Alternative drivmidler

Energistyrelsen

September 2014

ISBN www: 978-87-7844-923-8

Energistyrelsen

Amaliegade 44

1256 København

www.ens.dk

Alternative drivmidler

Energistyrelsen

September 2014

Indholdsfortegnelse

1 Sammenfatning 3

1.1 Formål og baggrund 3

1.2 Analyseramme og afgrænsning for AD modellen 3

1.3 Vurderede drivmidler og drivlinjer 4

1.4 Forudsætninger og usikkerhed 5

1.5 Kort sammenfatning af resultater 5

1.6 Detaljeret gennemgang af resultater 6

1.7 Ændringer i resultater i forhold til tidligere version af AD modellen 24

2 Indledning og baggrund 25

2.1 Formål 25

2.2 Indhold 26

3 Valg af drivmidler og drivlinjer 27

4 Beskrivelse af analysemetode 30

4.1 Emissioner 30

4.2 Energieffektivitet 33

4.3 SØK 34

4.4 Teknologifremskrivning 35

5 Centrale antagelser om udviklingen indtil 2050 37

6 Usikkerheder 40

7 Resultater 42

8 Referencer 43

# Sammenfatning

## Formål og baggrund

Denne rapport fungerer som dokumentation og formidling af resultater fra Alternativ Drivmiddelmodellen (AD modellen).

Udviklingen af AD modellen blev igangsat på baggrund af mandat i Energiaftalen fra 2008, og forlænget i Energiaftalen fra 2012 med det formål at give vurderinger af de samlede miljøbelastninger, energieffektivitet og samfundsøkonomiske omkostninger ved anvendelse af forskellige drivmidler anvendt i forskellige transportmidler på specifikke tidpunkter i perioden frem til 2050. Målsætningen for AD modellen er således, at den skal bruges til at vurdere miljømæssige, energieffektivitesmæssige og samfundsøkonomiske alternativer til opfyldelsen af 2020 og 2050 målsætningerne for transportsektoren[[1]](#footnote-1).

AD modellen skal kan forstås som teknologianalyse, hvor ensartede transportmidler (lette køretøjer, busser, lastbiler, tog, skibe og fly) udstyres med forskellige drivlinjer og drivmidler.

AD modellen har gennemgået flere opdateringer. I denne version er analysemodellen bl.a. blevet udvidet med fly, skibe og toge samt fremskrevet helt frem til 2035 og 2050.

Version 3.0 af AD modellen relaterer til denne rapport.

## Analyseramme og afgrænsning for AD modellen

AD modellen tager et såkaldt well-to-wheel (W-t-W) perspektiv hvor alle energiforbrug og emissioner forbundet med produktion og anvendelse af drivmidlet er medtaget, helt fra produktion af råvarerne til dets anvendelse i køretøjet. Tilgangen indebærer, at der medtages drivhusgasudledninger både i Danmark og udenfor landet, typisk i forbindelse med produktion af råvarer. AD modellen er udformet, så det tilnærmelsesvist er muligt at identificere de danske udledninger, hvilket vil have betydning for en vurdering af, hvor meget de enkelte drivmidler belaster det danske klimaregnskab.

I forhold til de samfundsøkonomiske omkostninger er der medregnet omkostninger til produktion og vedligeholdelse af køretøjet, til råvarer og produktion af brændstoffet, til distribution af drivmidlet, samt omkostninger af udledninger af CO2 og lokal luftforurening samt støj. Disse omkostninger er beregnet uden skatter og afgifter.

Der er tale om en vurdering af enkeltteknologier og disses omkostninger, mens omkostninger til udvikling, regulering, implementering, samt den risikopræmie, som virksomheder måtte kræve for at udvikle og realisere især de mindst modne teknologier af teknologierne, ikke indgår. Der tages i beregningerne udgangspunkt i at de vurderede teknologier allerede er implementeret i et rimeligt omfang, således at den nødvendige infrastruktur for anvendelse af en given drivlinje er på plads. De ekstra infrastrukturomkostninger forbundet med implementeringen af yderligere køretøjer er således medtaget i AD modellen men antaget udnyttet på effektiv vis. Øgede omkostningerne ved lav udnyttelsesgrad i opbygningsfasen er derfor ikke medtaget.

Analysen af drivmidlerne er *partiel*, idet der fokuseres på de enkelte teknologier hver for sig og under ensartede forudsætninger.

Der er ikke indregnet forskellige mulige systemfordele for visse drivmidler, der har potentiale til at kunne levere ekstra og økonomisk værdifulde ydelser til andre dele af samfundet, herunder energisektoren, eksempelvis i forhold til indpasning af vindkraft, ved nyttiggørelse af bio-kulstof eller i et VE-balancerende gasnet.

En yderligere metodemæssig gennemgang kan ses i rapportens kapitel XX

## Vurderede drivmidler og drivlinjer

Der findes et stort antal alternative drivmidler, ligesom der findes en række forskellige måder at producere disse drivmidler på. Ligeledes kan hver type af transportmidler udstyres med forskellige drivlinjer og hermed anvende flere forskellige typer drivmidler. Kombinationen af drivmiddel, herunder dennes specifikke produktionsmetode, og transportmiddel med en specifik drivlinje betegnes i det følgende som ’spor’. Antallet af mulige spor er meget stort, og det har ikke været muligt at dække alle i AD modellen. Valget af spor er baseret på hensyn omkring sporets realiserbarhed i større skala, politiske målsætninger, samt ønsket om at favne bredt.

AD modellen indeholder 36 forskellige spor, fordelt på

* 14 personbiler
* 4 lastbiler
* 4 busser
* 6 på skibe
* 6 på tog
* 2 på fly

Som bruger af AD modellen er det endvidere muligt selv at oprette nye spor. Vejledning kan findes i appendix XX

Sammenligneligheden på tværs af de forskellige typer af drivlinjer indenfor en given type transportmiddel er i videst muligt omfang gjort ved at anvende standardiserede transportmidler. Det betyder, at f.eks. en elbil og en benzinbil er ens bortset fra de elementer i bilen som relaterer sig til bilens drivmiddel.

## Forudsætninger og usikkerhed

Beregningerne og resultaterne baseres på et stort antal forudsætninger om køretøjsteknologier, teknologier til produktion af drivmidler, priser og omkostninger, energiforbrug mv. Resultaterne er derfor behæftet med relativt store usikkerheder, specielt når der er tale om nye teknologier og lange tidshorisonter.

Modellen og dens forudsætninger har været præsenteret for en række aktører gennem en høringsproces i efteråret 2014. Resultaterne af høringen er i vidt omfang medtaget i modellen og dens forudsætninger.

En gennemgang af de mest signifikante usikkerheder og deres betydning for de samlede resultater er gennemgået i rapportens kapitel XX

## Kort sammenfatning af resultater

Sammenlignet med de konventionelle alternativer giver særligt biogas og 2. generations biodiesel og biokerosen (til fly) fremstillet af halm meget store reduktioner i CO2 udledningerne. El (og herunder brint produceret på el), metanol, DME samt 2. generation bioætanol leverer også store reduktioner. Vurderede 1. generations biobrændstoffer og naturgas (CNG og LNG) resulterer generelt i CO2 udledninger på linje med diesel og benzin[[2]](#footnote-2). Disse konklusioner er konstante over analysens tidsperspektiv, med den undtagelse at biogas i 2050 bliver lidt mindre attraktiv (dog stadig meget attraktiv). Dette skyldes at biogaspotentialet her antages at være udnyttet fuldt ud og en yderligere brug indenfor transportsektoren blot vil forskyde forbruget fra andre anvendelser.

De elbaserede drivmidler er de mest energieffektive på grund af en høj virkningsgrad i motoren. Sporet hvor metanol anvendes i brændselsceller har også en relativ høj effektivitet. Blandt de øvrige, er spor baseret på dieselmotorer mere effektive end spor baseret på benzin/Otto-motorer, på grund af dieselmotorens bedre virkningsgrad. Disse konklusioner er også konstante over analysens tidsperspektiv.

I forhold til de samfundsøkonomiske omkostninger, er de mest markante forskelle mellem de vurderede spor, at diesel, biodiesel og LNG til skibe er væsentligt mindre omkostningstunge end HFO, hvilket skyldes et fald i lokal luftforurening ved anvendelse af disse drivmidler. Herudover er biokerosen et dyrere flybrændstof end konventionel kerosen. Disse konklusioner er konstante over analysens tidsperspektiv. Herudover ses, at hvor brændselscellebiler i dag er mere omkostningstunge end andre alternativer, forventes disse, sammen med særligt elbiler og plugin hybridbiler, at blive noget billigere end alternativer i 2035 og 2050. Ud over disse forskelle er de samfundsøkonomiske omkostninger ved de undersøgte alternativer indenfor personbiler, tung transport, toge, busser og fly, sammenlignelige.

Samlet set indikerer disse resultater at der i forhold til personbiler er et stort potentiale i forhold til såvel samfundsøkonomi, energieffektivitet og klimapåvirkninger ved anvendelse af el- og brændselscelledrivlinjer. I forhold til opfyldelsen af 2020 målsætningen er disse teknologier dog udfordret ved en lav udbygning af infrastrukturen, og lave produktionsvoluminer af køretøjer, som betyder at de omkostninger som er angivet her, i forhold til dette tidsperspektiv, er for positive. Her kan iblanding af 1. generations bioætanol og 2. generations bioætanol og biodiesel baseret på halm og træ levere en løsning som samfundsøkonomisk er sammenlignelig med konventionelle drivmidler og som samtidig kan levere den nødvendige klimaeffekt.

På længere sigt, og i forbindelse med opfyldelsen af 2050 målsætningen er der dog ingen tvivl om at el og brændselscelledrivlinjer igennem deres relativt lave omkostninger, høje energieffektivitet og klimavenlige profil er meget attraktive løsninger. Herudover medfører de kun i meget ringe grad et øget pres på biomasseressourcerne, hvis disse drivmidler er produceret på baggrund af el produceret fra vind og sol.

For de øvrige transportmidler er konklusionerne på tværs af omkostninger, emissioner og effektivitet mindre klare. Generelt tegner der sig det billede at særligt 2. generations biobrændstoffer er klimamæssigt fordelagtige, men generelt ikke billigere end konventionelle drivmidler, og i visse tilfælde væsentlig dyrere.

## Detaljeret gennemgang af resultater

### Personbiler

I nedenstående 3 figurer vises samfundsøkonomiske omkostninger, drivhusgasemission og energieffektivitet for personbiler. Efter hver figur gives en kort analyse af resultaterne. Afslutningsvis drages overordnede konklusioner for personbilerne.

Figur 1: *Samfundsøkonomiske omkostninger for personbiler, kr./km 2015,2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

Et meget centralt resultat for personbiler er, at de samfundsøkonomiske omkostninger ved drivlinjerne anvendende forbrændingsmotorer, er meget ens, både på tværs af spor og tid. Årsagen til dette er, at omkostninger forbundet med drivlinjen og vedligehold, som udgør klart de største poster, er meget sammenlignelige.

De forskelle i omkostninger som faktisk ses mellem personbilerne anvendende (tilpassede) benzin og dieselmotorer opstår således primært som følge af forskelle i pris på drivmiddel og eksternaliteter som tilsammen udgør mindre poster.

Det skal dog understreges at omkostningerne for biobrændstoffer baseret på cellulose og lignocellulose, som er nye teknologier, er usikre og derfor bør tages med forbehold.

Brændselscelle- og brændselscellehybridbilerne, elbilen og plugin hybridbilen adskiller sig fra ovenstående. Her ses markant fald i omkostninger over tidsperioden. En vigtig komponent heri for alle disse biler er antagelsen om at batteriprisen pr. kwh forventes at falde med 75% i 2050 i forhold til 2015 prisen. Prisen for batteriet medregnes i vedligeholdelsesomkostningen på bilen. Tilsvarende prisfald forventes for brændselsceller og reformeren anvendt i metanol brændselscellebilen. Dette betyder at hvor brændselscelle- og brændselscellehybridbilerne er dyrere end konventionelle alternativer i 2015, forventes disse at blive billigere end konventionelle alternativer i 2035 og 2050. Elbiler som allerede i 2015 er sammenlignelige med konventionelle alternativer forventes at blive væsentlig billigere end disse i 2035 og 2050.

Det skal dog her understreges i forhold til elbilen at omkostningerne er baseret på en rækkevidde på 150-200 km, hvilket giver noget lavere omkostninger til batteri, end hvis den skulle have samme rækkevidde som konventionelle alternativer.

De lave eksternalitetsomkostninger forbundet til brændselscelle- og elbiler skyldes, at der ikke er skadelige emissioner fra disse biler og at støjen er lav, sammenlignet med konventionelle køretøjer. Samtidig er der lave eksternalitetsomkostninger forbundet med produktionen af el, som ud fra et langtidsmarginalperspektiv hovedsageligt er antaget at blive produceret via vindmøller (se afsnit XX).

Figur 2: *Drivhusgasemissioner fra personbiler, g CO2 ækv./km 2015,2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

Resultaterne for personbilernes drivhusgasemissioner viser, at der er meget store forskelle på de samlede well-to-wheel emissioner for forskellige spor. Biogas og 2. generations biodiesel fremstillet af halm har i størstedelen af den dækkede periode direkte negative emissioner. Herudover er der i forhold til konventionelle alternativer meget store reduktionspotentialer ved anvendelsen af elbiler, brændselscellebiler anvendende brint fremstillet via elektrolyse eller metanol fremstillet fra træ, samt ved anvendelsen af DME-biler. Emissionen fra ætanol-sporene, som er baseret på E85 er i høj grad påvirket af iblandingen af benzin. Dette gælder særligt for halmbaseret hvedeætanol, som ville have et samlet drivhusgasudslip på omkring 20 g/km, havde det ikke været for iblandingen af 15 % benzin. Sporen anvendende hvede- og sukkerroeætanol ville ligeledes være lavere uden denne iblanding.

Den negative emission fra biogas og 2. generation biodiesel baseret på halm skyldes for biogassens vedkomne antagelsen om at alternativanvendelsen af den i biogassen anvendte gylle i 2015, 2020 og 2035 ville være ubehandlet udspredning på marker med et relativt højt metanudslip til følge. Dette udslip undgås ved anvendelsen af gyllen til fremstilling af biogas. I 2050 antages biogaspotentialet at være udnyttet fuldt ud og en yderligere brug indenfor transportsektoren blot vil forskyde forbruget fra andre anvendelser. Den negative emission fra 2. generations biodieselen fremstillet på halm skyldes primært såvel den lave emission knyttet til anvendelsen af halm, såvel som en betydelig biproduktion af biobenzin, som antages at substituere produktionen af hvedebaseret bioætanol. Fra denne substitution kommer også den angivne negative ILUC emission[[3]](#footnote-3).

Emissionen knyttet til fossile drivmidler er relativt sammenlignelige. Dieselbilen har dog noget lavere emission end benzinbilen, og naturgasbilen ligger midt mellem disse to alternativer. Årsagen til at naturgasbilens emission tilsvarer benzin og dieselbilens emission på trods af at naturgas har mindre kulstofindhold pr. energienhed end både benzin og diesel, skyldes naturgasbilens dårligere energieffektivitet. Emissionen fra bilerne anvendende de fossile drivmidler kommer primært fra udstødningen hvor opstrømsemissionerne for benzin og diesel udgør 11,5 – 12 %, og for naturgas 10 - 20 %. De høje opstrømsemissioner for naturgas i 2035 og 2050 skyldes antagelsen om en længere transportvej for den marginale gas.

Plugin hybridbilens emissionsprofil ligner i høj grad en nedskaleret emissionsprofilen for benzinbilen. Dette skyldes at 66 % af den anvendte energi antages at komme fra benzin og at emissionerne fra den anvendte el i plugin hybridbilen er meget små i sammenligning, og derfor kun påvirker emissionsprofilen i mindre grad.

For biobrændstofferne er det i modsætning til de fossile brændstoffer opstrøms- og ILUC emissionerne, som generelt dominerer. Emissionen fra udstødningen fra biobrændstofferne er sat til 0[[4]](#footnote-4), som retfærdiggøres ved at der heller ikke medregnet et optag af CO2 under dyrkningen af afgrøderne brugt til biobrændstoffremstillingen. Emissionen fra udstødningen som primært ses fra ætanolen, kommer fra den iblandede benzin i E85 drivmidlet. Herudover har biobrændstofferne en mindre emission fra udstødningen som skyldes dannelse/udslip af metan og lattergas fra forbrændingsprocessen.

Figur 3: *Energieffektivitet for personbiler i % for 2015,2020, 2035 og 2050. WtW energieffektivitet udtrykker sporets endelige energieffektivitet indregnende de samlede tab i alle dele af sporets livscyklus. Tallet til højre for hver søjle indikerer hvad 100 % svarer til i MJ og udtrykker den samlede energi der er brugt i sporet for at køre 1 km. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

Overordnet ses for personbilers energieffektivitet en energieffektivitet mellem 14 og 31 % for personbiler med forbrændingsmotorer, hvor (tilpassede) dieselmotorer generelt ligger lidt højere end gnisttændingsmotorerne. Det klart største tab for disse biler kommer fra tab i motoren. Brændselscelle- og elbilerne (herunder plugin hybrid) har en væsentlig højere energieffektivitet – mellem 37 og 70 % - hvilket i høj grad skyldes at motortabet er væsentligt mindre (plugin hybriden har dog stadig et væsentligt motortab, da det antages at benzin udgør 64 % af dens drivmiddel).

Indenfor personbilerne anvendende biobrændstoffer ses generelt det billede at energieffektiviteten er lavere end for biler anvendende fossile drivmidler, hvilket skyldes det generelt større energiforbrug ved fremstilling af biobrændstoffer end ved fossile drivmidler. Herudover ses at 1. g. brændstofferne har et relativt højt råstofudvindingstab, men et lavt råstofkonverteringstab, hvorimod forhold for 2. g. biobrændstofferne er modsat. Dette skyldes i forhold til råstofferne, at for 1. g. biobrændstofferne er disse produceret med produktionen af biobrændstoffer for øje, og tab i denne proces tilskrives biobrændstoffet. For 2. g. biobrændstoffer er råstofferne betragtet som restprodukter, og de er derfor ikke tilskrevet nogen væsentlig produktionsenergi. Konverteringen af disse råstoffer kræver dog ofte mere intensive processer, hvilket resulterer i et relativt højere energiforbrug, end for 1. g. biobrændstofferne.

Det ses endvidere at det samlede energiforbrug for et givent spor er omvendt proportionalt med energieffektiviteten, hvilket er et resultat af at personbilerne stort set har det samme mekaniske energiforbrug ved drivakslen.

#### Sammenfattende konklusioner for personbiler

Samlet set indikerer resultaterne at der er et stort potentiale i forhold til såvel samfundsøkonomi, energieffektivitet og drivhusgasemissioner ved anvendelse af el- og brændselscelledrivlinjer.

Samfundsøkonomiske omkostninger ved anvendelse af forbrændingsmotorer er generelt sammenlignelige, men der kan være meget store forskelle i drivhusgasemissioner:

Biogas og 2. generations biobrændstoffer har enten direkte negative eller meget lave emissioner mens fossile drivmidler og biodiesel baseret på raps resulterer i væsentlige positive og relativt sammenlignelige emissioner.

### Lastbiler og busser

Figur 4: *Samfundsøkonomiske omkostninger for lastbiler og busser, kr./km 2015,2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

Som det kan ses af figur 4 er samlede omkostninger for lastbiler, som alle anvender forbrændingsmotorer, igen meget sammenlignelige på tværs af drivmiddel og tid. Samme billede gør sig gældende for busser. Dette dækker dog over underliggende forskelle. Lastbiler og busser på gas har højere omkostninger til drivlinjen, men lavere omkostninger til drivmiddel. Det relativt markante fald for både lastbiler og busser mellem 2015 og 2020 skyldes hovedsageligt en antagelse omkring motorernes stigning i effektivitet og heraf faldende omkostninger til drivmiddel, samt et fald i eksternalitetsomkostninger som skyldes implementering af strengere Euronormer med lavere NOx og partikelemission til følge. De lidt højere eksternalitetsomkostninger fra lastbiler og busser anvendende biodiesel skyldes en 20 % forøget emission af NOx som dog til dels bliver modsvaret af et fald i SO2 på 10 %.

Figur 5: *Drivhusgasemissioner fra lastbiler og busser, g CO2 ækv./km 2015,2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

I forhold til emission af drivhusgasser for lastbiler og busser ses en variation ved anvendelsen af drivmidlerne, som er meget sammenlignelig med variationen i drivhusgasudledninger set for personbiler.

Emissionen fra hybridbussen, som udover en dieselmotor inkluderer en elektromotor og et internt ladet batteri, er noget lavere end fra diesel, hvilket skyldes at denne antages at have en energieffektivitet som er 31 faldende igennem analysens tidsspænd til 25 % højere end en dieselbus.

Figur 6: *Energieffektivitet for lastbiler og busser i % for 2015,2020, 2035 og 2050. WtW energieffektivitet udtrykker sporets endelige energieffektivitet indregnende de samlede tab i alle dele af sporets livscyklus. Tallet til højre for hver søjle indikerer hvad 100 % svarer til i MJ og udtrykker den samlede energi, der er brugt i sporet for at køre 1 km. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

I forhold til energieffektiviteten for lastbiler og busser ses, at diesel er mere energieffektivt end gas. Dette skyldes primært den lavere energieffektivitet af gasmotoren, og i mindre grad tabet ved komprimering af gassen (her kaldet mellemkonverteringstab). Herudover ses igen at biobrændstoffer har en lavere energieffektivitet end fossile drivmidler grundet større råstofudvindingstab og –konverteringstab. Endelig ses en noget højere energieffektivitet ved brug af hybridteknologi indenfor busser, som skyldes højere motorvirkningsgrad, som nævnt ovenfor.

Den gradvise forbedring af energieffektiviteten over tid skyldes antagelsen om teknologiudvikling som fremmer energieffektivitet indenfor de viste teknologier.

#### Sammenfattende konklusioner for lastbiler og busser

Samlet set er der en variation i resultaterne ved anvendelse af drivmidlerne i lastbiler og busser, som er meget sammenlignelig med variationen set for personbiler. Omkostningerne er relativt sammenlignelige på tværs af drivmidler, og emissionerne fra fossile drivmidler og biodiesel baseret på raps resulterer igen i væsentlige positive og relativt sammenlignelige emissioner, mens 2. generations DME, som her er modelleret som fremstillet på baggrund af træ, er forbundet med væsentlig mindre emissioner. Hybridteknologien indenfor busser viser et potentiale for reduktion i udslip på grund af øget energieffektivitet, men er knyttet til øgede samfundsøkonomiske omkostninger.

#### Skibe

Figur 7: *Samfundsøkonomiske omkostninger for skibe, kr./km 2015,2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

Det har i forhold til omkostninger for hurtigfærgen ikke været muligt at skaffe information omkring omkostninger for transportmidlet og drift og vedligehold.

I forhold til tidligere resultater for let og tung vejtransport, er eksternalitetsomkostningerne meget høje i forhold til drivmiddelomkostningerne. Årsagen er den højere emission af specielt NOx og partikler pr. energienhed drivmiddel. For skibe som anvender drivmiddel indeholdende svovl, er der tillige en væsentlig større emission af SO2 pr. energienhed drivmiddel anvendt, end der er for let og tung vejtransport. Emissionerne af NOx, partikler og SO2 er lavere ved anvendelse af LNG, hvilket giver væsentligt lavere samfundsøkonomiske omkostninger.

Givet disse forbehold ses at der generelt forventes lavere eksternalitetesomkostninger forbundet med skibstransporten over tid, som skyldes en forventning om lavere emissioner af NOx, SO2 og partikler. Dette skyldes antagelsen om en generel lavere hastighed for skibene over tid og et heraf mindsket energiforbrug.

Figur 8: *Drivhusgasemissioner fra skibe, g CO2 ækv./km 2015,2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

Særligt for emissionerne for skibe i sammenligning med emissionerne fra andre transportmiddeltyper antages der et større fald i brændstofforbrug over analysens tidshorisont, end for andre transporttyper. Dette skyldes både antagelsen om mere effektive motorer, men også en antagelse om lavere hastigheder, som væsentligt reducerer energiforbruget pr. km.

Ved anvendelse af 2. generations biodiesel produceret på halm ses igen en meget lavere – endog negativ – emission end ved anvendelse af fossile brændstoffer, som også set i de øvrige resultater. Dette skyldes, som tidligere nævnt den høje biproduktion af biobenzin ved 2. g. biodieselproduktionen, som antages at substituere produktionen af 1.g. bioætanol.

Emissionerne for hurtigfærgen er antaget at være konstant på grund af manglende data omkring den sandsynlige fremtidige udvikling.

Figur 9: *Energieffektivitet for skibe i % for 2015,2020, 2035 og 2050. WtW energieffektivitet udtrykker sporets endelige energieffektivitet indregnende de samlede tab i alle dele af sporets livscyklus. Tallet til højre for hver søjle indikerer hvad 100 % svarer til i MJ og udtrykker den samlede energi, der er brugt i sporet for at sejle 1 km. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

Den samlede energieffektivitet for skibe forventes stort set at være konstante, på trods af et faldende samlet energiforbrug for alle 9000 TEU skibene (se tallet til højre for hver søjle i figur 9), som skyldes antagelsen omkring den lavere hastighed for skibene, og heraf lavere energiforbrug pr. sejlet km. Energieffektiviteten udtrykker anvendelsen af primærenergi pr. leveret mekanisk energi, og dette forhold forbliver ens uanset det lavere energiforbrug fra skibet.

Som set ved de andre transporttyper er der ved anvendelse af biobrændstoffer en lavere samlet energieffektivitet, hvilket generelt skyldes energiforbruget ved råstofudvinding og/eller råstofkonvertering. Motortabet er antaget ens for 2. generations biodiesel, diesel og HFO. Forskelle i afbildningen skyldes at hver tab summeret i søjlerne angiver andelen af det samlede tab. Et enslydende motortab kan derfor blive repræsenteret forskelligt, hvis det samlede energiforbrug er forskelligt.

Ved anvendelse af LNG ses et relativt højt tab ved mellemkonverteringen af gassen. Dette tab dækker over energianvendelse til køling og komprimering.

#### Sammenfattende konklusioner for skibe

Eksternalitetsomkostningerne er for skibe generelt meget høje i forholdt til øvrige omkostninger, særligt for skibe anvendende HFO. Særligt ved anvendelse af LNG er emissionerne af NOx, partikler og SO2 noget lavere, hvilket giver væsentligt lavere samfundsøkonomiske omkostninger.

I forhold til drivhusgasudledninger ses igen, at anvendelse af 2. generations biobrændstoffer leder til store reduktioner i drivhusgasudledninger.

#### Toge

Figur 10: *Samfundsøkonomiske omkostninger for toge, kr./km togsæt, 2015,2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

Omkostningerne relateret til vedligehold af togene antaget at være konstant på tværs af togtyper og tid på grund af manglende data omkring differentiering og den sandsynlige fremtidige udvikling.

I forhold til eksternalitetsomkostninger ses igen højere omkostninger ved anvendelse af diesel end 2. g. biodiesel, som igen er højere end anvendelsen af el. Dette skyldes primært biodieselens lavere emission af SO2 og CO2, og at ellen primært antages produceret med vindmøller, som medfører lave eksternalitetsomkostninger.

I forhold til omkostninger for drivmidler ses som tidligere at omkostningerne forbundet med anvendelse af diesel er lavere end biodiesel. Dog ses også det specielle forhold at anvendelsen af el er dyrere end biodiesel, hvilket skyldes at omkostninger til ledningsnettet, der ses som en infrastrukturudgift på linje med optankningsinfrastruktur, er fordelt ligeligt over togene som anvender infrastrukturen.

#### 

Figur 11: *Drivhusgasemissioner fra togsæt, g CO2 ækv./km 2015,2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

Igen ses, at hvis drivmidlerne sammenlignes på tværs af drivlinjer, er billedet meget sammenligneligt med de øvrige transportmidler. Set i forhold til drivhusgasemissionen fra lokal toget anvendende diesel, har LNG toget en meget lav emission. Dette skyldes til dels at LNG toget er et dual fuel tog, hvor effektiviteten er på linje med en dieselmotor, samt at der ikke antages at være udslip af uforbrændt metan fra toget, hvilket er grunden til at skibet anvendende LNG har en drivhusgasemission tilsvarende skibet anvendende diesel, på trods af ens energieffektiviteter.

Figur 12: *Energieffektivitet for toge i % for 2015,2020, 2035 og 2050. WtW energieffektivitet udtrykker sporets endelige energieffektivitet indregnende de samlede tab i alle dele af sporets livscyklus. Tallet til højre for hver søjle indikerer hvad 100 % svarer til i MJ og udtrykker den samlede energi, der er brugt i sporet for at køre ét togsæt 1 km. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

Igen ses samme billede som ved forgående spor i forhold primære tab, forskelle mellem biobrændstoffer og fossile drivmidler og energieffektiviteten ved anvendelse af el som drivmiddel. Dog er forskellen mellem energiforbruget mellem et IC diesel- og et IC eltog mindre end forskellen mellem en diesel- og elbil. Årsagen til dette kan skyldes at det ikke har været muligt i forhold til togene at etablere et ”standardtog” hvor kun drivlinjen varieres mellem de forskellige toge, som det har været på personbilområdet. Det betyder at det har været nødvendigt at skalere togene i størrelse så de bliver sammenlignelige, hvilket øger usikkerhederne ved resultaterne, herunder også for deres energiforbrug.

Herudover ses også at energieffektiviteten for lokaltoge anvendende gas falder efter 2020. Dette skyldes som tidligere angivet antagelsen om at den marginale naturgas efter 2020 har længere transportvej.

#### Sammenfattende konklusioner for toge

Konklusionerne for togene er meget sammenlignelige med konklusionerne for de andre transporttyper. Dog viser anvendelsen af LNG sig at have en drivhusgasmæssig fordel, som dog i høj grad hviler på antagelsen om at LNG toget ikke leder til udslip af uforbrændt metan. Herudover viser fordelen ved el fra et energieffektivitetsperspektiv at være mindre end for personbiler, hvilket dog måske skyldes at togene er skaleret for at muliggøre sammenligning, som øger usikkerheden af resultaterne for togene.

#### Fly

Figur 13: *Samfundsøkonomiske omkostninger for fly, kr./km 2015,2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

Igen ses det generelle billede som tegner sig at biobrændstoffer (her biokerosen) har lavere og negative eksternalitetsomkostninger men højere produktionsomkostninger end de fossile alternativer. De stigende eksternalitetsomkostninger skyldes primært stigende omkostninger ved emission af drivhusgasser.

Figur 14: *Drivhusgasemissioner fra fly, g CO2 ækv./km 2015,2020, 2035 og 2050. Bemærk at opgørelsen ikke medtager drivhuseffekten af flyenes kondensstribe.*

Biokerosen fremstillet på basis af halm ses at have en negativ emission, ligesom det blev set for 2. g. diesel fremstillet på halm. Den negative ILUC emission skyldes antagelsen om at biobenzinen, som er et biprodukt fra biokerosenproduktionen, substituerer bioætanol hvortil der er relateret ILUC emissioner. Hvis forholdet i drivhusgasemissioner mellem biobrændstoffet og den fossile modpart, ses i ovenstående tilfælde at biobrændstoffet har en meget stor negativ emission hvis der sammenlignes med forholdet mellem 2. g. biodiesel og konventionel diesel. Dette skyldes primært en lavere konverteringseffektivtet fra halm til biokerosen end fra halm til 2. g. biodiesel og en tilsvarende højere biproduktion af biobenzin fra biokerosenproduktionen end fra 2. g. biodieselproduktionen. Dette betyder at der bliver produceret mere biprodukt fra biokerosen- end fra 2. g. biodieselproduktionen for at producere en given mængde drivmiddel, hvilket resulterer i en større substitution og hermed mere negativ emission.

Figur 15: *Energieffektivitet for fly i % for 2015,2020, 2035 og 2050. WtW energieffektivitet udtrykker sporets endelige energieffektivitet indregnende de samlede tab i alle dele af sporets livscyklus. Tallet til højre for hver søjle indikerer hvad 100 % svarer til i MJ og udtrykker den samlede energi, der er brugt i sporet for at flyve 1 km. Manglende søjler indikerer at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.*

For fly ses igen samme billede som ved forgående spor i forhold primære tab og forskelle mellem biobrændstoffer og fossile drivmidler.

#### Sammenfattende konklusioner for fly

Anvendelse af biokerosen ses at have en meget stor negativ emission set i forhold til fossil kerosen, hvilket skyldes den høje biproduktion af biobenzin i processen. Herudover er konklusionerne omkring fly meget sammenlignelige med konklusionerne for de andre transportmidler.

1. Som følge af Vedvarende Energidirektivet og Brændstofkvalitetsdirektivet er den nationale målsætningen til og med 2020 for transportsektoren, at 10 % af drivmidlerne skal være baseret på vedvarende energi (VE), og at drivmidlerne skal lede til en CO2 reduktion fra transportsektoren på minimum 6 %. Ud over disse målsætninger er der en national 2050 målsætning, at Danmark skal være fossilfrit og drivhusgasemissionerne skal samlet set være reduceret med 85-90 % i forhold til 1990-niveau. [↑](#footnote-ref-1)
2. Moderate ILUC udslip medregnes som udgangspunkt i de her viste udslip, med mindre andet er angivet. ILUC udslip medtages da der er generel enighed omkring at ILUC udslip er en realitet, og, på trods af store usikkerheder, at ILUC udslip på 0 regnes for mere usandsynligt end udslippene her medtaget. [↑](#footnote-ref-2)
3. Moderate ILUC udslip medregnes som udgangspunkt i AD modellen. ILUC udslip medtages da der er generel enighed omkring at ILUC udslip er en realitet, og, på trods af store usikkerheder, at ILUC udslip på 0 regnes for mere usandsynlige end udslippene medtaget her. [↑](#footnote-ref-3)
4. Ved produktionen af RME indgår omkring 10 vægt-% metanol, som antages baseret på naturgas. Denne ’sorte’ komponent i biodieselen giver en drivhusgasemission fra biodieselanvendelsen. Af modeltekniske årsager er denne komponent dog tilskrevet opstrømsemissionerne og ikke udstødningsemissionerne, som ville have været mere konsistent. [↑](#footnote-ref-4)