

Energistyrelsen  
Amaliegade 44  
1256 København  
[www.ens.dk](http://www.ens.dk)

# **Alternative drivmidler**

Energistyrelsen

Januar 2016

## Indholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Sammenfatning</b>	<b>3</b>
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	27
<b>2</b>	<b>Indledning og baggrund</b>	<b>34</b>
2.1	Formål	35
2.2	Indhold	35
<b>3</b>	<b>Valg af drivmidler og drivlinjer</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>Beskrivelse af analysemetode</b>	<b>38</b>
4.1	Emissioner	38
4.2	Energieffektivitet	41
4.3	Samfundsøkonomiske omkostninger	45
4.4	Sikring af transportmidlernes sammenlignelighed	48
4.5	Teknologifremskrivning	49
<b>5</b>	<b>Centrale antagelser om udviklingen indtil 2050</b>	<b>52</b>
5.1	Fossile brændsler	53
5.2	Biomasse	53
5.3	El- og varmeproduktion	55
5.4	Biproduktsubstitutioner	55
5.5	Udledningsnormer	56

<b>6</b>	<b>Usikkerheder</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>Referencer</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>Liste over anvendte forkortelser og definitioner</b>	<b>60</b>
	<b>Appendix A: AD model documentation</b>	<b>62</b>
<b>9</b>	<b>Introduction</b>	<b>63</b>
<b>10</b>	<b>Model structure</b>	<b>63</b>
<b>11</b>	<b>Methodology</b>	<b>66</b>
11.1	Feedstock conversion technologies	66
11.2	Transmission of intermediaries	67
11.3	Intermediate conversion	68
11.4	Distribution of fuel	69
11.5	Motor conversion technologies	70
<b>12</b>	<b>Model interface</b>	<b>72</b>
12.1	Presentation of results	72
12.2	Adding new technologies and pathways	73

# 1 Sammenfatning

## 1.1 Formål og baggrund

Denne rapport fungerer som dokumentation og formidling af resultater fra Alternativ Drivmiddelmodellen (AD modellen). Formålet med AD modellen er at give vurderinger af de samlede miljøbelastninger, energieffektivitet og samfundsøkonomiske omkostninger ved anvendelse af forskellige drivmidler anvendt i forskellige transportmidler på specifikke tidspunkter i perioden frem til 2050. Målsætningen for AD modellen er således, at den skal bruges til at vurdere miljømæssige, energieffektivitetsmæssige og samfundsøkonomiske alternativer, som kan indgå i opfyldelsen af 2020 og 2050 målsætningerne for transportsektoren<sup>1</sup>.

Udviklingen af AD modellen blev igangsat i 2006. Arbejdet med modellen fortsatte på baggrund af mandat i Energiaftalen fra 2008, og igen i Energiaftalen fra 2012. AD modellen har undervejs gennemgået flere opdateringer. I denne version er analysemodellen bl.a. blevet udvidet med fly, skibe og tog samt fremskrevet helt frem til 2035 og 2050.

Version 3.0 af AD modellen relaterer til denne rapport.

## 1.2 Analyseramme og afgrænsning for AD modellen

Som nævnt er formålet med denne analyse at sammenligne de samlede klima-, energimæssige og økonomiske konsekvenser af at anvende konventionelle og alternative drivmidler i det samme køretøj, men med forskellige drivlinjer. For at vise de samlede konsekvenser tager AD modellen et såkaldt well-to-wheel (WtW) perspektiv, hvor alle energiforbrug, emissioner og omkostninger forbundet med produktion og anvendelse af drivmidlet er medtaget, helt fra produktion af råvarerne til dets anvendelse i køretøjet. Et sådant perspektiv svarer til det såkaldte LCA (Life Cycle Assessment) perspektiv.

Tilgangen er som udgangspunkt ikke nationalt afgrænset, men AD modellen er udformet, så det tilnærmelsesvist er muligt at identificere de danske udledninger.

---

<sup>1</sup> Som følge af Vedvarende Energidirektivet og Brændstofkvalitetsdirektivet er målsætningen til og med 2020 for den danske transportsektor, at 10 % af drivmidlerne skal være baseret på vedvarende energi (VE), og at drivmidlerne skal lede til en CO<sub>2</sub> reduktion fra transportsektoren på minimum 6 %. Ud over disse målsætninger er det en national 2050 målsætning, at Danmark skal være fossil uafhængigt og en EU-målsætning, at EU's drivhusgasemissioner samlet set skal være reduceret med 80-95 % i forhold til 1990-niveau.

I forhold til opgørelsen af emissioner og energiforbrug, medtager AD modellen både emissioner og energiforbrug fra produktion og anvendelse af drivmiddel og transportmiddel. Den medtager ikke emissioner og energiforbrug relateret til produktionen og bortskaftelsen af infrastrukturen, som transportmidlet anvender, da dette vurderes som værende af lille betydning.

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 CO<sub>2</sub> 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. Denne tilgang, hvor omkostningerne forbundet med teknologimodning ikke er medtaget, betyder, at der kan være relativt store forskelle mellem beregnede nutidige samfundsøkonomiske omkostninger og markedspriser. Denne forskel forventes dog at blive mindre over årene når de medtagne teknologier modnes.

For at kunne sammenligne umodne og etablerede teknologier er der taget udgangspunkt i en ”standard situation”, hvor alle de vurderede teknologier er implementeret i et rimeligt omfang, således at den nødvendige infrastruktur for anvendelse af en given drivlinje er etableret og rentabel. Ekstra infrastrukturomkostninger forbundet med implementeringen af yderligere køretøjer er medtaget i AD modellen. Øgede omkostningerne ved lav udnyttelsesgrad i opbygningsfasen er ikke medtaget. Generelt gælder for både eksisterende og ny infrastruktur, at den på længere sigt, ikke mindst pga. afskrivning, betyder mindre i det samlede omkostningsbillede.

Der er desuden 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 4

### 1.3 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 transportmiddel udstyres med forskellige drivlinjer og hermed anvende flere forskellige typer drivmidler, herunder også i kombination i det samme transportmiddel. 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 er ikke 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 en bred belysning af de teknologiske muligheder.

AD modellen indeholder 47 forskellige spor, fordelt på

- 16 personbiler
- 4 varebiler

- 6 lastbiler
- 7 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 A: AD model documentation

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 tilnærmelsesvist konstruktionsmæssigt ens, bortset fra de elementer i bilen, som relaterer sig til bilens drivmiddel.

## 1.4 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 og ekspertkonsultationer i 2015. Resultaterne af høringen og konsultationer 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 6.

## 1.5 Kort sammenfatning af resultater

Sammenlignet med de konventionelle alternativer giver særligt biogas meget store reduktioner i CO<sub>2</sub>-udledningerne. El (og herunder brint produceret på el) og metanol og DME baseret på træ leverer også store reduktioner. 1. generations bioætanol, 2. g. bioætanol på halm leverer nogen reduktioner, mens 1. g biodiesel (FAME og HVO baseret på raps) generelt resulterer i CO<sub>2</sub>-udledning på linje med diesel og benzin<sup>2</sup>. Disse konklusioner er konstante over analysens tidsperspektiv, med den undtagelse at biogas i 2050 bliver lidt mindre attraktiv (dog stadig meget attraktiv).

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. Herudover er fossile drivmidler generelt mere energieffektive end biobaserede drivmidler, grundet energitabet ved konvertering af biomassen. Disse konklusioner er også konstante over analysens tidsperspektiv.

---

<sup>2</sup> Moderate ILUC og DLUC (samlet benævnt LUC) 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.

I forhold til de samfundsøkonomiske omkostninger skal det understreges at denne analyse baserer sig på faktor-priser, dvs. eksklusiv skatter og afgifter, og for udvalgte år. Der er ikke taget højde for den risikopræmie, som virksomheder måtte kræve for at udvikle og realisere især de mindst modne teknologier. Det antages endvidere i videst muligt omfang, at alle transportmidler produceres i samme antal, således at ingen transportmidler drager særlig fordel af 'economies of scale' i produktionen. Denne tilgang, hvor omkostningerne forbundet med teknologimodning ikke er medtaget, betyder, at der kan være relativt store forskelle mellem beregnede nutidige samfundsøkonomiske omkostninger og markedspriser.

De mest markante forskelle mellem samfundsøkonomiske omkostninger for de vurderede spor er, at hvor brændselscellebiler i dag er mere omkostningstunge end andre alternativer, forventes disse, sammen med særligt elbiler, plugin hybridbiler og elbusser, at blive noget billigere end alternativer, særligt i 2035 og 2050. Herudover viser analysen, at samfundsøkonomiske omkostninger ved de øvrige undersøgte alternativer indenfor personbiler, tung transport, tog, busser og fly, er relativt sammenlignelige, og at biobrændstoffer i flere sammenhænge har potentiale til at blive konkurrencedygtige med fossile mellem 2020 og 2035. Det skal dog nævnes, at der er knyttet væsentlige usikkerheder til vurderingen af omkostninger ved drivmiddelproduktion, som ikke findes i stor skala i dag. Denne usikkerhed antages øget over analysens tidsperspektiv.

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 produktionsvolumener af køretøjer, som betyder, at de omkostninger, som er angivet her, i forhold til dette tidsperspektiv, er under markedsprisen. Her kan f.eks. iblanding af bioætanol baseret på sukkerroer levere en løsning, som samfundsøkonomisk er sammenlignelig med konventionelle drivmidler og som samtidig har en betydelig klimaeffekt.

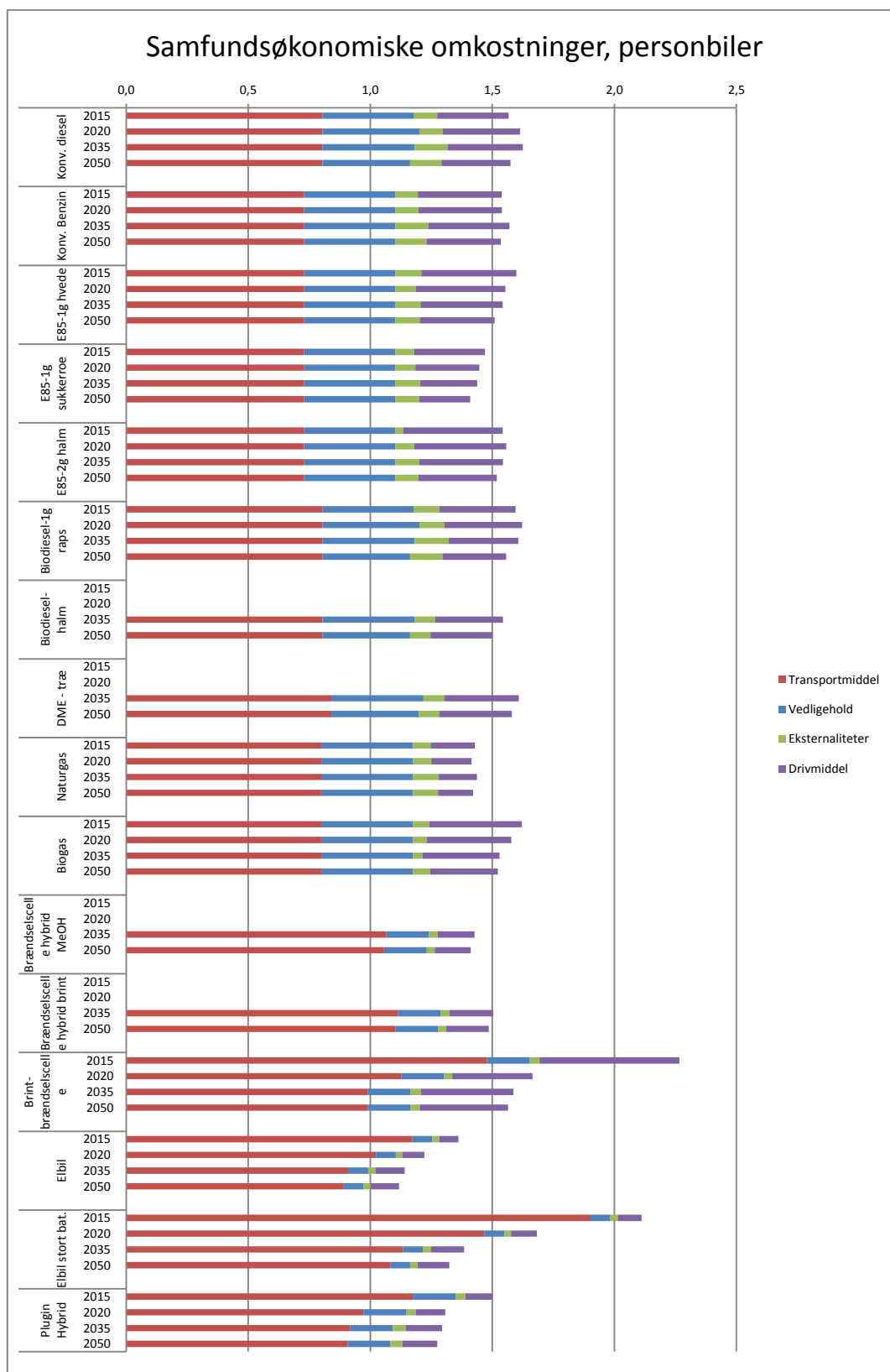
På længere sigt, og i forbindelse med opfyldelsen af 2050-målsætningen, er det meget sandsynligt, at el og brændselscelledrivlinjer igennem deres relativt lavere omkostninger, høje energieffektivitet og klimavenlige profil vil være meget attraktive løsninger. Herudover medfører de, hvis de er produceret på baggrund af el produceret fra vind og sol, kun i meget ringe grad et øget pres på biomasseressourcerne.

For de øvrige transportmidler er konklusionerne på tværs af omkostninger, emissioner og effektivitet mindre klare. Generelt tegner der sig det billede, at særligt biogas og 2. generations biobrændstoffer er klimamæssigt fordelagtige, og generelt har potentiale til at blive konkurrencedygtige med fossile brændstoffer omkring 2020-2035. Det skal dog igen understreges, at prisudviklingen på flere af 2. g. brændstofferne må betegnes som meget usikker.

## **1.6 Detaljeret gennemgang af resultater**

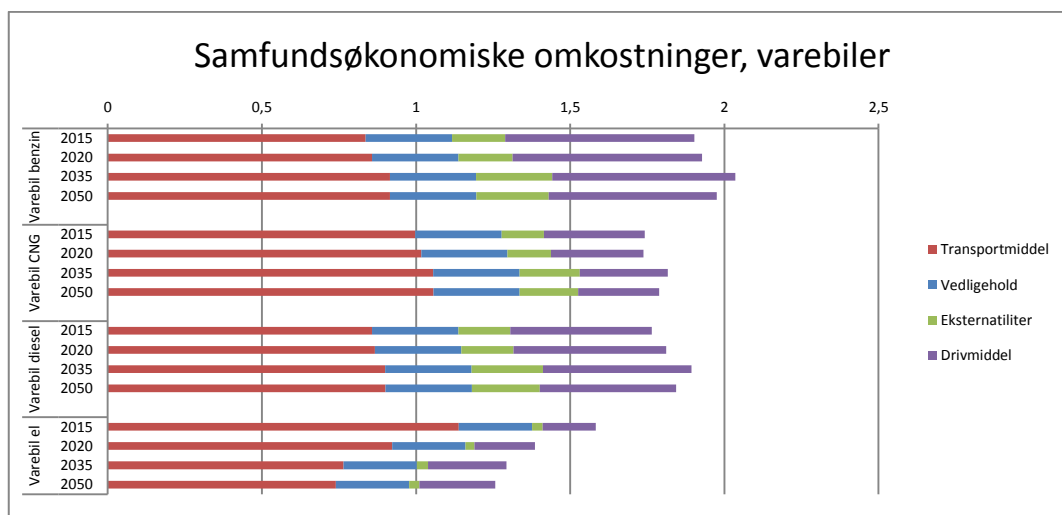
### **1.6.1 Personbiler og varebiler**

I nedenstående 6 figurer vises samfundsøkonomiske omkostninger, drivhusgasemissioner og energieffektivitet for person- og varebiler. Efter hver figur gives en kort analyse af resultaterne. Afslutningsvis drages overordnede konklusioner for person- og varebilerne.



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





Figur 2: Samfundsøkonomiske omkostninger for varebiler, kr./km 2015, 2020, 2035 og 2050.

I forhold til de samfundsøkonomiske omkostninger skal det understreges, at denne analyse baserer sig på faktor-priser, dvs. eksklusiv skatter og afgifter, og for udvalgte år. Der er ikke taget højde for den risikopræmie, som virksomheder måtte kræve for at udvikle og realisere især de mindst modne teknologier eller 'economies of scale'. Denne tilgang, hvor omkostningerne forbundet med teknologimodning ikke er medtaget, betyder, at der kan være relativt store forskelle mellem beregnede nutidige samfundsøkonomiske omkostninger og markedspriser.

Et meget centralt resultat for person- og varebiler er, at de samfundsøkonomiske omkostninger ved drivlinjerne med forbrændingsmotorer, er relativt 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 ses mellem personbilerne med (tilpassede) benzin- og dieselmotorer, opstår således primært som følge af forskelle i pris på drivmiddel og eksternatiliteter, som tilsammen udgør mindre poster.

Ses isoleret på omkostninger ved brændstoffer, er disse dog også relativt ens. Analysen indikerer altså, at forskelle i omkostninger for flere fossile, 1. g. og 2. g. biobrændstoffer er små. I visse tilfælde ventes 2. g. biobrændstoffer endda at have lavere produktionsomkostninger end både 1. g. biobrændstoffer og fossile brændstoffer, særligt senere i analysens tidsforløb. 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.

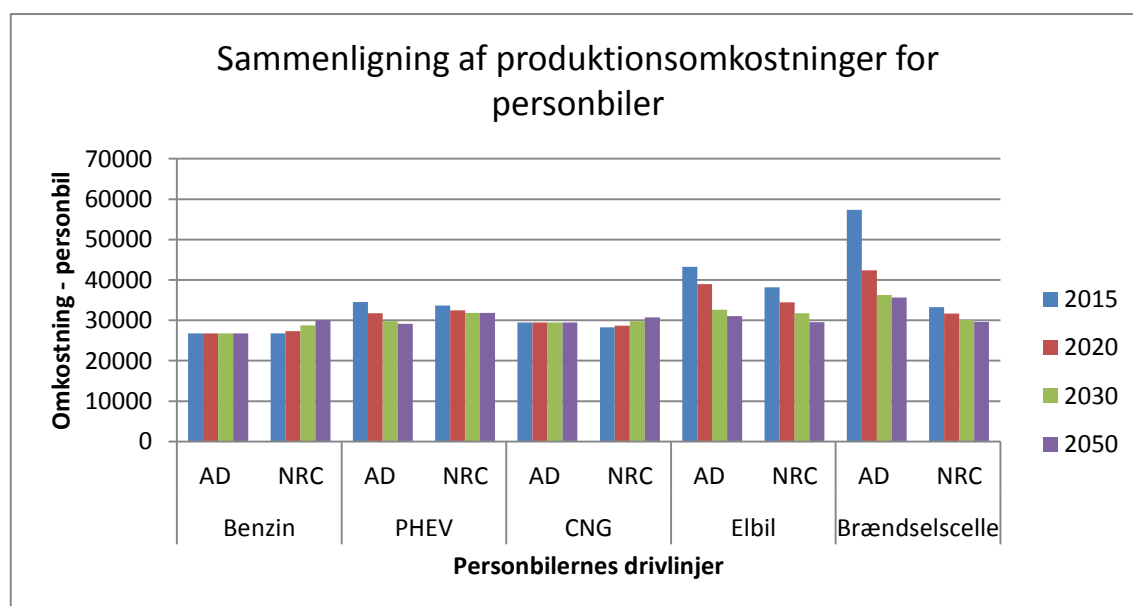
Brændselscelle- og brændselscellehybridbilerne, elbilen, plugin hybridbilen, og elvarevognen adskiller sig fra ovenstående. Her ses markant fald i omkostninger over tidsperioden. En vigtig komponent heri for alle disse biler er antagelsen om, at batteriprisen pr. kWh forventes at falde med ca. 66% i 2050 i forhold til 2015 prisen og forlænge levetiden, således at batteriet ikke behøver at blive skiftet i køretøjets levetid fra 2020. Prisen for batteriet medregnes i vedligeholdelsesomkostningen på bilen. Tilsvarende prisfald forventes for brændselsceller og reformeren anvendt i metanol brændselscellebilen. Dette betyder, at hvor elbiler med stort batteri (ca. 500 km rækkevidde), brændselscelle- og brændselscellehybridbilerne er dyrere end konventionelle alternativer i 2015, forventes disse at blive billigere

end konventionelle alternativer i 2035 og 2050. Elbiler og elvarevogne med et almindeligt batteri og hermed en rækkevidde på 150-200 km er allerede i dag med ovenstående antagelser forbundet med mindre omkostninger end konventionelle biler.

De lave eksterne omkostninger forbundet til brændselscelle- og elbiler skyldes, at der ikke er skadelige lokale emissioner fra disse biler, og at støjen er lav sammenlignet med konventionelle køretøjer. Samtidig er der lave eksterne omkostninger forbundet med produktionen af el, som ud fra et langtidsmarginalperspektiv hovedsageligt er antaget at blive produceret via vindmøller (se afsnit 5.3).

Der tages udgangspunkt i en årskørsel på 18.000 km for samtlige køretøjer. Dette er en central parameter, da f.eks. køretøjer som er dyrere i indkøb, men lavere drivmiddelomkostninger, som f.eks. elbilen, vil komme dårligere ud ved en lavere årskørsel, og vice versa.

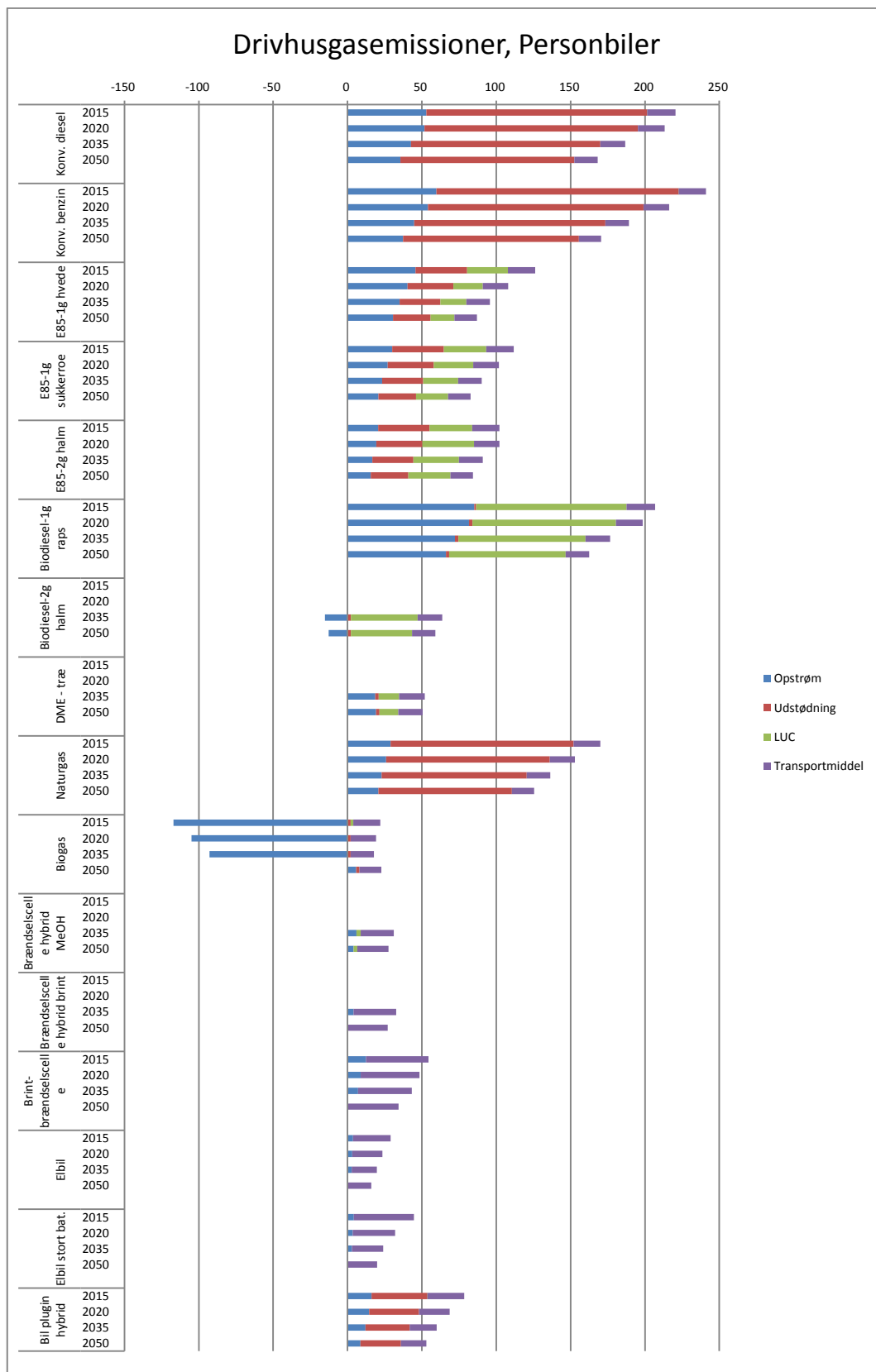
Resultaterne for beregning af omkostninger for personbiler er så vidt muligt sammenlignet med andre rapporter. Analysen ”Transitions to Alternative Vehicles and Fuels”, National Research Council (2013), tager ligesom AD modellen også udgangspunkt i at vurdere omkostninger for personbiler under ens forhold, dvs. sammenlignelige ydelser for køretøjer og ens antagelser om produktionsvolumener. Analysen viser følgende billede, når personbilerne i AD 3.0 tilpasses til størrelsen fra nævnte rapport:



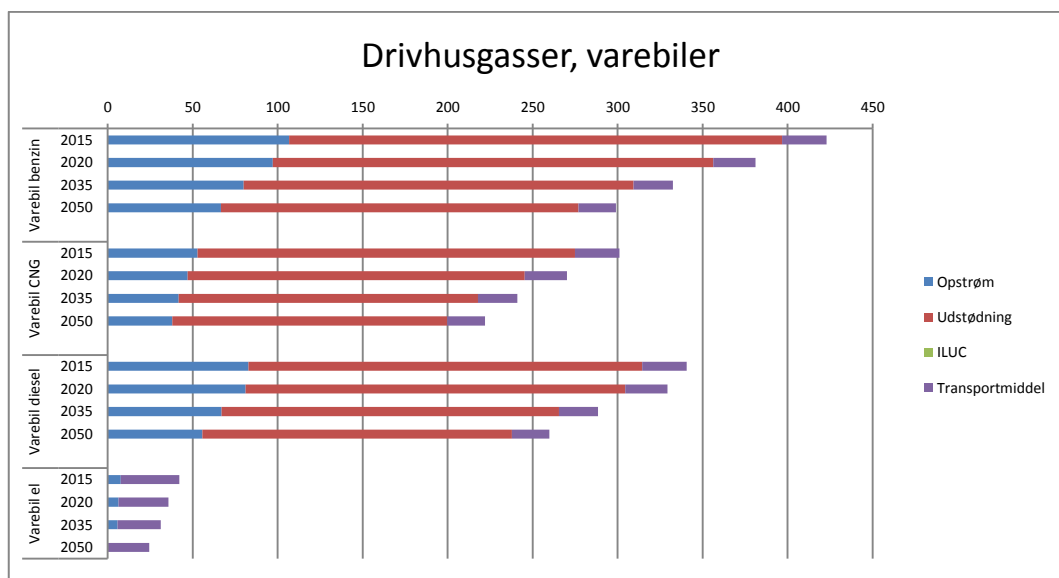
*Figur 3: Sammenligning af omkostninger for personbiler udregnet i AD modellen og i undersøgelse af National Research Council. PHEV og CNG er forkortelser for henholdsvis plug-in hybrid- og gasbiler. Personbilerne er skaleret således, at omkostningerne ved benzinbilen i 2015 er ens. Herudover er batteri- og brændselscellestørrelsen gjort ens. Undersøgelsen medtager kun omkostninger ved produktion af køretøjet, og det har derfor ikke været muligt at sammenligne antagelser omkring vedligeholdelsesomkostninger, som også er af stor betydning for de samlede omkostninger.*

Som det ses, er resultaterne af de to undersøgelser relativt ens. En væsentlig forskel er dog, at AD vurderer omkostningerne ved brændselscellepersonbiler væsentligt højere i 2015 og til dels i 2020, end undersøgelsen fra National Research Council (NRC). Dette skyldes primært en antagelse om lavere brændselscelleomkostninger i NRC. Estimer af

omkostninger for brændselsceller i andre undersøgelser har dog ligget tættere på estimater i AD modellen.



Figur 4: Drivhusgasemissioner fra personbiler, g CO<sub>2</sub> ækv./km 2015, 2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer, at sporet ikke ses som værende tilgængeligt det pågældende år



Figur 5: Drivhusgasemissioner fra personbiler, g CO<sub>2</sub> ækv./km 2015, 2020, 2035 og 2050.

Resultaterne for person- og varebilernes drivhusgasemissioner viser, at der er meget store forskelle på de samlede well-to-wheel emissioner for forskellige spor. Biogas har i størstedelen af den dækkede periode direkte negative emissioner. Herudover er der i forhold til konventionelle alternativer meget store reduktionspotentialer ved anvendelsen af el- og varebiler, brændselsceller med brint fremstillet via elektrolyse eller metanol fremstillet fra træ, samt ved anvendelsen af DME og 2.g. biodiesel baseret på halm. Emissionen fra ætanol-sporene, som er baseret på E85 er i nogen grad påvirket af iblandingen af benzin. CO<sub>2</sub>-emissionen fra disse spor ville være lavere uden denne iblanding.

Den negative emission fra biogas skyldes antagelsen om, at alternativanvendelsen af den i biogassen anvendte gylle i 2015, 2020 og 2035 ville være ubehandlet udspredding på marker med et relativt højt metanudslip til følge. Det antages, at anvendelsen af biogas i transport vil lede til en øget produktion af biogas (se kapitel 4.1), og at dette udslip derved undgås. I 2050 antages biogaspotentialet at være udnyttet fuldt ud (se kapitel 5), og en yderligere brug indenfor transportsektoren vil derfor blot forskyde forbruget fra andre anvendelser.

Emissioner knyttet til fossile drivmidler er relativt sammenlignelige. Dieselen har dog noget lavere emission end benzinen, og naturgasbilen ligger lidt lavere end disse to alternativer. Årsagen til naturgasbilens lidt lavere emission skyldes et mindre kulstofindhold pr. energienhed end både benzin og diesel, og at der nu laves dedikerede naturgasmotorer, så motorens energieffektivitet kommer på linje med benzinen. Emissionen fra bilerne, som anvender de fossile drivmidler, kommer primært fra udstødningen, hvor opstrømsmissionerne for gas, benzin og diesel udgør en mindre del.

Plugin hybridbilens emissionsprofil ligner i høj grad en nedskaleret emissionsprofil for benzinen. Dette skyldes at 31 % 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.

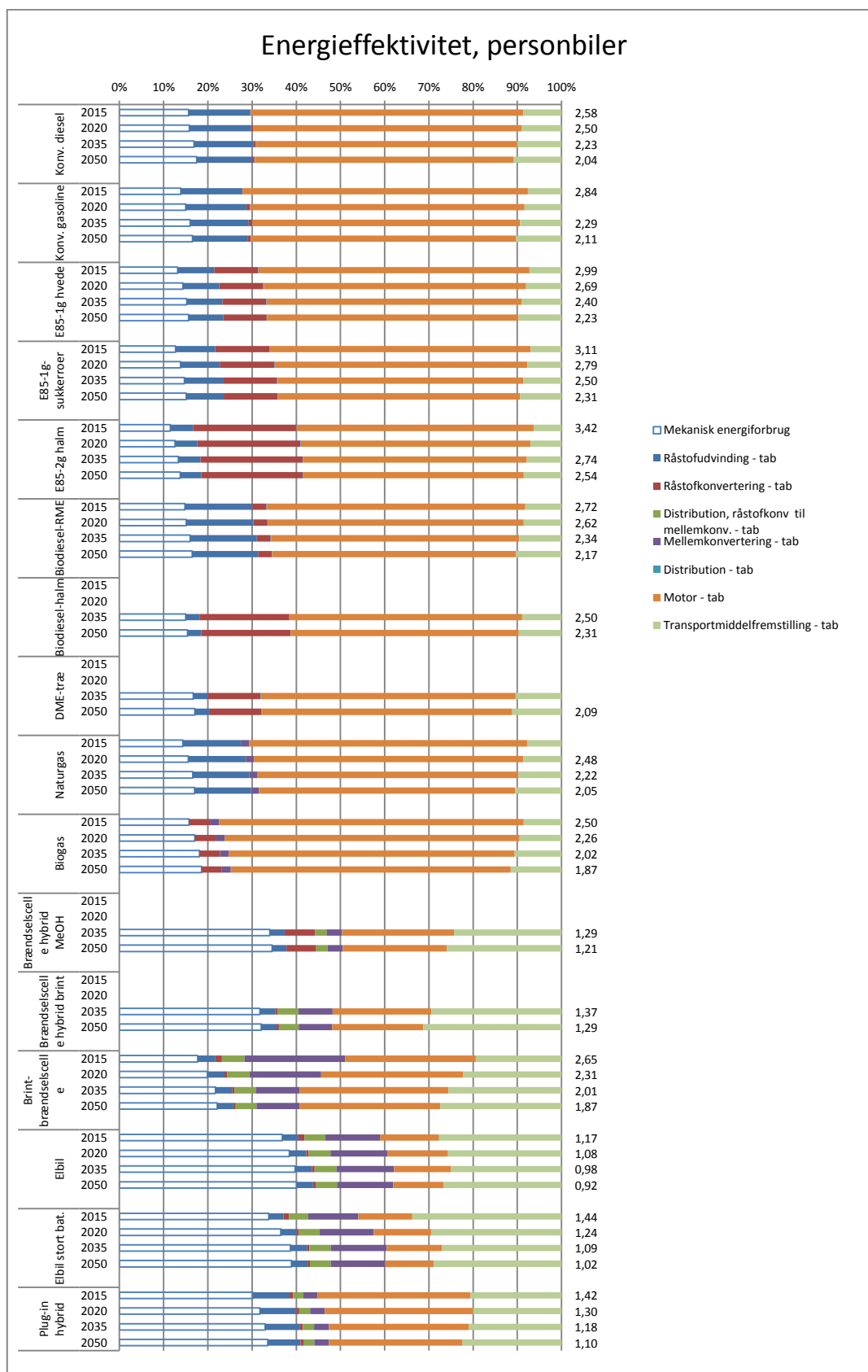
For biobrændstofferne er det i modsætning til de fossile brændstoffer opstrøms- og ILUC<sup>3</sup> emissionerne, som generelt dominerer. Emissionen fra udstødningen fra biobrændstofferne er sat til 0<sup>4</sup>, hvilket retfærdiggøres ved, at der heller ikke er medregnet et optag af CO<sub>2</sub> 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.

Emissionerne fra produktionen af køretøjerne er højere for de el- og brændselscelledrevne biler. Den højere emission fra bilproduktionen forventes dog at falde i takt med den øgende mængde grøn el, som anvendes i deres produktion, og i takt med batteriernes øgede holdbarhed.

---

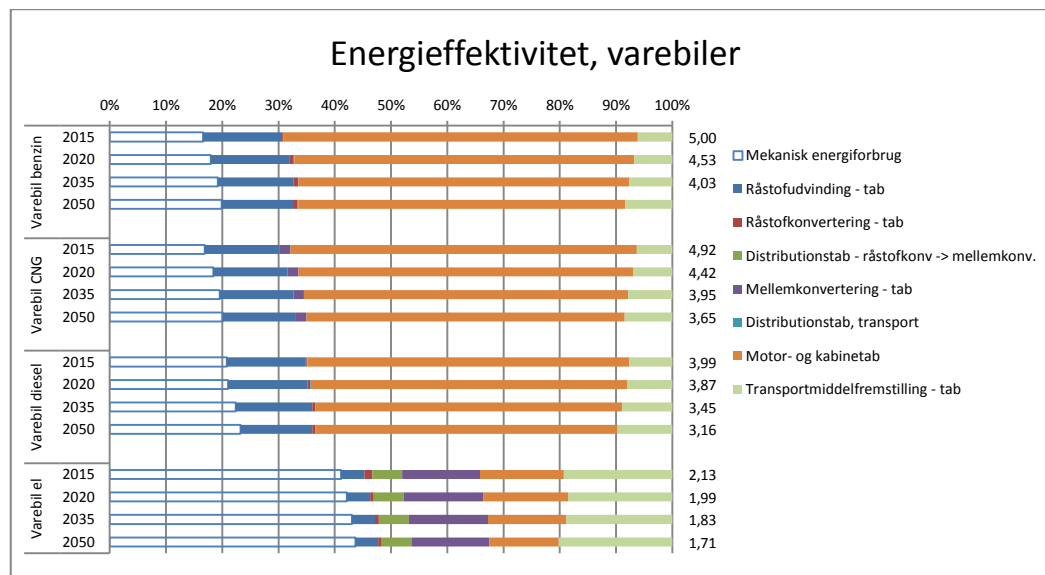
<sup>3</sup> Moderate ILUC og DLUC (her samlet kaldet LUC) emissioner medregnes som udgangspunkt i AD modellen. Disse medtages, da der er generel enighed omkring, at ILUC emissioner er en realitet, og, på trods af store usikkerheder, at ILUC emissioner på 0 regnes for mere usandsynlige end emissionerne medtaget her.

<sup>4</sup> 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 opstrømsmissionerne og ikke udstødningsemissionerne, som ville have været mere konsistent.



Figur 6: Energieffektivitet for personbiler i % for 2015, 2020, 2035 og 2050. Energieffektivitet er her forstået som det mekaniske energiforbrugs andel af det samlede energitab i sporet, og kan aflæses af den 'gennemsigtige bjælke'. Tallet til højre for hver søjle indikerer i MJ det samlede energitab

til produktion af den mekaniske energi krævet for at køre 1 km. Manglende søjler indikerer, at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.



Figur 7: Energieffektivitet for varebiler i % for 2015, 2020, 2035 og 2050. Energieffektivitet er her forstået som det mekaniske energiforbrugs andel af det samlede energitab i sporet, og kan aflæses af den 'gennemsigtige bjælke'. Tallet til højre for hver søjle indikerer i MJ det samlede energitab til produktion af den mekaniske energi krævet for at køre 1 km.

Overordnet ses for personbilerne en energieffektivitet mellem 12 og 23 % for person- og varebiler 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 højere energieffektivitet – mellem 18 og 44 % - hvilket i høj grad skyldes, at motortabet er væsentligt mindre (plugin hybriden har dog stadig et væsentligt motortab, da det antages, at benzin udgør 31 % af dens drivmiddel).

For biobrændstoffer anvendt i personbiler 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 forholdet for 2. g. biobrændstofferne er modsat. Dette skyldes i forhold til råstofferne, at 1. g. biobrændstofferne er produceret med produktionen af biobrændstoffer for øje, og tab i denne proces tilskrives biobrændstoffet. For 2. g. biobrændstoffer er råstofferne derimod 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.

For el- og brændselscellebilerne ses, at en stor del af tabet skyldes produktionen af bilen. Den primære årsag til, at det procentuelle tab er højere for disse biler, end det er for forbrændingsmotorbilerne, er, at disse biler samlet set bruger mindre energi. Herved udgør fremstillingsenergien, som er sammenlignelig på tværs af bilerne, en større andel af totalen.



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.

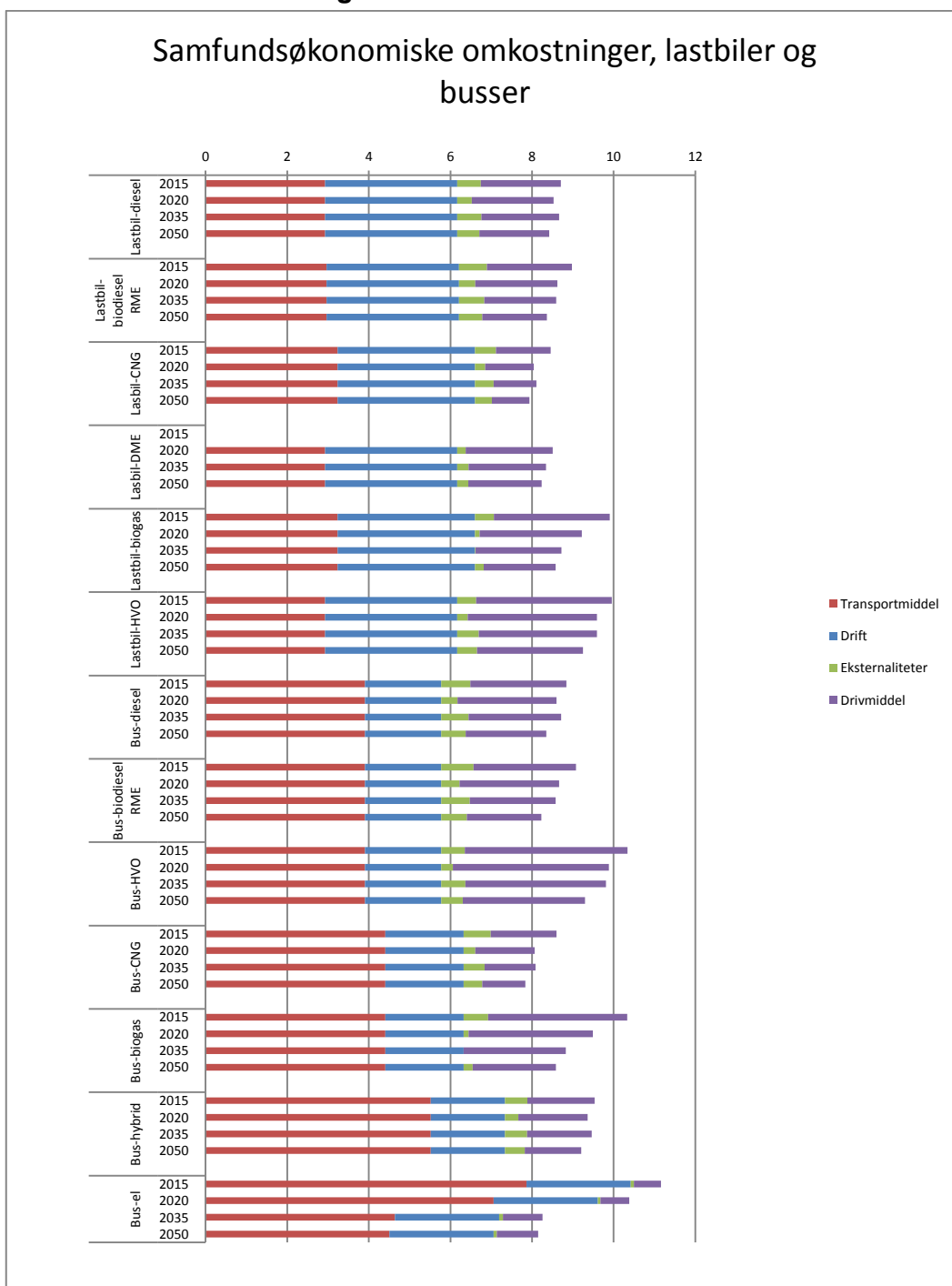
#### **Sammenfattende konklusioner for personbiler og varebiler**

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 lave emissioner, mens fossile drivmidler og biodiesel baseret på raps resulterer i væsentlige positive og relativt sammenlignelige emissioner.

## 1.6.2 Lastbiler og busser

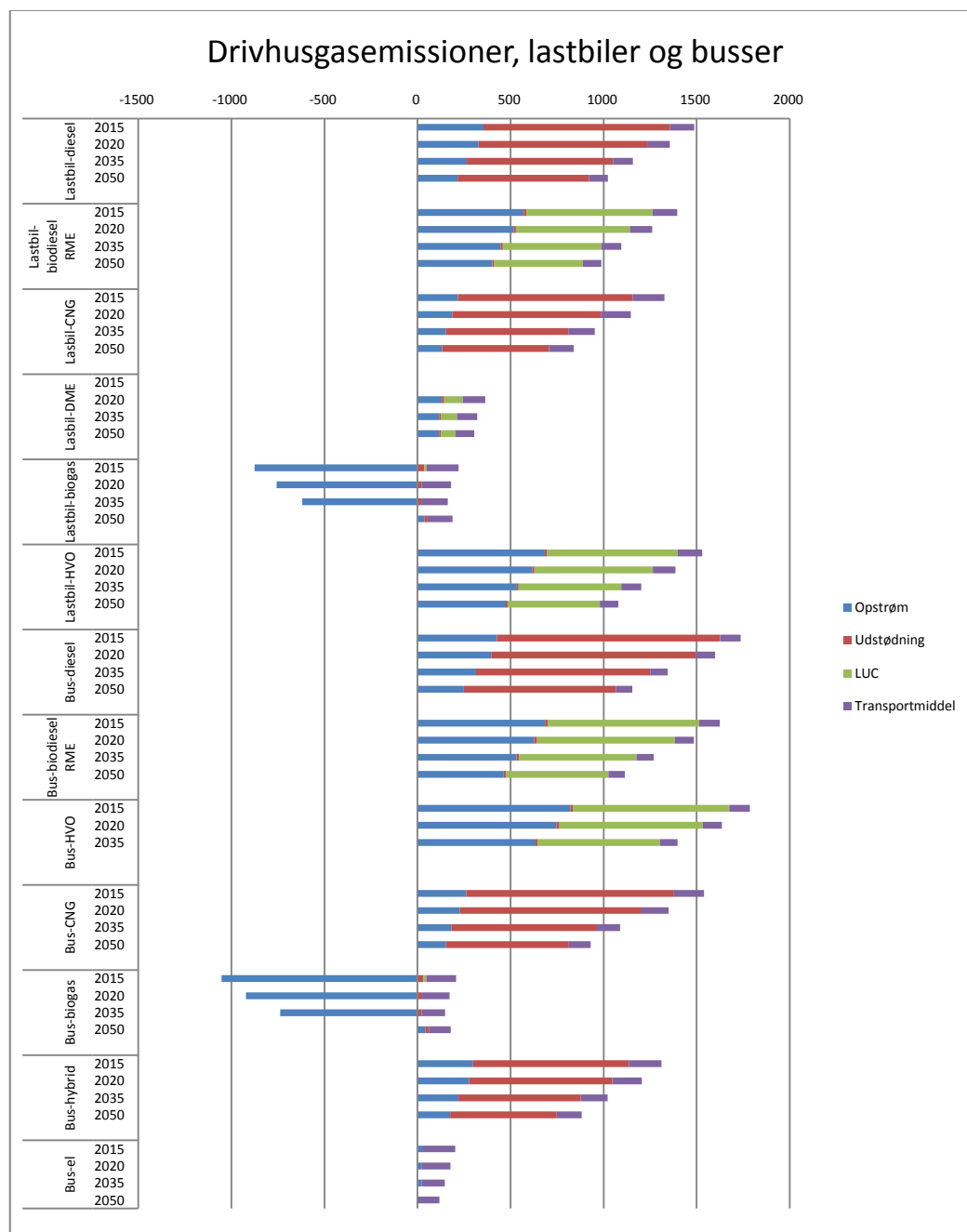


Figur 8: Samfundsøkonomiske omkostninger for lastbiler og busser, kr./km 2015, 2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer, at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.

Som det kan ses af figur 8 er samlede omkostninger for lastbiler igen meget sammenlignelige på tværs af drivmiddel og tid, med undtagelse af anvendelsen af HVO og biogas, som ligger lidt højere. Samme billede gør sig gældende for busser, hvor elbussen og hybridbussen dog også ligger noget højere i dag. Elbussen forventes at falde til omkring samme niveau som de øvrige drivlinjer over tid, da elbussens pris forventes at nærme sig samme niveau som dieselbussen over tid, og da den har lavere drivmiddelomkostninger end de øvrige busser.

Det kan yderligere bemærkes, at lastbiler og busser på naturgas har højere omkostninger til drivlinjen end diesel lastbiler og busser, men lavere omkostninger til drivmiddel. Det skal i den forbindelse understreges, at der ikke er indregnet skatter og afgifter.

Det relativt markante fald for både lastbiler og busser mellem 2015 og 2020 i eksterne omkostninger skyldes implementering af strengere Euronormer med lavere NO<sub>x</sub> og partikel-emission til følge. De lidt højere eksterne omkostninger, fra lastbiler og busser der anvender biodiesel, skyldes en 20 % forøget emission af NO<sub>x</sub>, som dog til dels bliver modsvaret af et fald i SO<sub>2</sub> på 10 %.

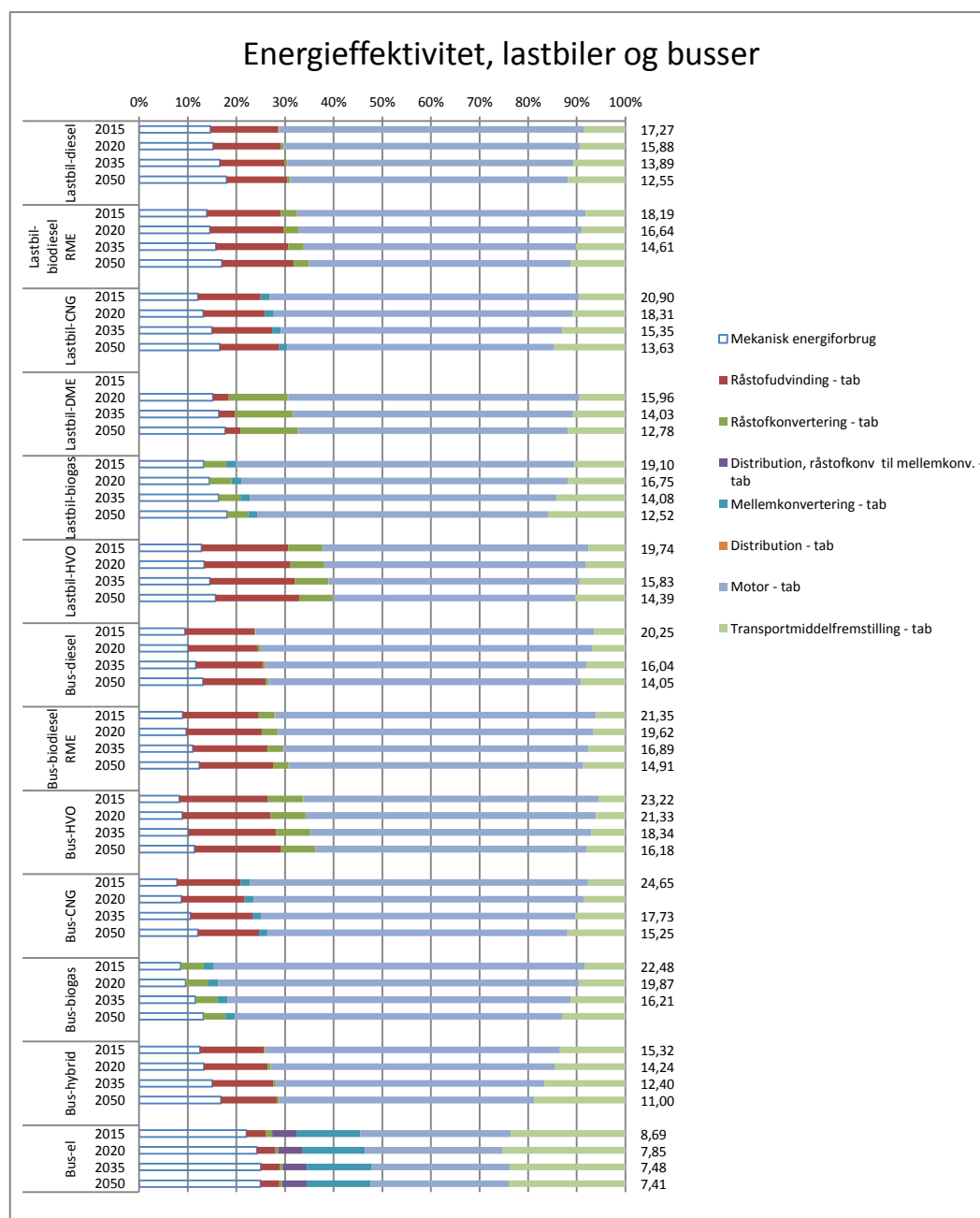


Figur 9: Drivhusgasemissioner fra lastbiler og busser, g CO<sub>2</sub> ækv./km 2015, 2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer, at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.

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 person- og varebiler.

Igen ses negative emissioner ved anvendelse af biogas og meget store CO<sub>2</sub> besparelser ved at anvende el som drivmiddel i el-bussen, og ved anvendelse af DME i lastbiler.

Emissionen fra hybridbussen, som udover en dieselmotor inkluderer en elektromotor og et internt ladet batteri, er på grund af bussens højere energieffektivitet noget lavere end fra diesel.



Figur 10: Energieffektivitet for lastbiler og busser i % for 2015, 2020, 2035 og 2050. Energieffektivitet er her forstået som det mekaniske energiforbrugs andel af det samlede energitab i sporet, og kan aflæses af den 'gennemsigtige bjælke'. Tallet til højre for hver søjle indikerer i MJ det samlede

*energitab til produktion af den mekaniske energi krævet 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 og særligt el indenfor busser, som skyldes højere motorvirkningsgrad, som nævnt ovenfor.

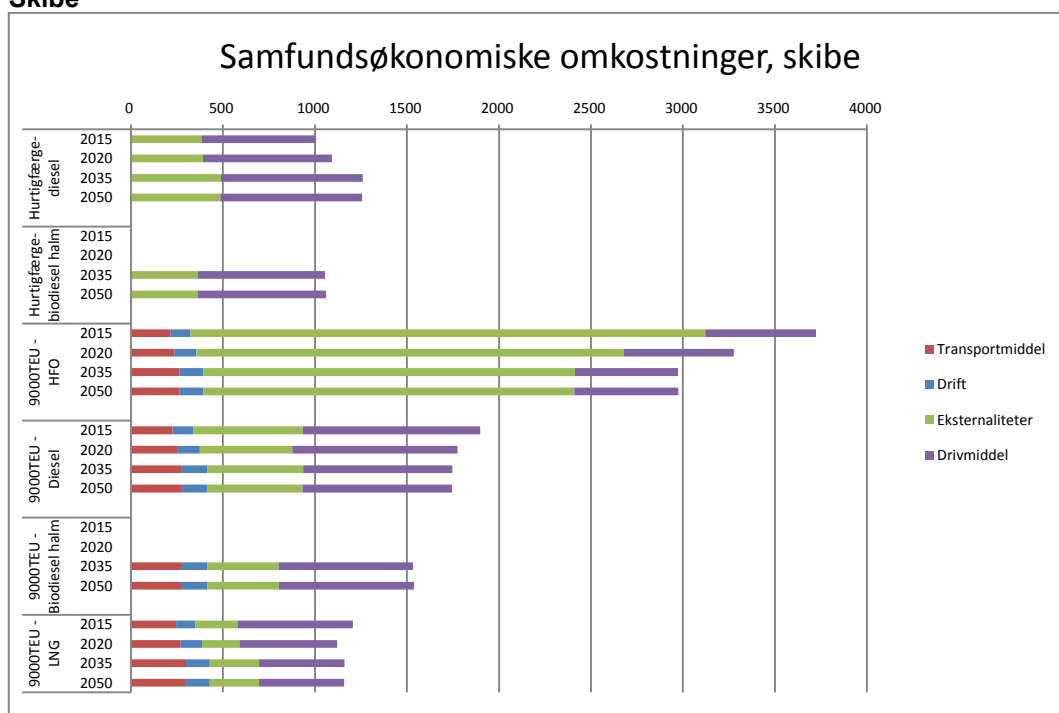
Det ses igen, at tabet ved produktionen af el-bussen er procentuelt højere end for de øvrige busser. Den primære årsag er igen, at el-busser samlet set bruger mindre energi. Herved udgør fremstillingsenergien, som er sammenlignelig på tværs af busserne, en større andel af totalen.

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, hvor HVO, biogas og hybridbusser dog er dyrere alternativer. Emissionerne fra fossile drivmidler og biodiesel baseret på raps resulterer igen i væsentlige positive og relativt sammenlignelige emissioner, mens biogas, el og DME, som her er modelleret som fremstillet på baggrund af træ, er forbundet med væsentlig mindre emissioner. Hybridteknologien og særligt el indenfor busser viser også et potentiale for reduktion i udslip på grund af øget energieffektivitet.

## Skibe



Figur 11: Samfundsøkonomiske omkostninger for skibe, kr./km 2015, 2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer, at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.

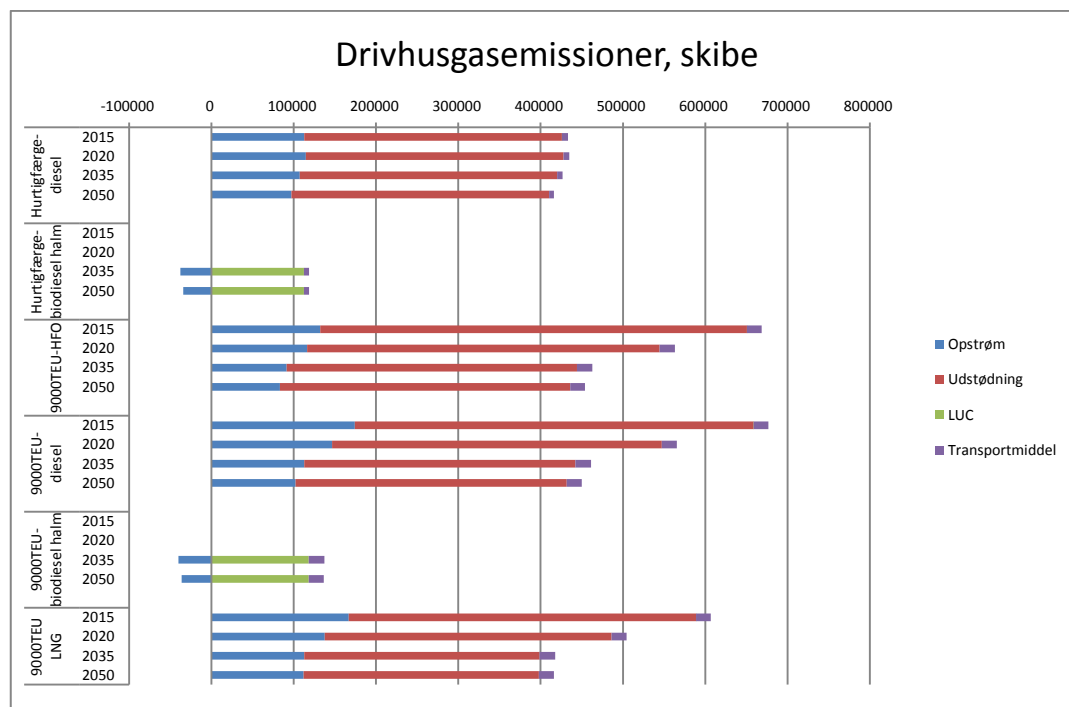
Det har i forhold til omkostninger for hurtigfærger ikke været muligt at skaffe information omkring omkostninger for transportmidlet og drift og vedligehold.

I forhold til tidligere resultater for let og tung vejtransport, er eksterne omkostninger meget høje i forhold til drivmiddelomkostningerne. Årsagen er den højere emission af specielt  $\text{NO}_x$  og partikler pr. energienhed drivmiddel. For skibe, som anvender drivmidler indeholdende svovl, er der tillige en væsentlig større emission af  $\text{SO}_2$  pr. energienhed drivmiddel anvendt, end der er for let og tung vejtransport. Dette ses særligt tydeligt ved containerskibet, som anvender HFO. I denne sammenhæng skal det dog nævnes, at MARPOL konventionen omkring emissioner fra skibsmotorer sætter grænser for blandt andet udledningen af  $\text{SO}_x$  i havområderne omkring Danmark, hvilket i praksis betyder, at anvendelsen af HFO ikke vil være mulig uden røggasrensning. Værdisætningen af emissionerne er baseret på, at emissionerne sker i tyndt befolkede områder, som angiveligt skulle være rimeligt repræsentative for danske havområder. Hvis emissionerne sker ude på det åbne hav, er det usikkert, om værdisætningen stadig er gyldig. Dette betyder, at værdisætningen af emissioner fra anvendelse af HFO muligvis bliver for høj, da værdisætningen tager udgangspunkt i anvendelsen i kystnære områder, som ikke er tilladt efter 2015 ifølge MARPOL konventionen. Eksterne omkostninger knyttet til containerskibe, som anvender HFO, skal derfor tages med forbehold.

Emissionerne af  $\text{NO}_x$ , partikler og  $\text{SO}_2$  er lavere ved anvendelse af LNG, hvilket giver væsentligt lavere samfundsøkonomiske omkostninger.

Givet disse forbehold ses, at der generelt forventes lavere eksterne omkostninger forbundet med skibstransporten over tid, som følge af en forventning om lavere emissioner af  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  og partikler. Dette skyldes, at internationale krav til skibes udledning af  $\text{NO}_x$  og  $\text{SO}_2$  strammes i de kommende år. I de kommende år træder også nye gradvist øgede krav til ski-

bes energieffektivitet i kraft, som bl.a. forventes at medføre en generel lavere hastighed for skibene over tid og et heraf mindsket energiforbrug og emissioner af NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> og partikler.

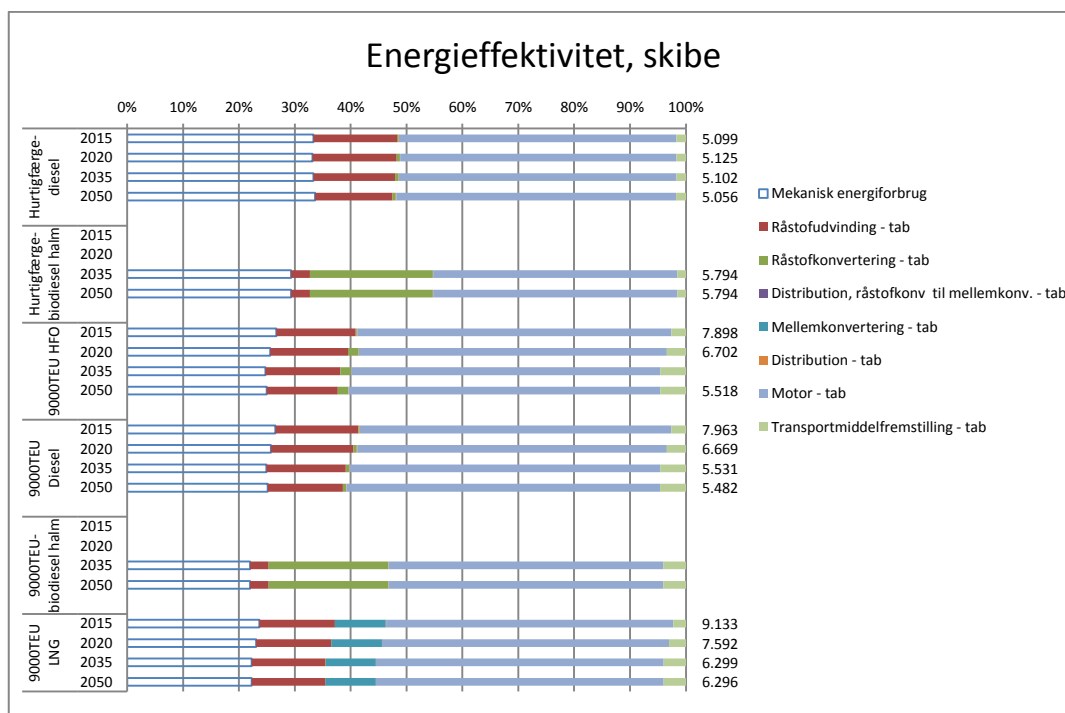


Figur 12: Drivhusgasemissioner fra skibe, g CO<sub>2</sub> ækv./km 2015, 2020, 2035 og 2050. Manglende søjler indikerer, at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.

Særligt for emissionerne for skibe i sammenligning med emissionerne fra andre transportmiddeltyper antages der et større fald i brændstofforbrug over analysens tidshorizont. Dette skyldes både antagelsen om mere effektive motorer, skrogformer med mindre fremdrivningsmodstand, men særligt antagelsen om lavere hastigheder over tid, som væsentligt reducerer energiforbruget pr. km.

Ved anvendelse af 2. generations biodiesel produceret på halm ses, som for de øvrige transporttyper, en meget lavere emission end ved anvendelse af fossile brændstoffer.

Emissionerne for hurtigfærger er relativt konstante, på grund af manglende data omkring den sandsynlige fremtidige udvikling af hurtigfærger.



Figur 13: Energieffektivitet for skibe i % for 2015, 2020, 2035 og 2050. Energieffektivitet er her forstået som det mekaniske energiforbrugs andel af det samlede energitab i sporet, og kan aflæses af den 'gennemsgtige bjælke'. Tallet til højre for hver søjle indikerer i MJ det samlede energitab til produktion af den mekaniske energi krævet 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 konstant, 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 forventes at forblive ens uanset det lavere energiforbrug fra skibet.

Som for 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 hvert 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.

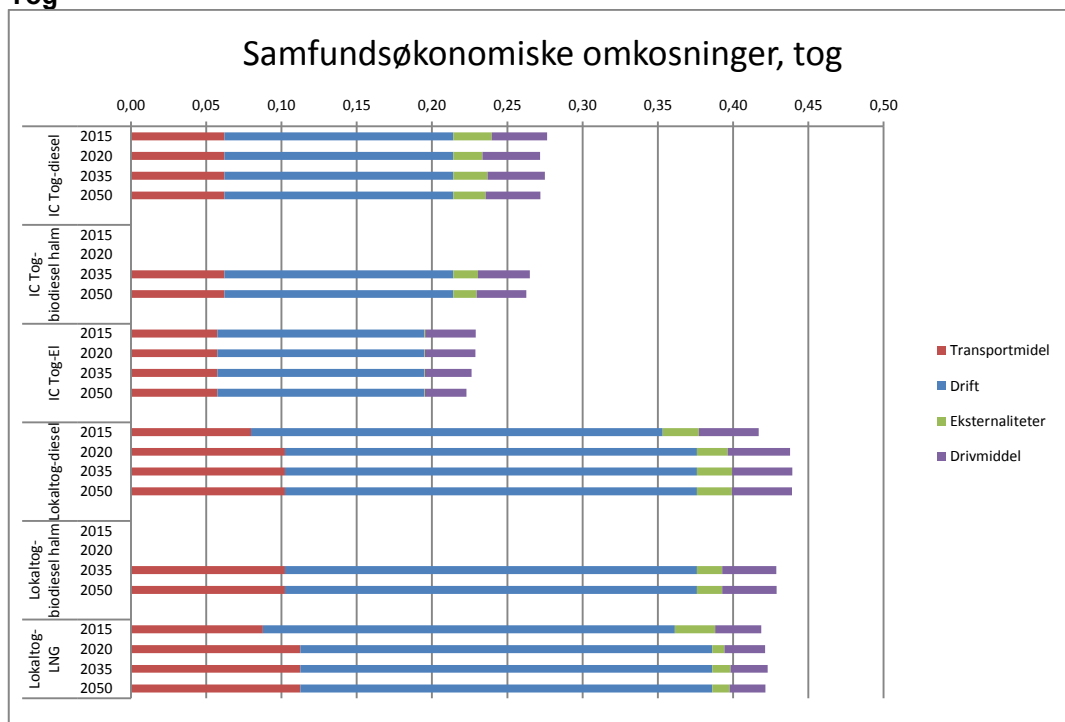
#### Sammenfattende konklusioner for skibe

Eksterne omkostninger er for skibe generelt meget høje i forhold til øvrige omkostninger, sammenlignet med andre transporttyper. Særligt ved anvendelse af LNG er emissionerne af NO<sub>x</sub>, partikler og SO<sub>2</sub> dog 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.



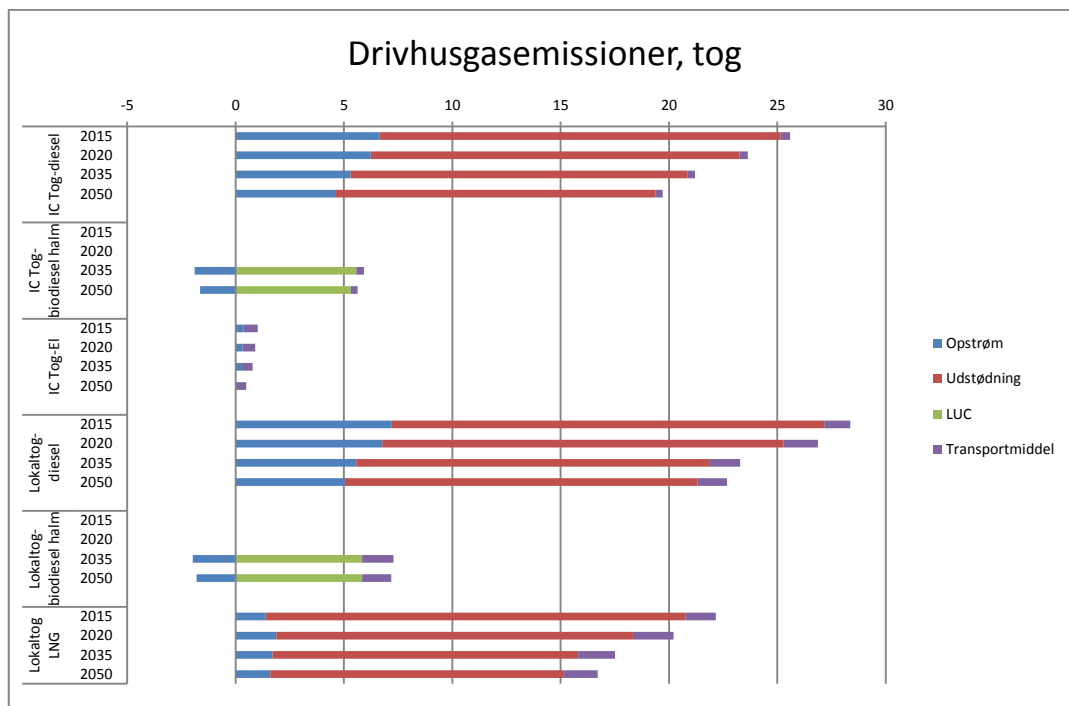
## Tog



Figur 14: Samfundsøkonomiske omkostninger for tog, kr./km togsæt, 2015, 2020, 2035 og 2050. Omkostninger er angivet pr sæde. Manglende søjler indikerer, at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.

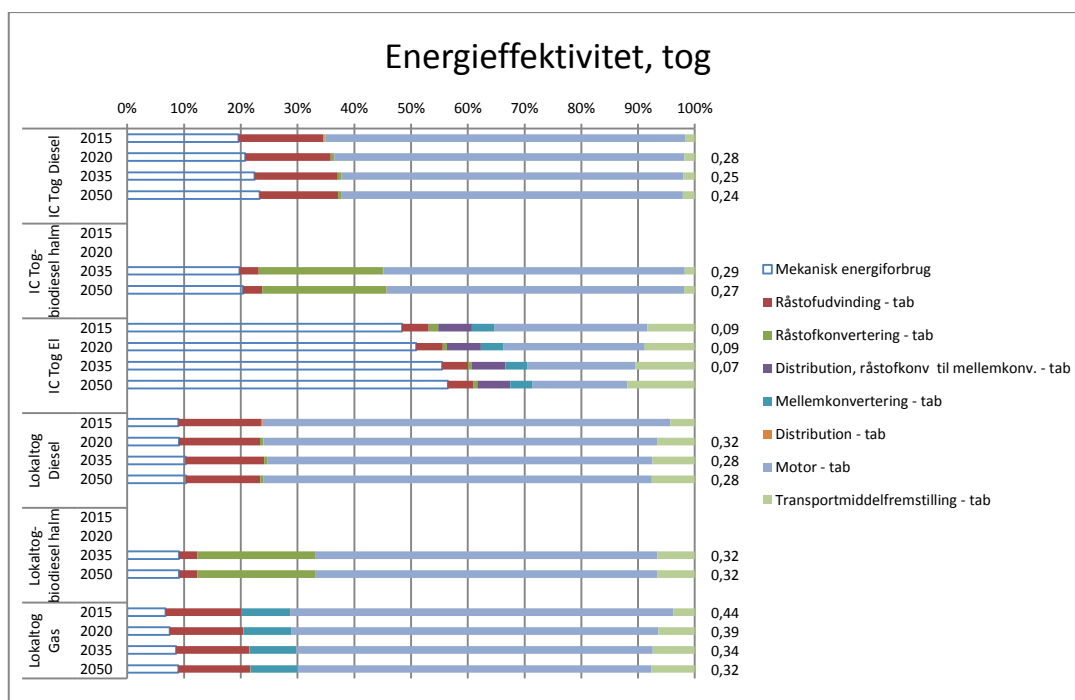
Omkostningerne relateret til vedligehold af togene er antaget at være konstant på tværs af togtyper og tid, som følge af manglende data omkring status og den sandsynlige fremtidige udvikling.

I forhold til eksterne omkostninger ses igen højere omkostninger ved anvendelse af diesel end 2. g. biodiesel, som igen er højere end anvendelsen af el. Dette skyldes primært biodiesels lavere emission af  $\text{SO}_2$  og  $\text{CO}_2$ , og at el primært antages produceret med vindmøller, som medfører lave eksterne omkostninger.



Figur 15: Drivhusgasemissioner fra togsæt, g CO<sub>2</sub> ækv./km 2015, 2020, 2035 og 2050. Emissioner er angivet pr. sæde. Manglende søjler indikerer, at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.

Igen ses, at billedet er meget sammenligneligt med de øvrige transportmidler, hvis drivmidlerne sammenlignes på tværs af drivlinjer. Set i forhold til drivhusgasemissionen fra lokaltoget anvendende diesel, har LNG-toget en 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.



Figur 16: Energieffektivitet for tog i % for 2015, 2020, 2035 og 2050. Energieffektivitet er her forstået som det mekaniske energiforbrugs andel af det samlede energitab i sporet, og kan aflæses af den 'gennemsigtige bjælke'. Tallet til højre for hver søjle indikerer i MJ det samlede energitab til

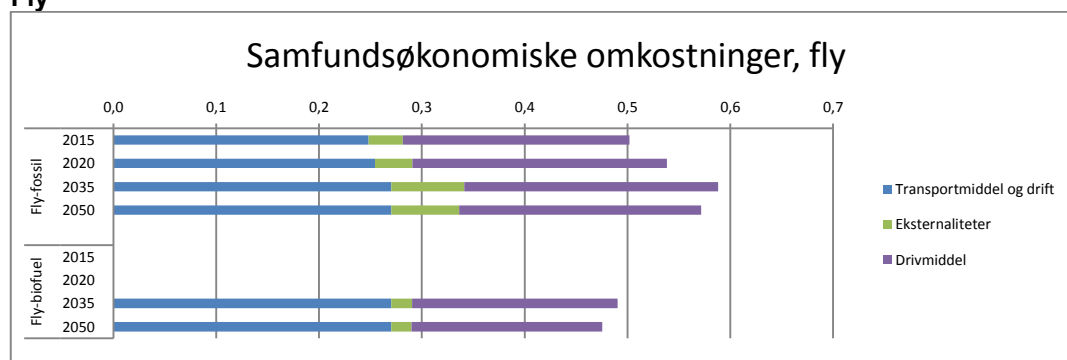
produktion af den mekaniske energi krævet for at køre 1 'sædekm'. Manglende søjler indikerer, at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.

Igen ses samme billede som ved foregående spor i forhold primære tab, forskelle mellem biobrændstoffer og fossile drivmidler og energieffektiviteten ved anvendelse af el som drivmiddel.

### Sammenfattende konklusioner for tog

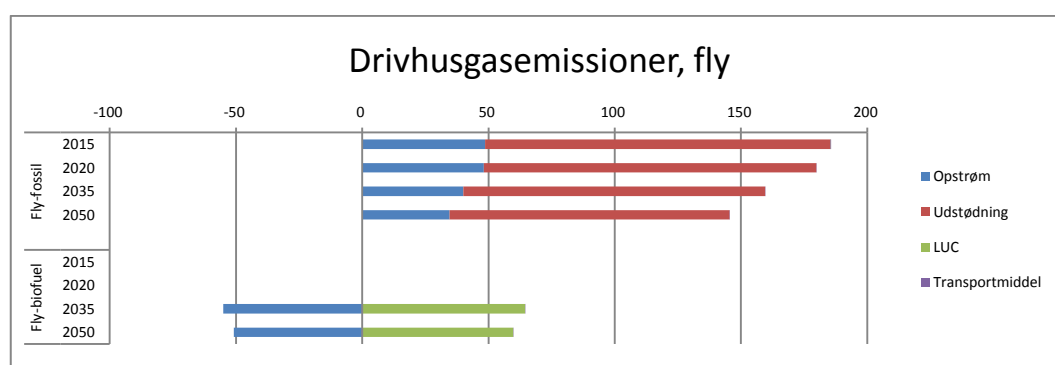
Konklusionerne for togene er meget sammenlignelige med konklusionerne for de andre transporttyper. Dog viser anvendelsen af LNG sig at have en drivhusgasmæssig fordel, som dog i høj grad hviler på antagelsen om, at LNG toget ikke leder til udslip af uforbrændt metan.

### Fly



Figur 17: Samfundsøkonomiske omkostninger for fly, kr./km 2015, 2020, 2035 og 2050. Omkostninger er angivet pr. sæde. Manglende søjler indikerer, at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.

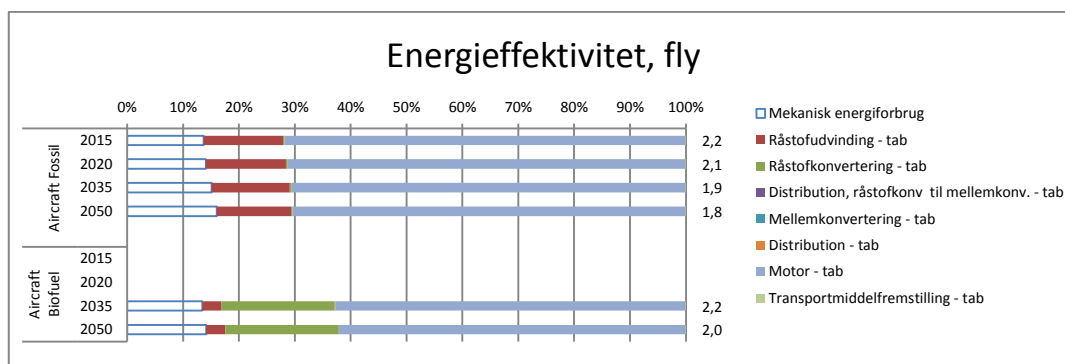
Igen ses, som for andre transportmidler, at biobrændstoffer (her biokerosen) har lavere eksterne omkostninger end fossile alternativer. Produktionsomkostningerne har tillige potentielle til at blive lavere end produktionsomkostninger for fossil kerosen i 2035. De stigende eksterne omkostninger fra den fossile kerosen igennem analysens tidshorisont skyldes primært stigende omkostninger ved emission af drivhusgasser.



Figur 18: Drivhusgasemissioner fra fly, g CO<sub>2</sub> ækv./km 2015, 2020, 2035 og 2050. Emissionerne er angivet pr. sæde. Bemærk at opgørelsen ikke medtager drivhuseffekten af flyenes kondensstribe.

Biokerosen fremstillet på basis af halm ses, meget sammenligneligt med 2. g. biodiesel, at have en meget lavere emission end fossil kerosen.

Det ses, at emissionerne til produktionen af flyene er meget små, på trods af at de samlede produktionsemissioner er relativt anseelige, hvilket skyldes, at transportdistancen over flyets levetid er meget stor i sammenligning med andre transportmidler.



Figur 19: Energieffektivitet for fly i % for 2015, 2020, 2035 og 2050. Energieffektivitet er her forstået som det mekaniske energiforbrugs andel af det samlede energitab i sporet, og kan aflæses af den 'gennemsgtige bjælke'. Tallet til højre for hver søjle indikerer i MJ det samlede energitab til produktion af den mekaniske energi krævet for at flyve 1 'sædekm.'. Manglende søjler indikerer, at sporet ikke er tilgængeligt det pågældende år.

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

### Sammenfattende konklusioner for fly

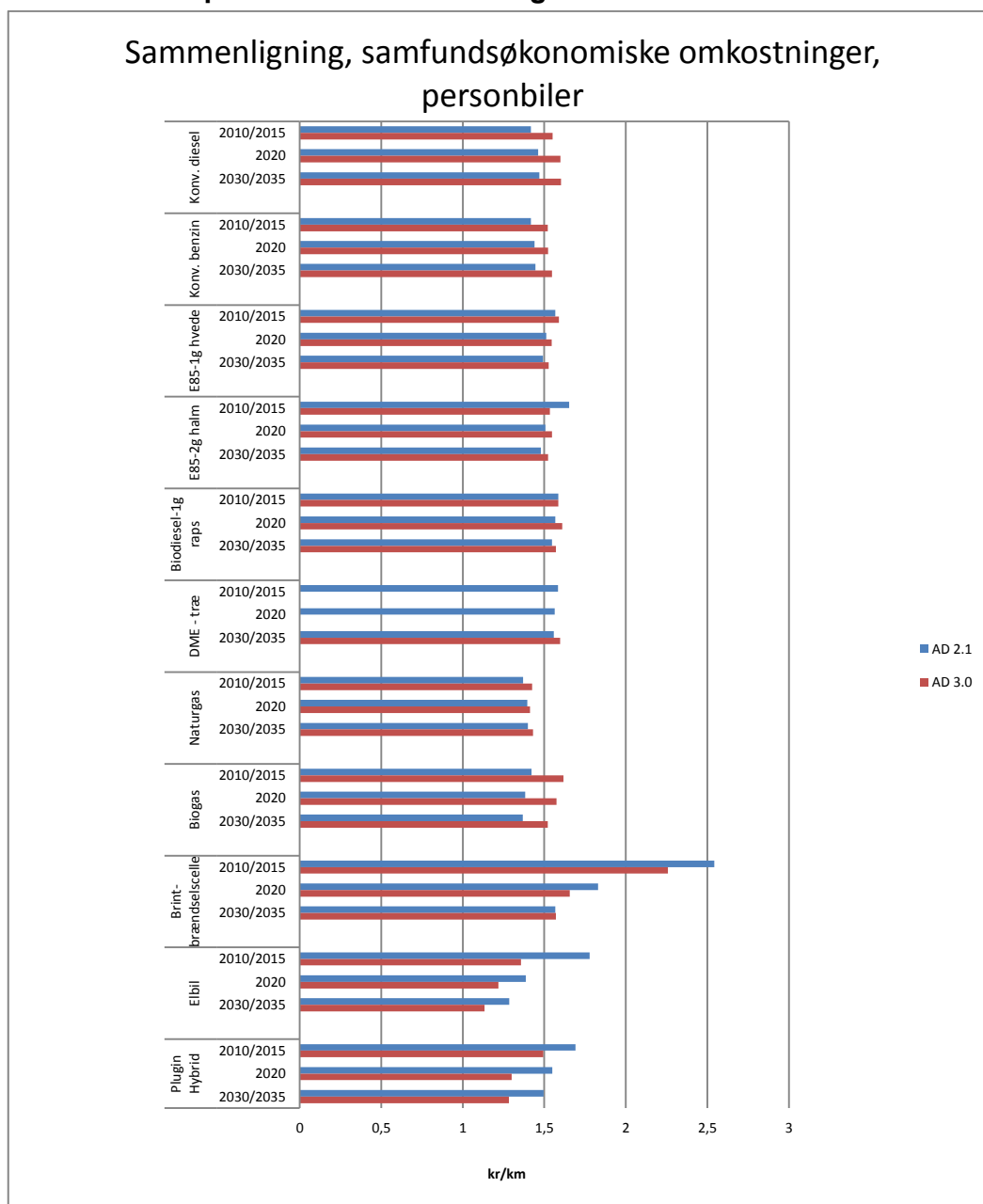
Anvendelse af biokerosen ses at have en meget mindre emission end fossil kerosen, og forventes at få lavere produktionsomkostninger end fossil kerosen sent i analysens tidsforløb. Herudover er konklusionerne omkring fly meget sammenlignelige med konklusionerne for de andre transportmidler.

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

AD modellen version 3.0 er blevet ændret på en række områder i forhold til tidligere version 2.1 af AD modellen. Dette drejer sig både om typen af transportmidler, drivlinjerne og drivmidlerne, som er medtaget i modellen, såvel som metode og datamæssige ændringer.

For at give en oversigt over konsekvensen af disse ændringer er nedenfor vist en sammenligning af resultaterne for personbiler mht. omkostninger, drivhusgasemissioner og energieffektiviteter. Grunden til, at busser og lastbiler ikke også er inkluderet i denne sammenligning, er, at de inkluderede typer af busser og lastbiler, såvel som grundlæggende antagelser omkring årlig kørsel mm., er ændret fra version 2.1 til 3.0 af AD modellen. En meningsfuld sammenligning vil derfor være vanskelig. I forhold til personbiler, er det derimod samme bil, som er anvendt i de to modeller, og antagelser omkring kørselslængder med mere over bilens livstid er uændrede.

### 1.7.1 Sammenligning af samfundsøkonomiske omkostninger for personbiler fra AD 2.1 og 3.0



Figur 20: Sammenligning af resultater for samfundsøkonomiske omkostninger fra personbiler i AD 2.1 og AD 3.0. Resultater er kun medtaget for sammenlignelige drivlinjer og sammenlignelige år. Resultater medtager ikke ILUC, og er baseret på et langtidsmarginalperspektiv for el, men et gennemsnitsperspektiv for fossile brændstoffer.

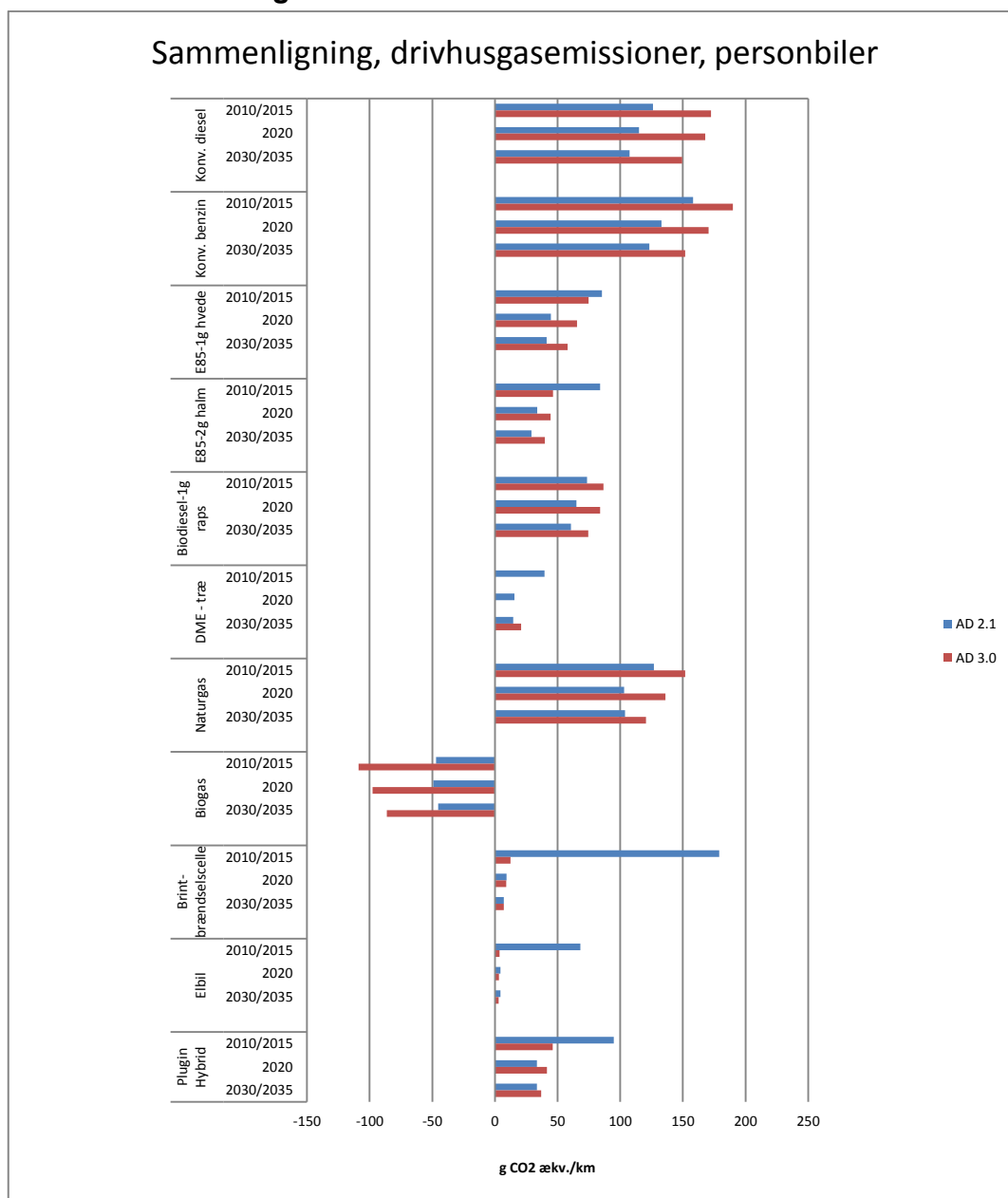
Årsagerne til de væsentligste forskelle i resultaterne for samfundsøkonomiske omkostninger i AD 2.1 og AD 3.0 gennemgås i tabellen nedenfor:

Forskel	Væsentligste årsager
Alle køretøjer, alle år	<ul style="list-style-type: none"> <li>AD 3.0 er baseret på emissioner fra kørsel under danske forhold, i modsætning til AD 2.1 som er baseret på forbrug under modellerede NEDC kørsler. Dette giver for alle drivlinjer et højere forbrug, og dermed øget omkostning.</li> </ul>
Alle køretøjer, alle år	<ul style="list-style-type: none"> <li>Samfundsøkonomisk afkastkrav er sat til 4 % i AD 3.0 imod 5 % i AD 2.1. Dette betyder omkring 5-6 øres omkostningsreduktion pr. km. på samtlige køretøjer i alle år.</li> </ul>

El-, plug-in hybrid- og brintbrændselscellebiler, alle år.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batteriprisen er væsentlig lavere i AD 3.0 end i AD 2.1</li> <li>• De pågældende personbiler antages at have mindre reparationer og slid i AD 3.0 end i 2.1</li> <li>• Specifikt for brintbrændselscellebilen skyldes ændringen også at bilen i AD 3.0 har mindre batteri og mindre brændselscelle</li> </ul>
Bil på DME i 2010/2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DME fra træ anses ikke for værende markedsmoden i 2010/2015 i AD 3.0</li> </ul>
Bil på RME, alle år	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Markedsprisen for rapsfrø antages at være lavere i AD 3.0</li> </ul>
Bil på biogas, alle år	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Øgede anlægs- og driftsomkostninger ved biogasproduktion i AD 3.0</li> </ul>

*Tabel 1: Oversigt over væsentligste forskelle og årsager til disse i resultater for samfundsøkonomiske omkostninger for personbiler i AD modelversion 2.1 og 3.0*

## 1.7.2 Sammenligning af drivhusgasemissioner for personbiler fra AD 2.1 og 3.0



Figur 21: Sammenligning af resultater for drivhusgasemissioner fra personbiler i AD 2.1 og AD 3.0. Resultater er kun medtaget for sammenlignelige drivlinjer og sammenlignelige år. Resultater medtages ikke LUC, og er baseret på et langtidsmarginalperspektiv.

Væsentlige forskelle, og deres årsag er gennemgået nedenfor:

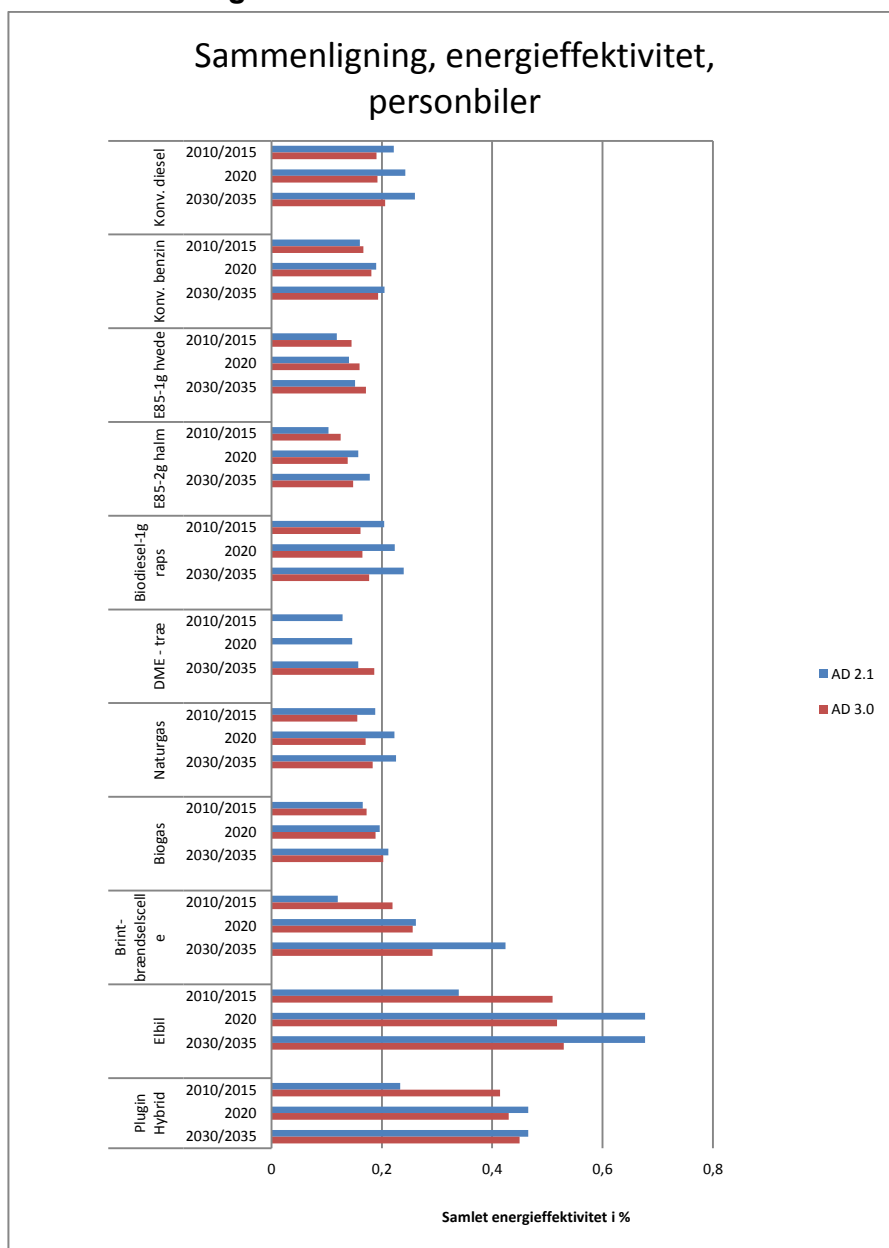
Forskel	Væsentligste årsager
Alle biler, alle år	<ul style="list-style-type: none"> <li>AD 3.0 er baseret på emissioner fra kørsel under danske forhold, i modsætning til AD 2.1 som er baseret på forbrug under modellerede NEDC kørsler. Dette giver for alle drivlinjer et højere forbrug</li> </ul>
Benzin og dieselbil i 2010/2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>Højere opstrømsmissioner fra produktionen af diesel og benzin</li> <li>Højere mekanisk energiforbrug for benzinbil i 2015 i AD 3.0</li> </ul>
Elbiler og brint-brændselscellebiler i 2010/2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>Emissionen fra elproduktion var i AD 2.1 baseret på gennemsnitsemmissionen fra el, selv når langtidsmarginalemmissionen var valgt.</li> </ul>
Bil på biogas, alle år	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mere negativ emission ved anvendelse af gylle i AD 3.0</li> </ul>

Bil på DME	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DME fra træ anses ikke for værende markedsmoden i 2010/2015 og 2020 i AD 3.0</li> <li>• Spildvarme fra produktionen af DME anvendes til fjernvarme i AD 3.0 med heraf følgende reduktion i emissioner.</li> </ul>
Plug-in hybrid, 2010/2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissionen fra elproduktion i 2010 var i AD 2.1 baseret på gennemsnitsemis-sionen fra el, selv når langtidsmarginalemissionen var valgt.</li> </ul>
Bioætanol fra halm, 2010/2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Højere emissioner fra el i 2010 i AD 2.1 end i AD 3.0</li> </ul>
Bil på E85 fra hvede, alle år	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lidt højere ætanoludbytte pr. råstofinput og lidt større output af biprodukter (DDGS og varme) i AD 3.0</li> </ul>
Bil på RME, alle år	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antaget højere udbytte pr. input af raps i AD 3.0</li> <li>• Emission fra biprodukter håndteret mere systematisk igennem systemudvidelse i AD 3.0 frem for økonomisk allokering, som i AD 2.1</li> </ul>

*Tabel 2: Oversigt over væsentligste forskelle og årsager til disse i resultater for drivhusgasemissioner for personbiler i AD modelversion 2.1 og 3.0*



### 1.7.3 Sammenligning af energieffektiviteter for personbiler fra AD 2.1 og 3.0



Figur 22: Sammenligning af resultater for energieffektivitet fra personbiler i AD 2.1 og AD 3.0. Resultater er kun medtaget for sammenlignelige drivlinjer og sammenlignelige år. Resultater er baseret på et langtidsmarginalperspektiv.

Igen er årsagerne til de væsentligste forskelle i resultaterne for energieffektivitet i AD 2.1 og AD 3.0 gennemgået i tabellen nedenfor:

Forskel	Væsentligste årsager
Alle biler, alle år	<ul style="list-style-type: none"> <li>AD 3.0 er baseret på drivmiddelforbrug fra kørsel under danske forhold, i modsætning til AD 2.1 som er baseret på forbrug under modellerede NEDC kørsler. Dette giver for alle drivlinjer et højere forbrug, og hermed lavere energieffektivitet. Særligt de elektriske drivlinjer er berørt af denne ændring.</li> </ul>
El-, plug-in hybrid- og brintbrændselsceller i 2010/2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>Emissionen fra elproduktion var i AD 2.1 baseret på gennemsnitsemmissionen fra el, selv når langtidsmarginalemissionen var valgt. Energieffektiviteten fra gennemsnitsproduktionen er væsentlig lavere end fra langtidsmarginalproduktionen, da langtidsmarginalproduktionen stort set er baseret på vind, som definitionsmessigt har en effektivitet på 100 %.</li> </ul>

Bil på DME, alle år	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DME fra træ anses ikke for værende markedsmoden i 2010/2015 i AD 3.0</li> <li>• Spildvarme fra produktionen af DME anvendes til fjernvarme i AD 3.0 med heraf følgende stigning i energieffektivitet.</li> </ul>
Bil på E85 fra hvede, alle år	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lidt højere ætanoludbytte pr. råstofinput og lidt større output af biprodukter (DDGS og varme) i AD 3.0</li> <li>• Lidt højere virkningsgrad af benzinbil i AD 3.0 end AD 2.1 i 2020.</li> </ul>

*Tabel 3: Oversigt over væsentligste forskelle og årsager til disse i resultater for energieffektiviteter for personbiler i AD modelversion 2.1 og 3.0*

## 2 Indledning og baggrund

Som led i Energiaftalen af 22. marts 2012 er der afsat en pulje på i alt 9 mio. kr. i 2013-2015 til udvikling af en model til at analysere de klima- og energimæssige forhold ved anvendelsen af alternative drivmidler. Modellen hedder Alternativ Drivmiddelmodellen – AD modellen - og blev igangsat af Energistyrelsen i 2006.

Baggrunden for dette har været, at den danske transportsektor frem mod 2050 skal være del af en omstillingsproces mod alternative drivmidler. Herudover er 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 CO<sub>2</sub> reduktion fra transportsektoren på minimum 6 %<sup>5</sup>. I 2050 er den nationale målsætning, at Danmark skal være fossil-uafhængig. Herudover er en EU-målsætning, at drivhusgasemissionerne samlet set skal være reduceret med 85-90 % i forhold til 1990-niveau.

Denne rapport (Alternativ Drivmiddelrapporten - AD rapporten) beskriver den metodemæssige baggrund for AD modellen, gennemgår dens resultater og analyserer væsentlige ændringer i forhold til tidligere versioner af AD modellen. Herudover giver rapporten en teknisk gennemgang af AD modellen. Denne rapport relaterer til AD modellen version 3.0

Udviklingen af AD modellen og rapporten er ledet af Energistyrelsen. COWI har sammen med Energistyrelsen stået for udviklingen af AD modellen og indsamling af data relateret til drivlinjer og emissioner og omkostninger ved inputs og outputs fra drivmiddelfremstillingen. FORCE Technology har udført dataindsamlingen relateret til drivmiddelfremstillingen. Data for drivmiddelfremstillingen er kvalitetssikret af (S&T)<sup>2</sup> Consultants Inc. Model, metode og resultater har desuden været gennemgået med en gruppe af eksperter fra Energinet.dk, DCE, Trafikstyrelsen, Miljøstyrelsen, NISA og Danmarks Rederiforening.

Endelig har en række eksterne eksperter og høringsparter bidraget med data og metodemæssige forslag.

Kommentarer til model eller rapport kan sendes til Andreas Moltesen fra Energistyrelsen på [anj@ens.dk](mailto:anj@ens.dk)

---

<sup>5</sup> Brændstofkvalitetsdirektivet 98/70/EF og VE-direktivet 2009/28/EF

## 2.1 Formål

AD modellen analyserer de klima- og energimæssige forhold ved anvendelsen af alternative drivmidler i en bred vifte af transportmidler. Formålet hermed er at styrke beslutningsgrundlaget omkring omlægning af drivmidler for alle transportmidler, herunder personbiler, lastbiler, busser, toge, skibe og fly, i perioden 2015 til 2050 i Danmark. Konkret skal AD modellen og rapporten styrke beslutningsgrundlaget i forhold til opfyldelsen af 2020 og 2050 målsætninger indenfor transportsektoren.

Herudover er målsætningen for AD modellen at fungere som et teknologikatalog og referencepunkt for opgørelser omkring samfundsøkonomiske omkostninger, energieffektivitet og drivhusgasemissioner for enkelttransportmidler i Danmark.

## 2.2 Indhold

I rapportens kapitel 3 beskrives drivmidler og drivlinjer, som indgår i AD modellens 'spor'.

I kapitel 4 gives en kort beskrivelse af den anvendte metode.

I kapitel 5 beskrives analysens vigtige forudsætninger og konsekvenser af disse.

I kapitel 6 diskuteres væsentlige usikkerheder i analysen.

I bilag A præsenteres et overblik over opbygningen af AD modellen og en vejledning i anvendelsen og udvidelsen heraf.

Rapportens resultater er udelukkende præsenteret i kapitel 1.

### 3 Valg af drivmidler og drivlinjer

For at belyse klima- og energimæssige samt økonomiske konsekvenser ved omlægning af drivmidler for alle transportmidler, inkluderer AD modellen en række drivmidler og drivlinjer indenfor de forskellige transportmidler. Koblingen af et drivmiddel og en drivlinje indenfor et transportmiddel benævnes et spor. Da antallet af potentielle spor er meget stort, har det været nødvendigt at vælge et antal spor ud, som AD modellen skal inkludere. Valget af spor er baseret både på tilgængeligheden af råstoffet i Danmark, som de baserer sig på, samt sporets teknologiske relevans.

De udvalgte spor med personbiler dækker:

- 1) Benzin (referencespor)
- 2) Diesel (referencespor)
- 3) Bioætanol produceret på hvede (E85, dvs. 85 volumen-% ætanol og 15 % benzin)
- 4) Bioætanol produceret på sukkerroer (E85)
- 5) Bioætanol produceret på halm (E85)
- 6) Biodiesel (RME) produceret på raps
- 7) Biodiesel baseret på halm
- 8) DME baseret på træ
- 9) Naturgas (som CNG)
- 10) Biogas baseret på gylle, dybstrøelse, energimajs, industriaffald og halm
- 11) Plug-in hybrid på metanol baseret på træ til anvendelse i metanolbrændselscelle
- 12) Elproduceret brint i brintbrændselscelle
- 13) Plug-in hybrid på el og elproduceret brint i brintbrændselscelle.
- 14) Elbil med batterier opladet fra elnettet
- 15) Elbil med stort batteri opladet fra elnettet
- 16) Plug-in hybrid på el og benzin

De udvalgte spor med varebiler dækker:

- 17) Benzin (referencespor)
- 18) Diesel (referencespor)
- 19) Naturgas (som CNG)
- 20) Elbil med batterier opladet fra elnettet

De udvalgte spor med lastbiler dækker:

- 21) Diesel (referencespor)
- 22) Naturgas (som CNG)
- 23) Biogas (som CBG)
- 24) Biodiesel (RME) baseret på raps

- 25) Biodiesel (HVO) baseret på raps
- 26) DME baseret på træ

De udvalgte spor med busser dækker:

- 27) Diesel (referencespor)
- 28) Naturgas (som CNG)
- 29) Biogas (som CBG)
- 30) Biodiesel (RME) baseret på raps
- 31) Biodiesel (HVO) baseret på raps
- 32) Hybridbus på diesel
- 33) Elbus

De udvalgte spor med tog dækker:

- 34) IC tog på diesel (referencespor)
- 35) IC tog på el direkte fra elnettet
- 36) IC tog på biodiesel baseret på halm
- 37) Lokaltog på diesel (referencespor)
- 38) Lokaltog på biodiesel baseret på halm
- 39) Lokaltog på naturgas (som CNG)

De udvalgte spor med skibe dækker:

- 40) 9000 TEU på HFO (reference)
- 41) 9000 TEU på diesel
- 42) 9000 TEU på biodiesel baseret på træ
- 43) 9000 TEU på naturgas (som LNG)
- 44) Hurtigfærge på diesel
- 45) Hurtigfærge på diesel baseret på halm

De udvalgte spor med fly dækker:

- 46) Standard passager jetfly på kerosen
- 47) Standard passager jetfly på biokerosen

## 4 Beskrivelse af analysemetode

Som beskrevet i kapitel 1 er formålet med denne analyse at vise klima-, energimæssige og økonomiske konsekvenser af anvendelsen af et drivmiddel i et eller flere køretøjer. Konsekvenserne er her forstået som forskellen mellem en situation, hvor der anvendes et givent transportmiddel (f.eks. én elbil), og baseline situationen hvor transportmidlet ikke anvendes. I beregningerne indgår således det merforbrug fra well-to-wheels, WtW, (brønd til hjul)<sup>6</sup> af el, olie, naturgas, landbrugsprodukter mv., som anvendelsen af disse transportmidler forårsager produktionen af. Herudover medtages også emissioner og energiforbrug knyttet til produktionen af transportmidlerne. I forhold til de udregnede omkostninger medtager modellen også produktion og vedligehold af transportmidlet og den nødvendige infrastruktur.

Da der er tale om ændringer i forbruget, er målet i videst muligt omfang ikke at anvende gennemsnitsomkostninger og emissioner, men derimod de omkostninger og emissioner, der er knyttet til et yderligere forbrug, en marginaltilgang<sup>7</sup>. Dette har dog kun været muligt at anvende denne tilgang i forhold til el og fossil olie. Øvrige input i modellen er baseret på gennemsnitsdata.

Beregningerne i AD modellen og som gengivet her i rapporten er partielle. Dvs. at beregningerne ikke forsøger at give et helhedsbillede af hele transportsektoren. Beregningerne viser blot konsekvenserne af anvendelsen af et drivmiddel i et eller få transportmidler.

Nedenfor er givet en gennemgang af de valgte metoder for opgørelsen af de udregnede emissioner, energieffektivitet og omkostninger.

### 4.1 Emissioner

Ved opgørelse af de samlede emissioner, som er forårsaget af valg af en drivlinje med tilhørende drivmiddel, består den første opgave i at lave en opgørelse over relevante emissioner. Emissioner er generelt knyttet til de industriprocesser, som er forårsaget af valget af drivlinje og drivmiddel, samt emissioner fra brugen af denne drivlinje og drivmiddel. AD model-

---

<sup>6</sup> WtW metoden indebærer, at emissionsberegningerne omfatter de globale emissioner, altså også emissioner, der finder sted uden for Danmark i forbindelse med indvinding eller produktion af drivmidler. I modelarbejdet er der dog lagt vægt på, at emissionsberegningen og samfundsøkonomi også kan afgrænses til de danske emissioner, der ligger til grund for de danske forpligtigelser og opgørelser knyttet til det danske klimaregnskab. Det antages i den sammenhæng, at landbrugsafgrøder produceres i Danmark, og at konverteringen af disse til drivmidler foregår i Danmark.

<sup>7</sup> Producenten som ændrer sin produktion som følge af små ændringer i efterspørgsel.

len medtager ikke emissioner relateret til produktion og bortskaffelse af infrastruktur (såsom tankstationer og ladestandere).

De industriprocesser, som er inkluderet i opgørelsen af emissionerne, er generelt antaget at være de processer, som er en del af drivmidlets livscyklus i forholdet 1:1. For eksempel, er det i forhold til emissionerne fra drivmidlet "ætanol fra sukkerroer" blandt andet medtaget processer, som knytter sig til dyrkningen af mængder af sukkerroer i en mængde, som tilsvarende produktionen af den givne mængde ætanol.

Der er dog en vigtig undtagelse i forhold til denne regel: Hvis der i produktionen af et bio-brændstof bruges et restprodukt (f.eks. gylle, halm e.l.), og dette restprodukt allerede er fuldt ud anvendt, er antagelsen af udbuddet ikke stiger som følge af øget efterspørgsel. I stedet antages det, at visse brugere af dette restprodukt vil finde et alternativ. En øget efterspørgsel efter et restprodukt antages i denne situation at lede til en øget efterspørgsel efter et alternativ. Emissionen relateret til produktionen af dette alternativ er medtaget i analysen.

Hvis produktionen af et drivmiddel resulterer i produktionen af biprodukter/restprodukter, vil produktionen af drivmidlet blive godskrevet med emissioner svarende til de emissioner, som dannes ved produktionen af de produkter, som bliver fortrængt af de producerede biprodukter. Her antages igen, at forholdet mellem udbud og efterspørgsel er 1. Denne metode-mæssige tilgang er i denne form for analyser ofte betegnet systemudvidelsesmetoden.

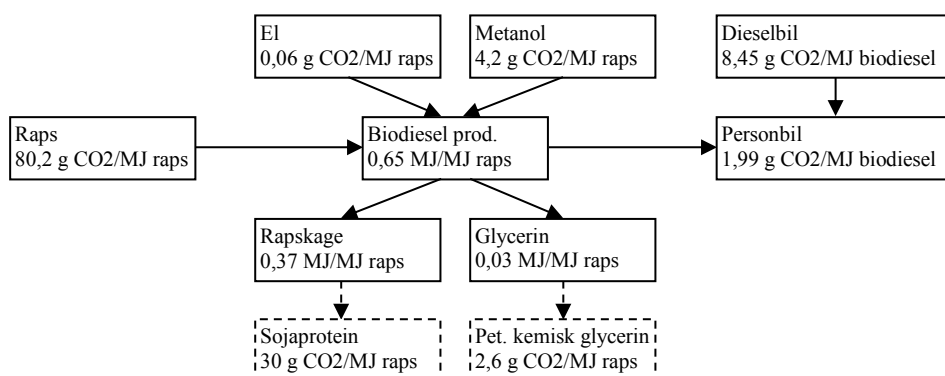
Ud fra denne procedure etableres et overblik over de processer, som medtages i opgørelsen over emissionerne fra en given drivlinje og drivmiddel. Optimalt set er det emissionerne knyttet til produktionen fra den marginale produktion. Der skelnes mellem den langsigtede og kortsigtede marginale produktion. Den kortsigtede marginale produktion er produktion som kommer fra eksisterende produktionsanlæg, som skrues op eller ned som følge af en ændring i efterspørgsel. Den langsigtede marginale produktion er produktionen som kommer fra produktionskapacitet, som installeres som følge af en ændring i efterspørgslen. Den kortsigtede og langsigtede marginale produktion vil i mange tilfælde være forskellige: Den kortsigtede marginale produktion vil i et marked med stigende efterspørgsel være produktionen med højere marginale produktionsomkostninger, hvorimod den langsigtede marginale produktion ofte vil være produceret på optimerede moderne produktionsanlæg, som ofte giver lavere produktionsomkostninger. Det har dog kun været muligt at identificere marginalen i forhold til el- og olieproduktionen. For andre processer er valgt en gennemsnits-emission knyttet til de medtagne processer. Hvilket perspektiv som anvendes i beregningerne, kan vælges af brugeren i modellen.

Analysen medtager drivhusgasemissioner ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ), og emissioner med virkninger for den lokale luftkvalitet, herunder emissioner af  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  og partikler.

Drivhusgasemissioner bliver sammenvejet ud fra drivhusgassernes effekt set i et 100 års perspektiv, hvilket betyder at  $\text{CO}_2$  bliver vægtet med 1,  $\text{CH}_4$  med 25 og  $\text{N}_2\text{O}$  med 298 på massebasis. Alle emissioner bliver prissat ved udregning af eksternaliteter knyttet til drivlinjer og drivmidler. Dette er gennemgået i yderligere detaljer i afsnit 4.3



Eksemplet nedenfor viser en oversigt over tilgangen til udregningen af emissioner generelt.



Figur 23: Eksempel på processer, som medtages ved udregning af drivhusgasemissionen for produktionen af biodiesel af raps. Stiplede linjer indikerer, at et biprodukt substituerer produktionen af produktet markeret med de stiplede linjer. Emissionen fra de substituerede produkter skal derfor tælles negativt. Figuren indikerer, at der ved produktionen af 0,65 MJ biodiesel er en emission på 57 g CO<sub>2</sub>. Figuren, og dermed også den opgjorte emission, er dog forenklet i forhold til AD modellen, da den ikke medtager transport mellem leddene.

#### 4.1.1 Centrale datakilder og antagelser for emissioner

Opgørelse af emissioner fra drivmiddel produktion og anvendelse anvender data fra mange forskellige kilder. De mest centrale er opgjort i tabellen nedenfor:

Dataområde	Kilde
Emissioner ved råstofproduktion og biproduktproduktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context WTT APPENDIX 1 Description of individual processes and detailed input data. 2011</li> </ul>
Emissioner ved produktion af råstoffer til transportmiddel-fremstillingen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Addition of Materials Data to the Danish Transportation LCA Model. (S&amp;T)<sup>2</sup> Consultants Inc, 2014</li> </ul>
El- og varmeproduktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>Forudsætninger for samfundsøkonomiske analyser på energiområdet. Energistyrelsen. 2014</li> <li>World Energy Outlook. IEA, 2014</li> </ul>
ILUC emissioner og tab af kulstof i jord	<ul style="list-style-type: none"> <li>Global Trade and Environmental Impact Study of the EU Biofuels Mandate. IFPRI 2010</li> <li>Carbon footprint of bioenergy pathways for the future Danish energy system. SDU og COWI, 2014</li> </ul>
Emissioner af NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O og partikler fra transportmidler	<ul style="list-style-type: none"> <li>For personbiler: EU kommissionens forordning nr. 692/2008 om EURO V og VI normer</li> <li>Lastbiler og busser: COPERT modelberegninger</li> <li>For skibe: Beregningsmodel SHIP-DESMO-Container Ship, 2014</li> <li>For fly: SAS group sustainability report, 2012.</li> <li>For tog: Non-Road Mobile Machinery, 97/68/EC, direktivændringerne som fremgår af Direktiv 2002/88/EC, Direktiv 2004/26/EC, Direktiv 2006/105/EC, Direktiv 2015/26/EU, Direktiv 2011/88/EU, og Direktiv 2012/46/EU</li> </ul>
Emissioner af CO <sub>2</sub> ved anvendelse af drivmidler	<ul style="list-style-type: none"> <li>Udregnet på baggrund af fossilt C-indhold i drivmiddel.</li> </ul>

Tabel 4: Overblik over centrale kilder til udregning af emissioner i AD modellen.

Som det fremgår af tabel 4, er det for flere transportmidler antaget at emissionen af CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> og partikler følger lovgivningskravene. Denne antagelse introducerer en fejlkilde, da dette ofte ikke vil være tilfældet. Det skal dog understreges, at modellen kun medtager disse emissioner for at kunne opgøre samlede omkostninger, og at emissionerne

kun udgør en mindre post i de samlede omkostninger. Usikkerheden vurderes derfor at være acceptabel.

## 4.2 Energieffektivitet

Energieffektivitet er her overordnet defineret som forholdet mellem den nyttiggjorte output energi og den anvendte input energi. Systemgrænserne for energieffektivitetsberegningerne omfatter, ligesom ovenstående beregninger, også hele WtW perspektivet. Energieffektiviteten er beregnet ud fra den nedre brændværdi.

Nedenfor gennemgås udregningerne af energieffektiviteten og systemgrænser i de forskellige dele af systemet.

### 4.2.1 Energieffektivitet ved råstof-, drivmiddel- og transportfremstilling

I forhold til fremstilling af råstoffer er effektiviteten af skabelsen af råstofferne (f.eks. olie, halm, el fra vindmøller) definitions-mæssigt ikke taget med. Dog er energien brugt til at udvinde disse råstoffer medtaget.

Ved produktion af drivmidler medregnes energiindholdet af biproduktet i det omfang, at biproduktet bliver nyttiggjort. Energi, som anvendes til at fremstille inputs til drivmiddel-fremstilling ud over end el og varme, er ikke medtaget i opgørelsen af energieffektiviteten. Dette betyder for eksempel i forhold til input af metanol i biodiesel, at energien i metanolen er inkluderet i beregningen af energieffektiviteten, men at energien som anvendes til at fremstille metanolen, ikke er.

Samme tilgang som for produktionen af drivmidler anvendes for udregningen af energiforbrug for transportmiddelfremstillingen.

### 4.2.2 Energieffektivitet af transportmidlerne

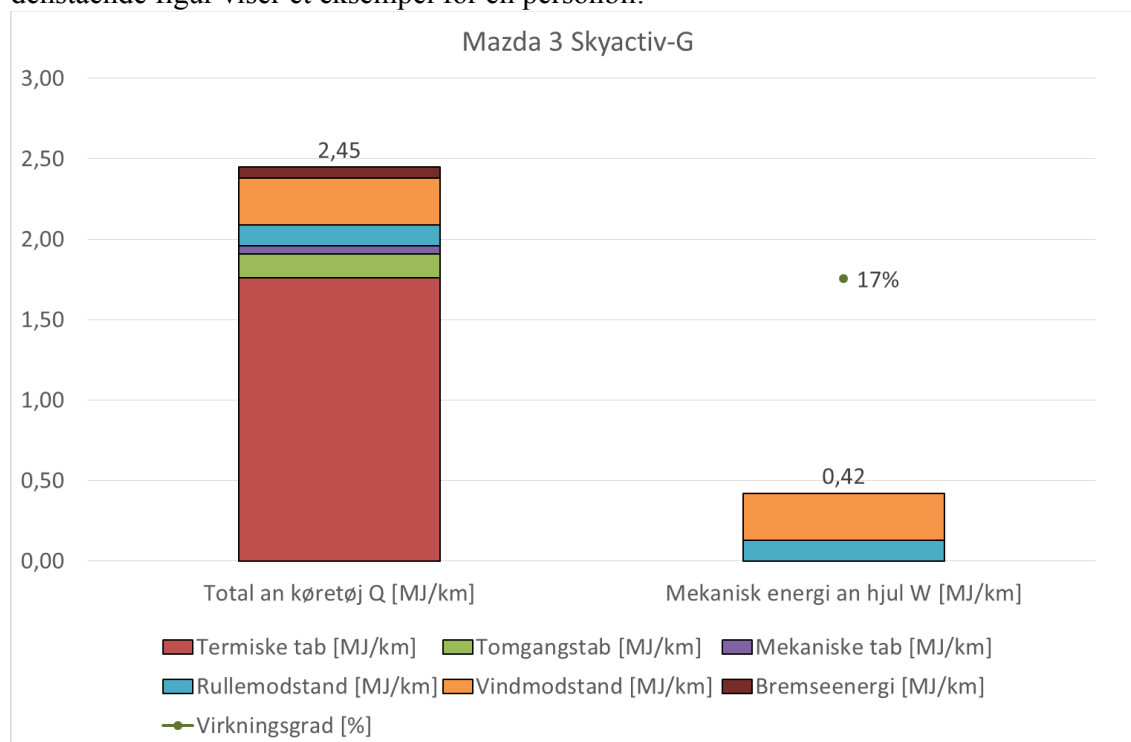
I modsætning til tidligere versioner af AD modellen, hvor energiforbruget for personbilerne var baseret på testcyklusser, er energiforbruget i køretøjerne i AD 3.0 baseret på forbrug under tilnærmelsesvist faktiske danske forhold. Dette betyder et generelt forøget energiforbrug for personbilerne i forhold til tidligere versioner af AD modellen. Særligt har de elektriske drivlinjer fået et højere energiforbrug, som blandt andet skyldes højere gennemsnits-hastigheder under danske forhold end under testcyklusser. Højere kørselshastigheder resulterer særligt for elektriske drivmidler i et højere energiforbrug. Da de øvrige transportmidler også baserer sig på faktiske energiforbrug, betyder ændringen, at sammenligning af energieffektiviteter på tværs af køretøjstyper bliver lettere. Yderligere detaljer omkring udregning af energieffektivitet for transportmidlerne kan ses af rapporterne ”Validering af energiforbrugsdata for køretøjer i AD modellen. Teknologisk Institut, 2015”, og ”Energiforbrug for tog og fly. Teknologisk Institut, 2016”.

Herudover medtages i AD 3.0 alle tab i transportmidlet og ikke kun drivlinjereleterede tab, som i højere grad var tilfældet i AD 2.1

Endelig er definitionen af energieffektivitet for transportmidlerne ændret i AD 3.0. I AD 2.1 blev energieffektiviteten i transportmidlet defineret som forholdet mellem den mekaniske energi som motoren frembragte og energien i drivmidlet. Problemet med denne tilgang, som

primært fokuserede på motorens virkningsgrad, var, at f.eks. kabinetab ikke blev medtaget. Dette var af væsentlig betydning for angivelsen af f.eks. elbilens virkningsgrad, som uden dette tab fremstod meget høj i forhold til konventionelle personbiler.

I AD 3.0 anses udelukkende den energi, som skal til for at overkomme gnidningsmodstanden fra vej, luft og/eller vand samt evt. potentiel energi som skal anvendes for at foretage en given rejse i transportmidlet. Dette betyder, at f.eks. bremsetab vil blive regnet som tabt energi. Idéen med denne tilgang har været at energien til at overkomme gnidningsmodstanden, samt evt. potentiel energi for et givent transportmiddel kan ses som det absolutte minimum af energi, som skal leveres. Al anden energianvendelse kan betragtes som tab. Nedenstående figur viser et eksempel for en personbil:



Figur 24: Eksempel på energibalancer for C-segment benzin personbil under normal daglig dansk kørsel. Energieffektiviteten for køretøjet bliver her  $0,42/2,45=17\%$  med ovenstående betragtningsskema.

### 4.2.3 Udregningen af samlet energieffektivitet for systemet

Energieffektivitet for et system forstås ofte som et forhold mellem det samlede output af nyttiggjort energi ud af systemet og inputtet af primær energi. Outputtet kan være en kombination af mange forskellige energiformer, f.eks. mekanisk energi, el, varme, foderenergi, mm. Der skelnes ofte ikke mellem forskellige 'kvaliteter' af energi. Dvs. at nyttiggjort varme tæller med på lige fod som el, på trods af varmeenergiens 'lavere kvalitet'. Primær energi er her ofte forstået som energi, der kan udvindes fra naturen, såsom fossile energiformer, sol, vind, mm. Oftest medtages ikke energien til at fremstille denne 'primære energi' i systemet, såsom solenergi til at fremstille vind, etc. Dog medtages energien, som anvendes til at 'høste' den primære energi oftest som en del af systemet.

Formålet med en energieffektivitetsindikator i AD modellen er, at anskueliggøre hvor meget energi der kræves for at skabe den nødvendige mekaniske energi for at flytte transportmidlet en given strækning.

En mulig og meget simpel indikator i denne sammenhæng kunne være en angivelse af forholdet af alt nyttiggjort energi ud af systemet med det samlede energiinput ind i systemet. Problemet med denne energieffektivitetsindikator i denne sammenhæng er imidlertid, at hvis der f.eks. er store mængder af biprodukter, som skabes i systemet med stor effektivitet, vil en evt. lav energieffektivitet af drivmiddelforbruget i køretøjet 'drukne' og således ikke vise sig i væsentlig grad i det endelige resultat. Dette er tilfældet med f.eks. benzin og diesel, hvor der produceres store mængder biprodukter med høj effektivitet. Af denne grund vurderes denne indikator ikke at kunne anvendes i denne sammenhæng.

En anden tilgang til at etablere en indikator for energieffektivitet af systemet er at estimere samtlige energitab, som opstår for at producere nok drivmiddel til at skabe den nødvendige mekaniske energi for at transportere transportmidlet en km. Det totale energitab pr. transportmiddel-km. kan ligeledes ses som en energieffektivitetsindikator, der angiver, hvor effektivt et system kan frembringe en given energiform. Denne indikator har ikke som ovenstående den ulempe, at store biproduktioner i en inkluderet proces 'forstyrrer' billedet. Den har imidlertid den bagdel, at hvis der i sporet indgår en proces hvor der både produceres store mængder biprodukter og hvor der er betydelige tab i processen, vil indikatoren angive store tab forbundet med sporet. Dette vil f.eks. være tilfældet ved flere biobrændstofproduktioner.

Energieffektivitetsindikatoren valgt i dette studie benytter denne sidstnævnte indikator med den ændring, at tabet i en given proces kun tilskrives sporet proportionalt med i hvor høj grad energioutputtet fra processen videreføres i sporet. Dvs., at hvis f.eks. en biodieselproces resulterer i, at 40% af energien kommer ud som foderstoffer, er det kun 60% af tabet i biodieselprocessen som tilskrives biodieselen, resten tilskrives foderstoffet.

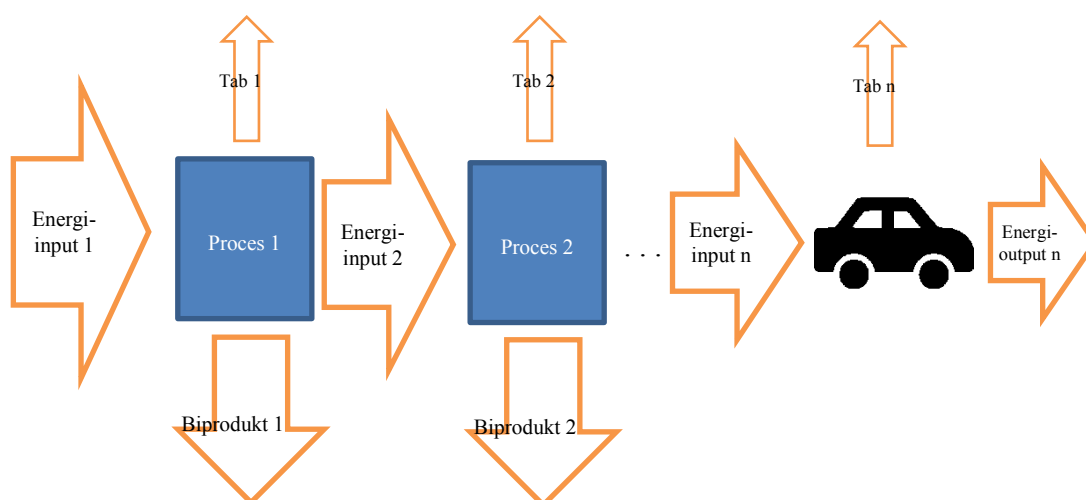
Ud fra disse principper er energieffektivitetsindikatoren udregnet på følgende måde:

$$\text{Effektivitet} = \frac{\sum_{k=1}^n \text{tab}_k \cdot \left( \frac{\text{Energiinput}_{k+1}}{\text{Biprodukter}_k + \text{Energiinput}_{k+1}} \right)}{\text{Energioutput}_n + \sum_{k=1}^n \text{tab}_k \cdot \left( \frac{\text{Energiinput}_{k+1}}{\text{Biprodukter}_k + \text{Energiinput}_{k+1}} \right)}$$

Hvor n er antallet af processer i kæden (1= råstofproduktionen, og n=anvendelsen af drivmidlet i transportmidlet)

Energioutput<sub>n</sub> angiver den mekaniske energi leveret fra systemet.

En illustration af udregningen kan ses af nedenstående figur:



Figur 25: Illustration af udregningen af systemets energieffektivitet.

I tidligere versioner af AD modellen er energieffektivitetsindikatoren udregnet ved multiplikation af energieffektiviteten (nyttiggjort energi ud/energi ind) fra hver enkelt proces i systemet. Metoden er i denne udgave af AD modellen ændret, da den tidligere metode i mindre grad afspejlede det fysiske energiflow i systemet. Resultatmæssigt er der dog meget lille forskel på de to metoder.

### Grænsedragning

Som angivet ovenfor forsøges med denne indikator at opgøre det samlede tab tilskrevet sporet pr. forbrugt energi i sporet (samlede tab + mekanisk energi). En udfordring er imidlertid at sætte grænserne for hvad som er, og hvad som ikke er inkluderet i sporet. Eksempelvis ville der med ovenstående gennemgang kunne argumenteres for, at energitab ved produktion af produktions- og transportfaciliteter mm. i sporet burde være inkluderet, og i princippet yderligere processer, som bidrager til denne produktion, osv.

I denne sammenhæng medtages dog udelukkende:

- produktion af råstofferne som anvendes til drivmidlet. Tab ved produktion af råstofferne, såsom tab af sollys ved produktion af biomasse, medtages ikke.
- konverteringsprocesser af råstoffer til drivmidler
- transport af råstoffer og drivmiddel
- produktion og bortskaffelse af transportmiddel
- omsætningen af drivmiddel til mekanisk energi i transportmidlet.

#### 4.2.4 Centrale datakilder og antagelser for energieffektivitet

De mest centrale kilder til beregning af energieffektivitet er opgjort i tabellen nedenfor:

Dataområde	Kilde
Energiforbrug til råstofproduktion og biproduktproduktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and power-trains in the European Context. IET JEC 2011.</li> <li>• Energistatistik 2011. Energistyrelsen</li> </ul>
Energiforbrug ved produktion af råstoffer til transportmiddelfremstillingen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Addition of Materials Data to the Danish Transportation LCA Model. (S&amp;T)<sup>2</sup> Consultants Inc, 2014</li> </ul>

Energiforbrug ved råstofkonvertering	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technology data for advanced bioenergy fuels. FORCE, 2013.</li> <li>• Technology data for advanced bioenergy fuels – extension 1. FORCE, 2014.</li> <li>• Biogas i Danmark - status, barrierer og perspektiver, Biogas Taskforce, november 2013.</li> </ul>
Energiforbrug for transportmidler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• For personbiler, varebiler, lastbiler og busser: Validering af energiforbrugsdata for køretøjer i AD modellen. Teknologisk Institut, 2015</li> <li>• For personbiler: Tank to Wheels Report, version 4.0. IET JEC. 2013; Energy Technology Perspectives. IEA. 2008.</li> <li>• For tung transport: Rammevilkår for gas til tung vejtransport. Energistyrelsen. 2014.</li> <li>• For skibe: Beregningsmodel SHIP-DESMO-Container Ship, 2014</li> <li>• For fly og tog: Energiforbrug for tog og fly. Teknologisk Institut, 2016</li> <li>• For fly: SAS group sustainability report. 2012.</li> <li>• For tog: Korrespondance med DSB</li> </ul>

Tabel 5: Overblik over centrale kilder til udregning af energieffektivitet i AD modellen.

### 4.3 Samfundsøkonomiske omkostninger

AD modellen udregner omkostninger for enkeltteknologier, mens omkostninger til udvikling, regulering, implementering mv. af teknologierne i samfundet, herunder omkostninger forbundet med politiske virkemidler som skatter og afgifter, ikke indgår. De samfundsøkonomiske omkostninger er beregnet i faktor-priser, dvs. eksklusiv skatter og afgifter, og for udvalgte år. Der er ikke taget højde for den risikopræmie, som virksomheder måtte kræve for at udvikle og realisere især de mindst modne teknologier.

Denne tilgang, hvor omkostningerne forbundet med teknologimodning ikke er medtaget, betyder, at der kan være relativt store forskelle mellem beregnede nutidige samfundsøkonomiske omkostninger og markedspriser.

De samfundsøkonomiske omkostninger opgøres for hele sporet, dvs. inkl. omkostninger til produktion og distribution af drivmidlet, omkostninger forbundet med produktion og brug af det transportmiddel, der anvender drivmidlet, omkostninger ved infrastruktur, samt eksterne omkostninger ved produktion og anvendelse af drivmidlet.

Der indgår følgende elementer i omkostningsberegningerne:

- Omkostninger for råvarer og andre ressourcer, herunder energiforbrug, der medgår til produktion af drivmidlet, typisk i markedspris ekskl. afgifter an anlæg.
- Indkomst fra salg af evt. biprodukter fra produktionen af drivmidlet, f.eks. foderkager, el og varme.
- Kapitalomkostninger, både for konverteringsanlæg og for transportmiddel, beregnet ud fra en økonomisk levetid og ved brug af en samfundsøkonomisk real kalkulationsrente på 4% p.a.
- Drift og vedligeholdelsesomkostninger i alle led, inkl. transportomkostninger af råvarer og mellemprodukter.
- Eksterne omkostninger fra luftemissioner (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, partikler og CO<sub>2</sub>) og støj i hele sporet, dvs. både opstrøms i produktion og konvertering af råvarer, ved distribution og ved anvendelse i transportmidlet.

I nedenstående tabel er som et eksempel vist beregning af de samfundsøkonomiske omkostninger for 2. generations biodiesel, baseret på halm som råstof.

Omkostningen for drivmidlet beregnes per GJ produceret drivmiddel, og denne omkostning omregnes efterfølgende til kr./km ud fra køretøjets energiforbrug per km.

Afskrivningerne af bilens produktionsomkostninger beregnes ud fra en forventet økonomisk levetid på 16 år og et gennemsnitligt kørselsforbrug på 18.000 km/år.

Eksternalitetsomkostningerne beregnes ud fra de forventede emissioner af de regulerede stoffer iht. EU emissionsnormer for Euro 6 samt EURO V og VI.

<b>Drivmiddelomkostninger</b>	
Råvarer	125 kr/GJ
+ Kapitalomkostninger	66 kr/GJ
+ Faste driftsomkostninger	54 kr/GJ
- Indtægter fra salg af biprodukter	108 kr/GJ
I alt	136 kr/GJ
+ Distribution inkl. tankstation	23 kr/GJ
<b>Drivmiddel i alt ab tankstation</b>	<b>159 kr/GJ</b>
<b>Drivmiddel i alt ab tankstation</b>	<b>0,19 kr/km</b>
<b>Køretøjsomkostninger</b>	
<i>Investeringsomkostning 160.622 kr</i>	
Afskrivning	0,76 kr/km
+ Driftsomkostninger	0,35 kr/km
<b>Køretøjsomkostninger i alt</b>	<b>1,10 kr/km</b>
<b>Eksterne omkostninger</b>	
CO <sub>2</sub>	-0,004 kr/km
+ CH <sub>4</sub>	0,000 kr/km
+ N <sub>2</sub> O	-0,000 kr/km
+ SO <sub>2</sub>	-0,003 kr/km
+ NO <sub>x</sub>	0,007 kr/km
+ Partikler	0,003 kr/km
+ Støj	0,048 kr/km
<b>Eksterne omkostninger i alt</b>	<b>0,051 kr/km</b>
<b>Samfundsøkonomisk omkostning i alt</b>	<b>1,34 kr/km</b>

Tabel 6: Samfundsøkonomiske omkostninger, 2. generations biodiesel i 2035, 2011 priser

De eksterne omkostninger beregnes ved at multiplicere de beregnede emissioner af de enkelte stoffer med en pris pr. kg eller ton udledt af det pågældende stof. De anvendte priser for CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O er baseret på Energistyrelsens fremskrivning af CO<sub>2</sub> kvoteprisen, og for SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> og partikler på Transportøkonomiske enhedspriser. Priserne på emissionerne af CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> og partikler er differentieret afhængigt af, om emissionen sker i byen, på landet eller en blanding mellem de to. Karakteristika for kategorierne land og by kan ses af "Værdisætning af transportens eksterne omkostninger. 2010. Transportministeriet". Emissioner fra fly og fra skibe anses for værende emissioner "på landet", i tråd med kategoriseringen i ovenfor nævnte rapport.

Når der kan blive tale om negative eksterne omkostninger skyldes det, at biprodukterne, f.eks. foderkager, sælges og erstatter produkter, der ellers foranlediger udledninger. I visse tilfælde betyder produktionen af biprodukter og substitueringen af almindelige produkter, at der samlet set sker et fald i udledningen for hele systemet, set i forhold til en situation uden produktion af drivmidlet.

Værdisætning af støj baseres på transportøkonomiske enhedspriser i kr/km for almindelige køretøjer og elbiler. Der er tale om en grov tilnærmelse, idet beregningerne ikke tager hensyn til, hvor bilerne kører, og at de forskellige drivmiddelspor har et forskelligt støjmønster. Både el- og gasdrevne biler støjer således mindre ved kørsel end referencekøretøjerne, men gasbilerne får ikke en godskrivning for dette.

Der medregnes infrastrukturomkostning for alle drivmidlerne. Disse optræder dog lidt forskelligt i beregningerne, alt efter om der eksisterer en markedspris på drivmidlet i dag, som allerede inkluderer infrastrukturomkostningen eller ej.

For drivmidler, som er udbredte på markedet i dag, anvendes markedsprisen, idet markedsprisen på drivmidlet antages at inkludere infrastrukturomkostningerne. For drivmidler, der kan anvende de samme distributionskanaler som benzin eller diesel, anvendes distributionsomkostningerne for benzin eller diesel, afhængig af hvad der er relevant. For drivmidler, hvor der ikke, eller kun i ringe grad, er udbygget infrastruktur, er omkostningerne hertil estimerede. Specifikke antagelser omkring omkostninger og energieffektivitet af infrastruktur kan ses af de blå faneblade med hvid skrift i AD modellen.

Det sidste gælder brint, biogas, naturgas og el. For disse spor antages, at der er sket en "tilpas" udbygning med infrastruktur, således at infrastrukturen udbygges i takt med benyttelsen, og infrastrukturen derfor udnyttes effektivt. Herved bliver infrastruktur behandlet på samme måde uanset drivmiddel.

I realiteten vil der være udfordringer forbundet med introduktion og udbygningen af infrastruktur for nye drivmidler. Ved at etablere dem i forbindelse med flåder af køretøjer kan det sikres, at anlæggene udnyttes i rimelig grad i opbygningsfasen, men omvendt vil de ikke dække hele landet. I det omfang der udbygges bredere, kan der være introduktionsperioder med beskedne efterspørgsel efter drivmidlet på de enkelte fyldeanlæg. Disse ekstra omkostninger i en opbygningsperiode er ikke medtaget i modellen.

I nedenstående tabel er som eksempel vist en del af infrastruktur-omkostningerne for en elbil i 2015. Herudover medtages omkostning til transmission og distribution af el, som indgår i den anvendte elpris.

Ladestander omkostning	10000 kr/elbil
Levetid af ladestander	30 år
Omkostning	83 kr/GJ
Omkostning	0,034 kr/km

Tabel 7: Samfundsøkonomiske omkostninger per elbil til ladestander i 2015

#### 4.3.1 Centrale datakilder og antagelser for samfundsøkonomiske omkostninger

De mest centrale kilder til beregning af samfundsøkonomiske omkostninger er opgjort i tabellen nedenfor:

Dataområde	Kilde
Markedspriser på råstoffer og biprodukter	<ul style="list-style-type: none"> <li>Forudsætninger for samfundsøkonomiske analyser på energiområdet. Energistyrelsen. 2014</li> <li>Analysis of biomass prices, future Danish prices for straw, wood chips and wood pellets. Ea Energy Analyses. 2013.</li> </ul>



	<ul style="list-style-type: none"> <li>Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and power-trains in the European Context. IET JEC 2011.</li> <li>Energistatistik 2011. Energistyrelsen</li> </ul>
Omkostninger ved råstofkonvertering	<ul style="list-style-type: none"> <li>Technology data for advanced bioenergy fuels. FORCE, 2013.</li> <li>Technology data for advanced bioenergy fuels – extension 1. FORCE, 2014.</li> <li>Biogas i Danmark - status, barrierer og perspektiver, Biogas Taskforce, november 2013.</li> <li>Statoil, Grønt Regnskab 2012</li> </ul>
Omkostninger for transportmidler	<ul style="list-style-type: none"> <li>For personbiler: Tank to Wheels Report, version 4.0. IET JEC. 2013;</li> <li>For varebiler: Validering af energiforbrugsdata for køretøjer i AD modellen. Teknologisk Institut, 2015</li> <li>For tung transport: Rammevilkår for gas til tung vejtransport. Energistyrelsen. 2014.</li> <li>For skibe: Beregningsmodel SHIP-DESMO-Container Ship, 2014; Maritime Economics, 3rd edition. 2009.</li> <li>For fly: SAS group sustainability report. 2012.</li> <li>For tog: Strategisk analyse af elektrificering af banenettet - Opgave A, strategianalysen. Banedanmark. 2011.</li> </ul>
Omkostninger ved emissioner og støj	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transportøkonomiske enhedspriser. DTU. 2010.</li> </ul>

Tabel 8: Overblik over centrale kilder til udregning af samfundsøkonomiske omkostninger i AD modellen.

#### 4.4 Sikring af transportmidlernes sammenlignelighed

En central parameter for AD modellens resultater er transportmidlets egenskaber. For at sammenligning på tværs af drivmidler indenfor et givent transportmiddel skal blive meningsfuld, er det derfor vigtigt at det kun er drivlinjen, som ændres, men at resten af transportmidlet så vidt muligt holdes konstant.

Tre forskellige tilgange har været benyttet:

1. Transportmidlet inkluderet i modellen med de forskellige drivmidler dannes ud fra en teknisk gennemgang, hvor transportmidlet sammensættes af de nødvendige komponenter. Herved fremstilles et 'beregnet transportmiddel' hvorfra karakteristika såsom energiforbrug, vægt og fremstillingsomkostninger kan estimeres. Denne tilgang er set som den mest nøjagtige, da den giver mulighed for udelukkende at ændre drivlinjen og holde alt andet konstant. Tilgangen er dog meget arbejdsstung, og har derfor kun været mulig at anvende hvor der allerede har været udviklet en anvendelig standard i andre sammenhænge.

I AD modellen er personbiler og til dels containerskibe baseret på denne tilgang. Personbiler er i forhold til omkostninger baseret på resultater fra "Tank to Wheels Report, 4.0. IET JEC. 2013". Den er en standardiseret mellemklassebil (C-klasse) med en egenvægt omkring 1300 og 1550 kg, afhængigt af drivlinjen.

I forhold til containerskibe er anvendt en beregningsmodel (SHIP-DESMO-Container Ship, 2014), som muliggør en beregning af energiforbrug og emissioner for containerskibe. Omkostninger for disse skibe er dog baseret på anden information (Maritime Economics, Martin Stopford, 3. udgave, 2009, kap. 13, Routledge)

2. Transportmidlet inkluderet i modellen er baseret på et markedsført transportmiddel, hvor der findes meget sammenlignelige modeller som anvender forskellige drivmidler. Denne tilgang er meget mindre arbejdskrævende at anvende end første tilgang, da tekniske specifikationer, såsom energiforbrug umiddelbart kan findes. Det har dog den bagdel, at de forskellige drivlinjer ikke nødvendigvis er helt sammenlignelige, at de markedsførte modeller ikke nødvendigvis dækker bredden af drivlinjer som ønskes dækket i AD modellen, at evt. mærkespecifikke fordele og ulemper ikke nødvendigvis

afspejler et gennemsnit, og at omkostningerne ved fremstillingen af køretøjet kan være vanskelige at få information omkring.

Denne tilgang er på trods af disse ulemper anvendt i forhold til person- og varebiler i forhold til energiforbrug, tung transport og tog.

3. Transportmidlet inkluderet i modellen er baseret på et gennemsnit fra en flåde af varierende transportmidler indenfor samme type. Denne tilgang minder meget om 2. tilgang, og har mange af de samme fordele og ulemper, men er vanskelig at bruge hvis der indenfor transportmidlet skal differentieres mellem forskellige drivlinjer, da et flådegennemsnit i sagens natur ikke viser specifikke forskelle mellem de forskellige drivlinjer. Denne tilgang har derfor udelukkende vist sig egnet til fly, hvor flyet ikke varierer efter det anvendte drivmiddel. I AD modellen er de medtagne fly baseret på et gennemsnit af SAS's flåde.

## 4.5 Teknologifremskrivning

Denne analyse dækker, som nævnt, tidsspændet indtil 2050. Da det kan forventes, at der sker en teknologisk udvikling indenfor de inkluderede teknologier i dette tidsrum har det været nødvendigt at lave en fremskrivning af disse teknologier mht. omkostninger, energieffektivitet og emissioner. Nedenfor er gennemgået metoden for teknologifremskrivningen for drivmidlerne, drivlinjerne og infrastrukturen.

### 4.5.1 Metode for fremskrivning af omkostninger af drivmidler

I forhold til fremstillingen af drivmidler, er der både medtaget en antagelse omkring effekten af øget anlægsstørrelsen (economy of scale), samt af øget erfaring (learningcurves).

#### Economy of scale

Større produktionsanlæg har en generel tendens til at være mindre investeringsintensive end mindre anlæg per produceret enhed, en tendens som ofte benævnes 'economy of scale'. Erfaringer har vist følgende generelle forhold mellem anlægspris og produktionskapacitet:

$$\frac{C_1}{C_2} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^a$$

Hvor C er investeringsomkostningerne for anlæg 1 og 2, P er produktionskapaciteten for anlæg 1 og 2 og a er en proportionalitetsfaktor. I disse beregninger er a antaget at være 0,7 på tværs af samtlige anlægstyper.

#### Learningcurves

Ud over økonomiske fordele ved opskalering af anlægsstørrelse, antages også en forbedringsratio, som dækker over, at der er en generel tendens til at anlæg bliver optimeret jo længere erfaring der haves med en given anlægstype. Forbedringsrationen udtrykker omkostningseffektiviteten for en given anlægstype når produktionskapaciteten fordobles på globalt plan. Her antages en ratio på 0,95. Denne ratio antages både for anlægs-, såvel som driftsomkostninger.

Som udgangspunkt antages en 'moderat' udbygning, hvor en forøgelse af den installerede kapacitet kan ses af nedenstående tabel:

Learning group	2015	2020	2035	2050
----------------	------	------	------	------

Established	1	1	1	1
Recent	1	1	2	3
New	1	1	2,5	4
Developing	1	2	4,5	7
Demonstration	Ikke tilgængelig	1	3,5	6
Laboratory	Ikke tilgængelig	Ikke tilgængelig	1	3,5

Tabel 9: Antagne udbygning af produktionskapaciteten for forskellige typer af drivmidler. Tallene angiver det antal gange produktionskapaciteten forventes fordoblet.

Som Tabel 9 angiver, er der indenfor den 'moderate' udbygning af produktionskapaciteter for drivmidler, som er antaget som udgangspunkt i AD modellen, forskellige kategorier af teknologier. Kategorierne, som går fra 'established' til 'laboratory' indikerer, hvor udviklet en teknologi er. Jo nyere en teknologi, jo større udbygningspotentiale er antaget. Dog er udbygningspotentialet af teknologier som er 'developing', 'demonstration' og 'laboratory' antaget ens, blot forskubbet i tid. Klassificeringen af de forskellige teknologier indenfor de forskellige kategorier er baseret på ekspertskøn.

Som bruger af AD modellen er det muligt at ændre antagelsen omkring udbygningen af produktionskapaciteterne.

#### 4.5.2 Metode for fremskrivning af energieffektivitet for fremstilling af drivmidler

Der er ikke medregnet en ændring af energieffektiviteten af råstofudvindingen eller – konverteringen i denne version af AD modellen. Det forventes, at fremtidige versioner af AD modellen vil inkludere dette element.

#### 4.5.3 Metode for fremskrivning af omkostningerne og energieffektivitet af drivlinjerne

Omkostningerne til transportmidlerne er som udgangspunkt holdt konstante over analysens tidshorisont, med få undtagelser: Batterier, brændselsceller og reformere anvendt til at omsætte metanol til brint før brændselsceller anses for værende ny teknologi med en hurtig udvikling og er antaget at falde i produktionsomkostninger over analysens tidshorisont. Faldet i produktionsomkostninger på disse komponenter er baseret på litteraturstudier og ekspertskøn.

Produktionsomkostninger ved andre komponenter af de inkluderede transportmidler vil med stor sandsynlighed også ændre sig over analysens tidshorisont, men da ændringen i produktionsomkostninger for disse komponenter i stor udstrækning vil være ens for sporene under de inkluderede transportmidler, er usikkerheden introduceret ved antagelsen omkring de konstante produktionsomkostninger, vurderet som acceptabel.

Fremskrivning af transportmidlernes energieffektivitet er primært baseret på for personbilernes vedkommende baseret på rapporterne ” Validering af energiforbrugsdata for køretøjer i AD modellen. Teknologisk Institut, 2015”, samt ”Energiforbrug for tog og fly. Teknologisk Institut, 2016”. Usikkerheden ved fremskrivningen er søgt minimeret ved at sammenligne drivmidler og transportmidler på tværs. Herved øges sandsynligheden for, at analysen bliver konsistent på tværs af spor.

#### **4.5.1 Metode for fremskrivning af omkostningerne og energieffektivitet af infrastrukturen**

Omkostningerne til og energieffektiviteten af infrastrukturen er i denne version af AD holdt konstante med få undtagelser. Omkostninger til ladestandere til elbiler er antaget at falde med ca. 12 % i pris over perioden, hvilket er antaget på baggrund af ekspertskøn. Ligeledes er omkostningerne til brintfyldestationer antaget at falde over tid og blive mere energieffektive, baseret på skøn fra ”Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European Context”, IET JEC, 2006.

## 5 Centrale antagelser om udviklingen indtil 2050

I nedenstående kapitel gennemgås en række af de vigtigste antagelser omkring udviklingen af transport og energisektoren indtil 2050.

Som beskrevet tidligere, viser denne analyse de klima-, energimæssige og økonomiske konsekvenser af yderligere anvendelse af et spor. Konsekvenserne er her forstået som de samlede forskelle mellem en situation, hvor et spor anvendes yderligere og en situation hvor sporet anvendes som fremskrevet. For at kunne vurdere forskellen, skal der etableres en baseline, som skitserer udviklingen af parametre som er centrale for udviklingen af drivhusemissioner, energieffektiviteter og omkostninger ved anvendelse af sporene.

Baselinen, som er anvendt i AD modellen, er baseret på Energistyrelsens rapport ”Energiscenarier”, 2014. ”Energiscenarier” inkluderer 4 forskellige scenarier for udviklingen i Danmarks energiforsyning og transport, hvoraf vindscenariet er valgt som baseline i denne sammenhæng. Vindscenariet er overordnet konsistent med de danske og EU målsætninger omkring fossil-uafhængighed i 2050, samt en reduktion i drivhusgasemissioner på mellem 80-95 %. Det skal dog nævnes at scenariet kun viser et ud af et meget stort antal mulige udviklinger, og at et valg af en anden baseline i nogen grad ville kunne ændre på resultaterne i denne analyse. Scenariet er teknisk muligt og økonomisk set sammenligneligt med andre meget anderledes udviklinger, men på trods af dette er det ikke muligt at vurdere, om scenariet viser den mest sandsynlige udvikling af den danske energiforsyning og transport.

Vindscenariet, som her bruges som baselinescenarie, beskrives kort i Energistyrelsens rapport ”Energiscenarier” frem mod 2050 således: Der foretages en massiv elektrificering af transport- og varmesektoren. Bioenergianvendelsen begrænses til omkring 250 PJ, nogenlunde svarende til det danske potentiale og ca. 100 PJ mere end i dag. Biobrændstoffer produceres i vidt omfang i Danmark, og biobrændstoffabrikkerne integreres i el- og varmforsyningen. Vindkraft bliver den bærende teknologi i elproduktionen, men der vil også være bidrag fra solceller og kraftvarmeværker. Opvarmning baseres i vidt omfang på overskudsvarme (til fjernvarme) fra biobrændstoffabrikker, kraftvarme samt elvarmepumper, hvis behovet er ved lave og moderate temperaturer. Varmekilder til varmepumperne er udeluft, havvand, spildevand og geotermisk varme. Til mellem- og højtemperaturvarme i industrien bruges kraftvarme, el og biomasse. En stor del af personbilerne forsynes med el. Dette gælder også jernbaner og en del af varebilerne og busserne. Resten af transporten forsynes med biobrændstoffer og syntetisk naturgas baseret på biogas. Der produceres i et vist omfang brint ud fra vindmøllestrøm som supplement til bioenergianvendelsen. Vindscenariet ligger tæt op ad scenarier tidligere fremstillet af Klimakommissionen, Energistyrelsen og Energinet.dk.

I nedenstående afsnit er udviklinger i baseline scenariet, der er særligt vigtige for AD modellen, gennemgået i yderligere detaljer.

Det skal i denne sammenhæng nævnes, at vindscenariet anvender data fra AD modellen til at estimere omkostninger ved de forskellige transportformer og deres anvendelse af biomasse. AD modellen anvender omvendt data fra vindscenariet omkring biomasseproduktion og –anvendelse og produktion af el og varme i årene frem mod 2050. Denne anvendelse af data fra vindscenariet i AD modellen og modsat giver ikke anledning til uheldige cirkelslutninger. Den 'cirkel', som i få tilfælde opstår heraf, er, at data fra AD modellen influerer på hvilke transportformer, som anvendes i vindscenariet. Heraf estimeres i vindscenariet den mængde af biomasse, som anvendes samlet i hele systemet. Disse data anvendes så igen i AD modellen til at give et estimat af tilgængeligheden af forskellige typer af biomasse. Et konkret eksempel på dette er, at AD viser et givent omkostningsniveau ved anvendelse af gylle til biogas, og på den baggrund antages gyllen at være fuldt anvendt i 2050 i vindscenariet. Denne information anvendes i AD modellen, hvilket giver det resultat, at anvendelsen af biogas i AD modellen i 2050 ikke antages at give anledning til anvendelse af yderligere gylle, hvilket har betydning for biogassens CO2 emission i 2050.

## 5.1 Fossile brændsler

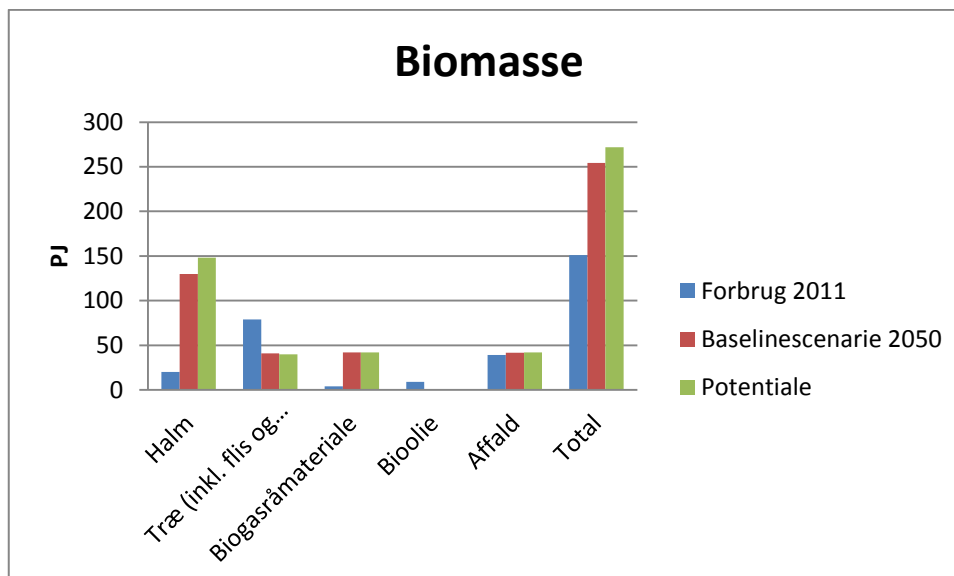
Energipriserne i baseline scenariet antages at følge trends angivet i "Forudsætninger for samfundsøkonomiske analyser på energiområdet. Energistyrelsen. 2014" og være upåvirkede af både det valgte danske scenarie, såvel som eventuelle valg af drivmidler i modellen.

Det antages, at produktionen af den marginale naturgas på sigt vil være fra kilder længere fra Danmark.

Produktionen af den marginale råolie antages at blive produceret fra de dyreste kilder, som det pågældende år antages at være i produktion. Dette er antaget at være tight og ukonventionel olieproduktion. Se yderligere detaljer herom i AD modellens ark "basic data".

## 5.2 Biomasse

Som angivet ovenfor antages det i baselinescenariet, at der anvendes ca. 250 PJ biomasse, som der bæredygtigt kan produceres indenfor de danske grænser og uden det går ud over den producerede mængde fødevarer. Følgende figur viser nuværende (2011) forbrug, samt antagne forbrug og potentiale i 2050 i baselinescenariet:



Figur 26: Anvendelsen af biomasse i 2011, samt potentialet og anvendelsen af biomasse i 2050 i baselinescenariet.

Det antages at halm, gylle/biogasråmateriale og affald ikke importeres, men at træ og træflis bliver importeret efter behov. Det betyder, som angivet i figur 26, at biogasråmateriale- og affaldspotentialet er fuldt ud anvendt i 2050, at affaldspotentialet allerede i dag er fuldt udnyttet, og at der både i dag og i 2050 er et ubrugt halmpotentiale. Halm skal i denne sammenhæng forstås bredt som 1-årige afgrøder.

I forhold til produktionen af biobrændstoffer betyder dette, at alt halmbaseret biobrændstof vil føre til en øget anvendelse af halmpotentialet i alle år. Biogasbaserede brændstoffer vil i 2015 til 2035 medføre øget anvendelse af det ubrugte potentiale. I 2050 antages en øget anvendelse af biogas at lede til, at produktionen forskydes fra andre anvendelser af biogassen. Her antages dette at lede til øget produktion af SNG, produceret via øget brintproduktion, svarende til energiindholdet af den anvendte biogas. Øget anvendelse af biobrændstoffer baseret på træ antages at lede til øget import af træ.

### 5.2.1 LUC emissioner

I forhold til emissioner fra anvendelse af biobrændstoffer, er antagelser omkring ILUC- og DLUC-emissioner centrale. I AD modellen antages som udgangspunkt, at ILUC (og DLUC) emissioner er reelle. I øjeblikket er estimerne udviklet i ”Global Trade and Environmental Impact Study of the EU Biofuels Mandate. IFPRI. 2010” anset som værende de mest autoritative, og disse ILUC emissioner er derfor brugt som udgangspunkt i modellen. Disse ILUC emissioner er dog relateret til brændstoffet, og da opbygningen af AD modellen kræver, at ILUC emissioner relateres til råmaterialerne, har det været nødvendigt at konvertere ILUC emissionerne. Dette er gjort på baggrund af AD modellens konverteringseffektiviteter af råstof til biobrændstof.

Herudover anvendes ILUC emissioner fra anvendelse af træ og DLUC emissioner af halm, som ikke er medtaget i ovennævnte rapport. Disse er baseret på ”Carbon footprint of bioenergy pathways for the future Danish energy system”, COWI/SDU 2014.

ILUC-emissionerne dækker over specifikke globale og regionale udviklingsscenarier omkring globale anvendelser af biomasser, fødevarerbehov, politikker omkring arealanvendelser med mere og indbygger en lang række af antagelser om udviklingen af disse forhold frem mod 2050 i modeludregningerne. Det er ikke undersøgt om antagelserne, som de for-

skellige ILUC beregninger baserer sig på, er parallelle med øvrige antagelser omkring verdens udvikling indtil 2050.

### 5.3 El- og varmeproduktion

Elproduktionen i baselinescenariet er sammensat både af den reelt forventede udvikling for elsektoren indtil 2020, samt for 2020-2050 en udvikling som er nødvendig for at realisere ovenfor skitserede baselinescenarie.

Indtil 2020 er den planlagte udbygning af elsektoren for over 90 % vedkomne baseret på vind og en mindre mængde sol. Herudover er der mindre bidrag fra naturgaskraftvarme og affaldsforbrændingsanlæg.

For 2020 til 2050 antages udbygningen at ske primært igennem udbygningen af vindmøller, mens brændselsbaserede værker antages at blive anvendt mindre. Det antages på den baggrund, at den langsigtede marginale elproduktion, som i udgangspunktet anvendes i modellen, udgøres af vindmøller, kombineret med den mængde termisk elproduktion som er nødvendig for at balancere systemet. En simulation lavet i forbindelse med dette arbejde har vist, at behovet for balancerende produktion svarer til omkring 4,1 % af den anvendte el på årsbasis, afhængigt af hvor fleksibelt forbruget er og hvorvidt forbruget optimeres i forhold til at minimere anvendelsen af termiske anlæg eller elpris. Det antages, at den langtidsmarginale balancerende termiske elproduktion i 2020 og 2035 vil være baseret på naturgas, og for 2050 vil være baseret på SNG på grund af kravet om fossilfri elproduktion efter 2035. Den øgede anvendelse af SNG til elproduktion antages at produceres via øget brintproduktion, svarende til energiindholdet af den anvendte SNG, som fremstilles via elektrolyse.

Varmeproduktionen i baselinescenariet er ligesom elproduktionen sammensat både af den reelt forventede udvikling for elsektoren indtil 2020, samt for 2020-2050 en udvikling som er nødvendig for at realisere ovenfor skitserede baselinescenarie. Den centrale fjernvarmeproduktion falder i baselinescenariet, men produktionen øges gradvis for kedler fyret med biomasse frem mod 2020. Efter 2020 stiger andelen af fjernvarme produceret via varmepumper, og i mindre grad via solvarme, imens andre fjernvarmeformer, inklusive kedelbrug samtidig aftager.

El anvendt til fremstilling af transportmidler er ikke baseret på den danske elproduktion, da det er vurderet, at meget lidt af transportmiddelproduktionen vil finde sted i Danmark. I stedet er anvendt den forventede udvikling af verdens elproduktion frem mod 2050. Denne udvikling, samt emissionen fra forskellige typer af elproduktion, er anvendt til at udregne emissionen fra elproduktionen.

### 5.4 Biproduktsubstitutioner

Som nævnt i kapitel 4.1 antages produktionen af biprodukter fra drivmiddelproduktionen at substituere produktionen af andre produkter på markedet. Antagelsen om hvilke produkter som substitueres er i høj grad afhængig af markedsudviklingen for de pågældende produkter. Antagelserne er i høj grad baseret på, hvordan markedet for biprodukter typisk fungerer på i dag. Antagelserne kan ses af følgende tabel:



Biprodukt	Substitueret produkt
'Grøn' diesel	RME
'Grøn' biobenzin	2. g. ætanol, halm
Elektricitet	Elektricitet
Anvendelig spildvarme	Fjernvarme
Biogas	Naturgas
Stivelsesrig foderkage	Hvede (på energiindholdsbasis)
DDGS	Hvede (på energiindholdsbasis)
Rapskage	Rapsfrø (på energiindholdsbasis)
Glycerin	Foder (Rapsfrø (på energiindholdsbasis))

## 5.5 Udledningsnormer

Det antages ikke, at der vedtages vejrelaterede udledningsstandarder ud over eksisterende Euro 6 norm. På søvejsområdet antages heller ikke yderligere stramninger af MARPOL konventionen ud over eksisterende vedtagne. Disse betyder praktisk set, at det ikke vil være muligt at benytte HFO som drivmiddel i 'Emission Control Areas' efter 2015 uden røgrrensning. Herudover antages ikke, at der kommer dækkende udledningsnormer for andre transportmidler i perioden.

## 6 Usikkerheder

Formålet med AD modellen er at estimere emissioner, priser og energieffektiviteter ved at anvende et givent drivmiddel i en given drivlinje indtil 2050. For at imødekomme dette skal udvikling i teknologier og markeder forudses for en meget lang tidshorisont. Flere af de medtagne teknologier eksisterer kun på forsøgsplan eller demonstrationsplan i øjeblikket. På den baggrund virker det unødvendigt at understrege, at resultaterne er behæftede med store usikkerheder. Det skal dog også understreges, at dette ikke er en usikkerhed, som skyldes mangler eller fejl i analysen, men skyldes manglende valide metoder til at forudsige fremtiden. Usikkerhederne kan derfor for nuværende ikke undgås, men er iboende i denne type analyser.

Væsentlige usikkerheder, som af ovenstående årsager ikke forventes at kunne forbedres væsentligt, relaterer sig til:

- *Estimering af markedets reaktion på baggrund af ændret efterspørgsel og heraf følgende emissioner*  
Som angivet i metodeafsnittet antages det i AD modellen, at ændret efterspørgsel leder til ændret produktion i forholdet 1:1. I virkeligheden er det langt fra sikkert, at de globale markeder vil reagere på en given ændring i efterspørgsel på denne meget simple måde.
- *Udvikling af teknologier og systemer indtil 2050*  
I AD modellen er angivet specifikke priser og energieffektiviteter for teknologier indtil 2050. Hvorvidt disse teknologier udvikler sig som her antaget, er meget usikkert, specielt i forhold til udviklingen af ny teknologi, som stadig kun eksisterer i pilot eller demonstrationsform. Derudover medtages sammenspil med energisektoren mht. produktionen og anvendelse af el og varme i produktionen af biobrændstof ikke. Effekten af dette sammenspil er meget afhængigt af den faktiske udbygning af elsektoren, hvilken også er usikkert specielt set i lyset af analysens lange tidsperspektiv.
- *Emissionen fra processer*  
Det antages endvidere, at produktionsprocesser for diverse drivmidler altid vil lede til angivne emissioner upåagtet producentens produktionsudstyr og produktionsprocedurer. I virkeligheden vil emissioner knyttet til forskellige producenter ofte variere væsentligt. Det er dog på grund af analysens generiske form vanskeligt at medtaget emissionerne knyttet til specifikke producenter.
- *ILUC emissioner*  
AD modellen medtager ILUC emissioner (med mulighed for at antage at værdien er 0). Udregningen af ILUC emissioner forsøger at sammenkoble udviklingen i efterspørgsel af en given afgrøde med den globale udvikling i anvendelse af arealer og heraf afledte emissioner. Der knytter sig store usikkerheder til udregningen af disse meget komplek-

se sammenhænge – en usikkerhed som dog på ingen måde er elimineret ved at antage at den ikke findes (og angive emissionen til 0).

Ud over disse generelle usikkerheder, som ikke forventes at kunne forbedres nævneværdigt ved yderligere dataanalyse, bør nævnes en række mere specifikke usikkerheder, som forventes at kunne forbedres ved yderligere dataanalyse, og som forventes at blive adresseret i fremtidige opdateringer af AD modellen:

- *Omkostninger, emissioner og effektivitet ved råstofkonvertering*  
Til flere råstofkonverteringer er knyttet relativt store usikkerheder til estimeringen af omkostninger, emissioner og effektivitet. Dette skyldes, at der særligt for de nye teknologier findes mange forskellige bud i litteraturen og blandt eksperter, som varierer afhængigt af specifikke produktionsforhold, anlægsstørrelse, mængden af praktiske erfaringer mm. Et centralt aspekt af fremtidige opdateringer vil være at holde modellen ajour med den løbende udvikling.
- *Priser på køretøjer*  
Som det fremgår af resultatsammenfatningen, er omkostninger til transportmidlet generelt den væsentligste faktor for de samlede omkostninger. Beregningen af omkostninger ved produktion og vedligehold er dog behæftet med væsentlige usikkerheder. Særligt vil der ved omkostninger knyttet til transportmidler, som ikke er beregnet ud fra et 'standard' transportmiddel (se kapitel 4.4) være større usikkerheder, da omkostningerne er baseret på priser fra en enkelt leverandør.
- *Værdisætning af emissioner og støj fra transportmidler*  
Lokationen af emissionen og støjen fra transportmidlerne er centrale for fastsættelsen af de eksterne omkostninger forbundet hermed. I AD modellen er værdisætningen baseret på en relativt grov opdeling i hvorvidt emissionerne sker på landet (inkluderende øvre luftrum og havet), byen eller en blanding mellem de to. En finere inddeling vil kunne øge nøjagtigheden af denne værdisætning, men det bør dog understreges at de eksterne omkostninger herved generelt er relativt små set i forhold til de samlede omkostninger, og en yderligere forfinelse af denne inddeling derfor ikke vil have højeste prioritet.

## **7 Referencer**

Anvendte kilder er angivet i rapportens tekst. For en oversigt over kilder anvendt i AD modellen henvises til fanebladet "Referencer" i AD modellen.

## 8 Liste over anvendte forkortelser og definitioner

1. generation Betydningen af 1. generation biobrændstoffer varierer. I denne sammenhæng dækker betegnelsen over biobrændstof produceret på baggrund af råstoffer, som kunne være anvendt til fødevarer.
2. generation Betydningen af 2. generation biobrændstoffer varierer. I denne sammenhæng dækker betegnelsen over biobrændstof produceret på baggrund af råstoffer, som ikke kunne være anvendt til fødevarer.
- Biodiesel Biobrændstof, som har meget sammenlignelige egenskaber med almindelig diesel. Betegnelsen kan dække over flere forskellige typer af stoffer, varierende fra rene alkaner og estere til glycerider.
- CBN Compressed biogas. CNG baseret på opgraderet biogas
- CNG Compressed natural gas. Naturgas tryksat til omkring 200 atm.
- DME Dimetylæter. En æter bestående af to metylgrupper. DME kan ved modifikationer af motoren anvendes i dieselmotorer.
- E85 Angiver at 85 volumen-% af brændstoffet er ætanol og resten er benzin
- HFO Heavy fuel oil. Langkædet olie anvendt indenfor skibsfart
- HVO Hydrogeneret vegetabilsk olie. En type biodiesel, som kan laves af en lang række forskellige bioolier.
- ILUC Indirect land use change. Termen bruges ofte i relation til de drivhusgasemissioner, som indirekte kan forårsages af efterspørgsel efter landbrugsprodukter. Den øgede efterspørgsel efter landbrugsprodukter vil ofte lede til en øget produktion. En del af denne øgede produktion kan lede til, at jordarealers beplantning ændres (f.eks. hvis skov omlægges til landbrugsjord). I visse tilfælde vil dette lede til, at kulstofmængden, som er bundet i og på jorden eller som optages, ændres. Denne ændring vil ofte lede til en ændring i optag eller afgivelse af CO<sub>2</sub> til atmosfæren. Denne CO<sub>2</sub> emission betegnes som ILUC emissioner.
- DLUC Emissioner som følge af ændring af jordbrug på et givent areal.

LBG	Liquified biogas. LNG baseret på opgraderet biogas.
LNG	Liquified natural gas. Naturgas afkølet til omkring 176 grader C.
RME	Rapsmetylester. Biodiesel produceret på baggrund af rapsfrø
Spor	Kombinationen af drivmiddel, herunder dennes specifikke produktionsmetode, og transportmiddel med en specifik drivlinje
WtW	WtW eller well-to-wheel angiver et analyseperspektiv, hvor alle energiforbrug, emissioner og omkostninger forbundet med produktion og anvendelse af drivmidlet er medtaget, helt fra produktion af råvarerne til dets anvendelse i køretøjet.

## **Appendix A: AD model documentation**

## 9 Introduction

The methodology used in the project is inspired by e.g. “Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and power-trains in the European Context. 2006. Concawe” and “Environmental and economic performance of biofuels - Volume I & II. 2005 VIEWLS”, where various fuel and transport technologies are described in so-called pathways.

A pathway consists of the whole production chain from production of feedstocks such as crude oil, crops or biomass through various conversion processes, transport and distribution until the final use in the motor of a particular vehicle.

By using the pathway approach, it is possible to account for all the various steps in the production and use of transport fuels in a systematic way. In particular, it is possible to streamline and standardise the assumptions on feedstock and process energy inputs, and their conversion and distribution losses. The standardisation implies that it also is possible to compare the costs and emissions of various pathways.

The scope of the model is therefore a life cycle assessment of the socio-economics selected environmental effects, notably greenhouse gasses including ILUC, but also hazardous emissions such as SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and particulate matter (PM).

The effect analysed is the marginal effect of adding a small amount of transport activity, e.g. 1 km of driving with a 2nd generation ethanol car.

## 10 Model structure

The AD model has a "bottom-up" structure where costs and emissions are added to the each of the different pathways modelled in successive layers of increasing refinement from feedstock to fuel. These layers are:

- 1 Upstream processes for production and transport of feedstocks to the (bio)refinery
- 2 Converting feedstock into intermediate product (e.g. syngas from thermal gasification)
- 3 Transport/transmission and losses of intermediate product (e.g. natural gas net)
- 4 Converting intermediate product into transport fuel (e.g. syngas to fuel)
- 5 Distribution of fuels (e.g. tanker trucks, recharging/compression stations)
- 6 Conversion in motors from energy to traffic work

Often, the feedstock conversion process result in a ready-to-use fuel. In these cases, layer 3 and 4 are not used. Others (such and thermal gasification + synthetisation) these additional two layers are needed.

In each layer various process energy uses, production of by-products and conversion losses occur. All pathways are analysed using the layering and loss structure depicted in the figure below:



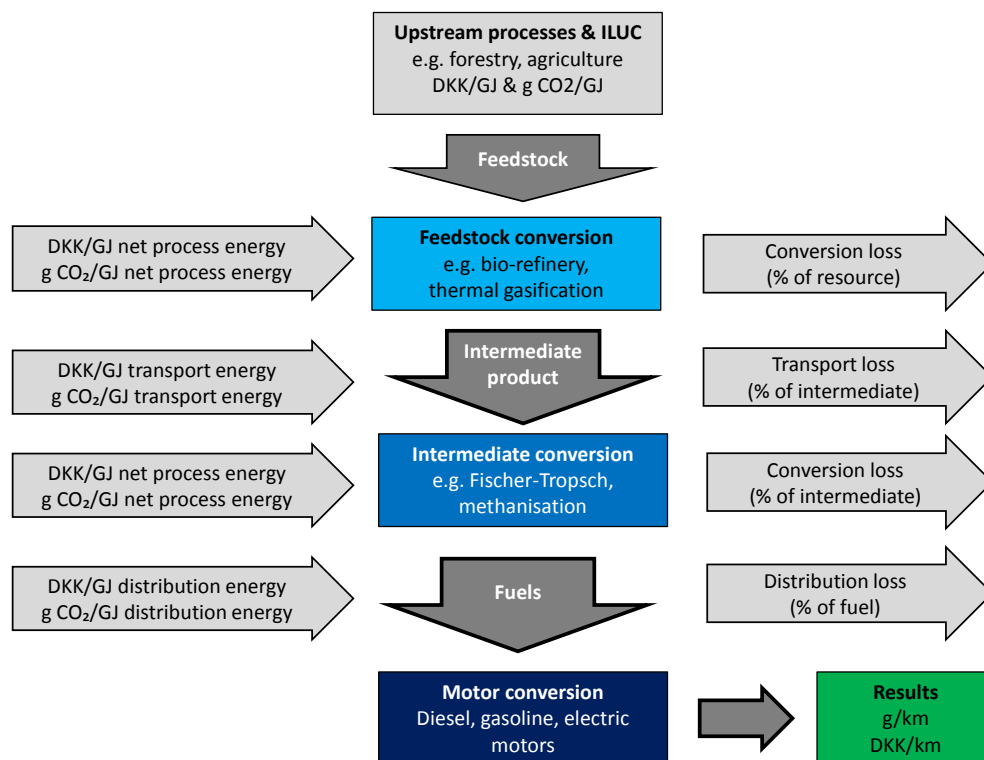


Figure 24: The blue coloured boxed indicates the conversion technology specific parts of the data used for computing the costs and emissions in each pathway.

The conversion technology data needed in the AD model are briefly described in Table 10.

	Feedstock conversion	Intermediate conversion	Motor conversion
<b>Conversion efficiency</b>	GJ intermediate / GJ feedstock	GJ fuel / GJ intermediate	km / GJ fuel
<b>Process energy</b>	GJ energy/ GJ feedstock	GJ energy / GJ intermediate	N/A
<b>Costs</b>	CAPEX + OPEX + inputs	CAPEX + OPEX + inputs	CAPEX + OPEX + inputs
<b>Emissions</b>	Feedstock + input energy use	Intermediate + input energy use	Fuels

Table 10: Overview of input data for the conversion technologies

In Figure 22 the light grey arrows indicates data used for computing the input costs and emissions from inputs in each pathway. The scope of the costs and emissions are briefly described in Table 11.

Input data	Coverage
<b>Feedstock process</b>	<b>Covers:</b> Extraction, cultivation, harvest, transport <b>Costs:</b> Land & resource rents, OPEX and CAPEX <b>Emissions:</b> Transport and energy use, soil process, losses
<b>Feedstock ILUC</b>	<b>Emissions:</b> Indirect land use change
<b>Process energy and by-products</b>	<b>Covers:</b> Electricity, heat, diesel, chemicals, by-products <b>Costs:</b> OPEX & CAPEX, marginal input costs and value <b>Emissions:</b> Transport and energy use valued at marginal emissions
<b>Transport / transmission</b>	<b>Covers:</b> Power and natural gas transmission net <b>Costs:</b> CAPEX, OPEX and energy <b>Emissions:</b> Electricity losses, compression energy
<b>Distribution</b>	<b>Covers:</b> Tanker transport, compression of gas, loss in charger stations <b>Costs:</b> CAPEX and OPEX and energy

	<b>Emissions:</b> Transport, electricity use
--	--

*Table 11: Overview of input data for inputs into conversion and transport, transmission and distribution*

Some of the conversion processes also produce by-products, e.g. production of RME using rapeseed has rape seed cake and glycerol as by-product. By-products are generally handled such that the avoided emissions from the by-products' substitution of virgin materials are subtracted from the emission footprint of the main product.

One notable exception is refinery products, e.g. the co-production of gasoline and diesel. For these products, the total process energy and upstream emissions from the feedstock is distributed between the by-products according to their market value when leaving the refinery.

## 11 Methodology

### 11.1 Feedstock conversion technologies

The accounting of emissions in the conversion of feedstocks departs from the upstream emissions from producing the feedstock, e.g. fuel for machine use, but also emissions connected to direct effects of land use, e.g. emissions from the soil used for feedstock, or leakage emissions from mining or drilling. The feedstock conversion technologies can be seen in the light blue sheets in the AD model.

The process energy use in connection with the conversion process is also accounted for in kg/GJ feedstock. Further, some processes have by-products, which may substitute virgin materials leading to emission reductions elsewhere. These are also accounted for in kg/GJ feedstock.

The sum of feedstock and process energy emission is subtracted the avoided emissions from production of by-products. Finally, the energy conversion efficiency of the conversion technology,  $\eta_F$ , is used for scaling the emission from kg/feedstock to kg/intermediate. This is summarised in Table 12.

Step	Emissions	Formula
eA	Feedstock production emissions (per GJ feedstock)	$eA1 + eA2$
eA1	- process emissions from production and transport	Data
eA2	- indirect land use emissions	Data
eB	Feedstock conversion	$(eB1+eB2-eB3)$
eB1	Feedstock use ( $\eta_F = \text{GJ intermediate per GJ feedstock}$ )	Data
eB2	Process energy use (per GJ feedstock)	Data
eB3	By-product emissions substituted	Data
eC	Total emissions after conversion (per GJ intermediate)	$(eA + eB) / \eta_F$

Table 12: Handling of emission in feedstock conversion

A similar calculation is made for the economics of the feedstock conversion technologies, c.f. Table 13.

Step	Costs	Formula
cB	Feedstock conversion (DKK/GJ)	$cB1+cB2-cB3+cB4+cB5$
cB1	Feedstock costs	Data
cB2	Process energy costs	Data
cB3	Income from by-products	Data
cB3	Capital costs	Data

cB4	Operations and maintenance costs	Data
cC	Intermediate product (DKK/GJ)	$cB / \eta_F$

Table 13: Handling of costs in feedstock conversion

Finally, the AD model also calculates the energy efficiency of the various parts of the pathway conversion processes.

Step	Energy use	Formula
uA	Process energy use for feedstock	Data
uB	Conversion energy use (per GJ feedstock)	$uB1+uB2-uB3$
uB1	Feedstock use (per GJ feedstock)	1
uB2	Process energy use for conversion	Data
uB3	Energy content of by-products	Data
uC	Energy use after conversion	$(uA + uB) / \eta_F$

Table 14: Handling of energy use and efficiency in feedstock conversion

The process energy use, uB2, is also the basis for the calculation of emissions of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and particles which are summed up with the same method as emissions of CO<sub>2</sub>.

## 11.2 Transmission of intermediaries

The transmission of intermediaries covers grid based energy such as electricity and natural gas. For electricity, a transmission loss is assumed while natural gas has a transmission process energy use for compressing the natural gas to the relevant pressure in the gas transmission grid. The methodology for calculating total emissions of the intermediary after transmission is shown below.

Step	Emission	Formula
eD	Intermediary, kg/GJ	$eD1+eD2$
eD1	Intermediary before transmission kg/GJ	eC (see Table 12)
eD2	Process energy use GJ/GJ intermediary	Data
eE	Intermediary after transmission, kg/GJ	$eD / \eta_T$

Table 15: Handling of emissions in the transmission step

The electricity transmission loss,  $\eta_T$ , is based on "Forudsætninger for samfundsøkonomiske analyser på energiområdet, opdaterede regneark 2012", and the process energy use is based on "Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and power-trains in the European Context. IET JEC 2011."

The cost of transmission is based on data from "Forudsætninger for samfundsøkonomiske analyser på energiområdet, opdaterede regneark 2012". The methodology for calculating intermediary cost after transmission is illustrated in Tabel 16.

Step	Cost	Formula
cD	Intermediary	$cD1 + cD2 \times \eta_T$
cD1	Intermediary before transmission, DKK/GJ	cC (see Table 13)
cD2	Intermediary transmission, DKK/GJ	Data
cE	Intermediary after transmission, DKK/GJ	$cD / \eta_T$

Table 16: Handling of costs of transmission

The methodology of energy use and efficiency during transmission is illustrated in Table 17:

Step	Energy use	Formula
uD	Intermediary	$uD1 + uD2 \times \eta_T$
uD1	Intermediary before transmission, GJ/GJ	1
uD2	Intermediary transmission energy, GJ/GJ	Data
uE	Intermediary after transmission, GJ/GJ	$uD / \eta_T$

Table 17: Handling of energy use and efficiency in transmission

The process energy use, uD2, is also the basis for the calculation of emissions of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and particles which are summed up with the same method as emissions of CO<sub>2</sub>.

### 11.3 Intermediate conversion

The handling of emission calculation is very similar to that of the feedstock conversion and is described in Table 18. The intermediate conversions in the AD model can be seen in the blue sheets with white writing.

Step	Emissions	Formula
eF	Intermediate conversion	$(eF1+eF2-eF3)$
eF1	Intermediate use	1
eF2	Process energy use (per GJ feedstock)	Data
eF3	By-product emissions substituted	Data
eG	Total emissions after conversion (per GJ fuel)	$eF / \eta_F$

Table 18: Handling of emission in feedstock conversion

Note:  $\eta_I = \text{GJ fuel per GJ intermediate}$

A similar calculation is made for the economics of the intermediate conversion technologies, c.f. Table 19.

Step	Costs	Formula
cF	Intermediate conversion (DKK/GJ intm.)	$cF1+cF2-cF3+cF4+cF5$
cF1	Intermediate costs	Data
cF2	Process energy costs	Data
cF3	Income from by-products	Data
cF3	Capital costs	Data
cF4	Operations and maintenance costs	Data
cG	Fuel (DKK/GJ fuel)	$cF / \eta_F$

Table 19: Handling of costs in feedstock conversion

Finally, the AD model also calculates the energy efficiency of the various parts of the pathway conversion processes c.f. Table 20.

Step	Energy use	Formula
uF	Conversion energy use (per GJ intermediate)	$uF1+uF2-uF3$
uF1	Intermediate use (per GJ intermediate)	1
uF2	Process energy use for conversion	Data

uF3	Energy content of by-products	Data
uG	Energy use after intermediate conversion	$uF / \eta_F$

Table 20: Handling of energy use and efficiency in intermediate conversion

The process energy use, uF2, is also the basis for the calculation of emissions of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and particles which are summed up with the same method as emissions of CO<sub>2</sub>.

## 11.4 Distribution of fuel

The process energy use, emissions, loss and costs for distribution of fuels covers the transport and resale activities when the finished fuel leaves the intermediate conversion facility. This step is only relevant for all liquid fuels since the transport of gas and compression happens in the transmission layer of the model. Data related to the distribution of fuel can be seen in the sheet in the AD model named "Distribution"

The point of departure for the distribution costs is the cost of gasoline distribution as calculated by "Forudsætninger for samfundsøkonomiske analyser på energiområdet, opdaterede regneark 2012". For both tanker trucks and gasoline station volume in cubic metres is the cost driving factor. Therefore, the distribution of 1 m<sup>3</sup> of fuel is assumed to be the same. However, since energy densities of the alternative fuels vary, the distribution cost is scaled using the ratio between the energy density of gasoline and the alternative liquid fuel. The difference can be significant since the energy density of e.g. DME, methanol and ethanol are between half and 2/3 of gasoline. For emissions and energy use, the assumption is an 18 m<sup>3</sup> truck driving 60 km incl. return at a vehicle energy use of 3 km/l using a EURO6 engine.

Alternative fuels for aviation and ships are assumed to have same distribution costs as their fossil equivalents.

The methodology is illustrated in Table 21, Table 22, and Table 23

Step	Emission	Formula
eH	Fuel after distribution, kg/GJ	$eH1 + eH2$
eH1	Fuel before distribution kg/GJ	eG
eH2	Process energy use kg/GJ fuel	Data: COWI

Table 21: Handling of emissions in the distribution step

Step	Cost	Formula
cH	Fuel after distribution	$cH1 + cH2$
cH1	Fuel before distribution, DKK/GJ	cG
cH2	Fuel distribution, DKK/GJ	DEA (2012)

Table 22: Handling of costs of distribution

The methodology of energy use and efficiency during transmission is illustrated in Table 23.

Step	Energy use	Formula
uH	Fuel after distribution	$uH1 + uH2$
uH1	Fuel before distribution, GJ/GJ	1
uH2	Fuel distribution, GJ/GJ fuel	Estimate

Table 23: Handling of energy use and efficiency in distribution

The process energy use,  $uH_2$ , is also the basis for the calculation of emissions of  $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$  and particles which are summed up with the same method as emissions of  $CO_2$ .

## 11.5 Motor conversion technologies

The AD model contains a number of different motor conversion technologies, as outlined in chapter 3. Motor conversion technologies can be seen in the dark blue sheets in the AD model.

The methodology for computing traffic work emissions, energy use and cost is described in Table 24, Table 25 and Table 26.

Step	Emission	Formula
eI	Emission per traffic work g/km	$eI1 \times eI2 / eI3$
eI1	Fuel, kg/GJ	Data
eI2	Energy use GJ mechanical/km	Data
eI3	Conversion efficiency GJ mechanical/GJ fuel	Data

Table 24: Handling of emissions in the motor conversion step

Step	Cost	Formula
cI	Traffic cost, DKK/km	$cI1 \times eI2 / eI3 + cI2 + cI3 / cI4$
cI1	Fuel costs, DKK/GJ	Data
cI2	O&M costs DKK/km	Data
cI3	Vehicle depreciation DKK/year	Data
cI4	Vehicle traffic work km/year	Data
cI5	Environmental costs	$eI + \text{other emissions and noise}$

Table 25: Handling of costs vehicle

Step	Energy use	Formula
uI		$uH / eI3$
uI1	Fuel before distribution	See $uH$ in Table 23

Table 26: Handling of energy use and efficiency in transmission

The emission from the vehicle (tank-to-tailpipe) is calculated in two parts: The first part is motor specific, e.g.  $CH_4$  from leaks, or  $NO_x$  stemming from the compression level in the engine. The second part is fuel specific, e.g. fossil  $CO_2$  or particles and  $SO_2$  stemming from the sulphur content of the fuel.

### 11.5.1 Hybrid motors

Hybrid motors cover a range of vehicles that use more than one fuel. Typically hybrids combine a conventional fuel with an electric motor. This can be achieved in several ways:

- Hybrid Electric Vehicle (HEV): Primarily Internal Combustion Engine (ICE) supported by an electric engine on acceleration. This vehicle is basically an ICE vehicle with improved efficiency.
- Plugin Hybrid Electric Vehicle (PHEV): Electric and ICE propulsion. Not used in the AD model.

- Range Extender Electric Vehicle (REEV): Full electric propulsion. The ICE or Fuel Cell (FC) will charge the battery on longer trips to "extend the range". All plug-in hybrids in the AD model are of the range extender type.

In the AD model, all vehicle data sheets offer the option for energy consumption from two different fuels (primary and secondary) as well as separate engine efficiencies. For vehicles which only use one fuel, energy consumption and engine efficiency need only be specified for the primary fuel.

In some cases energy consumption for hybrid vehicles is only listed as an aggregate. This is not optimal, but it may be applied in the same manner as for the single fuel car with the one exception that the engine efficiency (even though it will be the same value) **MUST** be specified for both fuels.

In addition to the data on the vehicle data sheets, one more alteration is necessary to make hybrids work. In the "Vehicles" sheet rows 11 and 12 it is possible to indicate a fuel mix. In these rows the energy consumption of each fuel relative to the total energy consumption per km is specified. This kind of data is not always readily available, but it is nonetheless essential. The use of fuel mixes is elaborated below.

### **11.5.2 Fuel mixes**

In the "Vehicles" sheet rows 11 and 12 it is possible to indicate a fuel mix as the relative energy content of the individual fuels. The E85 ethanol mix is currently the only fuel mix utilized in the model. E85 indicates that 85% of the volume of the fuel is ethanol – the rest is gasoline. As ethanol has a lower energy content per volumetric unit, the relative content of energy from the two fuels will not be 85/15. Measured in energy content, the mix is 79/21 – 79% of the energy content of the fuel comes from ethanol.

Another use for the fuel mix option is when the vehicles use more than one fuel, i.e. hybrid vehicles. In that case, the fuel mix indicates the energy consumption of each fuel relative to the total energy consumption per km.



## 12 Model interface

### 12.1 Presentation of results

#### 12.1.1 ResultsAllYears

In the sheet called "ResultsAllYears" the users can see consolidated charts for one group of vehicle types. The charts also show the development in costs and emissions over time. A number of dropdown boxes allow the user to

- Change the year between 2010, 2020, 2035 and 2050
- Change between various ILUC assumptions
- Include or exclude emissions and energy consumption from the production of vehicles
- Change whether emissions of allowance market CO<sub>2</sub> is accounted as an emission or an allowance cost
- Change perspectives in the calculations from marginal to average.
- Change learning assumptions between None, Moderate and Fast
- Select a specific sensitivity scenario

The user can decide which pathways that are presented in the chart by assigning each pathway a letter (A to F) in the "Chart control table". Then selecting which group to show in the dropdown menu and pressing the button "Update charts" will update the charts to the user's selection.

#### 12.1.2 A4results

In the sheet "A4 results", the user can view very specific details for one pathway. This sheet is printable in an easily readable A4 paper format. It shows all four years (2010, 2020, 2035 and 2050) in four columns as well as 3 columns for selected sensitivity analyses.

Located in cell V1 there is a dropdown menu where the user can select which pathway to view. After selecting a pathway, the button "Update tables" must be pressed. Then, the table will be update its columns with the years specified by the table "Year selection", and the sensitivity scenarios specified by the table "Sensitivity selection" (both with left corners in column V).

#### 12.1.3 Sensitivity

The sheet sensitivity allow the user to make sensitivity analyses targeted towards specific groups of pathways. Groups of pathways can be defined in the table called "Definition of vehicles groups for sensitivity analysis".

In the table called "Combination of sensitivity scenarios (rows) and sensitivity parameters (columns)" the user can define 5 sensitivity analyses for each group by writing the group name label in column D and adjusting the sensitivity settings in column F to S. It is possible to combine several sensitivity parameters in one sensitivity scenario (a row in the table), or just to adjust on one sensitivity variable only.

After adjusting the sensitivity scenarios and groups (or after making other changes to the model) the sensitivity analyses can be re-run by pressing the button "Update sensitivity tables & charts".

#### 12.1.4 Log

The AD model also offers a logging functionality, where the user can log and explain differences due to changes in the model or assumptions. This can be done in the sheet "Log2010". In this sheet and the sheets Log2020, Log2035 and Log2050 already logged changes can be seen.

If an assumption or calculation method is updated, the results on economic, emissions and efficiency will typically change. The results last logged by the user will be compared to the current results and any difference will be highlighted with colours. Differences are also written in white text in row 1 on many of the sheets in the model. This allows the user quickly to be aware if intended or unintended changes in the model affect the results.

The user is encouraged to log any change by writing the reason for the changes in cell K5 alongside with his name/initials/email address in cell K4 and then press the button named "Log results". Then the present results will be copied to the bottom of the log alongside the reason, initial and date. This feature is highly useful for tracking changes and their reasoning, but will only work if the user assert some discipline in logging any change as soon as it occur.

## 12.2 Adding new technologies and pathways

The calculation of a pathway happens in two successive steps: First the fuel and the vehicle.

### 12.2.1 Adding vehicles

It is possible for a vehicle to use the same fuel as other vehicles, so new pathways can be added just by adding vehicles.

- 1 In the sheet "Vehicles" insert a new column between two existing columns or change an existing column to match your new pathway.
- 2 Add a new pathway label (not identical to any other pathway label) in row 6
- 3 Add label for primary and secondary fuel (if any) in row 7 and 8. The label must be a fuel present on the sheet "Fuels".
- 4 If the vehicle uses dual fuels, set the distribution of primary and secondary fuels in row 11 and 12. The percentages cover energy, not volume or mass. Note that hybrid vehicles (motor + battery) has only one fuel here, and that the split between battery and motor propelling is handled on the relevant motor technology sheet.

### 12.2.2 Adding conversion technologies

It is possible for a user to add new conversion technologies and fuels to the model. Data for conversion technologies are stored on the light blue data sheets. The new fuels can be added by following the steps described below.

- 5 In the sheet "Fuels" find an empty column or add a new column between two existing fuels.
- 6 Enter the name of the new fuel (row 6) and the category for tailpipe emissions (row 7), and the feedstock (row 8)
- 7 Enter the category of transport between feedstock and intermediate conversion (row 9) and the category of distribution (row 10)