrenningsmotor omvandles kjemisk energi til mekanisk energi gjennom å forbrenne en trykksatt gass, noe som igjen medfører en gassekspansjon. Denne ekspansjonen utnyttes for å skape en roterende mekanisk bevegelse, derav navnet forbrenningsmotor. Konvensjonelle drivsystemer anvender enten ottomotor (gnisttenning) eller dieselmotor (kompresjonstenning). Blant forbrenningsmotorene regnes også gassturbiner, stirlingmotorer og ulike konsepter som kombinerer fordelene med henholdsvis kompresjons- og gnisttenning.

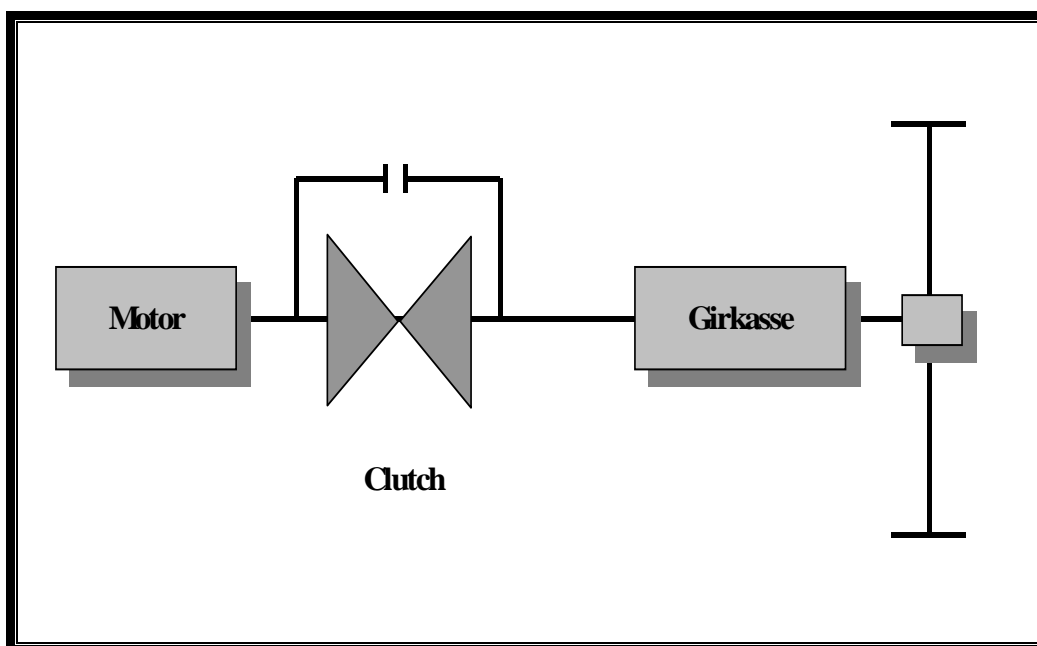
²² Betegnelsen er hentet fra GM (2002): "Vehicle Architectures".

Ved gnisttenning (ottomotor) forblendes drivstoff og luft før deretter å sprøytes inn i sylinderen i dampform.²³ Drivstoff-brenselblandingen blir homogen og antennes ved hjelp av en gnist fra en tennplugg. I forhold til dieselmotoren foregår antenningen i en ottomotor ved et lavere kompresjonsforhold, noe som bidrar til en lavere virkningsgrad. En ottomotor fungerer vel sammen med metanol og etanol. De er ”helt enkelt ’naturlige’ ottomotordrivstoffer (Ecotraffic 2001a). I analysene av metanol og etanol i konvensjonelle forbrenningsmotorer er det forutsatt bruk av ottomotorer. Det lave Cetantallet – hvilket forhindrer selvantening – tillater en forhøyning av kompresjonen i ottomotoren og således en bedre virkningsgrad. I en kompresjonsmotor (dieselmotor) sprøytes drivstoffet inn i sylinderen og blandes med den komprimerte luften rett før det selvantener på grunn av det høye trykket.

I både otto- og dieselmotoren overføres den frigjorte kjemiske energien i drivstoffet til et mekanisk arbeid på hjulene ved hjelp av et mekanisk drivsystem. Foruten en clutch, består systemet av en girkasse og en differensial som overfører kraften fra motoraksen ut til hjulene. Det konvensjonelle drivsystemet er vist skjematisk i figur 9.

Figur 9.

Konvensjonell forbrenningsmotor med mekanisk energioverføring (Kilde: GM 2001a).



²³ Her foregår det imidlertid en utvikling mot direkteinnsprøyting også for ottomotorer. Den japanske produsenten Mitsubishi var først ute med denne teknikken på det japanske markedet og siden har flere motorer blitt introdusert i Europa. Det er forventet at denne teknologien kommer til å ta over fullstendig innen 10 år. Den største fordelen med direkteinnsprøyting i bensinmotorer er at drivstoffbruket reduseres betraktelig (Ecotraffic 2001a).

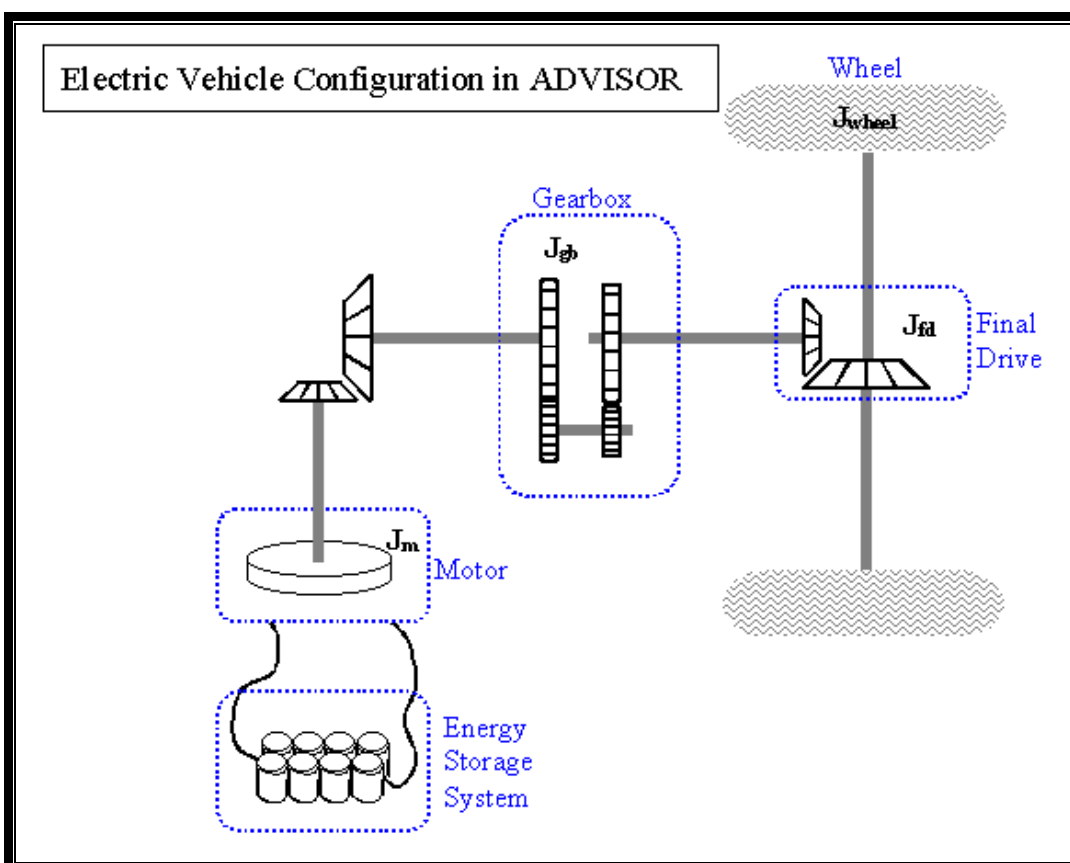
Elektrisk drivsystem

Denne kjøretøyarkitekturen representerer det vi i dagligtale kaller elbilen. Elbilen får all sin energi tilført via det elektriske nettet og fremdriften sørges for av et elektrisk drivsystem. Et elektrisk drivssystem består i hovedsak av følgende komponenter: (i) lader, (ii) energilager, (iii) styring, (iv) motor og (v) kraftoverføring.

Det elektriske drivsystemet er vist skjematisk i figur 10.

Figur 10.

Elektrisk drivsystem med mekanisk energioverføring (Kilde: Advisor).



En lader består i prinsippet av kraftelektronikk, en datamaskin og en transformator. Nettspenningen transformeres til det nivå man lader batteriet og reguleringsmekanismen sørger for at strømmen og spenningen følger et forhåndsdefinert ladningsprogram. Ladingen kan ta fra noen timer og ned til en halvtime ved såkalt "hurtiglading".

Batteriene er elbilens akilleshæl. Det har ikke lyktes å utvikle en batteritype som kan lagre tilstrekkelig energi til at elbilen oppnår kjørelengder opp mot det vi er vant til fra vanlige biler. Per i dag har de beste batteriene en spesifikk energi – altså lagret energimengde per vektenhet – på 83 Wh/kg. Til sammenlikning har en vanlig bensinbil en spesifikk energi på rundt 9 kWh/kg, altså mer enn hundre ganger elbilen. Riktignok er elbilen mer energieffektiv, men resultatet er likevel at elbilen får en sørgelig rekkevidde sammenliknet med bensinbilen. Det arbeides

fremdeles med å utvikle batterier med høyere energiinnhold per vektenhet, men det gjenstår å se om man lykkes i å utvikle et batterikonsept som gjør at elbilen kan konkurrere med bensinbilen på ytelse.

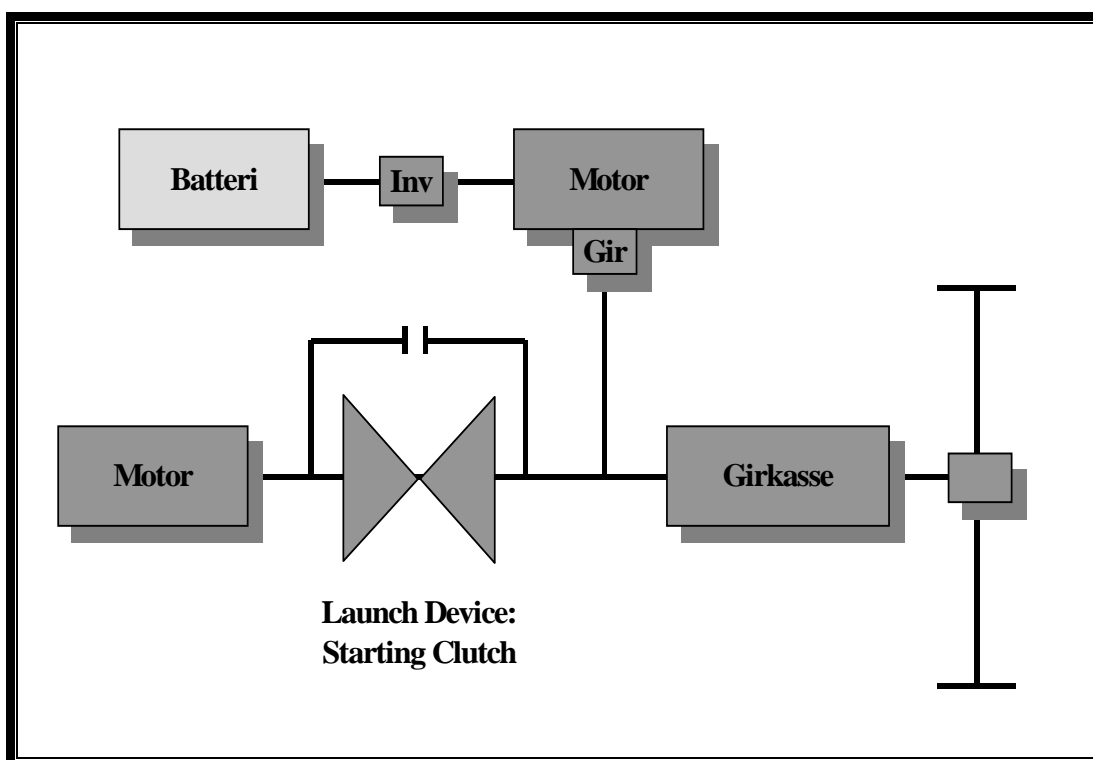
Parallell hybrid

Et hybridkjøretøy er en kombinasjon av et konvensjonelt og et elektrisk drivsystem. Kjøretøyet er altså utstyrt med to motorer, en primærmotor (otte- eller dieselmotor) og en elmotor. Disse kan kobles i serie eller i parallell (parallellhybrid er vist skjematisk i figur 11).

I en serie hybrid er primærmotoren koblet i serie til ett batteri som i neste omgang forsyner elmotoren med elektrisk energi. Man slipper her doble drivsystemer, men all energi i primærmotoren går gjennom en generator, elmotor og til en viss grad batteriet, noe som gir effektivitetstap. Fordelen med et slikt konsept er at primærmotoren kontinuerlig går på konstant turtall i sitt mest optimale område. Dermed unngår man de fasene av et kjøremønster hvor motoren enten går på tomgang eller makseffekt.

Figur 11.

Parallell hybrid (Kilde: GM 2001a).



I en parallellhybrid er primærmotoren og batteri koblet parallelt til hjulene, noe som innebærer at kjøretøyet kan ta energi direkte fra primærmotoren uten å gå veien om elmotoren. Man kan i en parallell hybrid velge mellom å la elmotoren eller primærmotoren være effektforsterkere i systemet. Med en effektforsterker menes den del som går inn ved høye belastninger og hjelper til. Ved lave eller

normale belastninger er effektforsterkeren avstengt. Ved en typisk regulering av parallellhybriden tar elmotoren hånd om all bykjøring og ved lave hastigheter, mens primærmotoren kobles inn ved kraftige akselerasjoner og tar helt over ved landeveiskjøring.

Begge konseptene er tenkbare. Parallellhybriden er anvendt her fordi den for det første har størst potensial til reduksjoner av drivstofforbruket. For det andre behøver ikke parallellhybriden like stort batteri som seriehybriden og blir derfor billigere (Ecotrafic 2001a).

Foruten rene serie- og parallellhybrider, finnes for øvrig en del konsepter som prøver å forene styrkene ved hvert enkelt konsept. Vi skal ikke gå nærmere inn på disse her.

Brenselcelle hybrid

En brenselcelle omdanner kjemisk energi direkte til elektrisk energi. Dette gir mulighet til en betydelig høyere energieffektivitet. En brenselcelle har en teoretisk termodynamisk energivirkningsgrad på 85 til 95% avhengig av hvilken type brenselcelle man anvender (Åhman 1999). Det er altså store forskjeller i potensiale for energieffektivitet mellom brenselceller og forbrenningsmotor (som har sin virkningsgrad begrenset av Carnot-prosessen).

Brenselcellen har dessuten en annen fordel. Den er under bestemte betingelser praktisk talt forurensningsfri, i alle fall dersom man snakker om utslipp av klimagasser (CO₂, CH₄ og N₂O), de regulerte avgassene (NO_x, HC, CO og Partikler) og såkalte uregulerte utslipp (aldehyder, butadien, benzen etc.). Det kan imidlertid være snakk om andre forurensninger enn de som er nevnt her (Andersen 2002).

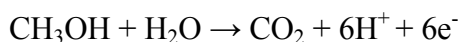
I brenselceller skjer det altså omdanning av kjemisk energi til elektrisk energi. Gjennom elektrokjemiske reaksjoner ved to elektroder dannes en spenningsforskjell mellom elektrodene. Denne gir en elektronstrøm mellom anoden og katoden som for eksempel kan utnyttes til å drive en elektrisk motor. I brenselceller skjer det en oksydasjon ved anoden, og en reduksjon ved katoden. Når hydrogen benyttes som drivstoff, skjer oksydasjon av hydrogen i en katalysereaksjon hvor hydrogen-gass (H₂) adsorberes til platina (Pt) på anoden, fulgt av dissosiasjon av hydrogenmolekylet til protoner (H⁺) og frie elektroner (e⁻). Totalreaksjonen for hydrogenoksydering er:



Oksydasjon av hydrogen i brenselcellen krever at det benyttes ekstremt ren hydrogen. Problemer oppstår i brenselcellen hvis forurensninger finnes i hydrogen-gassen. Ekstremt ren hydrogen er svært kostbart å produsere. Ved metanolreformering til hydrogen, vil det selv etter rensing av gassen, finnes forurensninger. Tilstedeværelse av karbonmonoksyd (CO) fører for eksempel til blokkering av de aktive katalyse-setene på overflaten av Pt-elektroden, og stopper dermed reaksjonen.

En type brenselcelle kan benytte metanol (CH₃OH) direkte som drivstoff. I direkte metanol brenselcelle (DMFC) skjer oksydasjon av metanol i en katalysereaksjon hvor metanol i vann adsorberes til platina (Pt) på anoden, fulgt av flere steg med

deprotonering og frigjøring av elektroner, med CO₂ som sluttprodukt. Totalreaksjonen for metanol-oksydering er:



Under oksydasjon av metanol dannes CO som et mellomprodukt. Som beskrevet ovenfor for metanolreforming

Det finnes en rekke ulike type brenselceller. Det er i hovedsak to måter å skille mellom ulike typer: 1) Lav-temperatur eller høy-temperatur brenselceller, og 2) Hva slags elektrolytt²⁴ som benyttes. Et unntak er for DMFC, hvor metanol inngår direkte i anode-reaksjonen. Elektrolytten for denne cellen er ikke bestemmende for typen. Lav-temperatur brenselceller har driftstemperatur på under 210 °C og inkluderer alkalisk brenselcelle (AFC), polymerisk elektrolytt membran brenselcelle (PEMFC), DMFC, og fosfor-syre brenselcelle (PAFC). Høy-temperatur brenselceller har driftstemperatur på ca. 600-1000 °C. To typer er utviklet, smeltet karbonat brenselcelle (MCFC) og fast oksyd brenselcelle (SOFC). En oversikt over ulike typer brenselceller er gitt i figur 12.

Figur 12.

De ulike typer brenselceller som er i bruk eller under utvikling (Hentet fra Andersen 2002).

	AFC (alkalisk)	PEMFC (polymerisk elektrolytt, proton "exchange" membran)	DMFC (direkte metanol)	PAFC (fosfor-syre)	MCFC (smeltet karbonat)	SOFC (fast oksyd)
Driftstemperatur (°C)	80-100	70-130	60-120	150-210	600-1000	650-1000
Transport bruksområde	Personbiler	Personbiler	Personbiler	Buss	Tog, båt	Tog, båt
Effekt	5-150 kW	5-250 kW	5 kW	50 kW-11 MW	100 kW-2 MW	100-250 kW

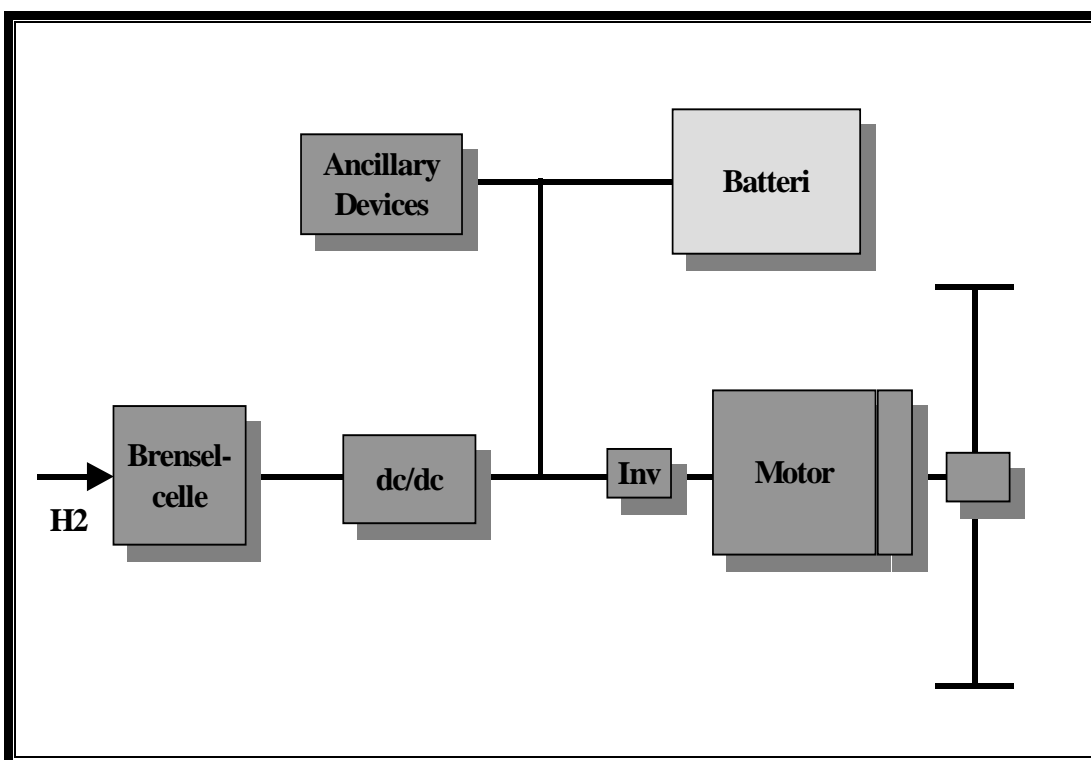
Den brenselcelle som er mest aktuell for drift av kjøretøy i dag er PEM-cellen. Denne brenselcelletypen har den fordelen at den er lett å produsere, har lang livslengde og dessuten en rekke materialspesifikke fordeler (for eksempel har membranen ingen problem med metallkorrosjon i cellen). Særlig de to førstnevnte fordelene, letthet å produsere og lang livslengde, gjør den attraktiv for bilindustrien. Ulempen med PEM-cellen er at membranen fremdeles er dyr å produsere på grunn av at membranens elektro-katalysator inneholder platina.

²⁴ Med elektrolytt menes det sammensetningen av det medium som ionene beveger seg i mellom elektrodene. Elektrolytten kan være i fast form eller flytende.

I vårt tilfelle har vi anvendt en såkalt hybrid brenselcelle, hvilket innebærer at motoren kan drives både fra brenselcellen og fra et eget batteri. Dette innebærer en høyere energieffektivitet for kjøretøyet, blant annet fordi man kan gjenvinne brenseenergien, minske tomgangkjøring og at man unngår å bruke brenselcellen på lave laster. Dessuten vil brenselceller som krever tid for å varmes opp før start dra nytte av å bruke et batteri for å komme i gang umiddelbart. En brenselcelle er i tillegg ganske treg sett i forhold til forbrenningsmotoren, hvilket kan avhjelpest med et batteri. Brenselcelle konseptet er vist skjematisk i figur 13.

Figur 13.

Brensel celle hybrid (Kilde: GM 2001a).



Brenselcelle hybrid med OBR

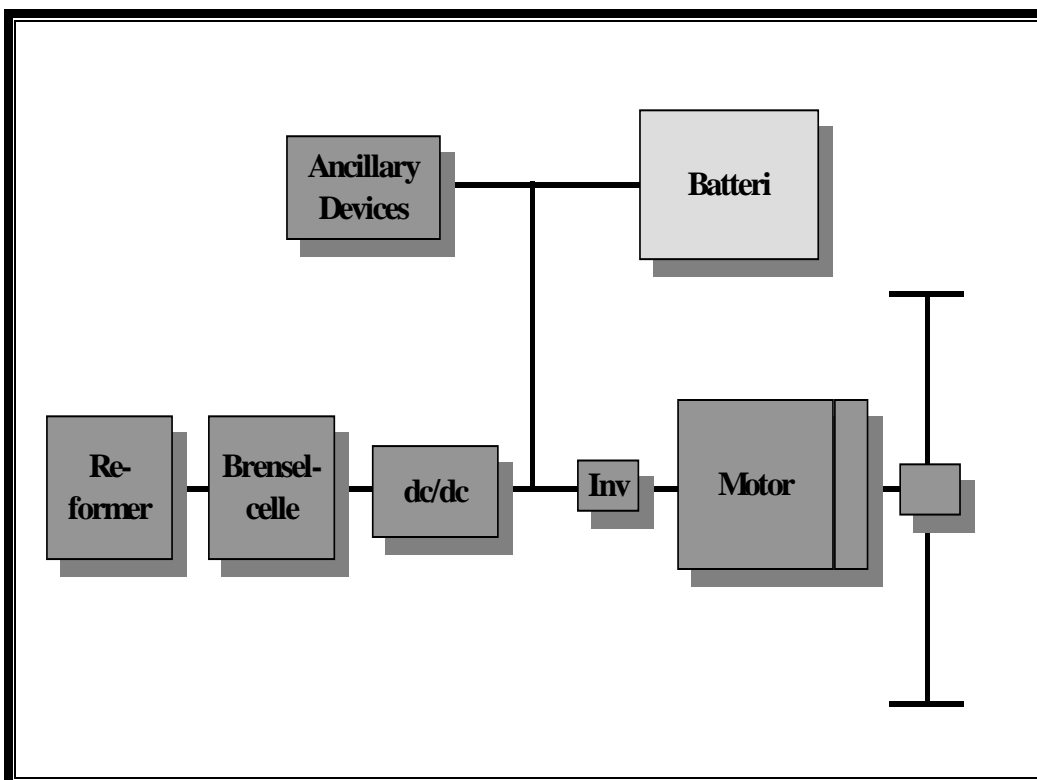
I denne kjøretøyarkitekturen fylles metanol og etanol direkte på kjøretøyets tanker. For å anvende drivstoffet i brenselcellen, må imidlertid metanol og etanol først reformeres til hydrogen (angitt som reformer i figur 14). Konseptet er altså identisk med det foregående bortsett fra en reformer som omvandler alkoholene til hydrogen. Som vi har vært inne på tidligere finnes det brenselceller som kan bruke metanol (ikke etanol) direkte uten å gå veien om reformering til hydrogen.²⁵ Denne teknologien er imidlertid lite utviklet og ikke vurdert her.

²⁵ En type brenselcelle kan benytte metanol (CH₃OH) direkte som drivstoff. I direkte metanol brenselcelle (DMFC) skjer oksydasjon av metanol i en katalysereaksjon hvor metanol i vann adsorberes til platina (Pt) på anoden, fulgt av flere steg med deprotonering og frigjøring av elektroner, med CO₂ som sluttprodukt.

Fordelen med et slikt system er at man kan få et langt enklere (og sannsynligvis) billigere distribusjonssystem enn om man skulle produsere hydrogen fra metanol/etanol i egne anlegg og deretter distribuere hydrogen til fyllestasjon. Langt på vei kan man benytte det eksisterende distribusjonssystemet for bensin og diesel. Ulempen er at man får en lavere virkingsgrad ved reformeringen når den skjer i små "anlegg" i kjøretøyet enn det man kan oppnå i større sentrale anlegg.

Figur 14.

Brensel celle hybrid med OBR. (Kilde: GM 2001a).

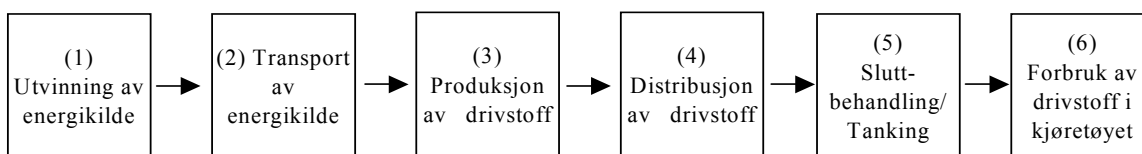


5. RESULTATER - PERSONBILER

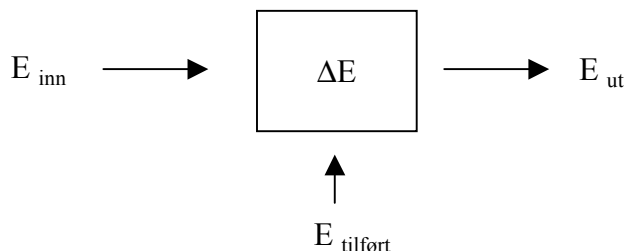
5.1. Virkningsgrader og energibruk

Metode

Det samlede energiforbruket beregnes med utgangspunkt i virkningsgradene i de enkelte delprosessene. Virkningsgraden er et uttrykk for hvor effektiv prosessen er, eller hvor godt energien ”overlever” gjennom prosessen.



Ser man på en enkelt delprosess isolert vil energistrømmene fordele seg som vist under.



hvor,

E_{inn} = Energi som går inn i delprosessen [MJ]

E_{ut} = Energi som går ut av delprosessen [MJ]

$E_{tilført}$ = Energi som tilføres delprosessen [MJ]

ΔE = Energi som tapes/forbrukes i delprosessen [MJ]

Virkningsgraden for delprosess nr. ”i” i energikjede nr. ”j” beregnes av sammenhengen:

$$(1) \quad \eta_{i,j} = \left(\frac{E_{inn} - \Delta E}{E_{inn} + E_{tilført}} \right)_{i,j}$$

hvor,

$\eta_{i,j}$ = energivirkningsgrad for delprosess ”i” for energikjede ”j” [%]

E_{inn} = Energi som går inn i delprosess ”i” for energikjede ”j” [MJ]

$E_{\text{tilført}}$ = Energi som tilføres delprosess ”i” for energikjede ”j” [MJ]

ΔE = Energi som tapes/forbrukes i delprosessen for delprosess ”i” for energikjede ”j” [MJ]

Virkningsgraden for energikjede nr. ”j” beregnes av sammenhengen:

$$(2) \quad \eta_j = \left(\prod_{n=1}^i \eta_n \right)_j$$

Settes ”i=6” får man energikjedens totale (WTW) virkningsgrad. Settes ”i=5” beregnes den aktuelle energikjedens WTT – virkningsgrad, mens η_6 er virkningsgraden for kjøretøyet (TTW).

Det samlede energiforbruket (MJ per vognkilometer) for energikjede nr. ”j” beregnes av sammenhengen:

$$(3) \quad E_j = \left(\frac{1}{\prod_{n=1}^5 \eta_n} \cdot E_{1,j} \right)_j$$

hvor,

E_j = Samlet energiforbruk for energikjede ”j” [MJ/vkm]

η_n = Energivirkningsgrad for delprosess ”n” for energikjede ”j” [%]

$E_{1,j}$ = Energibruk (”drivstofforbruk”) i kjøretøyet for energikjede ”j” [MJ/vkm]

Differansen mellom den totale energibruken beregnet av formel (3) og kjøretøyets energibruk (E_1), utgjør energibruket WTT.

Energiforbruket i delprosess ”i” for energikjede ”j” beregnes videre av sammenhengen:

$$(2) \quad dE_{i,j} = (E_i - E_{i+1})_j$$

hvor,

dE = Energibruk i delprosess [MJ_{Del}/MJ_{WTT}]

$E_{i,j}$ = Samlet energiforbruk for energikjede ”j” t.o.m. delprosess ”i” [MJ_{Del}/MJ_{WTT}]

$E_{i-1,j}$ = Samlet energiforbruk for energikjede ”j” t.o.m. delprosess ”i+1” [MJ_{Del}/MJ_{WTT}]

De tre verdiene som er beregnet her - η , E og dE - har hver sin betydning i beregningene. Virkningsgraden (η) sier noe om hvor effektiv de enkelte delprosessene er. Foruten å gi et mål på energieffektivitet, brukes den sammen med energiforbruket i kjøretøyet som utgangspunkt for beregning av det samlede energiforbruket for energikjedene. Energiforbruket i den enkelte delprosess (dE) danner utgangspunktet for beregning av utslipp (ikke CO₂) i de enkelte delprosessene. Den er altså ikke så interessant i ”energisammenheng”, men altså som en inngangsverdi til utslippsberegningene.

Resultat - virkningsgrader

I figur 15 er vist resultatene fra analysene av de totale virkningsgradene for de ulike energikjedene. Verdien på den enkelte energikjede sier noe om hvor effektivt energikilden (råstoffet) blir utnyttet på sin vei fra kilde (well) til et utført arbeid på hjulene (wheel). Vi viser til vedleggene for detaljer angående de enkelte data. I tråd med det vi har vært inne på tidligere baserer analysene seg på et livsløpsperspektiv, altså ”Well-To-Wheel”.

Det første som slår en når en betrakter figuren er hvor lave virkningsgradene er, eller hvor lite av den energien som er lagret i råstoffet som går med til det som skal gjøres. Kun 10 – 20 % av energiinnholdet i energikilden går med til å drive kjøretøyet framover. Det resterende er tap av energi i ulike former.

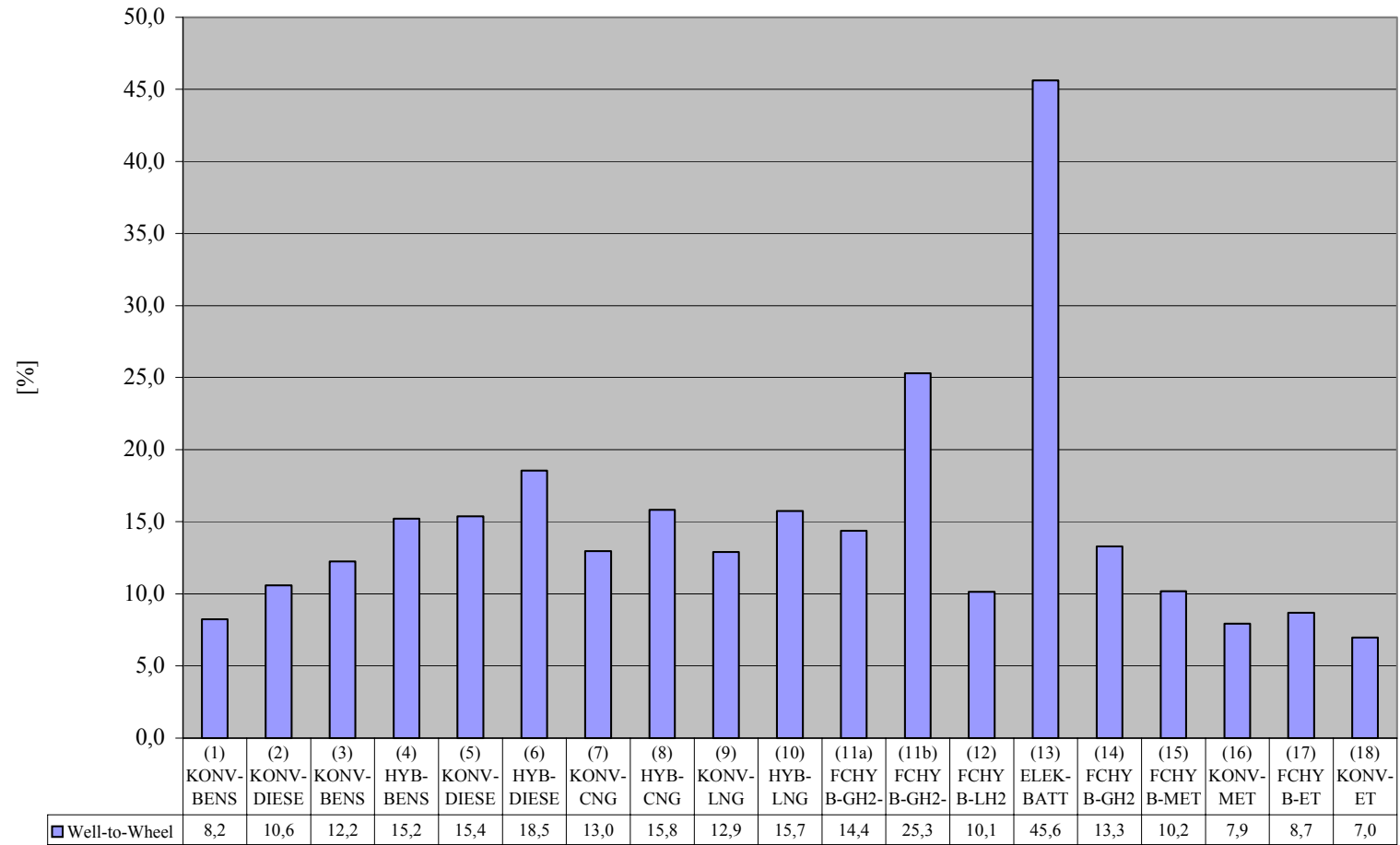
Nok om det. Er det forskjeller på de ulike energikildene når det gjelder virkningsgrader, eller hvor effektivt energien omvandles fra kilde til utført arbeid på hjulene? Før vi går inn og beskriver hvilke trekk man kan se ut fra data, vil vi komme med to kommentarer. Den første gjelder elbilen og den andre gjelder virkningsgraden til brenselcelle.

Vi skal starte med *elbilen*. Elbilen – merk at her er elektrisiteten produsert fra vannkraft - fremstår som en svært energieffektiv energikilde. Det er imidlertid så store begrensninger i kjørelengden til elbilen i forhold til de andre, at det nærmest er snakk om ulike former for transportmidler. Elbilen kan nok kjøre gjennom en standardisert kjøretøysyklus, men ikke mange etter hverandre slik de andre kjøretøyene kan. Hvis en elbil skal ha en rekkevidde opp mot det for eksempel en bensinbil har, vil den bli svært tung pga. batteriene. Det er grunn til å tro at et slikt elektrisk kjøretøy vil ha en virkningsgrad som er langt unna det som ligger til grunn i figuren. Per i dag har vi imidlertid ikke kommet over data som gjør elbilen ”sammenliknbar” med bensin- diesel eller naturgasskjøretøy. Vi skal derfor kort understreke at elbilen fremstår som et svært energieffektivt alternativ, men at den vanskelig kan sammenliknes direkte med de andre alternativene.

Brenselcellens virkningsgrad er den andre kommentaren. I alle WTW-analyser fremstår energibruken i kjøretøyet som svært viktig for sluttresultatet. For å oppnå et godt resultat fra kilde til hyl, er det med andre ord avgjørende å ha et effektivt sluttledd. Her kommer brenselcellen inn. Hvor effektiv er en brenselcelle når den settes inn i et kjøretøy og gjennomgår en kjøretur hvor belastningen varierer kontinuerlig fra null til maks?

Figur 15.

WTW virkningsgrader. Tallene gjelder for en personbil ved blandet kjøring. Alle tall i %.



I boka *Fuel Cell Systems Explained* går James Larminie og Andrew Dicks (2000) gjennom effektivitet og effektivitetsgrenser for brenselceller. De peker på at i motsetning til fastsettelse av virkningsgrader for vindturbiner og forbrenningsmotorer, er ikke bildet så klart når det gjelder brenselcellen. Brenselcellen er ikke begrenset av "Carnot-virkningsgraden", slik at i teorien kan man oppnå en virkningsgrad på 100%. Forfatterne peker imidlertid på at dette ikke er en særlig fruktbar måte å definere virkningsgraden på, da man ender opp med en øvre grense for virkningsgraden lik 100% uansett hvilke forhold brenselcellen ellers opererer under (s.24).

Siden en brenselcelle bruker materialer (drivstoffer) som vanligvis forbrennes for å frigjøre energien, vil det være hensiktsmessig å sammenlikne den elektrisiteten som produseres med den varmemengden som ville blitt produsert når drivstoffet forbrennes. Denne varmemengden kan beregnes og forholdet mellom denne og mengden elektrisitet som produseres kan kalles "termodynamisk virkningsgrad". Under optimale forhold kan denne bli opp til 83% for en hydrogen brenselcelle.

Det er imidlertid viktig å være klar over at den reelle virkningsgraden blir langt lavere. En rekke forhold bidrar til at for eksempel et brenselcellekjøretøy i virkelig kjøring har en virkningsgrad – dvs. forholdet mellom hydrogen som kommer inn og det arbeidet som utføres på hjulene – langt lavere enn 83%. Det skyldes for det første forhold i selve brenselcellen (interne forhold), og for det andre forhold knyttet til ulike nødvendige tilbehør for at brenselcellen skal fungere under ulike betingelser (eksterne forhold). Vi skal stikkordsmessig nevne noen av disse forholdene.

Interne forhold

- Temperaturen i brenselcellen påvirker virkningsgraden. Når temperaturen i brenselcellen øker fra 25°C til 1000°C, reduseres virkningsgraden fra 83% til 62%.
- Utnyttelsesgrad for drivstoff. I praksis vil ikke alt drivstoffet som leveres til brenselcellen blir brukt, noe passerer "ubrukt" gjennom cellen. Et godt estimat for dette tapet er 0,95, selv om det kan være langt lavere under spesielle betingelser (ibid, s. 28).
- Trykk og gasskonsentrasjon påvirker "Gibbs frie energi"²⁶, og dermed også den leverte spenningen fra brenselcellen.
- Type brenselcelle. Det finnes en rekke ulike typer brenselceller. Imidlertid er den såkalte "Proton Exchange Membrane Fuel Cells" (PEMFC) mest aktuell for bruk i kjøretøy.

Eksterne forhold

- Type drivstoff. En brenselcelle til bruk i kjøretøy kan anvende et bredt spekter av ulike drivstoffer. Hva slags drivstoff man anvender og hvordan den "for-

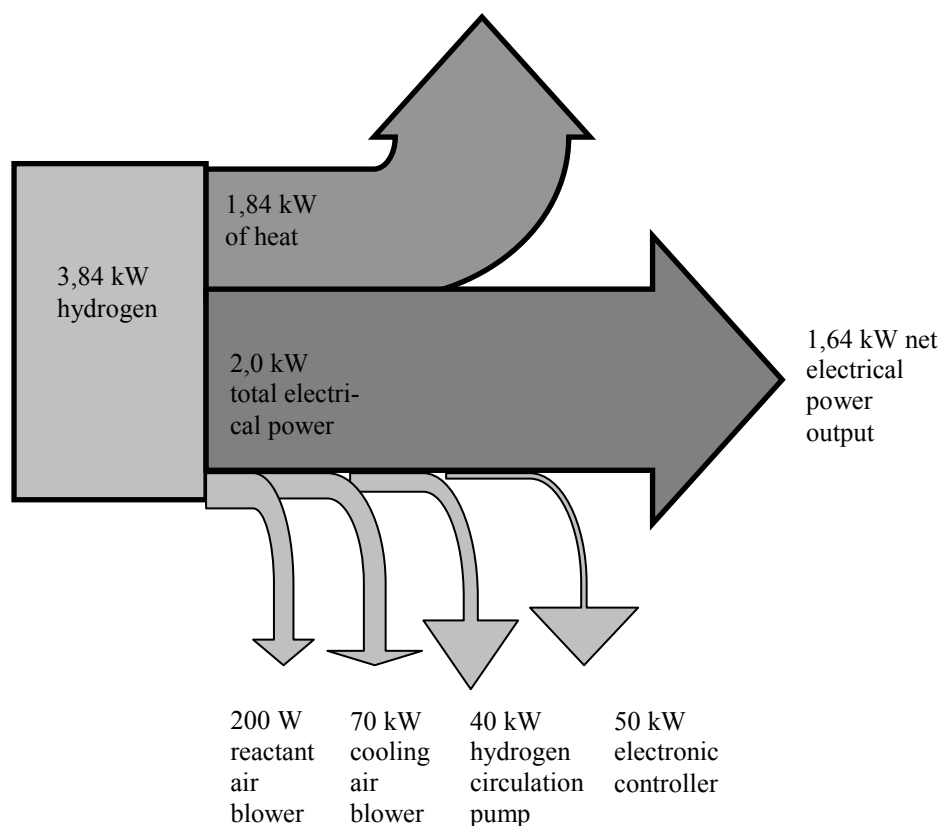
²⁶ For en brenselcelle er det Gibbs frie energi som er viktig. Denne kan defineres som "energi tilgjengelig for å utføre eksternt arbeid, når man neglisjerer arbeid utført ved endringer i trykk og/eller volum" (Larminie og Dicks 2000:18).

brennes” i brenselcellen (direkte eller via hydrogen) vil påvirke virkningsgraden.

- Kjøretøytype og kjøremønster. Som vi har vært inne på tidligere vil disse to forholdene påvirke brenselcellesystemets virkningsgrad. Det er grunn til å anta at en brenselcelle som anvendes i et tyngre kjøretøy ved mye høyhastighet-skjøring vil ha lavere virkningsgrad enn en brenselcelle som benyttes i et lite bykjøretøy.
- Forhold knyttet til *brenselcellesystemet*. En brenselcelle – som en forbrenningsmotor - er avhengig av en rekke tilleggssystemer og –komponenter for å fungere. Alle disse komponentene bidrar til tap i virkningsgraden. Det dreier seg om (i) kompressor for å drive anlegg for luftkjøling, (ii) pumpe for drivstoffsystemet, (iii) elmotor, (iv) system for tilpassing av spenning mellom brenselcelle og elmotor, (v) drivstofftank, inkludert eventuelt prosesseringsanlegg og avsvovlingsanlegg, (vi) trykkreguleringsystem og (vii) system for å kontrollere de ulike delsystemene (Larminie og Dicks 2000). Alle disse tilleggssystemene og –komponentene, omtales av Ahlvik og Brandberg (Ecotraffic 2001a og b) som ”parasittiske systemer”. De er helt nødvendige for at brenselcellen skal fungere under gitte driftsbetingelser. I figur 16 er vist et eksempel på energibruk i de ”parasittiske systemene”.

Figur 16.

Sankey diagram for 2,0 kW system (Larminie og Dicks 2000:105).



- Hybridisering. Også en brenselcelle kan hybridiseres på lik linje med en forbrenningsmotor, noe som påvirker virkningsgraden.
- Vekten på kjøretøyet. En brenselcellekjøretøy vil sannsynligvis bli en god del tyngre enn et bensin eller dieselskjøretøy, noe som vil bidra til å redusere virkningsgraden.

Disse interne og særlig eksterne forholdene gjør at det i litteraturen gir ulike svar på hvor effektiv en brenselcelle faktisk er. Faktisk er spennet ganske stort. I tabell 1 er vist virkningsgraden i ulike studier.

Tabell 1.

Virkningsgrader for brenselcelle personbiler. Hvis ikke annet er angitt gjelder tallene for blandet by- og landeveiskjøring.

Studie	Virkningsgrad	Merknader
MIT (2000)	36,2 / 35,8	Data for denne studien refererer til år 2020 og virkningsgradene er fremskaffet ved simuleringer av en mellomstor bil (Toyota Camry) i US FTP-75 kjøresyklus. Data i tabellen gjelder for hhv. bykjøring og landeveiskjøring.
Ecotrafic (2001)	23,5	Data for denne studien refererer til år 2010-2015 og virkningsgradene er fremskaffet ved simuleringer av en Europeisk familiebil (vekt ca. 1.100 kg) i NEDC ²⁷ kjøresyklus. Data i tabellen gjelder for hhv. bykjøring og landeveiskjøring.
GM (2001)	41,4	Data for denne studien refererer til ”etter 2005” og virkningsgradene er fremskaffet ved simuleringer av en varebil ²⁸ i US FTP-75 kjøresyklus. Data i tabellen gjelder for hhv. bykjøring og landeveiskjøring.
GM (2002)	48,9	Data refererer til år 2010 og simuleringene tar utgangspunkt i en Opel Zafira minivan med 1,8L bensinmotor og femtrinns manuell girkasse. Europeisk NEDC-syklusen er brukt.
SINTEF (2002)	37%	Bygger på data fra GM (2002) og MIT (2000)

²⁷ New European Driving Cycle.

²⁸ Betegnelsen på denne typen kjøretøy er ”light-duty truck”, og er en kjøretøykategori som er langt større enn en personbil slik vi i Norge kjenner den. Vekten på slike ”light-duty truck” starter på rundt 3 tonn og går oppover til 7-8 tonn for de største modellene. Bakgrunnen for at GM har valgt denne typen kjøretøy i sin studie, er at slike kjøretøy (sammen med ”sport utility vehicles, SUV’s) står for rundt 50% av ”personbiler” i USA for tiden.

Det er altså forskjeller i kjøresykluser, kjøretøy, tidsramme og ikke minst er det forskjeller i krav til rekkevidde for kjøretøyene. Kreves en rekkevidde for de alternative kjøretøyene på lik linje med bensin- og dieselskjøretøy, vil dette medføre at enkelte kjøretøy blir svært tunge, noe som igjen vil påvirke effektiviteten. Den kanskje største forskjellen er imidlertid hvor mye av det ”parasittiske” energiforbruket man har inkludert når man skal simulere. I enkelte av studiene er disse data ikke presentert, noe som gjør dem vanskelig å vurdere. På den annen har noen studier kanskje lagt inn for mye parasittiske tap, eller gitt for lite spillerom for teknologisk utvikling.

Disse forholdene gjør at vi her skal operere med en høy og en lav verdi når det gjelder virkningsgrader for brenselceller. Det er med andre ord ikke mulig å konkludere og vi følger derfor at det presenterte spennet gjenspeiler den usikkerheten som vi finner i litteraturen.

- Virkningsgrad brenselcelle, høy verdi: 41,4²⁹
- Virkningsgrad brenselcelle, lav verdi: 23,5

Vi skal ta med oss disse to ”brenselcelle-scenariene” videre i analysen av energibruk og utslipp. Som det vil fremkomme gir de to estimatene (hhv. høy og lav) til dels ulike konklusjoner når man sammenlikner med de konvensjonelle drivstoffene.

Resultat - energibruk

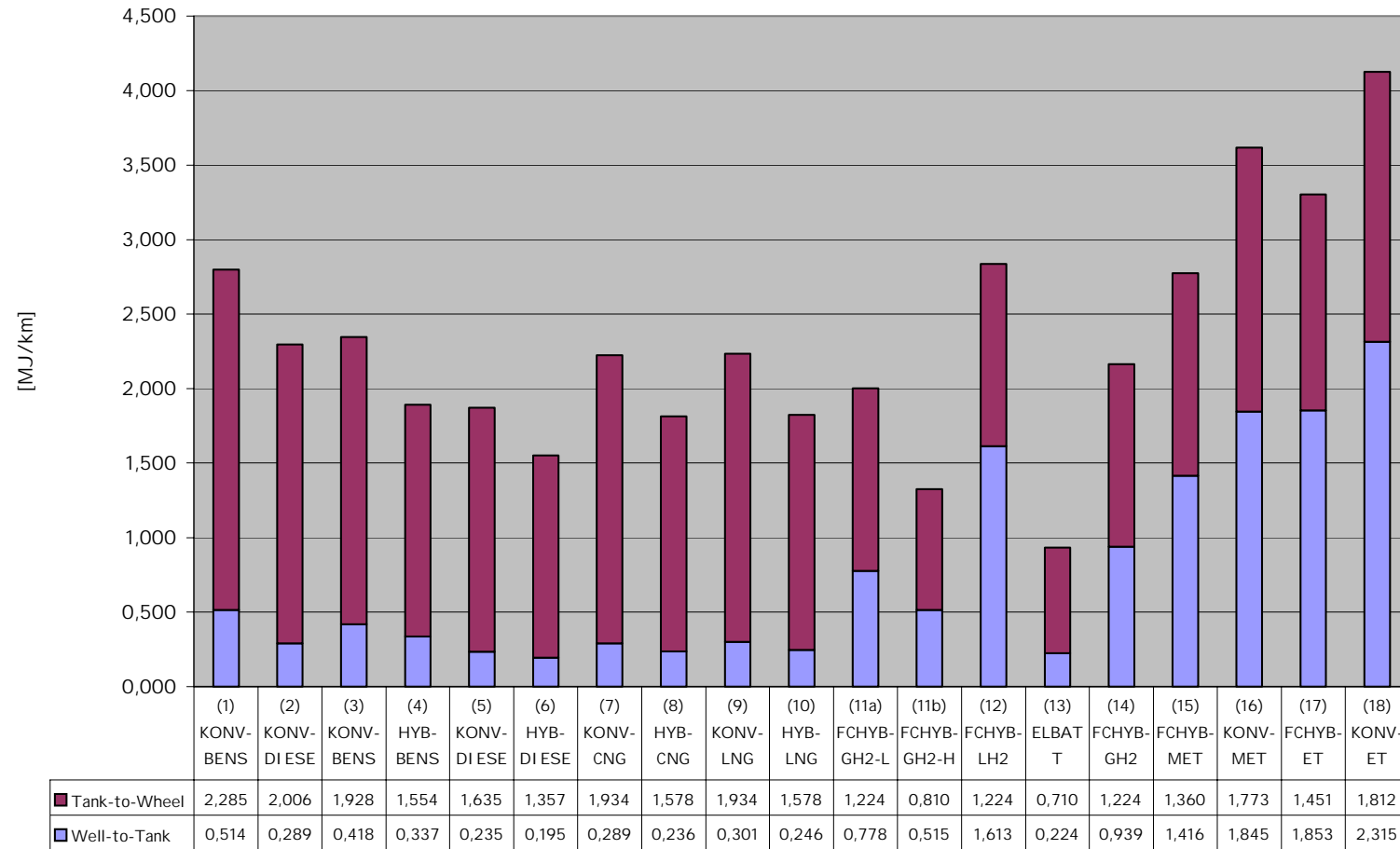
I figur 17 er vist resultatene fra analysene av det totale energiforbruket for de ulike energikjedene. Verdien på den enkelte energikjede sier noe om det samlede energiforbruket fra uttak av energikilden (well) til et utført arbeid på hjulene (wheel). Vi viser til vedleggene for detaljer angående de enkelte data. I tråd med det vi har vært inne på tidligere baserer analysene seg på et livsløpsperspektiv, altså ”Well-To-Wheel”.

- Nå er det slik at det er en direkte omvendt proporsjonal sammenheng mellom virkningsgrad og energibruk. Resultatene fra energianalysene er – som man kan forvente – helt i tråd med analysene av virkningsgradene. Det kan imidlertid være verdt å merke seg at mens det i virkningsgradsanalysen er bra å ha høye verdier (høy effektivitet), er det i energianalysen best å ha lave verdier (lavt energibruk).

²⁹ Vi har anvendt den øvre virkningsgraden fra GM (2001) og ikke den høyeste verdien fra GM (2002), se tabellen under. Årsaken til dette er at i GM (2002) er også virkningsgradene fra bensin og diesebilene såpass høye at hele denne studien ligger på et ”høyre” nivå enn de andre. Forskjellen mellom den beste diesebilen og brenselcellebilen er størst i GM (2001), og derfor beholder vi denne verdien for brenselcelle-virkningsgraden som ”høy verdi”.

Figur 17.

WTW energibruk. Tallene gjelder for en personbil ved blandet kjøring. Alle tall i MJ/km.



5.2. Utslipp av CO₂

Metode

De samlede CO₂-utslippene fra den enkelte energikjede er gitt av sammenhengen:

$$(3) \quad \text{CO}_{2,j} = \left(\sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^5 \frac{dE_{i,k} \cdot c_k \cdot 44}{H_k \cdot 12} \right)_j$$

hvor,

$\text{CO}_{2,j}$ = de totale CO₂-utslippene fra energikjede ”j” [kg/vkm]

$dE_{i,k}$ = energiforbruk i delprosess ”i” av energitype ”k” [MJ/vkm]

c_k = karboninnholdet i energitype ”k” [vekt %]

H_k = nedre brennverdi i energitype ”k” [MJ/kg]

”i” representerer de seks delprosessene i energikjeden

”k” representerer type energi som er forbrukt i den enkelte delprosess (k=1: bensin, k=2: diesel, k=3: naturgass, k=4: elektrisitet, k=5: ikke-fossilt brensel).

I forhold til formel (3) gjør vi følgende forenkling:

- Forbruket av energi i den enkelte delprosess ($dE_{i,k}$) for hver energikjede dekkes i sin helhet av én energitype. Denne energitypen settes lik energikilden for kjeden. Formålet med denne forenklingen er å gjøre beregningene mindre avhengige av detaljkunnskap om den enkelte delprosess.³⁰
- Alt karbon oksiderer til CO₂.

Det gir følgende forenklet formel for beregning av de samlede CO₂-utslippene fra den enkelte energikjede:

$$(4) \quad \text{CO}_{2,j} = \left(\frac{E_{\text{WTW}} \cdot c \cdot 44}{H \cdot 12} \right)_j$$

hvor,

$\text{CO}_{2,j}$ = de totale CO₂-utslippene fra energikjede ”j” [kg/vkm]

E_{WTW} = det totale energiforbruket i energikjede ”j” [MJ/vkm]

c = karboninnholdet i energikilden i energikjede ”j” [vekt %]

H = nedre brennverdi i energikilden i energikjede ”j” [MJ/kg]

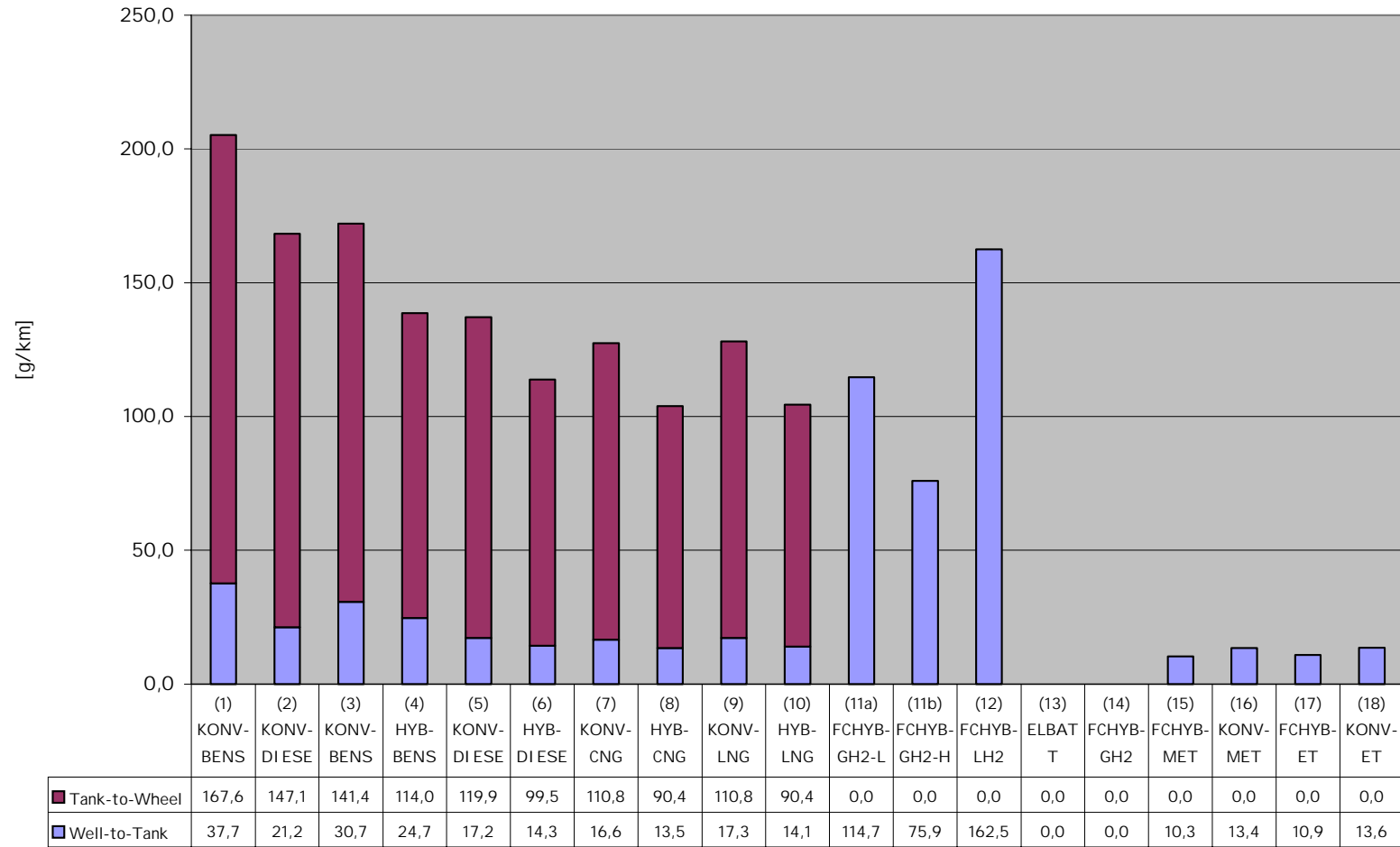
³⁰ Dette innebærer en forenkling i forhold til virkeligheten. For eksempel vil det ved utvinning av råolje brukes både en del diesel og strøm i tillegg til forbruk/tap av råolje. Basert på tidligere erfaringer og andre studier er det imidlertid grunn til å anta at den feilen vi gjør er liten. Vi har likevel gjort enkelte unntak fra denne forenklingen, der hvor vi finner grunn til det. For eksempel har vi inkludert forbruk av råoljebasert diesel (med dertil påfølgende CO₂-utslipp) i biomassekjeden.

Resultater

I figur 18 er vist resultatene fra analysene av de totale CO₂-utslippene for de ulike energikjedene. Verdien på den enkelte energikjede sier noe om de samlede utslippene fra uttak av energikilden energikilden (well) til et utført arbeid på hjulene (wheel). Vi viser til vedleggene for detaljer angående de enkelte data. I tråd med det vi har vært inne på tidligere baserer analysene seg på et livsløpsperspektiv, altså "Well-To-Wheel".

Figur 18.

WTW CO₂-utslipp. Tallene gjelder for en personbil ved blandet kjøring. Alle tall i g/km.



5.3. Utslipp av CO₂-ekvivalenter

Metode

CO₂-ekvivalenter beregnes med utgangspunkt i tre vesentlige drivhusgasser som er spesifisert i Kyoto-protokollen, nemlig karbondioksyd (CO₂), metan (CH₄) og lystgass (N₂O). Beregningen av de CO₂-ekvivalente utslippene tar utgangspunkt i ”oppvarmingspotensialet” (GWP³¹) til hver av de tre gassene. I tråd med anbefalingene fra det internasjonale klimapanelet (IPCC³²), er disse faktorer brukt her:

- CO₂: 1
- CH₄: 21
- N₂O: 310

Utslippene av CH₄ og N₂O beregnes på same måte som utslipp av NO_x (kap. 5.4).

Resultater

I figur 19 er vist resultatene fra analysene av de totale CO₂-ekvivalente utslippene for de ulike energikjedene. Verdien på den enkelte energikjede sier noe om de samlede utslippene fra uttak av energikilden (well) til et utført arbeid på hjulene (wheel). Vi viser til vedleggene for detaljer angående de enkelte data. I tråd med det vi har vært inne på tidligere baserer analysene seg på et livsløpsperspektiv, altså ”Well-To-Wheel”.

Det kan være verdt å merke seg følgende momenter knyttet til resultatene fra utslippene av CO₂-ekvivalenter.

Det er først og fremst utslippene av CO₂ som påvirker de samlede utslippene av CO₂-ekvivalenter. I tabell 2 er vist hvor stor andel av utslippene av CO₂-ekvivalenter som skyldes CO₂-utslipp for alle energikjedene.

Tabell 2

Andel av utslippene av CO₂-ekvivalenter som er CO₂-utslipp (alle energikjedene).

Energikjede nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11a	11b	12	13	14	15	16	17	18
Andel CO ₂ (%)	98	99	97	96	98	97	96	95	96	95	100	100	100	-	-	88	70	74	67

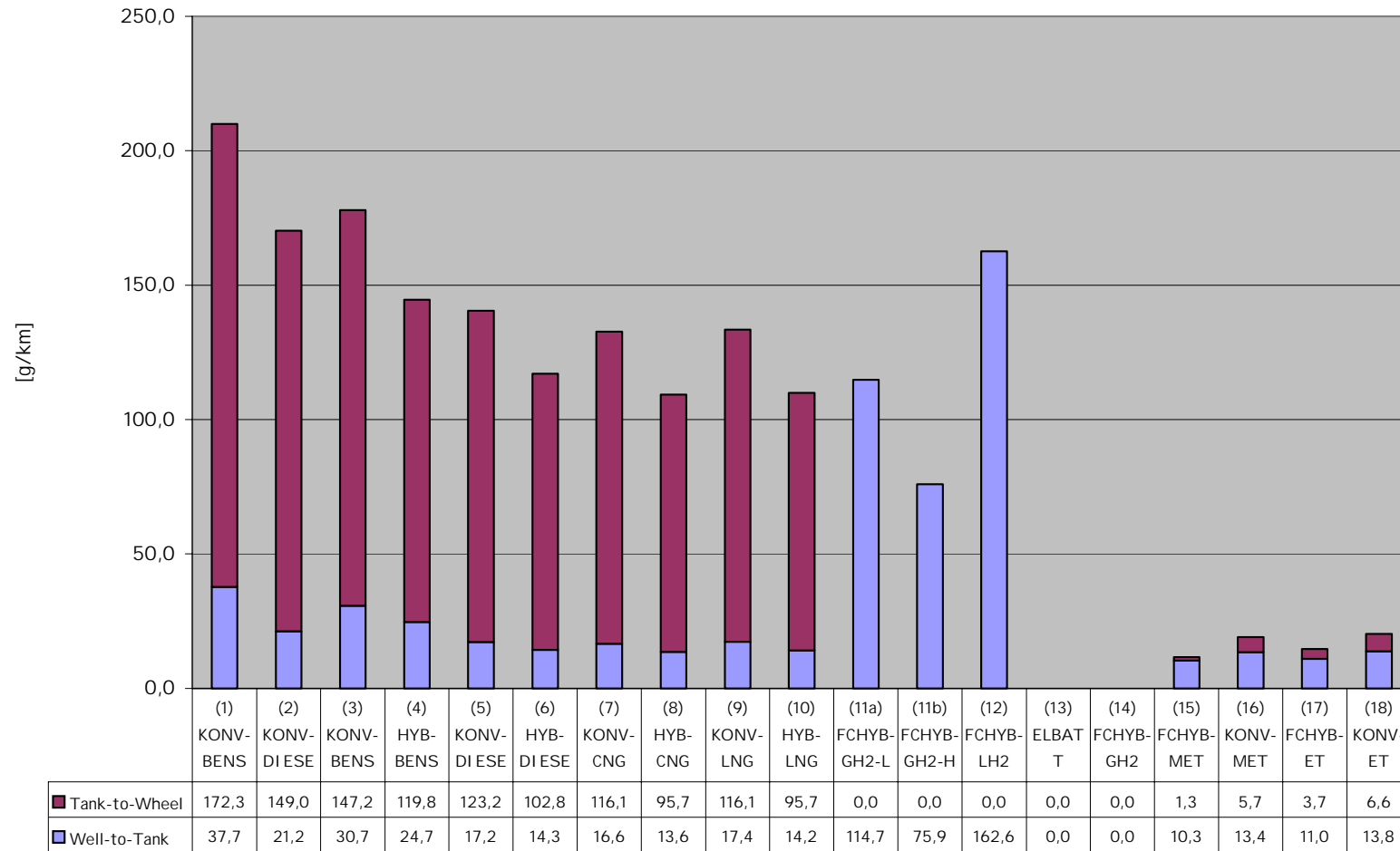
Utslippene av metan (CH₄) og lystgass (N₂O) påvirker altså i liten grad de samlede utslippene av CO₂-ekvivalenter. Det er først og fremst CO₂ som er viktig. Dette innebærer at konklusjonene fra utslippene av klimagasser i all hovedsak følger konklusjonene fra utslippene av CO₂, som det fremgår av teksten over.

³¹ GWP=global warming potential.

³² IPCC=Intergovernmental Panel on Climate Change.

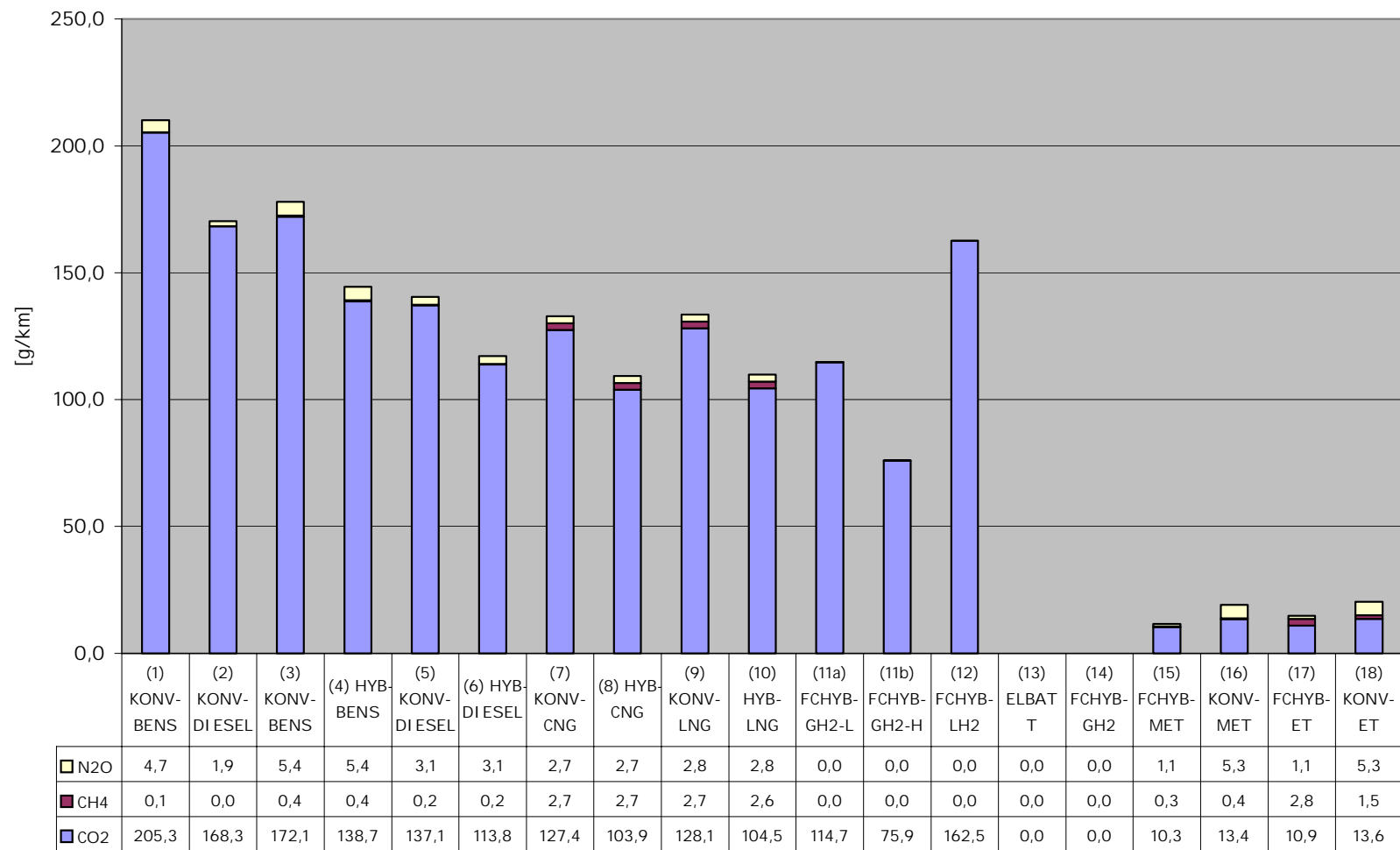
Figur 19.

WTW CO₂-ekvivalente utslipp. Tallene gjelder for en personbil ved blandet kjøring. Alle tall i g/km.



Figur 20.

WTW CO₂-ekvivalente utslipp fordelt på de ulike utslippskomponentene. Tallene gjelder for en personbil ved blandet kjøring.



5.4. Utslipp av NO_x

Metode

De samlede utslippene av NO_x fra de enkelte energikjedene beregnes av sammenhengen:

$$(5) \quad \text{NO}_{x,j} = U_{6,j} + \left(\sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^{k=n} u_{i,k} \cdot dE_{i,k} \right)_j$$

hvor

$U_{6,j}$ = NO_x-utslippene fra kjøretøyet for energikjede "j" [g/vkm]

$u_{i,k}$ = NO_x-utslippsfaktor for energitype/teknologi "k" for delprosess "i" for energikjede "j" [g/MJ]

$dE_{i,k}$ = energiforbruk av type "k" i delprosess "i" for energikjede "j" [MJ/vkm]

"i" representerer de fem delprosessene i energikjeden - WTT.

"k" representerer type energi og teknologi som er forbrukt i den enkelte delprosess.

I likhet med beregning av CO₂ gjør vi følgende forenkling ved beregning av NO_x-utslippene:

- Forbruket av energi i den enkelte delprosess ($dE_{i,k}$) for hver energikjede dekkes i sin helhet av én energitype. Formålet med denne forenklingen er å gjøre beregningene mindre avhengige av detaljkunnskap om den enkelte delprosess.

Det gir følgende forenklet formel for beregning av de samlede NO_x-utslippene fra den enkelte energikjede:

$$(6) \quad \text{NO}_{x,j} = U_{6,j} + \left(\sum_{i=1}^5 u_i \cdot dE_i \right)_j$$

hvor

$U_{6,j}$ = NO_x-utslippene fra kjøretøyet for energikjede "j" [g/vkm]

u_i = NO_x-utslippsfaktor for delprosess "i" for energikjede "j" [g/MJ]

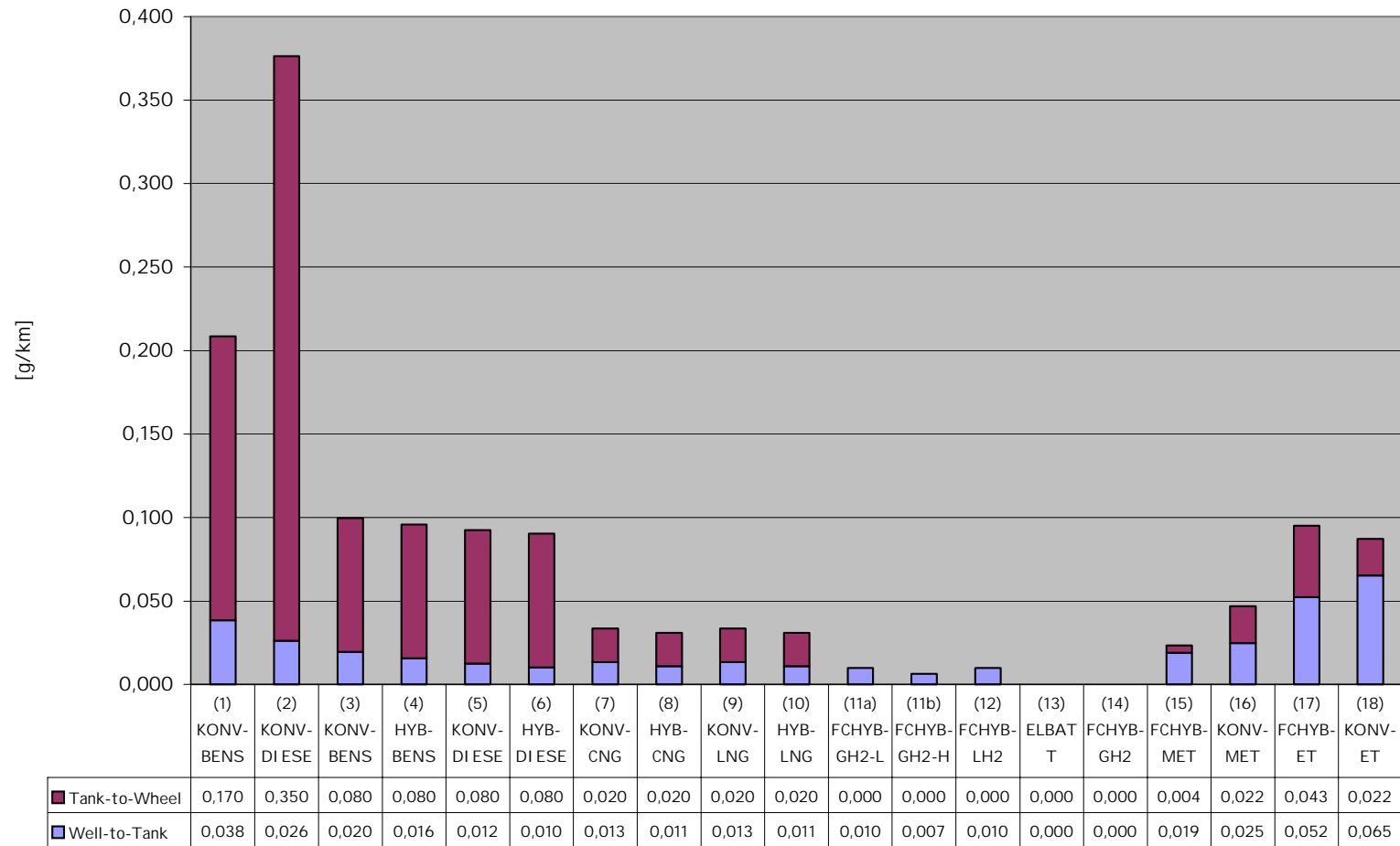
dE_i = energiforbruk i delprosess "i" for energikjede "j" [MJ/vkm]

Resultater

I figur 21 er vist resultatene fra analysene av de totale NO_x-utslippene for de ulike energikjedene. Verdien på den enkelte energikjede sier noe om de samlede utslippene fra uttak av energikilden (well) til et utført arbeid på hjulene (wheel). Vi viser til vedleggene for detaljer angående de enkelte data. I tråd med det vi har vært inne på tidligere baserer analysene seg på et livsløpsperspektiv, altså "Well-To-Wheel".

Figur 21.

WTW NO_x -utslipp. Tallene gjelder for en personbil ved blandet kjøring. Alle tall i g/km.



5.5. Utslipp av partikler³³

Svevestøv består av partikler som svever i luften en viss tid. Partiklene har diameter mindre enn 75 mikrometer, og er ved siden av NO_x den forurensningskomponenten som gir de største lokale luftforurensnings-problemene i Norge. Veitransporten er en viktig kilde til utslipp av svevestøv i norske byer.

Svevestøv omfatter en rekke ulike typer og størrelsesgrupper av partikler. Det er vanlig å bruke PM_{10} som indikator for de delene av svevestøvet som har størst helsemessig betydning. PM_{10} omfatter partikler med diameter mindre enn $10\mu\text{m}$. Det øvrige svevestøvet – med diameter større enn $10\mu\text{m}$ – kan også ha miljømessige konsekvenser, men det antas ikke å ha særlig helsemessig betydning (fordi de større partiklene ikke er inhalerbare). Dette er bakgrunnen for at rapporten er avgrenset til *utslippene av PM_{10}* , hvilket også er i samsvar med det som er vanlig både nasjonalt og internasjonalt.

PM_{10} er en sammensatt gruppe partikler. Den inndeles gjerne i 2 fraksjoner: *grovfraksjon* (diameter mellom 2,5 og $10\mu\text{m}$) og *finfraksjon* (diameter mindre enn 2,5 μm , $\text{PM}_{2,5}$). Finfraksjonen er spesielt alvorlig i helsemessig sammenheng. Det er knyttet til at de mindre partiklene ikke bare er inhalerbare, men også er respirable (dvs. føres helt ned i nedre luftveier og lungeblærer). I den grad det har vært mulig, referer vi data fra begge fraksjonene.

Innenfor veitransporten opererer man med 5 *hovedkategorier* av utslippskilder:

- Utslipp fra eksos
- Utslipp fra veislitasje (inkludert utslipp forårsaket av piggdekkslitasje)
- Utslipp fra dekkslitasje
- Utslipp fra slitasje av bremses og clutch
- Utslipp fra knusing til finere partikler med påfølgende oppvirvling

Her skal alle fem kategoriene kort omtales, men data er bare innhentet og presentert for utslipp av eksos. I utgangspunktet bør både direkte (TTW) og indirekte (WTT) utslippskilder til partikler vurderes. Ettersom de indirekte kildene i det vesentlige er spredd både nasjonalt og internasjonalt, kan de imidlertid antas å være uten betydning i denne sammenheng. Det har sammenheng med at det i første rekke er konsentrasjonene av svevestøv i byene som har miljømessig betydning. Dette innebærer at det ikke er benyttet et livsløpsperspektiv i beregning av partikkelutslipp i denne rapporten. Når det gjelder utslippsdata viser vi til kapittel 6. Årsaken til at vi ikke omtaler utslippsdata her er todelt. For det første anvender vi ikke WTW-analyse på partikkelutslipp. For det andre har vi ikke et robust og konsistent datasett for alle drivstoffene for partikler i år 2010.

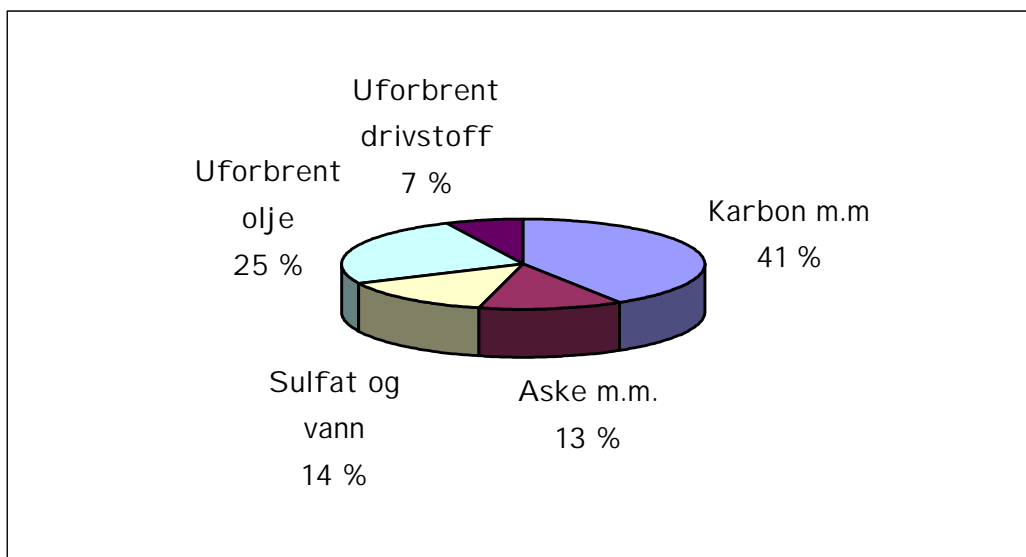
³³ Innholdet i dette kapittelet er i all hovedsak hentet fra Andersen (1999).

Karakteristika ved eksospartikler

Eksospartikler består i hovedsak av agglomerert fast karbonmateriale og aske, flyktige organiske forbindelser og svovel-forbindelser. Faste karbonpartikler dannes under forbrenningen, spesielt ved rike blandingsforhold mellom drivstoff og luft. Det meste av dette oksyderes, men restene blir sluppet ut i eksosen i form av agglomerater. En liten del av drivstoffet og motorolje unngår oksyderingen og slippes ut i aerosolform som flyktige eller løselige organiske forbindelser i eksosen. Motoroljerestene er en kilde til utslipp av partikkelbundne tungmetaller. Metallforbindelsene i drivstoffet og motoroljen fører til dannelse av små mengder uorganisk aske i eksosen. Hovedmengden av svovelet i drivstoffet blir oksydert til SO₂, men en mindre mengde blir oksidert til SO₃, som omdannes til svovelsyre og sulfater i eksospartiklene. Figur 22 viser en representativ sammensetning av partikulært materiale fra dieselmotor testet ved en U.S. heavy duty transient test.

Figur 22.

Typisk sammensetning av partikulært materiale fra dieselmotor testet på en heavy duty transient test syklus.



Når eksosen fortynnes og avkjøles vil flyktig materiale omdannes til partikler i fast og flytende (aerosol) form. Dette skjer ved en blanding av kjernedannelse, kondensering og adsorpsjon. I eksosrøret, hvor temperaturene er høye, er mesteparten av det flyktige materialet i gassfase. Forholdene rundt fortynningen og avkjølingen er av betydning for hvor stor del av materialet som adsorberer eller kondenserer på eksisterende partikler, eller kjernedanner til nye partikler.

Partikkelutslippet fra motoren utgjøres i all hovedsak av nanopartikler med størrelse omkring 100-200 nm. Agglomerering av nanopartiklene på vei ut mot utløpet av eksosrøret fører til at ca 10 % av partikelmengden ved eksosutslippet har diameter over 2,5 mikrometer.

Det aller meste av polysykliske aromatiske hydrokarboner (PAH) i deponert svevestøv ved vegene finnes på partikler med diameter mindre enn ca. 3 mikrometer.

Det meste av dette igjen finnes på partikler mindre enn 0,5 mikrometer (Anda og Larsen, 1982). Mengden PAH i partikler fra eksosutslipp fra bensin- og dieslbiler er i området 0,4 % - 1,6 % (NRC, 1982). Det finnes også 0,6 % - 2,4 % oksydasjonsprodukter av PAH, bl.a nitro-PAH. Nitro-PAH (for eksempel nitropyrener) er direkte-virkende (d.v.s uten aktivering gjennom metabolismen) mutagener og har fått oppmerksomhet på grunn av dette. Det har vært målt konsentrasjoner av nitro-PAH opp til 0,17 % i eksospartikler.

Karakteristika ved partikler fra veislitasje

Sammensetningen av partiklene fra veislitasje kan best beskrives ved å vurdere veidekkets sammensetning. I asfalt er ca 90 % stein, 5 % filler (steinstøv) og ca 5 % bindemidler (bitumen). Hvis steinsorten som benyttes som hovedkomponent i asfalten er kvarts, kan partiklene fra veislitasjen inneholde store mengder silisium, og dette kan innebære en potensiell helserisiko i form av sykdommen silikose. I Oslo benyttes imidlertid i stor grad basalt som steininnsats, slik at dette er en mindre aktuell risiko enn for eksempel i Trondheim. Bitumen i asfalten inneholder en rekke forbindelser som kan ha miljø- og helsemessig betydning ved spredning når forbindelsene er adsorbent på partikler.

Karakteristika ved partikler fra slitasje av bildekk

Innholdet i den delen av bildekkene som slites bort under kjøring er vist i figur 23. Partiklene som slites av fra bildekk inneholder altså ca. 1-2 % svovel, 2-5 % sink samt en rekke andre sporstoffer. I tillegg finnes kadmium (1,25 ppm) og bly (15 ppm) som forurensning i sinkoksid. Slitasje av piggene i pigge dekk gir utslipp av partikkelbundet wolfram og titan. Nye piggetyper inneholder lettmetaller og plaststoffer som også vil slites av og bidra til partikkelbundet luftforurensning av disse stoffene.

Figur 23.

Innhold i slitasjeproduktene fra bildekkene.

Komponent	Innhold (%)
Polymerer (naturgummi og syntetisk gummi)	40-60
Sot	25-35
Mykningsmiddel	25-30
Vulkaniseringsmiddel (svovel)	1-2
Akseleratorer (Cu, Zn og Pb)	0,5-2
Aktivatorer (bl.a. sinkoksid)	2-5
Elastisitetsmiddel (for eksempel stearinsyre)	<1
Antioksidanter	1-2
Herdere	0-3
Andre tilsetninger	<1

Karakteristika ved partikler fra bremseslitasje

Bremseklosser og –sko er sammensatt av asbest og/eller halvmetall-karbon blandinger. Utslipp fra bremseslitasje kan utgjøres av opptil 80 % asbest (CaSiO_3 / MgSiO_3). Størrelsen på asbestfibrene er under 2,5 mikrometer og kan derfor betraktes å inkluderes innenfor kategorien $\text{PM}_{2,5}$. Asbest fra clutch-slitasje utgjør noen få prosent i forhold til den mengden asbest som kommer fra bremsene. Cu er tilsatt bremses og kan utgjøre utslipp på 80 mikrogram per akselkilometer. Cr, Ba og Mn benyttes også i bremsebånd, og er funnet i partikler fra slitasje av bremses. Undersøkelser av sammensetningen av partikler fra slitasje av halvmetall bremsebånd er funnet til ca. 45 % Fe, ca. 2 % Cu, 0,5 % Sn, 3 % Ba og 0,5 % Mo.

Karakteristika ved partikler fra knusing og opphvirvling

Større partikler enn PM_{10} er ikke tatt med i beregningene våre hittil. En del av disse partiklene vil imidlertid bli deponert i veibanen og senere omdannet til PM_{10} og $\text{PM}_{2,5}$ ved gjentatt knusing i veibanen med påfølgende opphvirvling. Sammensetningen av partiklene som finknuses og opphvirvles kan antas i hovedsak å utgjøres av en blanding av partikler fra veislitasje og dekkslitasje.

5.6. Oppsummering

Vi skal her oppsummere resultatene fra WTW-analysene og rangere energikjedene i forhold til hverandre. Vi skal holde elbilen utenfor denne sammenlikningen fordi den ikke har de samme egenskaper som de andre. Riktignok vil brenselcellen bidra til noe kortere kjørelengde enn forbrenningsmotorer (særlig bensin og diesel), men rekkevidden til et brenselcellekjøretøy er likevel såpass god at den er en reelt konkurrent til de konvensjonelle kjøretøyene.³⁴ Elbilen strever derimot fremdeles med rekkevidden. Vi skal også holde de to energikjedene som refererer til bensin og diesel i år 2000. De er ikke interessante i en sammenlikning mellom alternativer i år 2010. *Det er for øvrig verdt å merke seg at vi i kjede nummer 11b har anvendt den høye virkingsgraden for brenselcelle, mens vi i alle andre sammenhenger hvor brenselceller inngår har anvendt den lave verdien for virkingsgrad.*

I tabell 3 er vist alle WTW resultatene fra 16 energikjeder (elbiler og 2000-bilene er utelatt). Merk at 11a og 11b er identiske energikjeder, men med ulike data for brenselcellens virkningsgrad. I tabellen har vi beregnet en del statistiske verdier for de ulike miljøindikatorene. For å rangere energikjedene har vi beregnet henholdsvis 25% kvartil, 50% kvartil (som er identisk med medianen)³⁵ og 75% kvartil. Dessuten har vi beregnet gjennomsnittsverdien og angitt maksimal- og minimumsverdi.

Tabell 3

Resultatene fra WTW-analysene.

	Virkningsgrad [%]	Energibruk [MJ/km]	CO ₂ [g/km]	CO ₂ -ekv [g/km]	NO _x [g/km]
(3) KONV-BENS	12,2	2,346	172,1	177,9	0,100
(4) HYB-BENS	15,2	1,891	138,7	144,5	0,096
(5) KONV-DIESEL	15,4	1,870	137,1	140,4	0,092
(6) HYB-DIESEL	18,5	1,552	113,8	117,1	0,090
(7) KONV-CNG	13,0	2,223	127,4	132,7	0,033
(8) HYB-CNG	15,8	1,814	103,9	109,3	0,031
(9) KONV-LNG	12,9	2,235	128,1	133,5	0,033
(10) HYB-LNG	15,7	1,824	104,5	109,9	0,031
(11a) FCHYB-GH2-L	14,4	2,002	114,7	114,7	0,010

³⁴ Nylig leverte Honda en brenselcelledrevet bil (Honda FCX) til staten California som går på hydrogen. I følge Honda har denne bilen en rekkevidde på 284 kilometer mellom hver fylling.

³⁵ Her står vi overfor 16 energikjeder. Medianen blir da beregnet som gjennomsnittsverdien av de to midterste verdiene.

(11b) FCHYB-GH2-H	25,3	1,325	75,9	75,9	0,007
(12) FCHYB-LH2	10,1	2,837	162,5	162,6	0,010
(14) FCHYB-GH2	13,3	2,163	0,0	0,0	0,000
(15) FCHYB-MET	10,2	2,776	10,3	11,6	0,023
(16) KONV-MET	7,9	3,618	13,4	19,1	0,047
(17) FCHYB-ET	8,7	3,304	10,9	14,7	0,095
(18) KONV-ET	7,0	4,127	13,6	20,3	0,087
Maksimalverdi	25,3	4,127	172,1	177,9	0,100
75% kvartil	15,5	2,791	130,3	135,2	0,091
50% kvartil (median)	13,1	2,193	109,2	112,3	0,033
25% kvartil	10,2	1,859	13,5	20,0	0,020
Minimumsverdi	7,0	1,325	0,0	0,0	0,000
Gjennomsnitt	13,5	2,369	89,2	92,8	0,049

Som det fremkommer av tabellen er det store forskjeller mellom energikjedene for alle de beregnede miljøindikatorene. Virkningsgraden varierer mellom 7,0 og 25,3 prosent. Den mest effektive energikjeden er altså nær fire ganger så mer effektiv som den minst effektive. For energiforbruket finner vi det samme forholdet (ikke så rart nå energiforbruket er omvendt proporsjonalt med virkningsgraden). Også når det gjelder utslipp av CO₂, CO₂-ekv og NO_x er det store forskjeller mellom kjedene. Forskjellen mellom de beste og de verste utgjør rundt en faktor 20.

I det påfølgende skal vi rangere energikjedene for hver miljøindikator. Vi skal vise resultatene fra (i) energibruk (dekker også virkningsgrad), (ii) CO₂-ekvivalente utslipp og (iii) NO_x. Hver for seg er de tre indikatorne representanter for tre miljøproblemområder: (i) energiresursbruk, (ii) klima og (iii) lokale utslipp. Vi skal rangere kjedene på følgende måte:

- ”Den beste”:
Den energikjeden som kommer best ut for gjeldende miljøindikator
- ”De beste”:
Energikjeder som ligger mellom 75% kvartil og den beste.
- ”De litt over midten”:
Energikjedene som ligger mellom medianen og 75% kvartilen.
- ”De litt under midten”:
Energikjedene som ligger mellom medianen og 25% kvartilen.
- ”De dårligste”:
Energikjeder som ligger mellom 25% kvartilen og den dårligste verdien.

- ”Den dårligste”:

Den energikjeden som kommer dårligst ut for den gjeldene miljøindikator.

Rangeringen er vist i tabellene under. Der hvor det er tydelige sprang i verdiene har vi tatt hensyn til det under rangeringen. En bensinbil med konvensjonell motorteknologi er merket med fet tekst i tabellene. Dette er de mest vanlige bilene slik vi har dem i dag og denne energikjeden kan indikere en utvikling der man ikke gjør spesielle tiltak ut over å følge den normale utviklingen (”business as usual”).

Tabell 4.

Rangering av energikjedene etter WTW energibruk. ”Best” indikerer her lavt energiforbruk per km.

Rangering	Energikjede (nr, beskrivelse)
”Den beste”	(11b) Naturgass –komprimert hydrogen – brenselcelle (høy virkningsgrad).
”De beste”	(6) Råolje – diesel – hybridisert dieselmotor. (8) Naturgass - komprimert naturgass (CNG) – hybridisert ottomotor. (10) Naturgass - flytende naturgass (LNG) – hybridisert ottomotor.
”De litt over midten”	(5) Råolje – diesel – konvensjonell dieselmotor. (4) Råolje – bensin – hybridisert ottomotor. (11a) Naturgass –komprimert hydrogen – brenselcelle (lav virkningsgrad). (14) Vannkraft – elektrisitet – komprimert hydrogen – brenselcelle.
”De litt under midten”	(6) Naturgass – komprimert naturgass (CNG) – konvensjonell ottomotor. (7) (9) Naturgass – flytende naturgass (LNG) – konvensjonell ottomotor. (3) Råolje – bensin – konvensjonell ottomotor. (15) Biomasse (skog) – metanol – brenselcelle med OBR.
”De dårligste”	(12) Naturgass – flytende hydrogen – brenselcelle. (17) Biomasse (skog) – etanol – brenselcelle med OBR. (16) Biomasse (skog) – metanol – konvensjonell ottomotor.
”Den dårligste”	(18) Biomasse (skog) – etanol – konvensjonell ottomotor.

De fleste energikjedene kommer bedre ut enn den konvensjonelle bensinbilen. Det er bare flytende hydrogen fra naturgass og de biomassebaserte energikjeden som

har et samlet energibruk per kilometer som er større. Det foreligger altså mange alternativer som har potensial til å redusere energibruken fremfor en ”business as usual” strategi. To alternativer stikker seg særlig ut. Den første er brenselcellen med høy virkningsgrad hvor hydrogen er produsert fra naturgass. Det kan være verdt å merke seg at selv med lav virkningsgrad kommer brenselcellen bedre ut enn den konvensjonell bensinbilen. Den andre energikjeden som kommer særlig godt ut er den hybridiserte dieselen. Det gir en indikasjon på at man ikke nødvendigvis trenger å revolusjonere bil- og energiindustrien for å bidra til et lavere energiforbruk.

Tabell 5.

Rangering av energikjedene etter WTW utslipp av CO₂-ekvivalenter. ”Best” indikerer her lavt utslipp per km.

Rangering	Energikjede (nr, beskrivelse)
”Den beste”	(14) Vannkraft – elektrisitet – komprimert hydrogen – brenselcelle.
”De beste”	(15) Biomasse (skog) – metanol – brenselcelle med OBR. (17) Biomasse (skog) – etanol – brenselcelle med OBR. (16) Biomasse (skog) – metanol – konvensjonell ottomotor. (18) Biomasse (skog) – etanol – konvensjonell ottomotor.
”De litt over midten”	(11b) Naturgass –komprimert hydrogen – brenselcelle (høy virkningsgrad). (8) Naturgass - komprimert naturgass (CNG) – hybridisert ottomotor. (10) Naturgass - flytende naturgass (LNG) – hybridisert ottomotor.
”De litt under midten”	(11a) Naturgass –komprimert hydrogen – brenselcelle (lav virkningsgrad). (6) Råolje – diesel – hybridisert dieselmotor.
”De dårligste”	(7) Naturgass – komprimert naturgass (CNG) – konvensjonell ottomotor. (9) Naturgass – flytende naturgass (LNG) – konvensjonell ottomotor. (5) Råolje – diesel – konvensjonell dieselmotor. (4) Råolje – bensin – hybridisert ottomotor. (12) Naturgass - flytende hydrogen – brenselcelle.
”Den dårligste”	(3) Råolje – bensin – konvensjonell ottomotor.

Som det fremkommer av tabellen vil alle de energikjedene som er inkludert i studien gi reduksjoner i utslipp av klimagasser sett i forhold til den vanlige bensinbi-

len. Naturlig nok er det de vann- og biomassebaserte energikjedene som kommer best ut. Deretter følger de naturgassbaserte alternativene på rekke og rad, før konvensjonell og vanlig diesel og hybridiserte bensinmotorer.

Tabell 6.

Rangering av energikjedene etter WTW utslipp av NO_x. "Best" indikerer her lavt utslipp per km.

Rangering	Energikjede (nr, beskrivelse)
"Den beste"	(14) Vannkraft – elektrisitet – komprimert hydrogen – brenselcelle.
"De beste"	(11b) Naturgass –komprimert hydrogen – brenselcelle (høy virkningsgrad).
	(11a) Naturgass –komprimert hydrogen – brenselcelle (lav virkningsgrad).
	(12) Naturgass - flytende hydrogen – brenselcelle.
"De litt over midten"	(15) Biomasse (skog) – metanol – brenselcelle med OBR.
	(8) Naturgass - komprimert naturgass (CNG) – hybridisert ottomotor.
	(10) Naturgass - flytende naturgass (LNG) – hybridisert ottomotor.
"De litt under midten"	(7) Naturgass – komprimert naturgass (CNG) – konvensjonell ottomotor.
	(9) Naturgass – flytende naturgass (LNG) – konvensjonell ottomotor.
	(16) Biomasse (skog) – metanol – konvensjonell ottomotor.
"De dårligste"	(18) Biomasse (skog) – etanol – konvensjonell ottomotor.
	(6) Råolje – diesel – hybridisert dieselmotor.
	(5) Råolje – diesel – konvensjonell dieselmotor.
	(17) Biomasse (skog) – etanol – brenselcelle med OBR.
"Den dårligste"	(4) Råolje – bensin – hybridisert ottomotor.
	(3) Råolje – bensin – konvensjonell ottomotor.

Også her er det verdt å merke seg at alle energikjeder kommer bedre ut enn den konvensjonelle bensinbilen. Når det gjelder utslipp av NO_x (så vel som andre lokale forurensningskomponenter) er det brenselcellen har sin styrke. I rangeringen over besetter brenselcellen de fem øverste plassene. Deretter kommer bilene som anvender naturgass direkte, mens etanol, metanol og diesel følger deretter. Her skal man imidlertid merke seg at vi forutsetter at dieselmotorene i 2010 klarer de samme avgasskravene for NO_x som settes til bensin. Det er fremdeles noe usikkerhet knyttet til om dette lar seg gjøre innen år 2010.

6. BUSSE, LASTEBILER OG GODSBÅTER

Vi har innledningsvis nevnt at det er lite data på de andre kjøretøykategoriene enn båt. Det er imidlertid ikke slik at det ikke finnes data også for disse transportmiddekkategoriene, men de er ikke av en så vidt god kvalitet som for personbiler. Vi skal her oppsummere noen av de data vi har kommet over når det gjelder bruk av alternative drivstoffer i busser, lastebiler og godsbåter. Vi skal nøye oss med å referere data fra kjøretøyet, og ikke sette disse data inn i en WTW-analyse (slik det er gjort for personbiler).

Her vil vi også ta med utslipp fra personbiler som ikke er omtalt tidligere. Blant annet gjelder dette utslipp av partikler. Data er vist i de påfølgende tabeller.

Tabell 7.

Energibruk og utslipp fra personbiler (Golf-klassen, 1350 kg inkl to personer).

Drivstoff	Drivsystem	Teknologi	Forbruk MJ/km	CO ₂ g/km	CH ₄ g/km	N ₂ O g/km	SO ₂ g/km	NO _x g/km	HC g/km	CO g/km	PM ₁₀ g/km	PM _{2,5} g/km	Kilde
Diesel	Dieselmotor	2010	1,66	122,6			0,004	0,04	0,02	0,07	0,016		VF/TI (2002)
	Dieselmotor	2010	1,69	129				0,04	0,02	0,07	0,016		Egebäck m.fl (1997)
	Dieselmotor	2005 ⁽⁴⁾									0,025	0,0225	Andersen (1999)
Bensin	Ottomotor	2010	2,14	156,6			0,005	0,04	0,08	0,35	0,0012		VF/TI (2002)
	Ottomotor	2010	2,14	160				0,04	0,08	0,35	0,0012		Egebäck m.fl (1997)
	Ottomotor, bykjøring	2010 ⁽⁵⁾									0,0039	0,0039	Andersen (1999)
Metanol	Brenselcelle	2010	1,33	91,3			0	0,0013	0,0073	0,0134	0		VF/TI (2002)
	Brenselcelle+reformer	2010	1,33	91,3			0	0,0013	0,0073	0,0134	0		VF/TI (2002)
	Ottomotor	2010						0,01	0,03	0,23			Egebäck m.fl (1997)
Etanol	Ottomotor	2010					0,01	0,03	0,23				Egebäck m.fl (1997) ⁽³⁾
CNG	Ottomotor	2010	2,14	123,9			0,0005	0,02	0,01	0,02	0,001		VF/TI (2002)
	Ottomotor	2010						0,02	0,01	0,02	0,001		Egebäck m.fl (1997)
LPG	Ottomotor	2010	2,14	139,6			0,0003	0,02	0,01	0,02	0,001		VF/TI (2002)

Hydrogen	Brenselcelle, GH2	2010	0,81	0			0	0	0	0	0		VF/TI (2002)
El	El (Bat.)	2010	0,71	0			0	0	0	0	0		VF/TI (2002)
	El (Bat.)	2010	0,71	0			0	0	0	0	0		VF/TI (2002)
EURO IV	Bensin	2005						0,08	0,1	1,0	-		
	Diesel	2005						0,25	0,3 ⁽¹⁾	0,5	0,025		
EURO V	Bensin	2008						0,08	0,1	1,0	0,0025		
	Diesel	2008						0,08	0,1 ⁽²⁾	1,0	0,0025		

(1) HC + NO_x.

(2) Separate grenseverdier for HC og NO_x både for bensin og diesel.

(3) Forskjellen i utslippene fra metanol og etanol antas å være små, slik at de settes like for de to drivstoffene.

(4) Euro IV-kravene er lagt til grunn (25,0 mg PM₁₀/vkm).

(5) For beregning av utslipp av PM₁₀ fra bensindrevne kjøretøy har de lagt til grunn estimer som er utført av California Air Resources Board (CARB). Estimater for utslipp av PM₁₀ i år 2010 er 2,7 mg/vkm for nasjonalt gjennomsnitt. Ved å anta at forholdet mellom utslipp av PM₁₀ ved bykjøring og nasjonalt gjennomsnitt er proporsjonal med forholdet mellom drivstofforbruket (0,89/1,28), kommer man frem til et utslipp på 3,9 mg PM₁₀/vkm ved bykjøring.

Tabell 8.

Energibruk og utslipp fra distribusjonsbiler (lette lastebiler, vekt ca.3,5 - 7 tonn).

Drivstoff	Drivsystem	Teknologi	Forbruk MJ/km	CO ₂ g/km	CH ₄ g/km	N ₂ O g/km	SO ₂ g/km	NO _x g/km	HC g/km	CO g/km	PM ₁₀ g/km	PM _{2,5} g/km	Kilde
Diesel	Dieselmotor	2010	3,91	288,7	-	-	0,009	1,5	0,1	0,3	0,035		VF/TI (2002)
	Dieselmotor	2010	3,98	320,0				1,5	0,1	0,3	0,035		Egebäck m.fl (1997)
CNG	Ottomotor	2010	4,5	260,5	-	-	0,001	0,3	0,32	0,06	0,0016		VF/TI (2002)
	Ottomotor	2010						0,3	0,32	0,06	0,0016		Egebäck m.fl (1997)
LPG	Ottomotor	2010	4,5	293,5	-	-	0,001	0,3	0,32	0,06	0,0016		VF/TI (2002)
CH ₂	Brenselcelle	2010	1,91	0	-	-	0	0	0	0	0		VF/TI (2002)
Metanol	Brenselcelle +reformer	2010	3,13	215	-	-	0,00	0,05	0,04	0,06	0,00		VF/TI (2002)
	Dieselmotor	2010	3,91	276,5	-	-	0,0002	0,46	0,03	0,02	0,01		VF/TI (2002)
	Dieselmotor	2010						0,46	0,03	0,02	0,010		Egebäck m.fl (1997)
Etanol	Dieselmotor	2010						0,46	0,03	0,02	0,010		Egebäck m.fl (1997) ⁽¹⁾

(1) Forskjellen i utslippene fra metanol og etanol antas å være små, slik at de settes like for de to drivstoffene.

Tabell 9.

Energibruk og utslipp fra tunge lastebiler(vekt 40 tonn).

Drivstoff	Drivsystem	Teknologi	Forbruk MJ/km	CO ₂ g/km	CH ₄ g/km	N ₂ O g/km	SO ₂ g/km	NO _x g/km	HC g/km	CO G/km	PM ₁₀ g/km	PM _{2,5} g/km	Kilde
Diesel	Diesel	2010	10,2	753,3	-	-	0,024	4,1	0,15	2,5	0,1		VF/TI (2002)
	Diesel	2010	10,4	910	-	-		4,1	0,15	2,5	0,1		Egebäck m.fl (1997)
CNG	Otto	2010	11,73	679,1	-	-	0,003	0,8	0,8	0,15	0,005		VF/TI (2002)
	Otto	2010			-	-		0,8	0,8	0,15	0,005		Egebäck m.fl (1997)
Metanol	Diesel	2010	10,2	721,4	-	-	0,001	1	0,02	0,05	0,005		VF/TI (2002)
	Diesel	2010			-	-		1	0,02	0,05	0,005		Egebäck m.fl (1997)
Etanol	Diesel	2010			-	-		1	0,02	0,05	0,005		Egebäck m.fl (1997) ⁽¹⁾

(1) Forskjellen i utslippene fra metanol og etanol antas å være små, slik at de settes like for de to drivstoffene.

Tabell 10.*Energibruk og utslipp fra busser (15 tonn).*

Drivstoff	Drivsystem	Teknologi	Forbruk MJ/km	CO ₂ g/km	CH ₄ g/km	N ₂ O g/km	SO ₂ g/km	NO _x g/km	HC g/km	CO g/km	PM ₁₀ g/km	PM _{2,5} g/km	Kilde
Diesel	Dieselmotor	2010	10,2	753,3	-	-	0,024	3,2	0,15	1,0	0,07		VF/TI (2002)
	Dieselmotor	2010	10,4	910				3,2	0,15	1,0	0,07		Egebäck m.fl (1997)
	Dieselmotor, bykjøring	2008 ⁽²⁾	345 ⁽³⁾	1093	0,02	0,003		2,40			0,03		Selvik og Bang (2000)
	Dieselmotor, forstadskj.	2008 ⁽²⁾	304 ⁽³⁾	965	0,01	0,002		1,60			0,02		Selvik og Bang (2000)
	Dieselmotor, bykjøring	2005 ⁽⁵⁾									0,122	0,110	Andersen (1999)
CNG	Ottomotor	2010	11,73	679,1	-	-	0,003	1,1	0,8	0,15	0,005		VF/TI (2002)
	Ottomotor	2010			-	-		1,1	0,8	0,15	0,005		Egebäck m.fl (1997)
	Ottomotor, bykjøring	2008 ⁽²⁾	434 ⁽³⁾	1112	1,2			2,80			0,02		Selvik og Bang (2000)
	Ottomotor, forstadskj.	2008 ⁽²⁾	392 ⁽³⁾	1006	0,7			1,70			0,01		Selvik og Bang (2000)
LPG	Ottomotor	2010	11,73	765	-	-	0,002	1,1	0,8	0,15	0,005		VF/TI (2002)
Metanol	Brenselcelle +reformer	2010	16,09	1111	-	-	0	0,015	0,048	0,211	0		VF/TI (2002)
	Dieselmotor	2010	10,2	721,4	-	-	0,001	1,3	0,04	0,05	0,02		VF/TI (2002)
	Dieselmotor	2010		1040				1,3	0,04	0,05	0,02		Egebäck m.fl (1997)
Etanol	Dieselmotor	2010		1040				1,3	0,04	0,05	0,02		Egebäck m.fl (1997) ⁽¹⁾
	Dieselmotor, bykjøring	2008 ⁽²⁾	473 ⁽³⁾					2,50			0,03		Selvik og Bang (2000)
	Dieselmotor, forstadskj.	2008 ⁽²⁾	423 ⁽³⁾					1,60			0,02		Selvik og Bang (2000)

Hydrogen	Brenselcelle (GH2)	2010	9,80	0	-	-	0	0	0	0	0	0	VF/TI (2002)
	Brenselcelle, bykjøring		228 ⁽⁴⁾										Selvik og Bang (2000)
	Brenselcelle, forstadskj.		206 ⁽⁴⁾										Selvik og Bang (2000)

- (1) Forskjellen i utslippene fra metanol og etanol antas å være små, slik at de settes like for de to drivstoffene.
- (2) Data er basert på EuroV kravene (01.10.08) og regnet om fra g/kWh til g/km.
- (3) g/km, dieselekvivalenter. Forbruket er omregnet til dieselekvivalenter basert på energiinnholdet (nedre brenneverdi).
- (4) Som grunnlag for beregning av energiforbruket har de gått veien om virkningsgrader. Midlere virkningsgrad for brenselcellen er satt til 55%, bufferbatterier (ladning + utladning) til 75%, elektriske motorer 85% og tap i elektriske kabler og styringssystemer 5%. Til sammen gir dette en virkningsgrad mellom 33 og 44% for fremdrift av bussen, avhengig av hvor mye strøm som går via bufferbatteriene. De har her valgt å bruke 36%. Når en virkningsgrad på 36% legges inn i deres beregningsmodell for forbruk og utslipp ved bybuskjøring (TNO-bybussyklus) gir det et hydrogenforbruk som er ekvivalent med 2,6 liter diesel/mil. Daimler Benz oppgir rekkevidden for sin Nebus til 250 km med 21 kg hydrogen, hvilket tilsvarer et dieselekvivalent forbruk på 2,8 l/mil.
- (5) Partikkeltallene baserer seg på EURO IV-kravene.

7. KONKLUSJON

Dette konklusjonskapittelet er tredelt. I den første delen skal vi gi en kort oppsummering av de viktigste konklusjonene fra analysene i kapittel 5. Vi spør med andre ord: Hvem vant? Deretter skal vi se nærmere på hvilke områder vi i dag mangler robust kunnskap om drivstoffenes energi- og miljøkonsekvenser. Til slutt skal vi komme med forslag til videre arbeid.

7.1. Og vinneren er.....

Vi har målt de 16 energikjedene etter tre indikatorer: energibruk, utslipp av klimagasser (CO₂, CH₄ og N₂O) og lokale utslipp (NO_x).³⁶ Konklusjonene vi her gir skal følge disse tre indikatorer og en samlet vurdering til slutt. Under hver kategori skal vi punktvis oppsummere noen av de viktigste konklusjonene. Konklusjonene gjelder bare for *personbiler*. Med forsiktighet er det grunnlag for å anvende konklusjonene også for andre veibaserte transportmidler (se mer om dette i kapittel 3.2). Den klart mest vanlige energikjeden for norske personbiler er bensin produsert fra råolje og anvendt i en konvensjonell ottomotor. Slik vil det sannsynligvis også være i år 2010. Denne energikjeden kaller vi derfor *basiskjeden* i konklusjonene under.

Energibruk

- Med ett unntak fremstår alle de fossilbaserte energikjedene som mer energieffektive over hele energikjeden enn basiskjeden. Det finnes således en rekke muligheter for å øke energieffektiviteten for personbiltransport i forhold til dagens situasjon.
- To energikjeder skiller seg ut som særlig energieffektive. For det første gjelder det brenselcellekjøretøy der hydrogen er produsert fra naturgass, *dersom potensialet for virkningsgraden i brenselcellen fullt ut lar seg realisere*. (Det gjenstår fremdeles å si noe sikkert om dette lar seg realisere. Kildene peker i ulike retninger. Anvendes mer moderate anslag for brenselcellens effektivitet i et kjøretøy, er det lite som skiller denne energikjeden i forhold til de konvensjonelle råoljebaserte alternativene.) For det andre er det hybridisering av den konvensjonelle dieselmotoren, hvor diesel er produsert fra råolje.
- Generelt gir en hybridisering av konvensjonelle forbrenningsmotorer – enten drivstoffet er bensin, diesel eller naturgass – store energieffektiviseringer.
- De biomassebaserte energikjedene framstår med et betydelig høyere samlet energiforbruk enn de fossilbaserte. Dette skyldes i hovedsak det store energiforbruket knyttet til produksjon av drivstoffene fra råstoffet.
- Elbilen – hvor elektrisiteten er produsert fra vannkraft – utgjør et noe spesielt tilfelle. Denne energikjeden fremstår med det klart laveste energiforbruket av alle de vurderte energikjedene. Likevel skal man være varsom med å sammen-

³⁶ I tillegg til NO_x har vi også inkludert en del andre lokale utslippskomponenter (for eksempel partikler).

likne elbilen med de andre kjøretøyene, fordi elbilen fremdeles sliter med langt lavere rekkevidde. Sett i forhold til de andre energikjedene er dermed elbilen å betrakte som "et annet type kjøretøy" og vil dekke andre behov. Av denne grunn er elbilen langt på vei holdt utenfor i analysene og konklusjonene.

Klimagasser

- Uten unntak fremstår alle de inkluderte energikjedene – fossil-, vannkraft- og biomassebaserte – med lavere utslipp av klimagasser enn basiskjeden. Det finnes således en rekke muligheter for å redusere utslippene av klimagasser for personbiltransport i forhold til dagens situasjon.
- Ikke uventet er det de biomassebaserte energikjedene som fremstår med de laveste utslippene av klimagasser. På tross av til dels betydelige utslipp av metan og lystgass i enkelte delprosesser, ligger WTW-utslippene av klimagasser fra disse energikjedene likevel et sted mellom 5 til 10% av de fossilbaserte energikjedene.
- Bruk av naturgass direkte i konvensjonelle motorer innebærer en reduksjon av klimagasser i størrelsesorden 25% i forhold til basiskjeden. I forhold til diesel er det imidlertid lite som taler for en introduksjon av naturgass. De to kjedene kommer noenlunde likt ut. Dermed vil en overgang fra basiskjeden til diesel-drevne personbiler være et like godt klimatiltak som en overgang til naturgassdrevne personbiler.
- Under ellers like betingelser fremstår brenselcellen med et potensiale til å redusere utslippene av klimagasser. Igjen er dette under forutsetning av at det er mulig å realisere en høy virkningsgrad for brenselcellen under virkelig trafikk (og ikke bare under stasjonære betingelser).

Lokale utslipp: NO_x

- Uten unntak fremstår alle de inkluderte energikjedene – fossil-, vannkraft- og biomassebaserte – med lavere utslipp av NO_x enn basiskjeden. Det finnes således en rekke muligheter for å redusere disse utslippene for personbiltransport i forhold til dagens situasjon. Dette gjelder under den betingelse at det er mulig å redusere NO_x-utslippene fra dieselmotoren til det samme nivå som for ottomotoren innen tiårsperioden. Det er ennå ikke dokumentert at dette lar seg gjøre i praksis.
- Det er for lokale utslipp at hydrogen og brenselcellens fordeler kommer til sin rett. Under optimale betingelser har denne kombinasjonen ingen utslipp av NO_x (eller partikler for den del).
- Blant de resterende energikjedene kommer naturgassalternativene nest best ut, mens de råolje- og biomassebaserte energikjedene har de høyeste utslippene av NO_x.

Samlet vurdering

Vurderingene her skal i første rekke rette seg mot spørsmålet: Har hydrogen i kombinasjon med brenselcelle de miljømessige egenskapene som gjør det til fremtidens drivstoff? *Dessverre – får man vel nesten si - er det ingen av de vurderte energikjedene som samtidig kommer best ut målt etter alle de tre kriterier vi har anvendt her.* En helhetlig vurdering må dermed basere seg på en vurdering av hva man oppfatter som det viktigste miljøproblemet. Konklusjonene må dermed bli som følger:

- Hvis målsetningen er å *øke energieffektiviteten* i kjedene, fremstår hydrogen og brenselcelle som et av flere alternativer for økt effektivitet i forhold til basiskjeden. Det avhenger imidlertid av at brenselcellens teoretisk høye virkningsgrad lar seg realisere i en personbil. Mer moderate anslag tyder på at det er lite å hente for brenselcelle og hydrogen i forhold til for eksempel hybridisering av konvensjonelle motorteknologier. Ellers så er det verdt å merke seg at hybridisering av konvensjonell motorteknologi bidrar til en betydelig energieffektivisering.
- Hvis målsetningen er å *reducere utslippene av klimagasser*, har bruk av naturgassbasert hydrogen i en brenselcelle et stort potensial. Igjen er man imidlertid avhengig av at det teoretiske potensialet faktisk lar seg realisere. En betydelig reduksjon av klimagasser er bare mulig dersom utgangspunktet er ikke-fossile, fornybare energikilder. Dette gjelder uavhengig av om man anvender konvensjonell motorteknologi eller brenselceller.
- Hvis målsetningen er å *reducere utslipp av lokale luftforurensninger* i våre byer og tettsteder, fremstår brenselcelle i kombinasjon med hydrogen som et svært godt alternativ. Her må brenselcellen imidlertid finne seg i å konkurrere med gange, sykkel, elbiler og kollektive transportmidler.

7.2. Kunnskapsstatus

I dette kapittelet skal vi gi en vurdering av kunnskapsstatusen når det gjelder energi- og miljødata for transport i år 2010. Vi opererer med tre kategorier, hhv. robust datagrunnlag, usikkert datagrunnlag og mangelfullt datagrunnlag.

Med et *robust datagrunnlag* mener vi at kunnskapen er av en såpass sikker karakter at det er mulig å legge den til grunn for eventuelle strategier for bruk av alternative drivstoffer i transportsektoren. Det er riktignok ikke slik at robust skal oppfattes som sikker kunnskap. Vi snakker uansett her om en situasjon om vel 10 år, og det vil naturlig nok alltid være en viss grad av usikkerhet om hva som vil skje. På tross av det reflekterer robust kunnskap at det er stor grad av konsensus om metoder, datagrunnlag og konklusjoner på området.

Med *usikkert datagrunnlag* mener vi at det finnes mye kunnskap både om metoder og de faktiske data. Datagrunnlager er imidlertid ikke av en slik karakter at man kan påberope seg konsensus. Det er sprikende resultater og til en viss grad uenighet om de metodene som benyttes. Det er dessuten slik at vi her kan stå overfor enkeltresultater og ikke flere kilder som peker i samme retning.

Med et *mangelfullt datagrunnlag* mener vi her områder hvor det finnes lite eller ingen data og dessuten stor spredning i de data som foreligger

Robust kunnskap

- Det er stor konsensus om WTW-energibruk og utslipp av CO₂ for bruk av de mest aktuelle alternative drivstoffene i personbiler. Både når det gjelder de rå-olje-, naturgass- og biomassebaserte energikjedene peker datagrunnlaget i samme retning. Dette gjelder både for prosessene WTT og energibruken i selve kjøretøyet (TTW). Et usikkerhetsmoment er imidlertid brenselcellens virkningsgrad (omtales under).
- Her skal det legges til at mye av datagrunnlaget er fremskaffet ved hjelp av såkalte datasimuleringer, og at disse må følges opp med målinger under virkelig kjøring. Naturlig nok kan dette vanskelig la seg gjøre før teknologien er ferdig utviklet. Likevel er det stor konsensus i det tilgjengelige datamaterialet internasjonalt.
- Det er tilsvarende stor konsensus når det gjelder utslipp av de regulerte avgassene (HC, CO, NO_x og partikler) fra konvensjonelle og alternative drivstoffer fra kjøretøyet (TTW). Dette gjelder både for personbiler og for tyngre kjøretøy. Årsaken til dette er først og fremst at det allerede nå foreligger utkast til kommende avgasskrav helt fram til 2008. Slike avgasskrav gir en tydelig indikasjon på hvor nivået på avgassutslippene kommer til å ligge.

Usikkert datagrunnlag

- Det finnes mye data omkring energibruk og utslipp av CO₂ fra busser og tyngre lastebiler. Per i dag er disse data imidlertid ikke av en like god kvalitet som for personbiler, noe som først og fremst skyldes mangel på datasimuleringer for slike kjøretøy.
- Det er usikkerhet knyttet til brenselcellens virkningsgrad. Dette har konsekvenser for både energibruk og (WTT-)utslipp av CO₂. Usikkerheten skyldes først og fremst om brenselcellens - isolert sett - teoretisk høye virkningsgrad lar seg realisere når den plasseres inn i et kjøretøy i virkelig trafikk.
- Utslipp av andre klimagasser enn CO₂ (CH₄ og N₂O) er usikkert for alle kjøretøykategorier. Det gjelder også for delprosessene WTT. Nå er det imidlertid slik at utslippene av CO₂ er svært dominerende når det gjelder de samlede klimagassutslippene (CO₂-ekvivalenter). Dermed vet vi trolig allerede nok om klimaeffekten av de ulike drivstoffene.

Mangelfull kunnskap

- Datagrunnlaget for såkalte "uregulerte utslipp" (for eksempel aldehyder, 1,3-butadien, benzen, PAH etc.) fra veibasert transport er svært mangelfullt. Det gjelder særlig for alternative drivstoffer, men også for de konvensjonelle drivstoffene.

- Når det gjelder bruk av brenselcelle er det etter vår vurdering mangelfull kunnskap, og dermed behov for mer kunnskap på særlig to områder. For det første trengs det mer kunnskap om de miljømessige konsekvensene av såkalte ”direkte brenselceller”, det vil si brenselceller som anvender for eksempel metanol, bensin eller diesel direkte uten å gå veien om en reformering til hydrogen. For det andre er det grunn til å tro at det til bruk av brenselcelle kan knyttes andre miljøkonsekvenser enn de som er omhandlet her. I visse brenselcelletyper vil vannmolekylene som frigjøres være i gassform. Når vannmolekyler kondenserer dannes aerosoler. Aerosoler fungerer som kondensasjonskjerner for andre former for luftforurensing ved at gassformige forbindelser i lufta kan kondensere på aerosolene. Dette vil kunne gi bidrag til smog-dannelse. Dermed kan det ikke utelukkes at store utslipp av aerosoler fra brenselceller kan gi økt forekomst av smog i framtida. Dette vil i så fall ha en rekke alvorlige helse- og miljøkonsekvenser.
- Det er mangelfullt datagrunnlag knyttet til arealkonsekvensene ved bruk av alternative drivstoffer. Etter vår vurdering er dette miljøproblemet underkommunisert i studiene som foreligger av alternative drivstoffers energi- og miljøkonsekvenser.
- Det er lite tilgjengelig data omkring energi- og miljøkonsekvenser ved bruk av alternative drivstoffer i skip. Dette skyldes tre forhold. For det første har utprøvingen av nye drivstoffer i skip kommet vesentlig kortere enn for veibasert transport. For det andre finnes det ikke spesifiserte avgasskrav for båter på lik linje med veitransport. For det tredje er det snakk om et svært stort antall ulike båter og dessuten mangel på det man kan kalle spesifiserte ”kjøresykluser” som man kan måle og sammenlike etter. Det gjenstår med andre ord mye arbeid før man kan si noe sikkert om konsekvensene av bruk av alternative drivstoffer i ulike typer skip.
- Det er etter vår vurdering mangelfull kunnskap om utslippene av såkalte ultrafine og nanopartikler fra konvensjonelle og alternative drivstoffer og - motorteknologier.

7.3. Forslag til videre arbeid

Basert på gjennomgangen i forrige kapittel, mener vi det særlig er grunnlag for å gå videre på følgende områder:

Brenselcellens virkningsgrad og utslipp:

- Hvilken virkningsgrad er det mulig å oppnå i en hydrogen-brenselcelledrevet personbil i virkelig trafikk?
- Hvilke forskjeller i virkningsgrad finner vi mellom bruk i hhv. lette og tunge kjøretøy?
- I hvilken grad er brenselcelle aktuell for bruk i tog og båter?
- Hva er virkningsgrad og utslipp fra brenselceller hvor metanol brukes direkte uten å reformeres til hydrogen?

-
- Hvor stort utslipp har en reformer som omdanner for eksempel metanol til hydrogen i kjøretøyet?

Biomassebaserte energikjeder

- Hvilke andre biomassebaserte energikjeder er interessante i en WTW-analyse (avfall, deponigass etc.)?
- Hva er de energi- og miljømessige konsekvensene ved bruk av slike biomassebaserte energikjeder (andre enn de som er omtalt her)?

Uregulerte utslipp

- Hvor store er de såkalte ”uregulerte avgassutslippene” fra henholdsvis konvensjonelle og alternative drivstoffer?

Arealbruk

- Hvilke arealmessige konsekvenser har bruk av alternative drivstoffer sammenliknet med de konvensjonelle?

Partikkelutslipp

- Hvor store utslipp har ulike drivstoffer og motorteknologier av såkalte ultrafint partikler (<2.5µm)

REFERANSER / LITTERATUR

- ACEA (2002) *Monitoring of ACEA's commitments on CO₂ Emission Reduction from Passenger Cars (2001)*. Final report, 25 June 2002. the European Automobile Manufactures Assosiation.
- Andersen, O. (1998) *Svevestøv fra persontransport i Oslo. En beregning av kostnader og mengder*. VF-rapport 14/98. Sogndal: Vestlandsforskning.
- Andersen, O. (2002) *Brenselceller*. (kommer). Sogndal: Vestlandsforskning.
- Bang, J. R. (1995) *Uregulerte utslipp i bilavgasser*. Oslo: teknologisk Institutt.
- Bang, J. R. og Holden, E. (1991) *Energiforbruk og relative CO₂-utslipp ved utvinning, produksjon, distribusjon og bruk av tradisjonelle- og alternative drivstoffer - En helhetlig vurdering*. Oslo: Teknologisk Institutt.
- Bang, J. R. og Holden, E. (1993) *Elektriske biler - en utslippsanalyse*. Oslo: Teknologisk Institutt.
- Bang, J. R. , Figenbaum, E. og Holden, E. (1992a) *Anvendelse av naturgass i transportsektoren - del 2.1*. Oslo: Teknologisk Institutt.
- Bang, J. R. , Figenbaum, E. og Holden, E. (1992b) *Anvendelse av naturgass i transportsektoren - del 2.2*. Oslo: Teknologisk Institutt.
- Bang, J. R. , Figenbaum, E. og Holden, E. (1992c) *Anvendelse av naturgass i transportsektoren - del 3*. Oslo: Teknologisk Institutt.
- Blinge, M. (1993) *Energilogistikk – livscykelanalys av drivmedel*. Rapport 18. Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för transportteknik. Göteborg.
- COWI (1992) *Forstudie til livscyklusanalyse inden for transportsektoren*. Lyngby, COWIconsult.
- COWI (1994) *Livscyklusvurdering af biler. Miljøhensyn ved innkøb og optimal livslængde (et forprosjekt)*. Arbeidsrapport. Lyngby, COWIconsult.
- DeLuchi (1991) *Emission of Greenhouse Gases from the Use of Transportation Fuels and Electricity. Volum 1: Main Text*. Mark A. DeLuchi. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory. November 1991.
- DeLuchi (1993) *Emission of Greenhouse Gases from the Use of Transportation Fuels and Electricity. Volum 2: Appendixes A-S*. Mark A. DeLuchi. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory. November 1993.

- Ecotrafic (1992) *The life of fuels. Motor fuels from source to end use*. Arne Johansson m.fl.. Ecotrafic, Stockholm
- Ecotrafic (1999) *Avgasemissioner från lätta fordon drivna med olika drivmedel. Effekter på hälsa, miljö og energianvänding*. KFB-Rapport 1999:38. Stockholm: Kommunikationsforskningsberedningen.
- Ecotrafic (2001a) *Systemeffektivitet för alternativa drivmedel. Olika drivmedel och drivsystem/motorer i ett livscykelperspektiv 2012*. Vägverket, publikation 2001:39..
- Ecotrafic (2001b) *Well-to-wheel efficiency for alternative fuels from natural gas or biomass*. Ecotrafic ERD³ AB.
- Egebäck, K-E., Ahlvik, P. og Westerholm, R. (1997) *Emissionsfaktorer för fordon drivna med fossila respektive alternative bränslen. Huvudrapport*. KFB-Meddelande 1997:22. Stockholm: Kommunikationsforskningsberedningen.
- Figenbaum, E. (1995) *Biodiesel - en livsløpsanalyse*. Oslo: Teknologisk Institutt.
- Figenbaum, E., Bang, J. R. og Holden, E. (1995) *Hybridbiler. Teknikk, miljøegenskaper*. Oslo: Teknologisk Institutt.
- GM (2001a) *Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – North American Analysis (Volume 2)*. General Motors Corporation.
- GM (2001b) *Well-to-Tank Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Transportation Fuels – North American Analysis (Volume 3)*. General Motors Corporation.
- GM (2002) *Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A European Study*. General Motors Corporation.
- Holden, E. (1992a) “Alternative use of natural gas as a fuel in the transportation sector - a cradle to grave analysis”. I: *The 3rd biennial international conference on natural gas vehicles, INGV-92 (Proceedings)*, Göteborg.
- Holden, E. (1992b) “The use of natural gas in the transportation sector”. I: *Proceedings from the European Applied Research Conference on natural gas (EU-ROGAS'92)*, Trondheim.
- Holden, E. (1993) *Energiforbruk og avgassutslipp ved produksjon og drift av personbiler*. Oslo: Teknologisk Institutt.

Holden, E. (1996a) ”Den miljøvennlige bilen - finns den ?”, I: *ProSus - tidsskrift for et bærekraftig samfunn* 4/96.

Holden, E. (1996b) ”Transport: areal-, forurensnings-, energi-, ressurs- eller mobilitetsproblem?”. I: *Miljø- og ressursbruk. Hvilket regnskap skal vi kreve?* Notater fra foredragsholdere på NaFo-konferansen i Vika Atrium, Oslo 26. og 27. September 1996. NaFo - Norsk Naturforvalterforbund.

Holden, E. (1997a) *Alternative drivstoffer i bybusser - hva bør man velge ?* VF-rapport 1/97. Sogndal: Vestlandsforskning.

Holden, E. (1997b) ”Er miljøbilen bærekraftig ?” I: Konferansedokumentasjon *Nordisk Miljøbil 97*, Siddis Centre, Stavanger 26-29 august 1997.

Holden, E. (1998a) ”Er miljøbilene bærekraftige ?”, I: *Samferdsel*, nr. 10, desember 1998.

Holden, E. (1998b) *Beregningsmodell for alternative drivstoffer i transportsektoren – dokumentasjonsrapport*. VF-notat 19/98. Sogndal: Vestlandsforskning.

Holden, E. (1998c) *Energi- og miljømessige konsekvenser ved bruk av alternative drivstoffer i personbiler - en kunnskapsstatus*. Notat. Sogndal: Vestlandsforskning.

Holden, E. (1998d) ”Bærekraftig mobilitet – illusjon eller reell mulighet?” I: *Veg og Trafikk 98* (Proceedings), Trondheim 2. og 3. September 1998.

Høyer, K. G. og Heiberg, E. (1993): *Persontransport - konsekvenser for energi og miljø*. Rapport 1/93. Sogndal: Vestlandsforskning.

Keiserås Bakkane, K. (1994) *Life Cycle Data for Norwegian Oil and Gas*. Trondheim: Tapir.

Kjeldegaard, K. (1992) *Livscyklusanalyse af den danske transportsektor*. Danmarks Miljøundersøkelser, afdeling for systemanalyse.

Larminie, J. and Dicks, A. (2000) *Fuel Cell Systems Explained*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.

MIT (2000) *On the Road in 2020. A life-cycle analysis of new automobile technologies*. Energy Laboratory Report #MIT EL 00-003. Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.

Selvik, E. og Bang, J. (2000) *Miljøvennlig teknologi for kollektivtrafikk i Bergensområdet. Temanotat: Utslipps- og kostnadskarakteristika for aktuell teknologi*. Civitas/Bang Consult.

Sørensen, K. H. (2002) ”Synlige hender? Om forholdet mellom politiske virkemidler og teknologiutviklingen innenfor energi og miljø” *Energikonferansen 2002*, Dømmesmoen.

UPI (1993) *Öko-bilanzen von Fahrzeugen*. Umwelt- und Prognose-Institut Heidelberg e.V.

VF/TI (2002) *Beregningsmodell for alternative drivstoffer i transportsektoren – dokumentasjonsrapport*. VF-Notat 19/98 (oppjusteres i løpet av høsten 2002). Vestlandsforskning og Teknologisk institutt.

VFF (1987) *Vår felles fremtid*. Verdenskommisjonen for miljø og utvikling. Oslo: Tiden Norsk Forlag.

Åhman, M. (1999) *Teknikk för energieffektiva personbilar*. KFB-Meddelande 1999:22. Stockholm: Kommunikationsforskningsberedningen.

Vedlegg 1:

**DATA FOR MILJØPARAMETRE-
NE FOR DE ULIKE ENERGIKJE-
DENE**