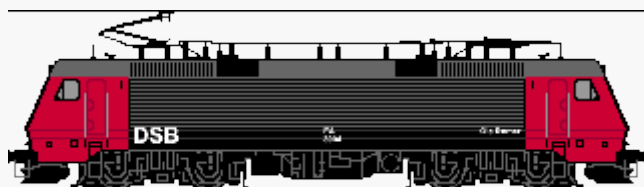




TEKNOLOGISK
INSTITUT

AD-modellen

Energiforbrug for tog og fly



Titel:

Energiforbrug for tog og fly

Udarbejdet for:

Energistyrelsen

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Teknologiparken
Kongsvang Allé 29
8000 Aarhus C
Transport og Elektriske Systemer

Januar 2016

Forfatter: Kim Winther

Indholdsfortegnelse

1. Energiforbrug for passagerfly.....	4
1.1. Mekanisk energiforbrug (drag)	5
1.2. Virkningsgrader for flymotorer	7
1.3. Standardforbrug ved cruise	9
1.4. Realforbrug iflg. Corinairs flydatabase.....	10
1.5. Realforbrug iflg. SAS og DAT	12
1.6. Realiserede virkningsgrader.....	12
1.7. Forventet udvikling	14
1.8. Konklusion	15
2. Energiforbrug for tog	17
2.1. Teoretisk grundlag.....	17
2.2. Mekanisk energiforbrug an hjul (køremodstand).....	19
2.3. Gennemsnitlig toghastighed i Danmark	21
2.4. Køremodstand baseret på gennemsnitshastighed og togtype	22
2.5. Bremsenergi baseret på vægt og bremselængde	23
2.6. Opnåelige virkningsgrader / øvrige tab.....	24
2.7. Togsimulering med kendt hastighedsprofil	26
2.8. Resultater af togsimulering	29
2.9. Generalisering af hastighedsprofil (regnearksmodel)	32
2.10. Realforbrug iflg. DSB og TEMA 2015	36
2.11. International sammenligning af realforbrug	36
2.12. Realiserede virkningsgrader (landsgennemsnit).....	37
2.13. Forventet udvikling	39
2.14. Konklusion	40

1. Energiforbrug for passagerfly

Til brug for AD-modellen skal der kalkuleres et energiforbrug pr. tilbagelagt distance, som kan sammenlignes med køretøjerne i modellen. Dette medfører at interkontinentale flyvninger ikke bør være i fokus, da sammenlignelige rejser ikke kan udføres med køretøjer. Analysen vil derfor primært koncentrere sig om indenrigsflyvning samt kortere udenrigsdistancer op til ca. 1000 km.

På disse strækninger anvendes som oftest mindre turbofan-jetfly eller de langsommere men mere brændstoføkonomiske turbine-propel (turboprop) fly.

I denne analyse er det valgt at fokusere på følgende 15 flytyper, hvor der foreligger aktuelle tal for brændstofforbrug. Flyene anvendes bl.a. af SAS og Danish Air Transport.

- Turbofan-jetfly i analysen (9 stk.)
 - o Airbus A319 (141 sæder)
 - o Airbus A320 (168 sæder)
 - o Airbus A321 (198 sæder)
 - o Boeing 737-600 (123 sæder)
 - o Boeing 737-700 (141 sæder)
 - o Boeing 737-400 (171 sæder)
 - o Boeing 717-200 (141 sæder)
 - o MD-82 (141 sæder)
 - o CRJ900 (88 sæder)

- Turboprop fly i analysen (6 stk.)
 - o Dash 8-100 (39 sæder)
 - o Dash 8-300 (50 sæder)
 - o Dash 8 Q400 (78 sæder)
 - o ATR-42 (42 sæder)
 - o ATR-72 (72 sæder)
 - o BAe Jetstream 31 (18 sæder)

Nogle af de nævnte flytyper udgået af driften pga. problemer med landingsstel eller lignende, men da disse forhold ikke vedrører den energimæssige performance indgår de alligevel i analysen.

Ud over de 15 ovennævnte flytyper anvendes i den rent teoretiske analyse også data fra Boeing 787, selv om den principielt er til interkontinental flyvning. Brugen af disse data begrundes med, at der har været særligt god adgang til detaljerede performancedata for netop denne flytype.

For at analysere energiforbruget på et passagerfly til brug for AD-modellen må der opstilles en simpel model for det mekaniske energiforbrug samt for motorens virkningsgrad. Dette gøres i de følgende afsnit 1.1 og 1.2

1.1. Mekanisk energiforbrug (drag)

Ved flyvning med konstant højde og hastighed skal opdriften på flyet være lig med tyngdekraften, jf. Newtons første lov. Flyets glidetetal udtrykker forholdet mellem opdrift (lift) og modstand (drag), og dermed modstanden som funktion af opdrift. Det følger af definitionen på mekanisk arbejde (kraft gange vej) at energiforbruget pr. tilbagelagt km er lig med modstanden målt i kN. Derfor udtrykker glidetallet også det mekaniske energiforbrug som funktion af flyets vægt:

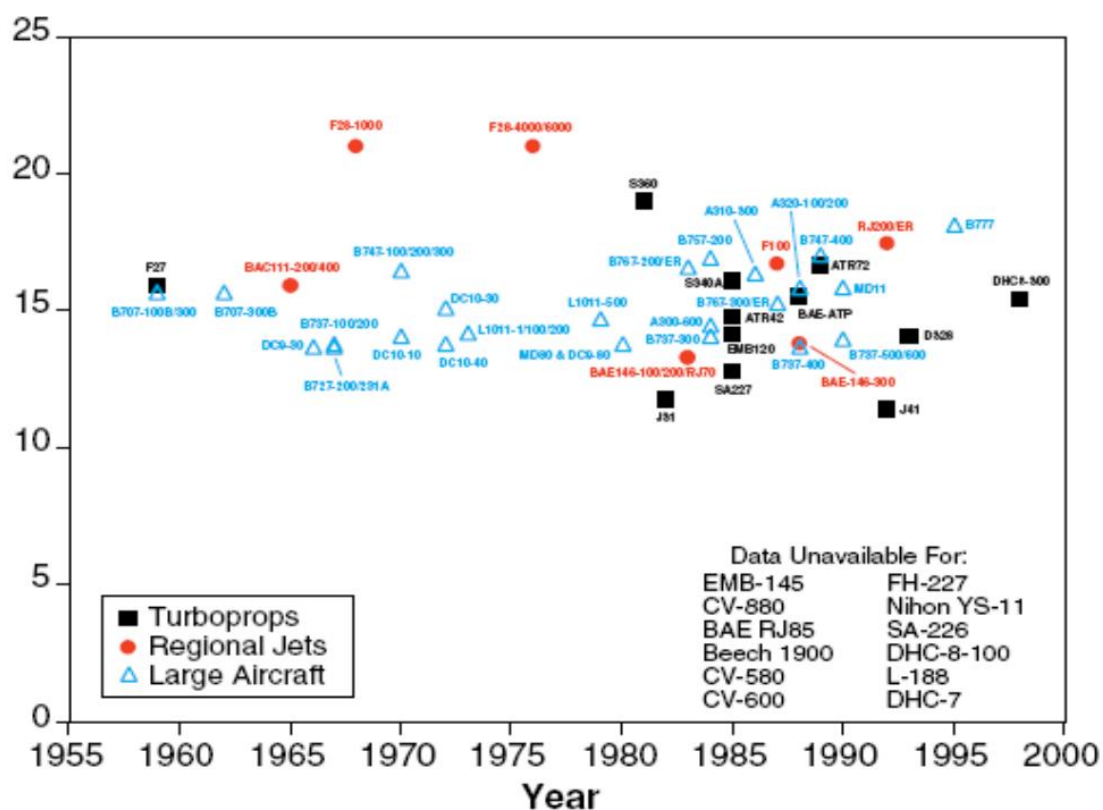
Ligning 1

$$MJ_{mek} \text{ pr. km} = \frac{M \cdot g}{1000 \cdot C_{L/D}}$$

- hvor,

- M er flyets totalvægt i kg
- g er gravitationskonstanten 9,82 m/s²
- C_{L/D} er glidetallet (forholdet mellem lift og drag, C_L/C_D)

Des ses altså at det mekaniske energiforbrug stort set kun afhænger af flyets vægt samt glide-tallet. Der ses bort fra vejrforhold og andet, som ikke er direkte relateret til flytypen.



Aerodynamic data for commercial aircraft: L/D for cruise (Babikian 2001)

Figur 1: Glidetetal for passagerfly i historisk perspektiv

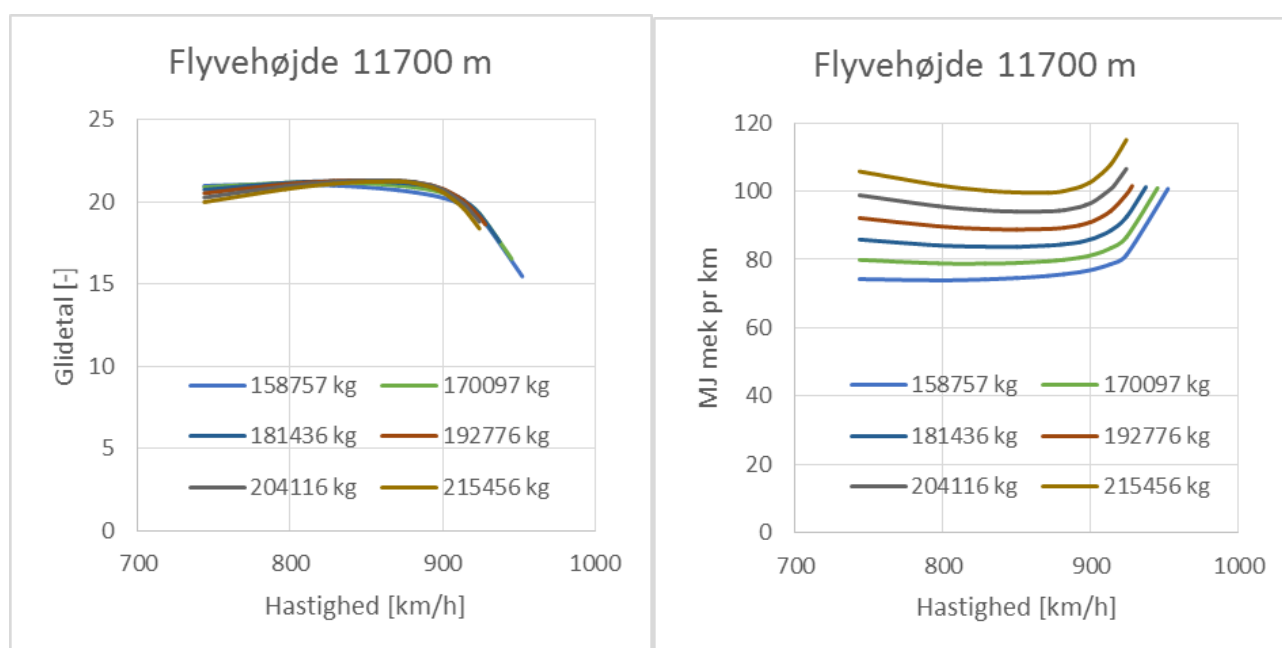
Glidetallet for et moderne passagerfly ligger i området 15 – 21 i flyets optimale flyvehøjde og fart, som det ses i Figur 1. Passagerflyene i denne analyse har en totalvægt (maksimal startvægt) fra 7 tons for den mindste turboprop maskine op til 80 tons for de nævnte turbofan jettfly.

Eksempel: 30.000 kg fly med et glidetetal på 15 => 19,6 MJ mekanisk energi pr. km

Glidetallet afhænger principielt ikke af vægt, som det ses i Figur 2.

I formlen for det mekaniske energiforbrug indgår hastigheden principielt ikke, under forudsætning af at glidetallet er konstant. I praksis vil glidetallet være stigende fra den laveste mulige flyvehastighed (stall-speed) til flyets optimale glidehastighed, og herefter svagt faldende med hastigheden. Moderne passagerfly, som vist i Figur 2, er konstrueret således at glidetallet er tæt på optimalt ved den typiske rejsehastighed (cruise air speed). Typisk ligger den optimale glidehastighed for turbofan passagerfly mellem 750 og 900 km/t.

Det er vigtigt at pointere at lydens hastighed udgør en stor barriere. Ved flyvning i en typisk højde for passagerfly (39000 fod) er lydens hastighed ca. 1062 km/t. Fly som nærmer sig eller overskrider denne hastighed bruger ekstreme mængder mekanisk energi. Et eksempel er Concorde som havde et glidetetal på kun 7,14 ved flyvning med 2 gange lydens hastighed.

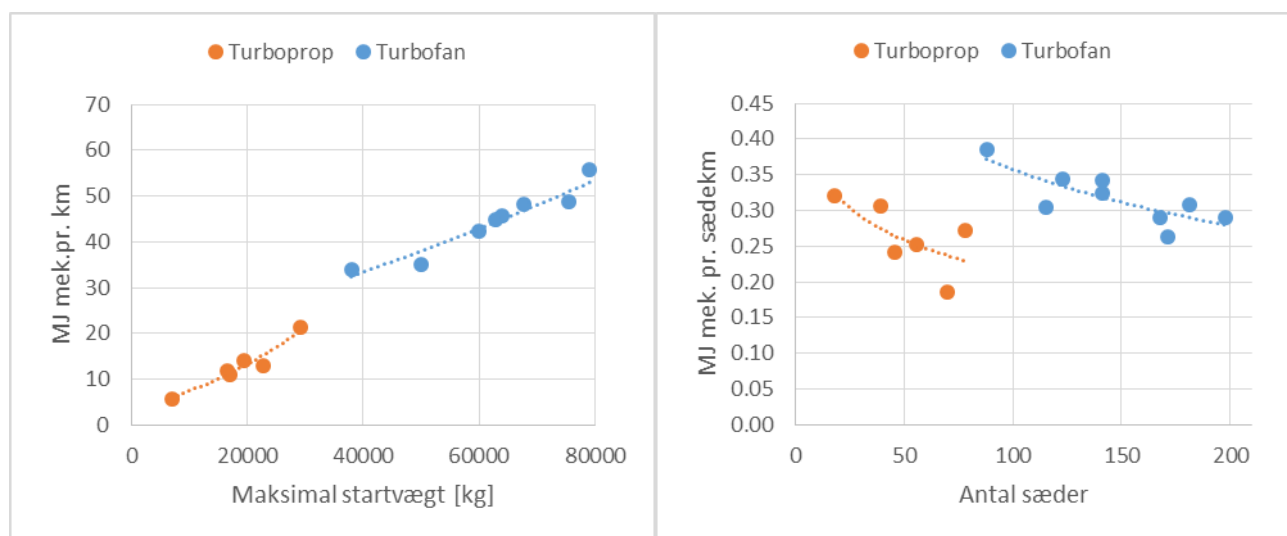


Figur 2: Hastighedens indvirkning på glidetetal og mekanisk energiforbrug for en Boeing 787 Turbofan i Flight Level 390 (39000 fod) (<http://www.lissys.demon.co.uk/samp1/cruz.html>)

Da flyet forbruger brændstof mellem start og landing, og derved taber i vægt, er der et forbrug af potentiel energi. Dette er imidlertid meget lille, fx Boeing 787: $11700 \text{ m} * 5,5 \text{ kg/km} * 9,81 \text{ m/s}^2 = 0,63 \text{ MJ/km} = \text{ca. } 0,8\%$ af det mekaniske energiforbrug. Her ud over er der intet forbrug af potentiel energi. Energien som bruges på opstigning kan altså hovedsageligt, bortset fra vægten af det forbrugte brændstof, genvindes ved nedstigning.

Det er princippet i AD-modellen at alt øvrigt forbrug af brændstof, for eksempel til kørsel og ventetid på taxi-runway samt flyvning i sub-optimal højde og fart, skal henregnes under virkningsgraden, og altså ikke indgår i det mekaniske energiforbrug.

Det samlede mekaniske energiforbrug for de 15 udvalgte flytyper kan derfor beregnes som vist i Figur 3.



Figur 3: Det mekaniske energiforbrug for de 15 passagerfly i analysen ligger mellem 0,19 – 0,39 MJ pr. sædekilometer

Da passagerfly varierer ekstremt meget i størrelse og vægt, giver det mest mening af beregne energiforbruget enten pr. ton km eller pr. sædekilometer. Her vælger vi sædekilometer.

1.2. Virkningsgrader for flymotorer

Hvis brændstofforbruget er kendt i forvejen, kan man springe dette afsnit over, og gå direkte til Afsnit 1.6.

Når forbruget ikke er kendt skal man imidlertid beregne virkningsgraderne ud fra motorleverandørens oplysninger. Her adskiller turbofan og turboprop motorerne sig afgørende fra hinanden,

Rene jetmotorer (turbojet) anvendes i dag kun til militære formål, da de bl.a. er meget støjende og fungerer bedst ved høj fart. Kommercielle fly anvender i stedet turbofan-jetmotorer, som er udstyret med en ekstra rotorsektion foran selve jetmotoren. Rotorsektionen trækker en stor mængde luft uden om motoren og virker derved både støjdæpende og økonomiserende.

Fly med stempelmotorer anvendes siden 1970'erne ikke længere til kommerciel transport. Det er i tråd med AD-modellen at anvende data for de nyeste flymodeller, således at analysen afspejler bedste tilgængelige teknologi.

For turbofan og andre jetmotorer antages jetkraften (thrust) at være omtrent proportionalt med brændstof flowet. Virkningsgraden kan derfor beregnes ud fra det thrust-specifikke brændstofforbrug (TSFC) og flyvehastigheden.

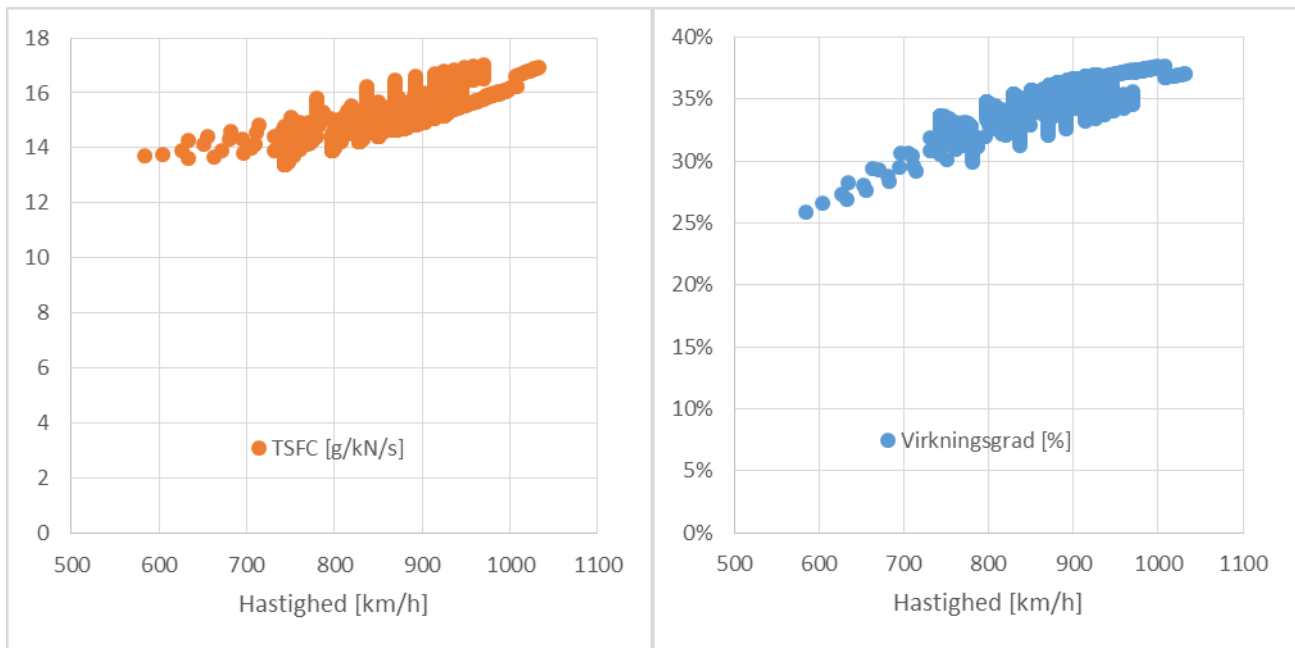
Ligning 2

$$\eta_{turbofan} = \frac{v_{cruise} \cdot \rho_{A-1}}{TSFC \cdot H_u \cdot 3,6^2}$$

- hvor,
- v_{cruise} er flyvehastigheden i km/h
- ρ_{A1} er densiteten for jetbrændstof A-1: $0,804 \text{ kg/m}^3$
- TSFC er det specifikke brændstofforbrug i g/s/kN
- H_u er den nedre brændværdi for jetbrændstof A-1: $10,22 \text{ kWh/l}$

Eksempel: $SFC = 17,1 \text{ g/s/kN}$, flyvehastighed 825 km/h , $\eta_{turbofan} = 29 \%$

Det forholder sig således, at turbofan-jetmotorens virkningsgrad øges ved højere hastigheder. Dette kan ses både ud fra Ligning 2 og ved at analysere producentens angivelser af brændstofmængden ved flyvning med forskellig højde, hastighed og vægt, hvilket ses i Figur 4.



Figur 4: Hastighedens indvirkning på virkningsgrad og specifikt brændstofforbrug for turbofan motorerne på en Boeing 787 (<http://www.lissys.demon.co.uk/samp1/cruz.html>)

For turboprop motorer angives det specifikke brændstofforbrug oftest an propel i g/kWh, hvilket gør sammenligning med turbofan motorer lidt vanskeligere, da man også skal tage højde for propellens effektivitet, som er ca. 80-85%.

Sammenligninger viser dog, at turboprop motoren har lavere TSFC, selv om man tager højde for propellens tab. Alligevel vil turbofan motoren grundet højere flyvehastigheder opnå den højeste virkningsgrad.

Beregningen af turboprop virkningsgraden ses i Ligning 3.

Ligning 3

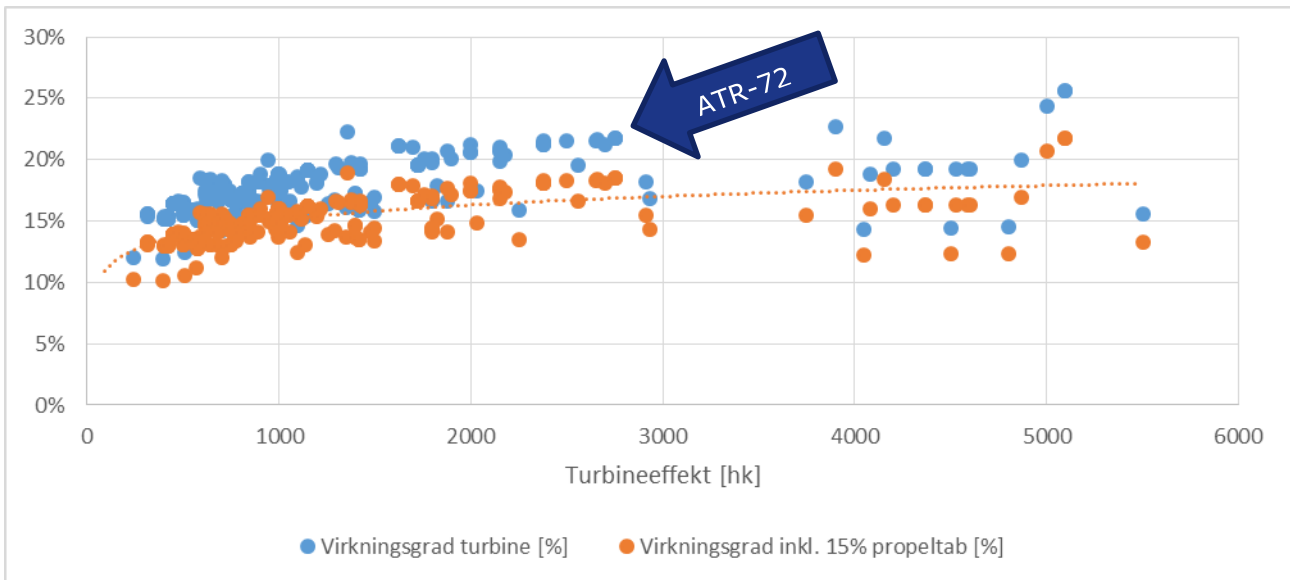
$$\eta_{turboprop} = \frac{\eta_{propel} \cdot \rho_{A-1}}{BSFC \cdot H_u \cdot 0,036^2}$$

- hvor,

- η_{propel} er propelvirkningsgraden, ca. 80-85%
- ρ_{A-1} er densiteten for jetbrændstof A-1: 0,804 kg/m³
- BSFC er det specifikke brændstofforbrug i g/kWh
- H_u er den nedre brændværdi for jetbrændstof A-1: 10,22 kWh/l

Eksempel: BSFC=279 g/kWh, $\eta_{propel}=0,85 \Rightarrow \eta_{turboprop}=18,5 \%$

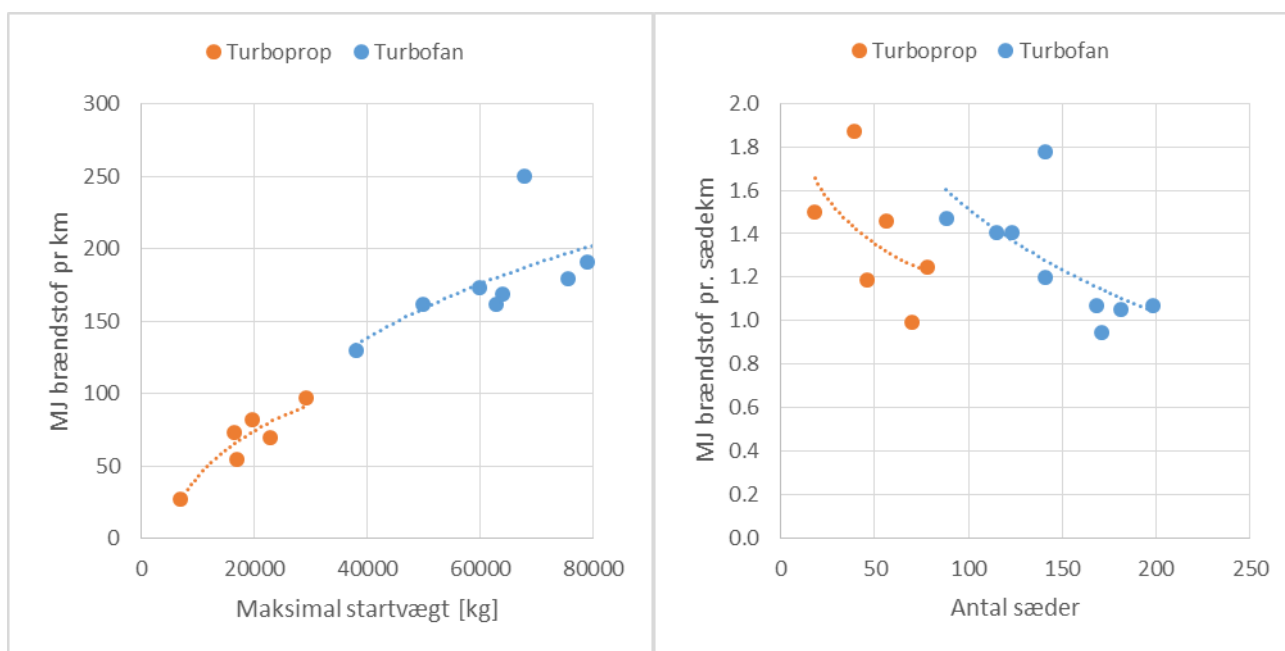
Beregnete motorvirkningsgrader for en række flytyper med turboprop motorer ses i Figur 5.



Figur 5: Virkningsgrader for turboprop motorer beregnet iflg. Ligning 3 med oplysninger fra <http://www.jet-engine.net/civtspec.html>

1.3. Standardforbrug ved cruise

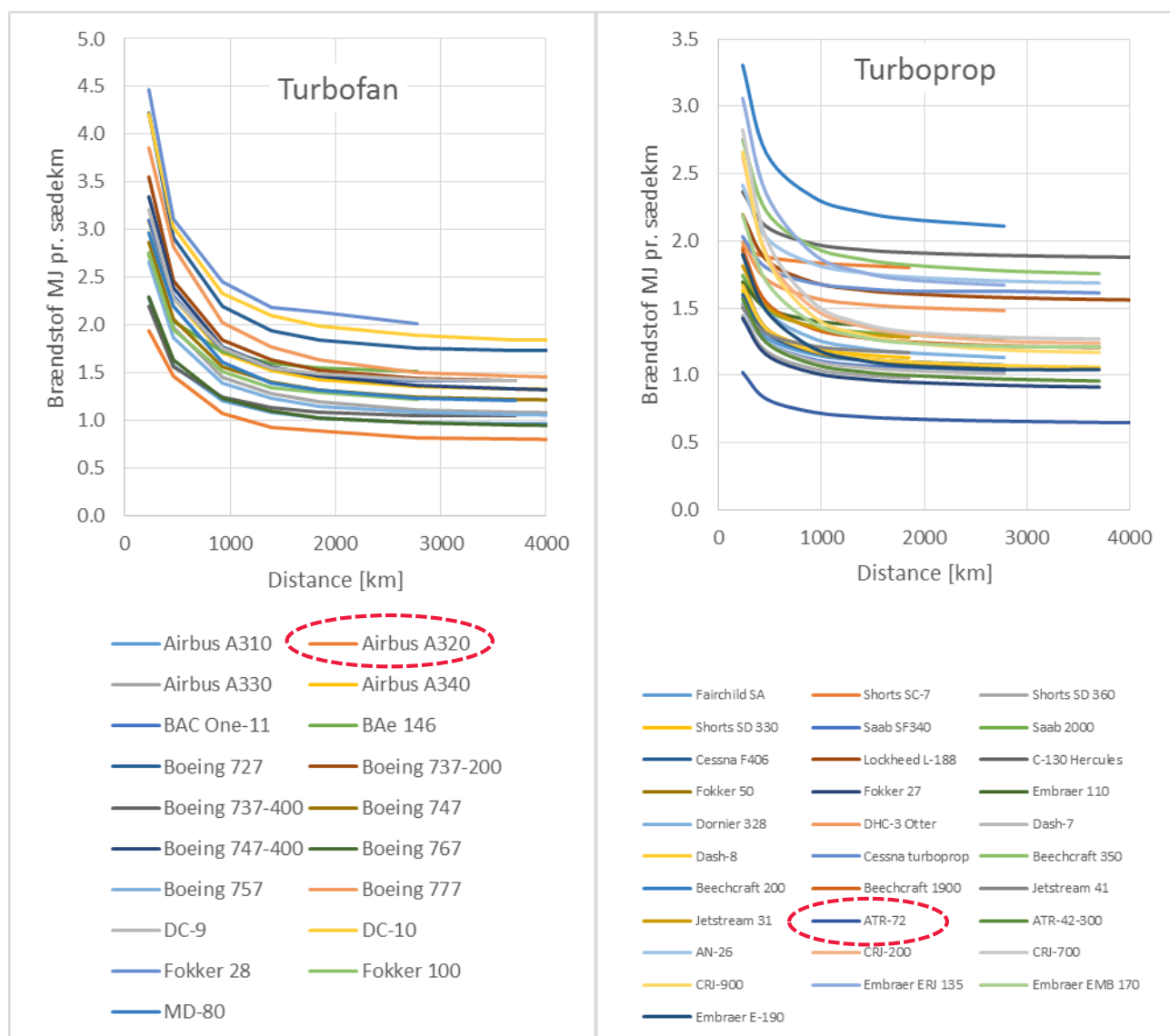
For de 15 udvalgte flytyper er der indsamlet oplysninger om typisk forbrug af brændstof ifølge flyselskaberne og Wikipedia, hvilket ses i Figur 6. Tallene er typisk udtryk for gennemsnitsforbruget på længere ruter. Det ses tydeligt at brændstofforbruget er nærmest proportionalt med den maksimale startvægt for flytypen. Da ruten og den reelle startvægt ikke er klart specificeret her, skal tallene dog kun bruges som rettesnor. Mere præcise angivelser findes i Afsnit 1.4 og 1.5



Figur 6: Standard brændstofforbruget for de 15 flytyper ligger mellem 0,9 og 1,9 MJ pr. sædekilometer (anvendte datakilder: www.sasgroup.net, www.scanliners.com, www.airlines-inform.com, books.google.dk, en.wikipedia.org, www.hunteraviation.com, www.aslairlines.ch)

1.4. Realforbrug iflg. Corinairs flydatabase

Corinair indeholder en database med realforbrug på 19 turbofan og 31 turboprop maskiner. Flere af disse maskiner er meget gamle, fx de Havilland DHC-3 udgået af produktion i 1967, og repræsenterer derfor ikke State of the art. Blandt de nyere flytyper er Boeing 777 turbofan og den meget effektive ATR-72 turboprop, som hører til de mest energieffektive passagerfly.



Figur 7: Corinairs flydatabase omregnet til energiforbrug pr. sædekilometer viser at de mest energieffektive fly klarer omkring 0,7 - 0,9 MJ pr. sædekilometer på længere distancer, mens forbruget på en kort rute (~232 km) er mindst 1,0 MJ for turboprop og 1,9 MJ for turbofan.

Som tommelfingerregel kan man sige at ruten skal være over 1000km for turbofan og 400 km for turboprop for at opnå det laveste brændstofforbrug pr. km.

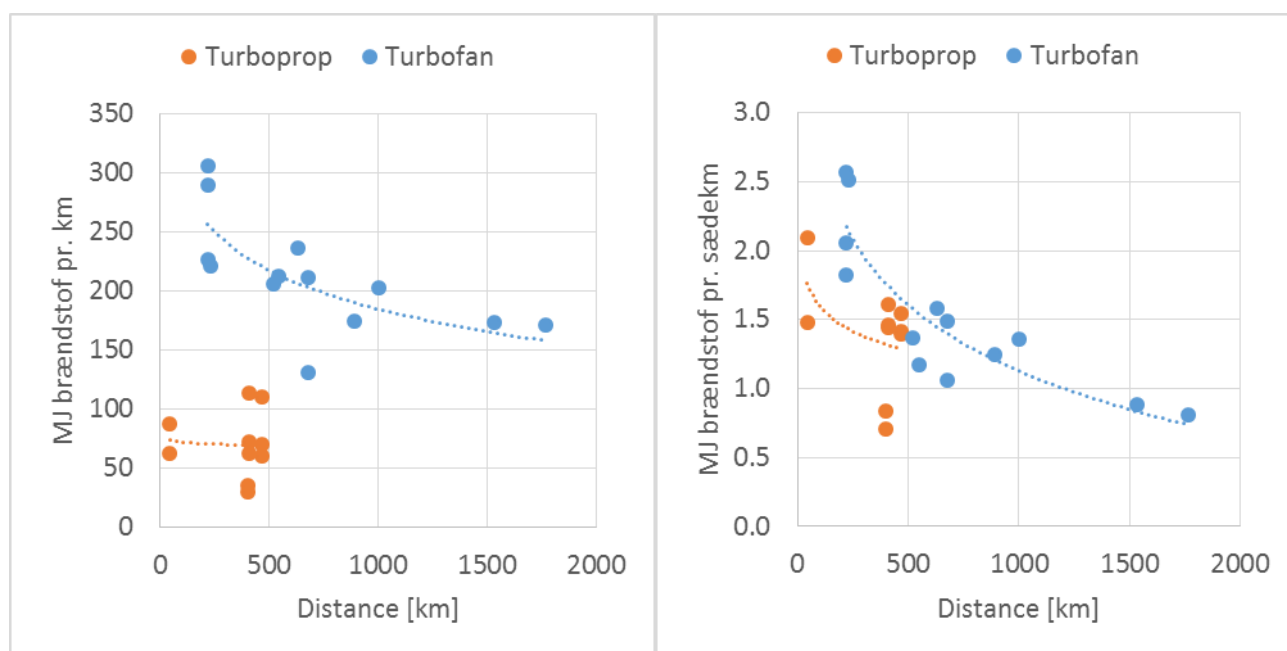
En typisk flyverute i Danmark er turen fra Billund til Kastrup, hvor afstanden er 219 km og den gennemsnitlige flyvetid er 50 minutter. Derfor er det mest realistiske forbrug her i størrelsesorden 1,0 MJ pr. sædekilometer for turboprop og 1,9 MJ pr. sædekilometer for turbofan.

På længere ruter vil turbofan og turboprop være omtrent jævnbyrdige.

1.5. Realforbrug iflg. SAS og DAT

Det reelle brændstofforbrug ved flyvning af danske lufthavne er fundet ved hjælp af SAS online CO₂-beregner, samt ved hjælp af servicelogs fra Danish Air Transport. Også her ses at distancen har stor betydning for forbruget i praksis. Dette ses af Figur 8, hvor forbruget pr. km på korte afstande er mere end dobbelt så højt som på længere ture. De danske flyveruter er generelt meget korte og byder derfor på en gennemsnitlig flyvehøjde og -hastighed som er langt fra optimal. Derfor er forbruget i praksis omtrent dobbelt så stort som på lange ruter.

Beregningerne af forbrug pr. sædekilometer adskiller sig fra beregning af forbrug pr. passagerkilometer. Ved omregning til passagerkilometer kan der antages en gennemsnitlig belægningsfaktor på 71,6%, som SAS anvender i sit grønne regnskab.



Figur 8: Observeret brændstofforbrug for danske passagerfly ligger fra 0,7 – 2,6 MJ pr. sædekilometer afhængigt af flyvedistance (ref. SAS og DAT)

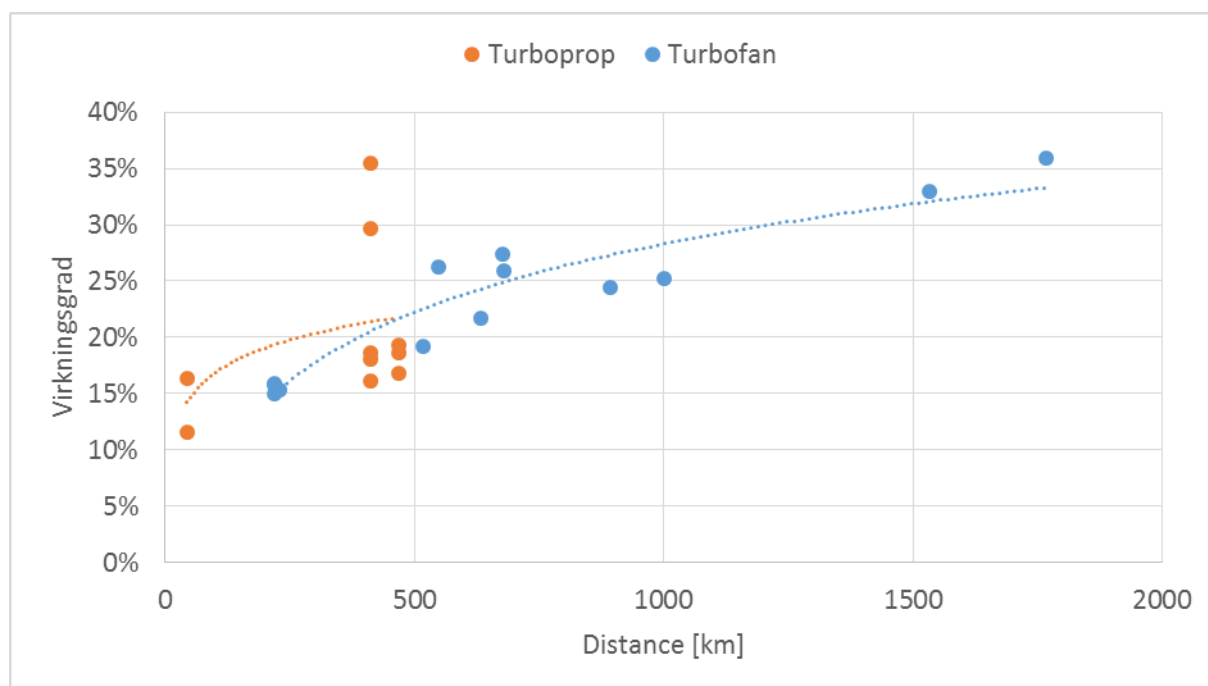
1.6. Realiserede virkningsgrader

Virkningsgraden kan beregnes ud fra det totale energiforbrug af fly, hvis dette er kendt:

Ligning 4

$$\eta_{motor} = \frac{MJ_{mek} \text{ pr. km}}{MJ_{fuel} \text{ pr. km}}$$

Det ses af Figur 9, at turbofan motorerne opnår de højeste virkningsgrader på længere ruter, mens turboprop motorerne er marginalt bedre på korte ruter. Virkningsgraden nærmer sig den beregnede motorvirkningsgrad ved længere ruter. Under gunstige vindforhold kan virkningsgraden endda overstige den beregnede motorvirkningsgrad, hvilket ses på de to Esbjerg-Stavanger-flyvninger med turbopropflyet ATR 42-320.



Figur 9: Virkningsgrader for de 15 flytyper ud fra reelt brændstofforbrug (Afsnit 1.5) og beregnet mekanisk energi (Afsnit 1.1)

Ruterne og flytyper anvendt i Figur 8 og Figur 9 er:

Rute	Flytype	Distance [km]	MJ pr. sædekm	MJ mek pr. sædekm	Virkningsgrad
Billund-Esbjerg	ATR 42-320	44	1.48	0.24	16%
Esbjerg-Billund	ATR 42-320	44	2.09	0.24	12%
Kastrup-Billund	Airbus A320-200	220	1.82	0.29	16%
Kastrup-Billund	Airbus A319-100	220	2.06	0.33	16%
Kastrup-Billund	CRJ 900LR	220	2.57	0.39	15%
Kastrup-Göteborg	CRJ 900LR	229	2.52	0.39	15%
Esbjerg-Stavanger	ATR 42-320	400	0.84	0.24	29%
Stavanger-Esbjerg	ATR 42-320	400	0.70	0.24	34%
Esbjerg-Stavanger	Dash-8-100	411	1.61	0.31	19%
Esbjerg-Stavanger	Dash-8-300	411	1.44	0.25	18%
Esbjerg-Stavanger	Dash-8-400	411	1.46	0.27	19%
Esbjerg-Haugesund	Dash-8-100	468	1.54	0.31	20%
Esbjerg-Haugesund	Dash-8-300	468	1.40	0.25	18%
Esbjerg-Haugesund	Dash-8-400	468	1.41	0.27	19%
Kastrup-Oslo	Boeing 737-400	518	1.37	0.26	19%
Kastup-Stockholm	Boeing 737-800	547	1.17	0.31	26%
Kastrup-Amsterdam	MD-82	633	1.58	0.34	22%
Kastrup-Frankfurt	Airbus A321-200	678	1.06	0.29	27%
Kastrup-Bergen	CRJ 900LR	679	1.48	0.39	26%
Kastrup-Helsinki	Boeing 717-200	892	1.24	0.30	24%
Kastrup-Paris	MD-82	1002	1.36	0.34	25%
Kastrup-Rom	Airbus A321-200	1534	0.88	0.29	33%
Kastrup-Barcelona	Airbus A321-200	1767	0.81	0.29	36%

1.7. Forventet udvikling

Den forventede udvikling i energiforbrug pr. sædekilometer er estimeret af det hollandske luftfarts laboratorium NLR-CR-2005-669 "Fuel efficiency of commercial aircraft - An overview of historical and future trends".

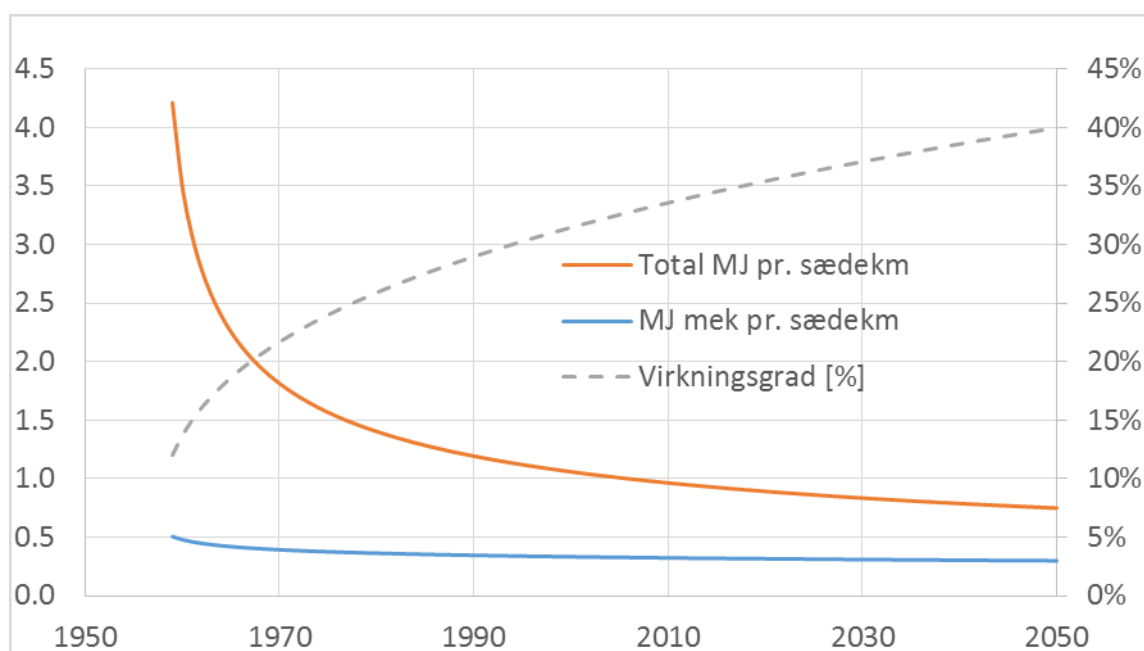
NLR påpeger at effektiviteten ikke kan fremskrives med en fast procent, som flere kilder i litteraturen har gjort, men i stedet bør beskrives ved en regressionslinje, som vist i Figur 10.

Regressionslinjens ligning er:

Ligning 5

$$MJ \text{ fuel pr. sædekm} = e^{1,75 - 0,45 \cdot \ln(n - 1957)}$$

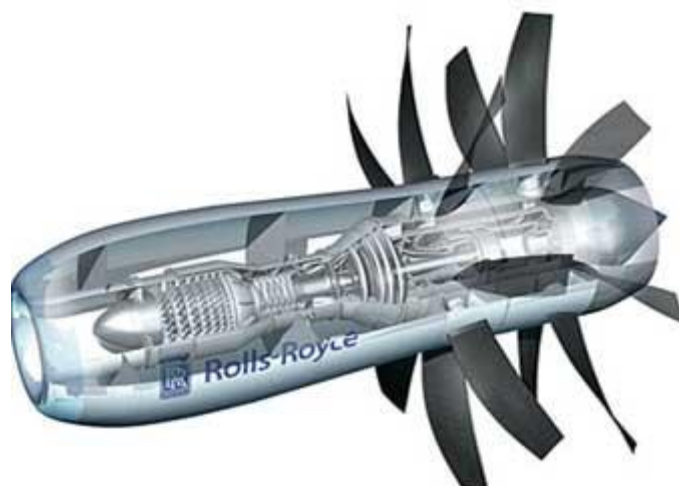
Følges denne regressionslinje, vil udviklingen med udgangspunkt i 2015 betyde et fald i energiforbrug pr. sædekilometer på ca. 3,7% i 2020, 12,5% i 2035 og 19,1% i 2050.



Figur 10: Udvikling i energiforbrug samt virkningsgrad og mekanisk energi for turbofan fly på i cruise (lange distancer)

Historisk har motorudviklingen ifølge NLR rapporten stået for 69 % af brændstofbesparelsen pr. sædekilometer, mens aerodynamik (glidetallet) har udgjort 27 %. Øvrige faktorer, primært opskalering af fly har bidraget med 4 %. Disse oplysninger anvendt til at estimere virkningsgrad og mekanisk energiforbrug i Figur 10.

Figuren gælder for turbofan motorer. Fremtidens flymotorer vil formentlig byde på en kombination af turbofan og turboprop, som vist i Figur 11. Herved opnås turboprop motorens effektivitet i lav fart og højde, kombineret med turbofan motorens effektivitet i stor fart og højde.



Figur 11: En mulig fremtidig Open Rotor turbofan motor under udvikling hos Rolls Royce (Foto: www.ASME.org)

Prognosen tager ikke højde for anvendelse af biobrændstoffer, da virkningsgraden og vægten af brændstoffet forventes at være den samme. Dette baseres på at flyindustrien kun accepterer fuldt kompatible biobrændstoffer og ikke fx alkoholer som har lavere energiindhold. Elektriske fly kan komme på tale i fremtiden, men dette vil kræve en betydelig justering af vægten, og dermed det mekaniske energiforbrug i AD-modellen.

1.8. Konklusion

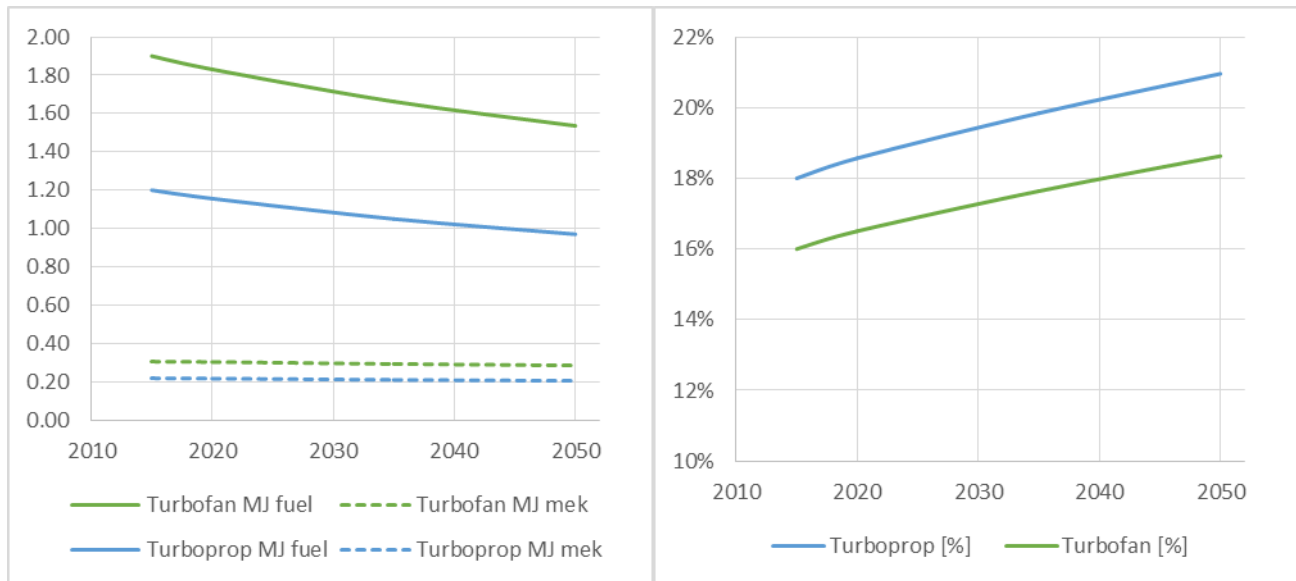
Med udgangspunkt i en typisk flyverute som Billund-Kastrup, hvor distancen er 219 km, vil et moderne turboprop passagerfly bruge 1,2 MJ pr. sædekilometer. Bedste tilgængelige teknologi, baseret på energiforbrug alene, er turboprop fly som ATR-72 samt den mindre ATR-43. Virkningsgraden vil ifølge Figur 9 være ca. 18 %.

For turbofan jetfly vil der typisk være flere sæder, men også et højere energiforbrug pr. sæde, da afstandene i Danmark ikke er optimale til turbofan drift. Her skal derfor regnes med 1,9 MJ pr. sædekilometer. Fremtidige forbedringer på virkningsgrad og mekanisk energiforbrug ventes at følge tendensen i Figur 10. Til brug for AD-modellen anbefales derfor følgende faktorer.

Tabel 1: Anbefalede data til AD-modellen

		2015	2020	2035	2050
Turboprop 23 ton, 88 sæder, Kastrup-Billund	Brændstofenergi MJ/sædekilometer	1,20	1,16	1,05	0,97
	Mekanisk energi MJ/sædekilometer	0,216	0,215	0,208	0,203
	Virkningsgrad	18,0 %	18,6 %	19,8 %	21,0 %
Turbofan 75 ton, 168 sæder, Kastrup-Billund	Brændstofenergi MJ/sædekilometer	1,90	1,83	1,66	1,54
	Mekanisk energi MJ/sædekilometer	0,304	0,302	0,293	0,286
	Virkningsgrad	15,0 %	15,5 %	16,5 %	17,5 %

Figur 12 viser konklusionen i oversigt.



Figur 12: Forventet udvikling i brændstofforbrug og virkningsgrad for turboprop og turbofan flyvning mellem Kastrup og Billund.

2. Energiforbrug for tog

Jernbanen hører historisk til blandt de mest energieffektive transportformer, da rullemodstanden for metalhjul mod metalskinner er ekstremt lav. Hertil kommer at togets lange og smalle form reducerer luftmodstanden i forhold til andre transportmidler.

2.1. Teoretisk grundlag

Den tilførte energi fordeler sig hovedsageligt på opbygning af kinetisk energi, overvindelse af køremodstande samt motor- og transmissionstab (inkl. tab i køreledninger og hjælpekraft).

Figur 13 viser energiforbruget mellem to stationer for et dieseltog.

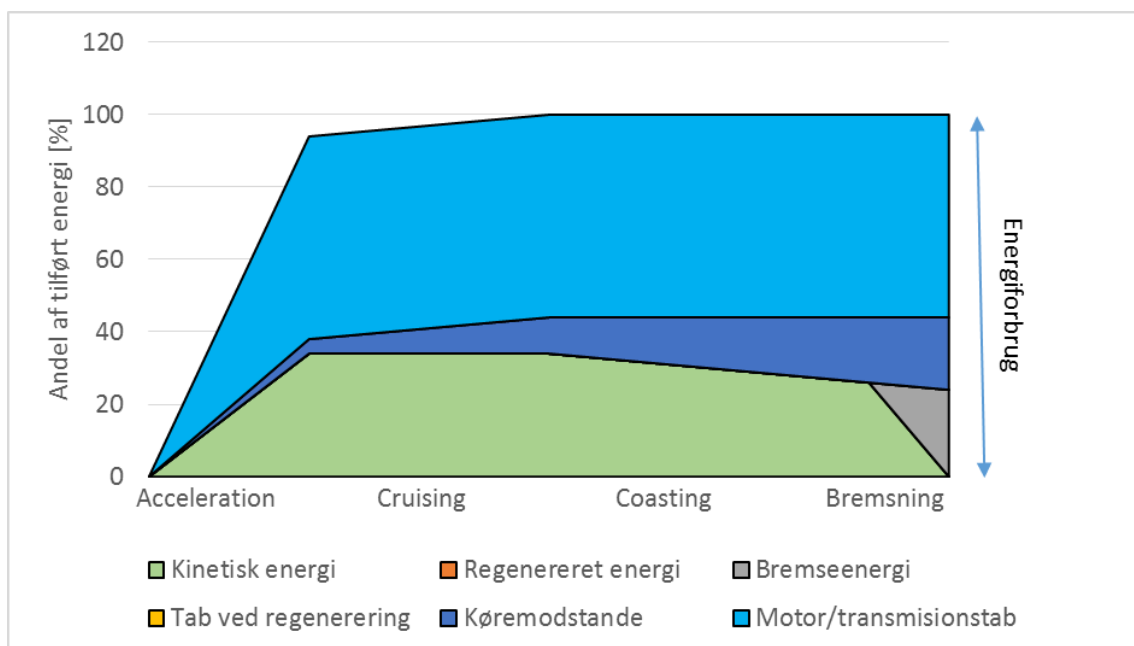
Størstedelen af energien tilføres i accelerationsfasen, hvor dieselmotorerne primært bruges til at opbygge kinetisk energi, og tabene udgør ca. 60% af den tilførte energi.

Under "Cruising" med konstant fart opretholdes den kinetiske energi ved at motoren overvinder køremodstandene. Dette kræver betydeligt mindre tilført energi pr. kørt kilometer end accelerationen.

Under den efterfølgende "Coasting" fase vil den oparbejdede kinetiske energi kunne anvendes til at overkomme de mekaniske køremodstande, således at toget taber fart, men principielt ikke belaster motorerne. Dette er meget økonomisk, men medfører også togets gennemsnitsfart reduceres, hvilket forsinket ankomsttidspunktet ved næste station.

For at undgå for lange rejsetider vælger man derfor at bremse toget mekanisk, hvilket påbegyndes ca. 1 kilometer før endestationen. Her tabes store mængder energi, da størstedelen af den resterende kinetiske energi forvandles til varme i bremseet systemet. En vis del af bremseenergien kan dog udnyttes til at drive aircondition anlæg m. på toget.

Samlet set er det kun ca. 20% af den tilførte energi, som går til at overvinde køremodstande.



Figur 13 Illustration af energiforbruget mellem to stationer for et dieseltog

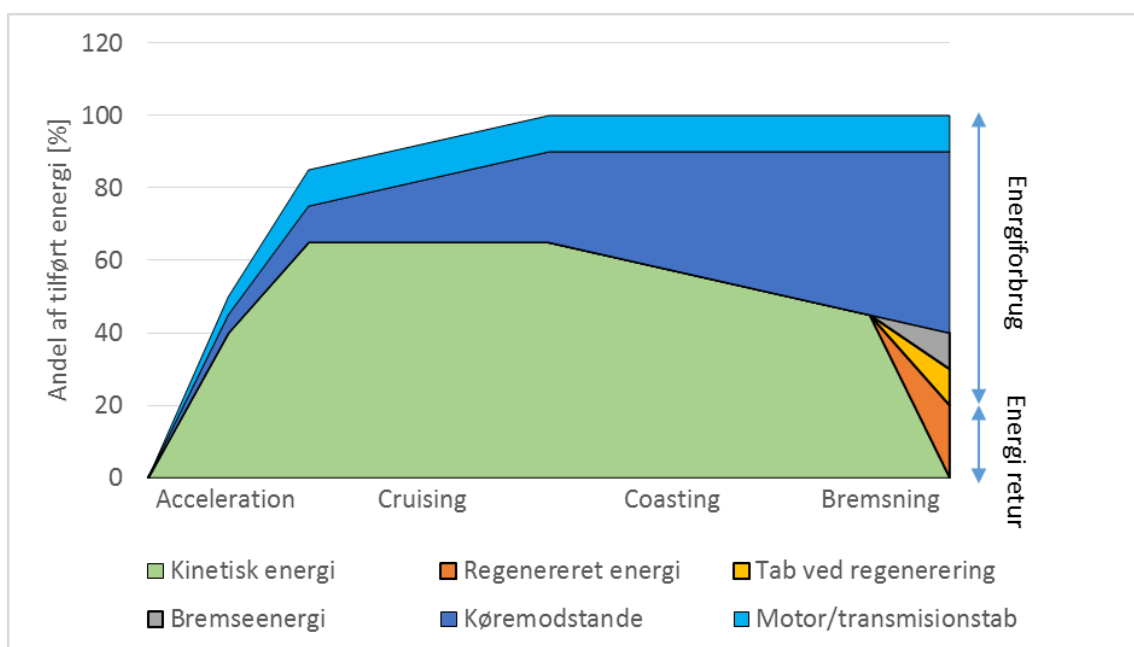
Figur 14 viser situationen for et elektrisk tog. Her er motor- og transmissionstab noget lavere, selv om man inkluderer ledningstab og drift af klimaanlæg i tallet.

Det elektriske tog kan omsætte mere end 80 % af den tilførte energi til kinetisk energi under accelerationsfasen. Ved "Cruising" kan op mod 90% omsættes til overvindelse af køremodstande.

Er strækningen kort, skal motorerne ikke bruges før bremsefasen, hvor de elektriske motorer anvendes som generatorer.

Figuren viser ca. 20% af energien regenereres og sendes retur til elnettet, mens 80% resterer som netto-energiforbrug an tog. Dette svarer nogenlunde til erfaringer fra de danske eltog (Litra ET/ER) som viser at det typisk er 16-20% af den tilførte elektriske energi som regenereres.

Samlet set går ca. 60% af energien til at overvinde køremodstande.



Figur 14: Illustration af energiforbruget mellem to stationer for et elektrisk tog

Det mørkeblå felt i Figur 13 og Figur 14 "Køremodstande" udgør det mekaniske energiforbrug an hjul, som defineret i AD modellen. Dette energiforbrug behandles nærmere i Afsnit 2.2.

2.2. Mekanisk energiforbrug an hjul (køremodstand)

Det mekaniske energiforbrug an hjul afhænger primært af hastigheden og togets vægt. I AD-modellen regnes tomgangstab og hjælpekraft til diverse udstyr på toget ikke som mekanisk energiforbrug. Disse forbrug/tab skal i stedet henregnes under virkningsgraden.

Det samme gælder bremseenergien, som kan være en ganske betydelig faktor når der køres med hyppige stop, som tilfældet er i Danmark. Dette forhold behandles specifikt i Afsnit 2.5.

Forskellige kilder anvender forskellige typer af matematiske udtryk for det mekaniske energiforbrug. Typisk er der tale om 2. eller 3. grads polynomier, hvor hastigheden er den primære variabel og hvor vægten indgår i alle led undtaget 2. grads leddet, som typisk tilskrives luftmodstand og derfor afhænger af togets længde.

Nultegradsleddet repræsenterer rullemodstanden, 1. gradsleddet lejevriktionen og 3. gradsleddet kan skyldes forskellige svingninger og oscillationer, flangekontakt i hurtige sving samt uheldig aerodynamik fx i mellemrummet mellem togvogne.

En generel formel for togets mekanisk energiforbrug kan skrives som vist i Ligning 6.

Ligning 6

$$MJ_{mek} \text{ pr.km} = \frac{m \cdot g}{1000} \cdot \frac{(A + B \cdot v + D \cdot v^3)}{1000} + \frac{C \cdot v^2}{1000}$$

Eksempler på faktorerne A, B, C og D ses i Tabel 2.

Tabel 2

Togsæt	A [N/kN]	B [N/kN/kmh]	C [N/kmh ²]	D [N/kN/kmh ³]
DSB IC3	1,5	0,0025	0,376	-
DSB IC3 x 2	1,5	0,0025	0,491	-
DSB IC3 x 3	1,5	0,0025	0,606	-
DSB IC3 x N	1,5	0,0025	0,26 + 0,002 · L	-
Railelectrica Passenger	1,43	0,0054	$0,000253 \cdot \frac{m \cdot g}{1000}$	-
Railelectrica LHB	0,69873	0,021533	$0,0000835 \cdot \frac{m \cdot g}{1000}$	-
Hay 60-ton vogn	1,83	-	-	0,0000045
Hay 20-ton vogn	3,77	-	-	0,0000073

Eksempel: 108500 kg, 120kmh, A=1,5, B=0,0025, C=0,376 => 7,33 MJ/km

Enheden [N/kN] svarer eksakt til [kg/ton], som er en ofte anvendt enhed.

Det kan være nyttigt at relatere nogle af faktorerne til enheder, som er kendt fra bilverdenen. Faktoren A kan fx omregnes til dimensionsløs rullemodstandskoefficient f_R ved hjælp af formlen:

$$f_R = \frac{A}{1000}$$

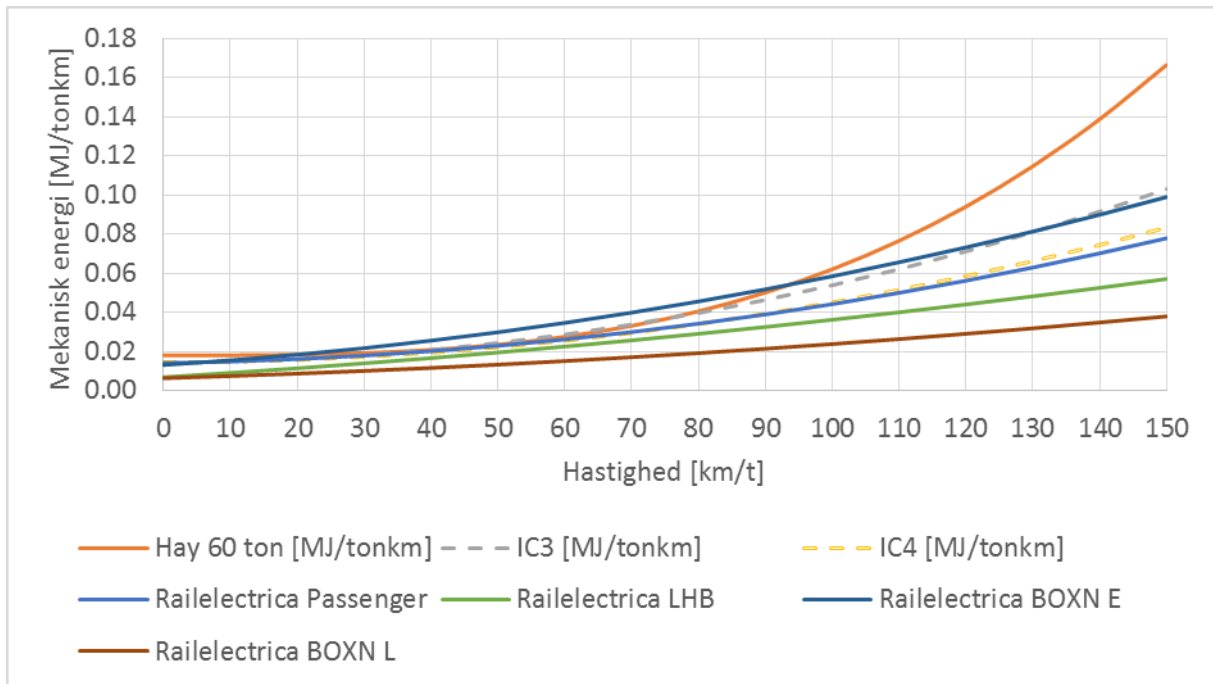
Eksempelvis $f_R = 0,002$ er typisk for tog. For biler er $f_R = 0,015$ normalt, altså 5-7 gange højere.

Faktoren C kan også omregnes til dimensionsløs luftmodstandskoefficient C_D ved hjælp af formlen:

$$C_D = \frac{C}{A_{front} \cdot 0,0463}$$

Eksempelvis $C_D = 1,0$ er almindeligt for et tog, mens $C_D = 0,3$ er typisk for en bil.

Sammenligning af modellerne fra Tabel 2 (ses i Figur 14) viser en rimeligt god overensstemmelse mellem modeltal for de danske IC3- og IC4-tog og modeltal for andre tog.

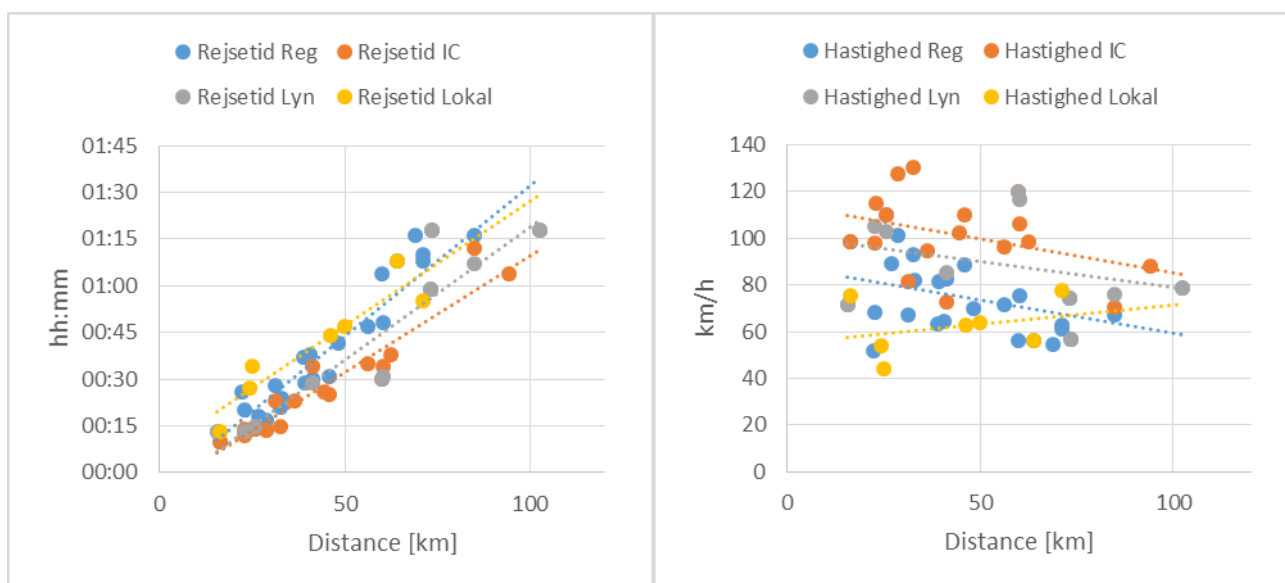


Figur 15: Sammenligning af matematiske modeller for toges mekaniske energiforbrug

Vægten af togsættene ligger fra 60 til 160 tons. Typisk antal sæder pr. ton er 1,2 til 1,7.

2.3. Gennemsnitlig toghastighed i Danmark

Det fremgår af Figur 14 at kørehastigheden er af væsentlig betydning for det mekaniske energiforbrug. For at finde realistiske kørehastigheder for danske jernbaner er der derfor foretaget opslag i DSB Rejseplanen i kombination med distancerne angivet i TEMA 2015 modellen på 42 danske togstrækninger. Strækningerne svarer til de 42 segmenter, som udgør hovedbanenettet i Danmark. Resultaterne er vist i Figur 16.



Figur 16: Rejsetider og gennemsnitshastigheder på de 42 danske banesegmenter

Det fremgår af Figur 16 at regional- og lokaltog kører langsommere end IC og IC-Lyn, hvilket kan forventes grundet flere stoppesteder. I beregningen af hastighed er udelukkende taget hensyn til rejsetiden og banesegmentets længde, og ikke til passagerantallet eller antallet af daglige afgange. Tallet afspejler altså ikke den gennemsnitlige passager-rejsetid.

Det fremgår også at farten på IC og IC-Lyn ruterne ikke adskiller sig væsentligt fra hinanden, og at IC endda nogle gange er hurtigere end IC-Lyn. Dette skyldes at nogle afgange klassificeres som IC-Lyn, selv om de reelt kører efter regional køreplanen. For eksempel har IC-Lyn mellem Thisted og Struer en usædvanligt lav gennemsnitshastighed på kun 57 km/t. AD-modellen skelner ikke umiddelbart mellem IC og IC-Lyn, hvilket kan begrundes med at hastighederne er ret ens.

Tager man hele turen fra Frederikshavn til København H, så opnår IC-Lyntoget en gennemsnitsfart på 86,8 km/t. Højeste gennemsnitsfart opnås af IC-toget mellem Odense og Nyborg på 128 km/t.

Det er paradoksalt, at hastigheden falder jo længere strækning der køres, og det antages at skyldes logistik, da flere tog som bekendt skal deles om skinnerne. Lokalbanen er en undtagelse, men den når dog aldrig over 80 km/t i gennemsnit.

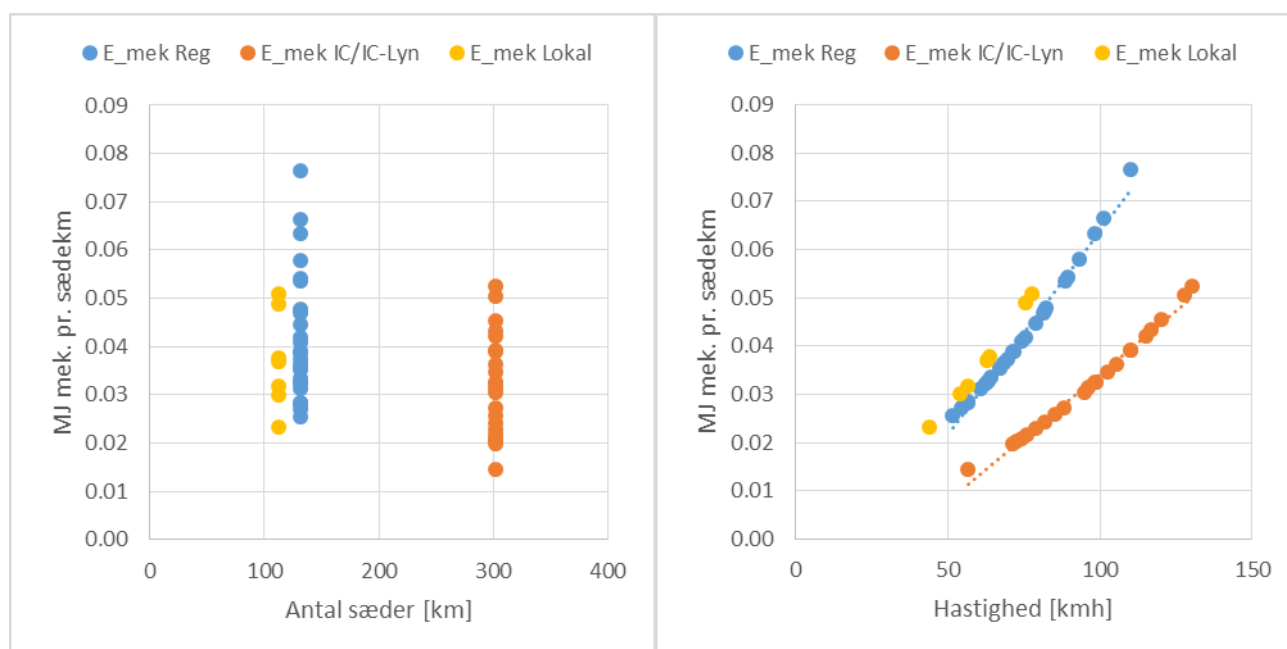
Det er hensigten ud fra Figur 16 at ansætte et niveau for gennemsnitshastigheden på de for AD-modellen relevante togtyper, som p.t. er Lokaltog og IC/Regionaltog. Det kunne være relevant at skelne mellem Regionaltog og IC/IC-Lyn, da hastigheden her er forskellig.

2.4. Køremodstand baseret på gennemsnitshastighed og togtype

Når man skal beregne den effektive køremodstand, er det ikke nok at medregne den gennemsnitlige hastighed, da køremodstandsformlen Ligning 6 ikke er lineær. Den effektive køremodstand bliver højere ved svingende hastigheder end ved konstant hastighed. Derfor beregnes den ækvivalente konstanthastighed i dette afsnit ud fra de beregnede gennemsnitshastigheder ved at gange med 1,4. Faktoren er valgt som et gennemsnit ud fra Tabel 4, som omtales senere.

Ud fra data for togsættenes mål, vægt og sædeantal kan der her efter beregnes et mekanisk energiforbrug pr. sædekilometer, som vist i Figur 17. Fælles for alle togsæt anvendes en A-værdi på 1,5 N/kN og en B-værdi på 0,0025 N/kN/kmh svarende til de kendte værdier for IC-3.

C værdien regnes som funktion af togets længde, jf. Tabel 2 og D sættes til nul. Da IC og IC-Lyn typisk køres med togsæt af samme type og længde, skelnes der ikke længere mellem IC og IC-Lyn.

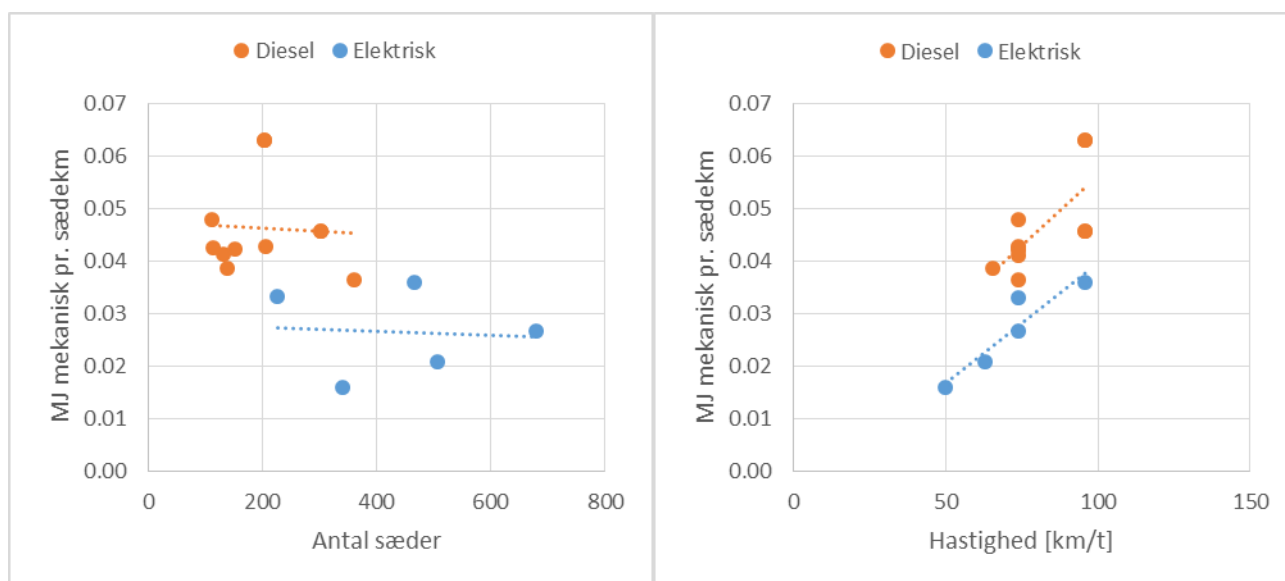


Figur 17: Mekanisk energi MJ pr. km pr banesegment beregnet ud fra gennemsnitshastighederne i Figur 16 samt data for de typiske indsatte togsæt

I Figur 17 indgår 42 forskellige strækninger og 6 forskellige togsæt (MR, MQ, IC3, ER, ET, Lint41), som iflg. TEMA 2015 er de typiske togsæt på strækningerne. Det ses at der er ekstremt stor spredning i det mekaniske energiforbrug pr. kilometer og pr. sædekilometer.

Det er derfor formålstjenligt at fastlægge en nærmere bestemt rute for hver togtype, hvilket er gjort i Figur 18. Her er der kun medtaget én gennemsnitshastighed for hver togtype, men til gengæld alle de togtyper, som findes i TEMA 2015.

Det ses bl.a. andet de elektriske tog har mange sæder, hvilket er hovedårsagen til at de har lavt mekanisk energiforbrug pr. sædekilometer.



Figur 18: Gennemsnitligt mekanisk energiforbrug pr togtype

Togtyperne i Figur 18 er MR, MQ, IC3 kort, IC3 lang, IC4, ME/5 vogne, ER kort, ER lang, ET, EA/9 vogne). Som lokaltog er valgt Lint41, som bruges af Arriva. Som S-tog er valgt Litra SA.

Hastighederne anvendt i Figur 18 er:

- SA 50 km/t (S-tog)
- ET 54 km/t (Øresundstog)
- Lint41, MR, MQ, IC3 kort, IC4, ME, ER, EA: 74 km/t (Regionaltog)
- IC3 lang, IC4, ER: 97 km/t (IC/IC-Lyn)

Som begrundet i Afsnit 2.3 skelnes der ikke længere mellem IC og IC-Lyn.

Dette afsnit giver kun et fingerpeg om det mekaniske energiforbrug og navnlig spredning heri. Det fremgår tydeligt af dette afsnit, at togtypen og rutens kørehastighed skal være kendt, før man kan beregne det mekaniske energiforbrug eksakt. Derfor vil der i det følgende blive defineret nogle mere specifikke togstrækninger som grundlag for hver togtype.

Det er også vigtigt at pointere, at der endnu ikke er taget højde for bremseenergi.

2.5. Bremseenergi baseret på vægt og bremselængde

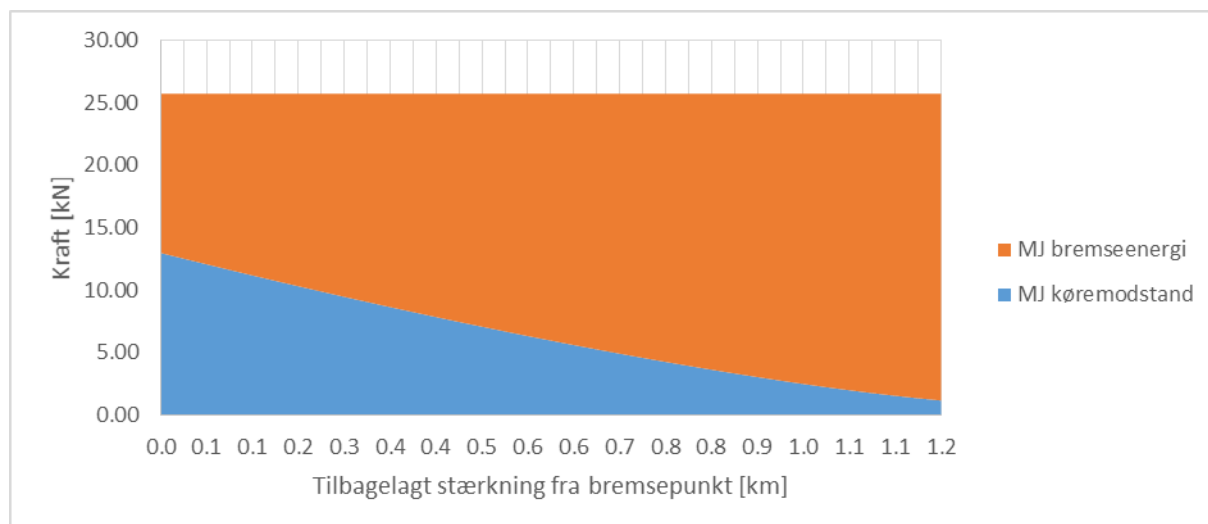
Som tidligere nævnt, skal man tage i betragtning at bremseenergien også henregnes under totalvirkningsgraden. Den teoretiske bremseenergi kan beregnes ved integration af bevægelsesligningen med udgangspunkt i den samlede kinetiske energi og køremodstanden angivet i Ligning 6. Dette resulterer i nedenstående udtryk.

Ligning 7

$$kJ_{bremseenergi} = \frac{m \cdot v^2}{2000 \cdot 3,6^2} - \frac{m \cdot g}{1000} \cdot \left(A \cdot s + \frac{2}{3} B \cdot v \cdot s + \frac{2}{5} D \cdot v^3 \cdot s \right) - \frac{1}{2} C \cdot v^2 \cdot s$$

Eksempel: 80 ton bremses fra 100 km/h på 1200 m med faktorerne ($A=1,5$, $B=0,0025$, $C=0,376$, $D=0$) resulterer i 27.037 kJ bremseenergi.

Integration af bevægelsesligningen ses illustreret i Figur 19, hvor Kraft x Vej = Energi, i enhederne $\text{kN} \times \text{km} = \text{MJ}$. En tilsvarende ligning kan anvendes under acceleration, når accelerationsraten $[\text{m/s}^2]$ forudsættes at være konstant. Unøjagtigheden ved denne metode er minimal.



Figur 19 Bremseenergi (det orange areal 23,5 MJ) udgør størstedelen af den totale bevægelsesenergi (det samlede areal 30,9 MJ). Det blå areal er køremodstanden 7,4 MJ.

For at vurdere bremseenergiens betydning må denne sættes i forhold til de øvrige tab på en relevant kørestrækning. Dette gøres i næste afsnit. Dette er samtidigt nødvendigt for at kunne vurdere den potentielle gevinst ved regenerativ bremsning.

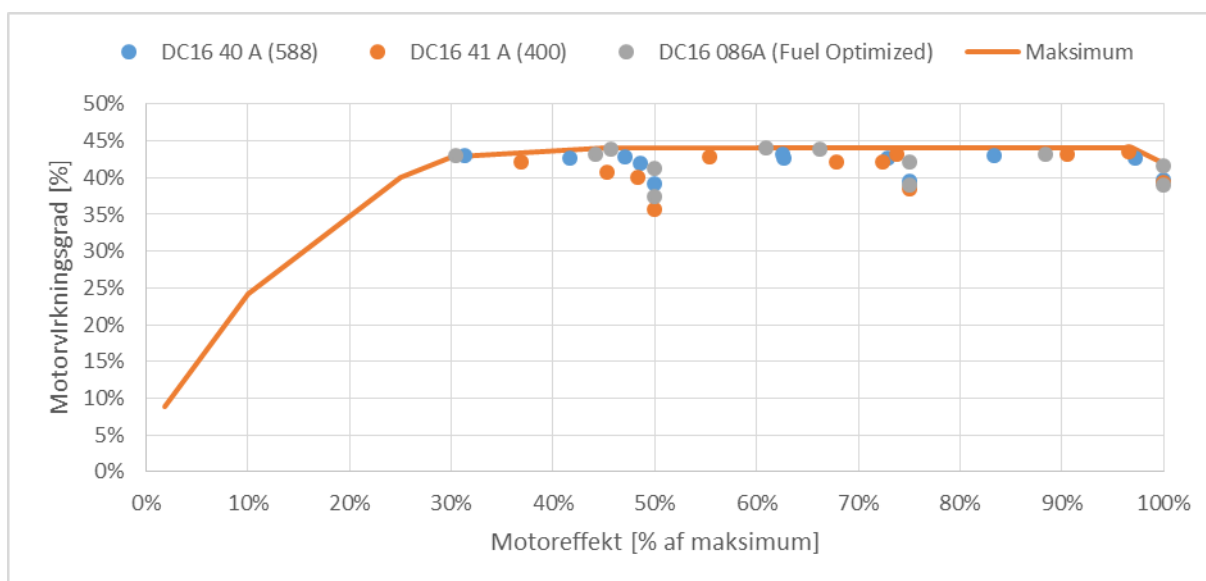
2.6. Opnåelige virkningsgrader / øvrige tab

Hvis totalforbruget an togsæt er kendt, kan man springe dette afsnit over og gå direkte til 2.10.

Når forbruget ikke er kendt er det nødvendigt at betragte følgende hovedfaktorer.

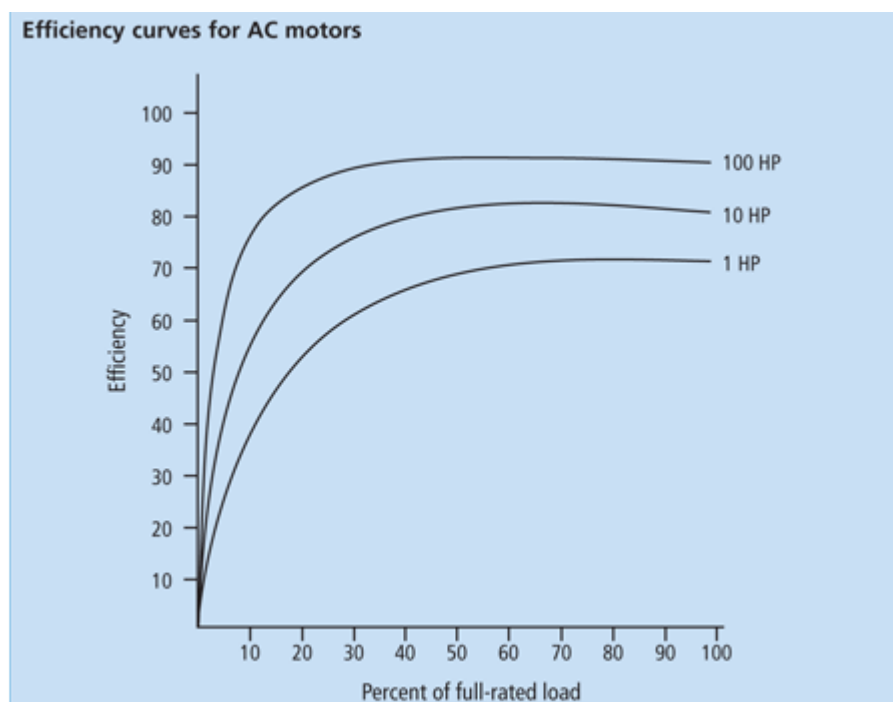
- Motorvirkningsgrad / termisk tab i motor
- Friktionstab i gearkasser
- Transmissionstab i køreledninger
- Energi til hjælpekraftanlæg
- Ikke-regenereret bremseenergi
- Stilstandstab

Dieselmotorer i størrelsen 400 kW, som typisk anvendes i persontog, kan under optimale forhold opnå en virkningsgrad på ca. 44 %, som det ses i Figur 20. Motorvirkningsgraden afhænger i nogen grad af belastningen på dieselmotorer, som helst skal arbejde over 25 % af den nominelle effekt. Dieseltogsæt er typisk udstyret med 12-16 trins automatgearkasser, som sikrer at omdrejningstallet holdes i det optimale område. Derfor kan en god virkningsgrad opretholdes i et bredt arbejdsområde, hvad angår hastighed og belastning.



Figur 20: Virkningsgrader for moderne dieselmotorer 400 - 588 kW (Data: Scania)

Elmotorer over 74k W kan opnå virkningsgrader over 90%, som vist i Figur 21. Elmotorerne i persontog er oftest på 400-1100 kW stykket. Prototyper har vist op til 97% virkningsgrad (<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tee.20530/pdf>).



Figur 21: Virkningsgraden for større AC motorer er over 90% (<https://www.isa.org>)

I motorvirkningsgraden er ikke medregnet friktionstab i gearkasser mv. Dette tab er begrænset for elektriske tog, da der typisk køres med fast udveksling. På dieseltogsæt med flere udvekslinger kan tabet udgøre 5-10%. Til gengæld anvender elektriske tog køreledninger, som typisk også taber omkring 5%.

Forbruget af hjælpekraft til aircondition, hydraulik mv. om bord på toget udgør typisk ekstra 15 kW. Nogle togsæt fx IC3 og IC4 udnytter en del af inertien ved nedbremsning og coasting til at dække dette behov, hvilket er fornuftigt. Dette er dog ikke muligt på fx MR togsættet.

Ud over de nævnte faktorer er der et betydeligt stilstandstab på dieselmotorer, fordi toget typisk står stille ca. 20% af tiden, hvilket omtales mere specifikt i Tabel 4 i det følgende afsnit.

Realiserede totalvirkningsgrader som landsgennemsnit findes i Afsnit 2.12. Beregnede virkningsgrader findes i Tabel 5 i 2.8 samt i Tabel 7 - Tabel 10 i Afsnit **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet..**

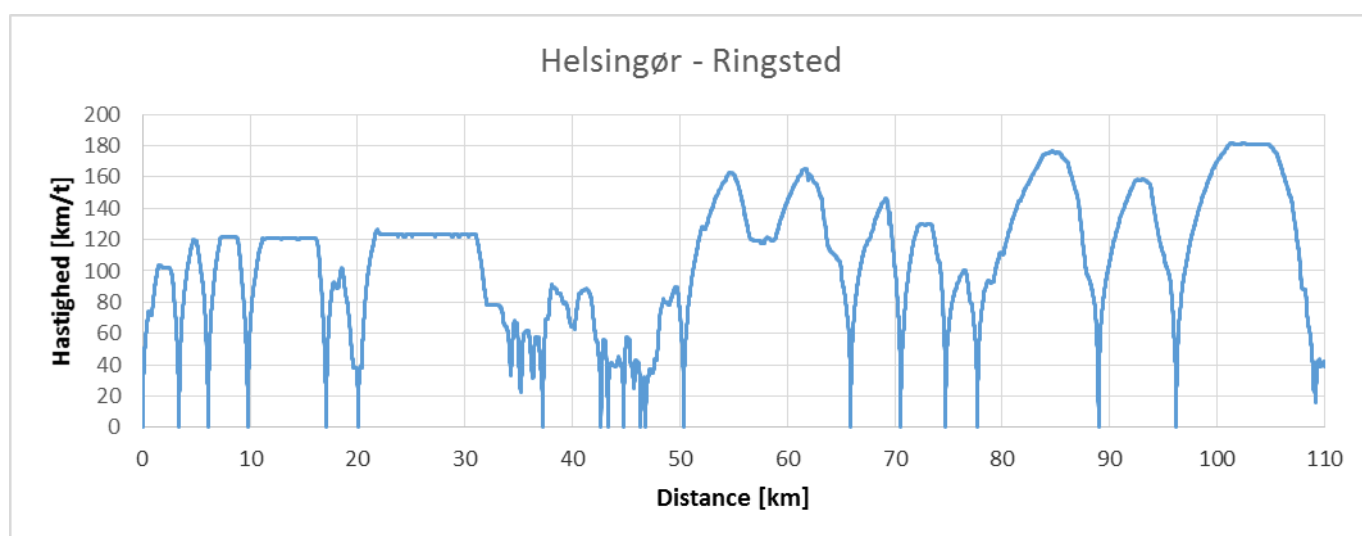
2.7. Togsimulering med kendt hastighedsprofil

Hvis man har adgang til en kendt hastighedsprofil, som fx en udskrift fra togets kørecomputer eller en GPS-log, kan togets energiforbrug estimeres ved hjælp af Backward Facing Step simulering. Teknikken bag dette er at man opdeler hastighedsloggen i tidsstep af eksempelvis 1 sekund, og for hver tidsstep beregner køremodstanden (Ligning 6) samt accelerationen. Her efter anvendes Newtons 2. lov til at bestemme traktionskraften, som kan være positiv (motoren arbejder) eller negativ (der bremses). Med passende kendskab til de opnåelige virkningsgrader / øvrige tab, kan man bestemme toget totale energiforbrug ganske nøjagtigt.

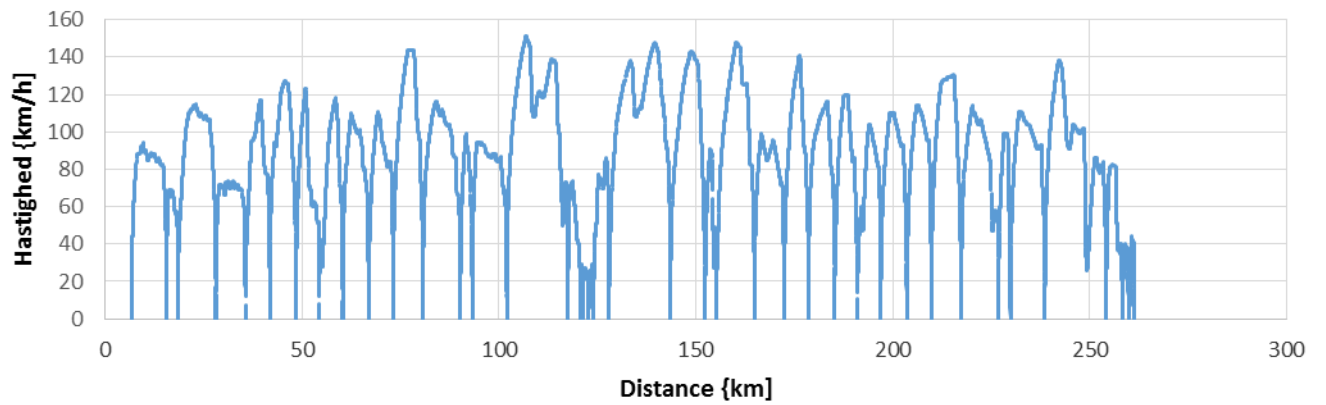
I projektet er der indhentet hastighedsprofiler for følgende regionaltogstrækninger:

- Roskilde-Gastrup med regionaltog type MR
- Helsingør – Ringsted med elektrisk lokomotiv type ER
- Høje Taastrup – Holbæk – Østerport – Holbæk - Østerport med diesellokomotiv type ME
- Høje Taastrup – Holbæk – København - Holbæk med diesellokomotiv type ME
- Nykøbing F - Østerport med diesellokomotiv type ME

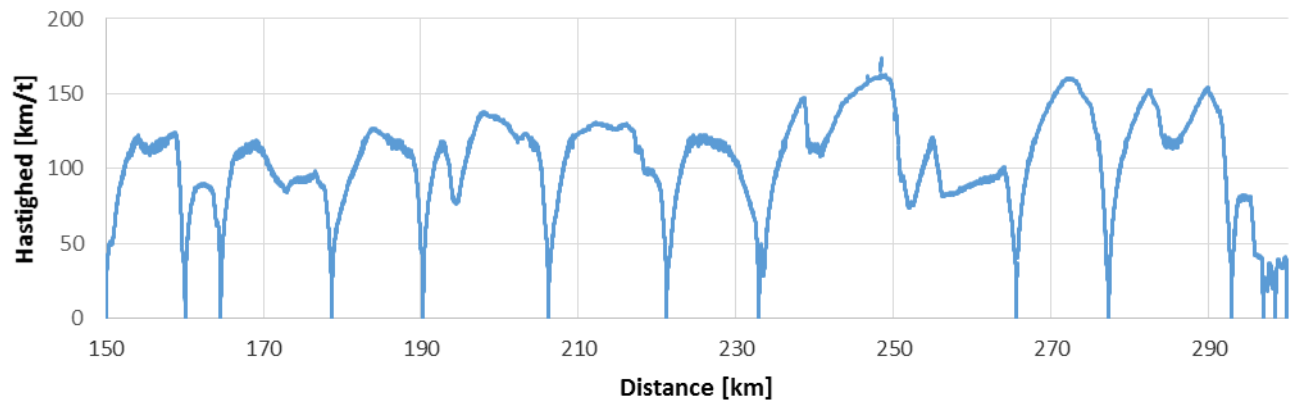
Hastighedsprofilerne er vist i Figur 22.



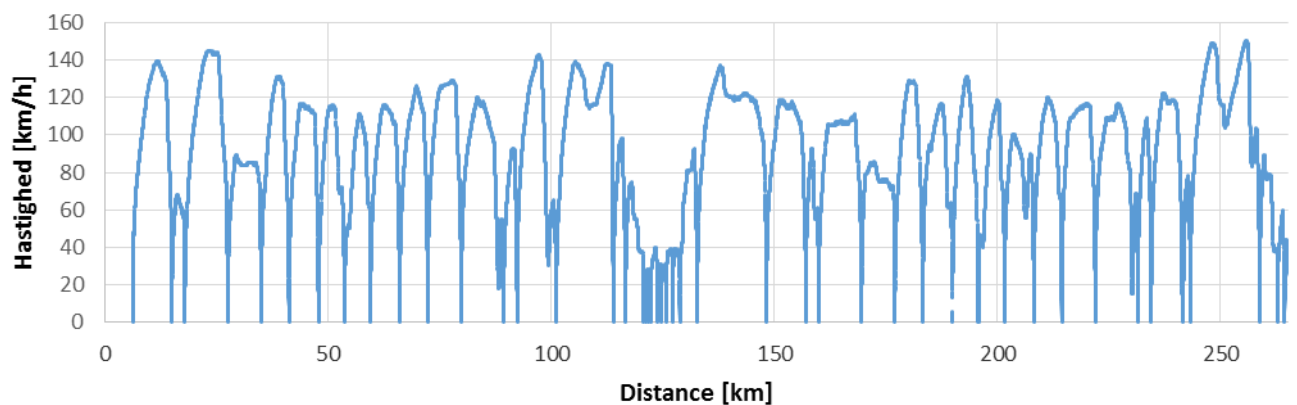
Høje Taastrup-Holbæk-København-Holbæk

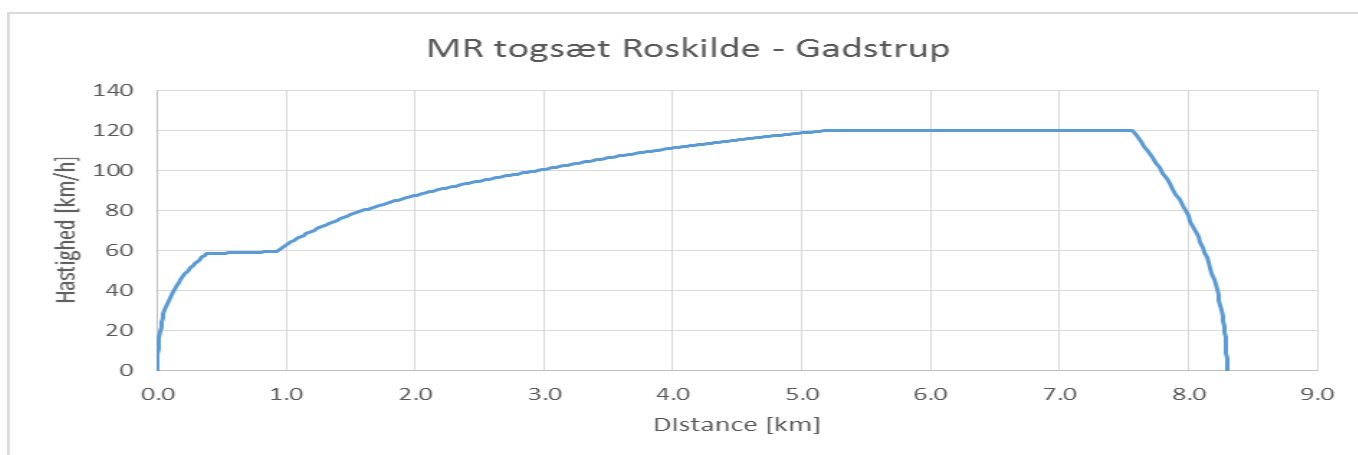


Nykøbing F - Østerport



Høje Taastrup-Holbæk-Østerport-Holbæk-Østerport





Figur 22 Viser hastighedsprofiler, som er anvendt til Backward Facing Step simulering.

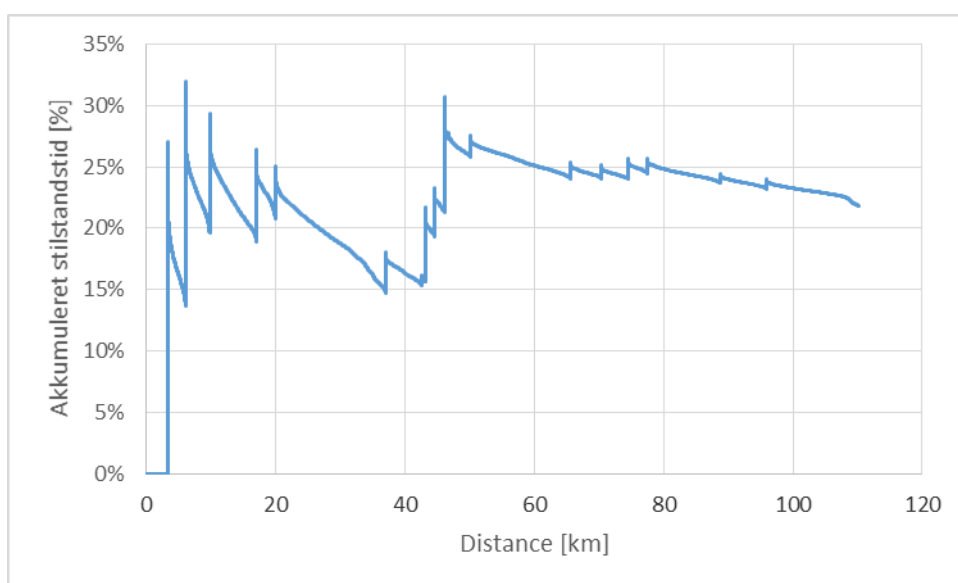
Ruterne kan her efter karakteriseres, for eksempel som vist i Tabel 3.

Tabel 3: Ruten Roskilde-Gadstrup

Samlet distance	8,4 km
Accelerationsrate	0.44 m/s ²
Tophastighed	120 km/h
Coast distance	0.0 km
Bremselængde	746 m

Det ses at ruten Roskilde-Gadstrup i dette tilfælde køres uden coasting, lokoføreren går direkte på bremsen fra tophastighed 746 meter fra stoppestedet, hvilket som tidligere nævnt er uøkonomisk.

Med henblik på at beregne energiforbrug kan det også være nyttigt at kende til antallet af stop samt deres varighed.



Figur 23 Ruten Helsingør – Ringsted har 18 stop af gennemsnitligt 73 sekunders varighed

Ikke mindst er det vigtigt at finde den ækvivalente konstanthastighed, som gør det muligt at beregne køremodstanden for et givet togsæt direkte ud fra Ligning 6.

De væsentligste ruteparametre ses i tabellen nedenfor:

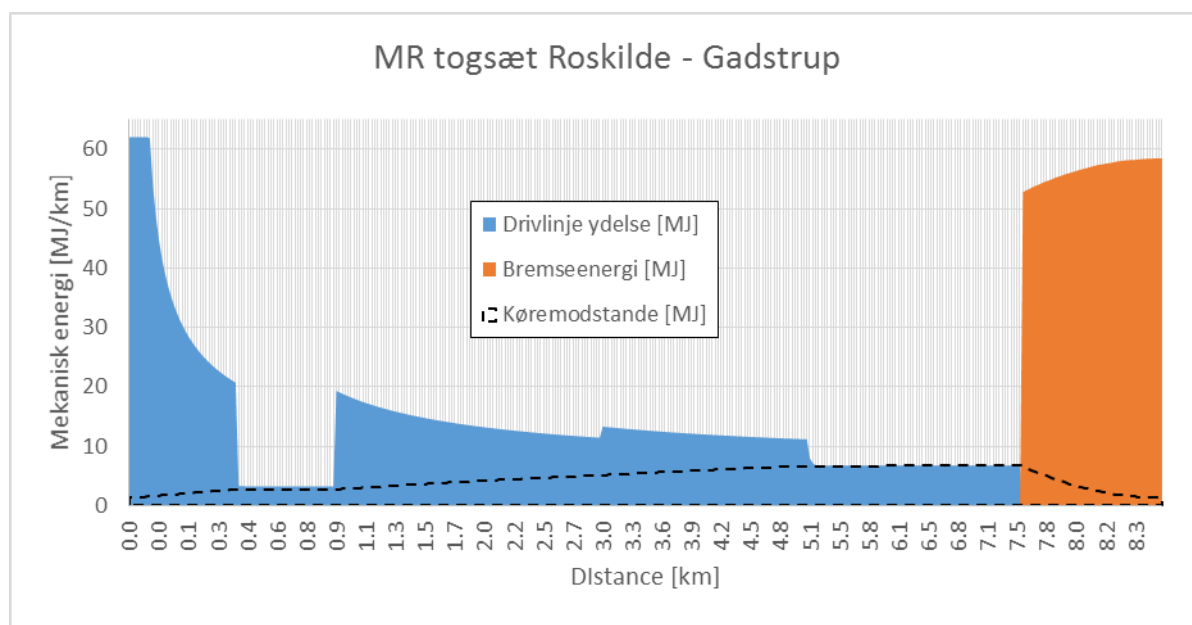
Tabel 4: Væsentlige ruteparametre uddraget fra hastighedsprofilerne

	Distance [km]	Topfart [km/h]	Gennemsnit mellem stop [km/h]	Gennemsnit inkl. stop [km/h]	Ækvivalent hastighed [km/h]	Stoptid i procent	Dist. Mellem stop [km]	Gns. Stop [s]	Antal stop
Helsingør-Ringsted	110.2	182	87.9	65.1	91.4	22%	6.1	74	18
Nykøbing F-Østerport	149.9	174	92.1	74.8	94.3	14%	8.3	48	18
Taastrup-Holbæk	254.4	151	79.2	49.5	94.8	28%	19.6	123	13
Holbæk-Østerport	259.5	150	80.1	51.5	97.4	29%	17.3	108	15
Roskilde-Gadstrup (MR)	8.4	120	86.9	74.1	99.2	15%	8.4	60	1

2.8. Resultater af togsimulering

Drivlinjevirkningsgraderne i de følgende simuleringer er sat til 80% for el og 30% for diesel.

En konkret simulering af Roskilde-Gadstrup ruten er vist i Figur 24. Resultatet er at køremodstanden er 4,97 MJ pr. kilometer. Bremsenergien udgør yderligere 5,08 MJ pr. kilometer. Bremsenergien udgør altså halvdelen af det samlede arbejde, som drivlinjen skal levere på strækningen. Figuren tager ikke højde for hjælpekræftsystemer, da dette vil være indeholdt i drivlinjevirkningsgraden. Denne vil således være påvirket om hvorvidt bremsenergi kan anvendes til at drive hjælpekræftanlæg. Dette sker dog ikke på togtypen MR.



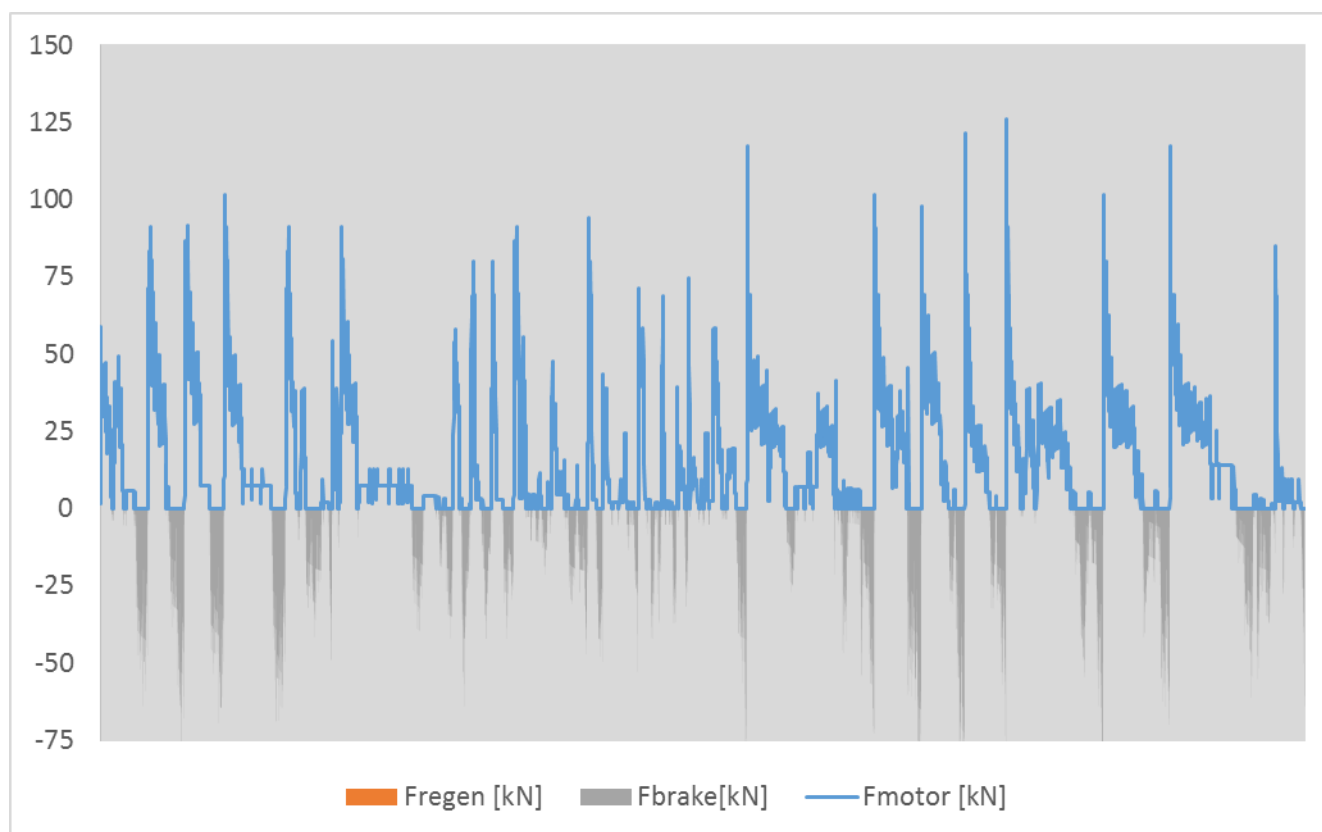
Figur 24: Kurvens højde angiver kraft i kN (hvilket også svarer til MJ/km). Arealet under kurven angiver samlet mekanisk energi i MJ.

Som nævnt kan totalforbruget findes ved brug af yderligere data for togsættet. Her under er anvendt IC3 data (151 sæder), med undtagelse af Gadstrup ruten, som her er baseret på MR.

Tabel 5: Aktuelle ruter simuleret med Backward Facing Step

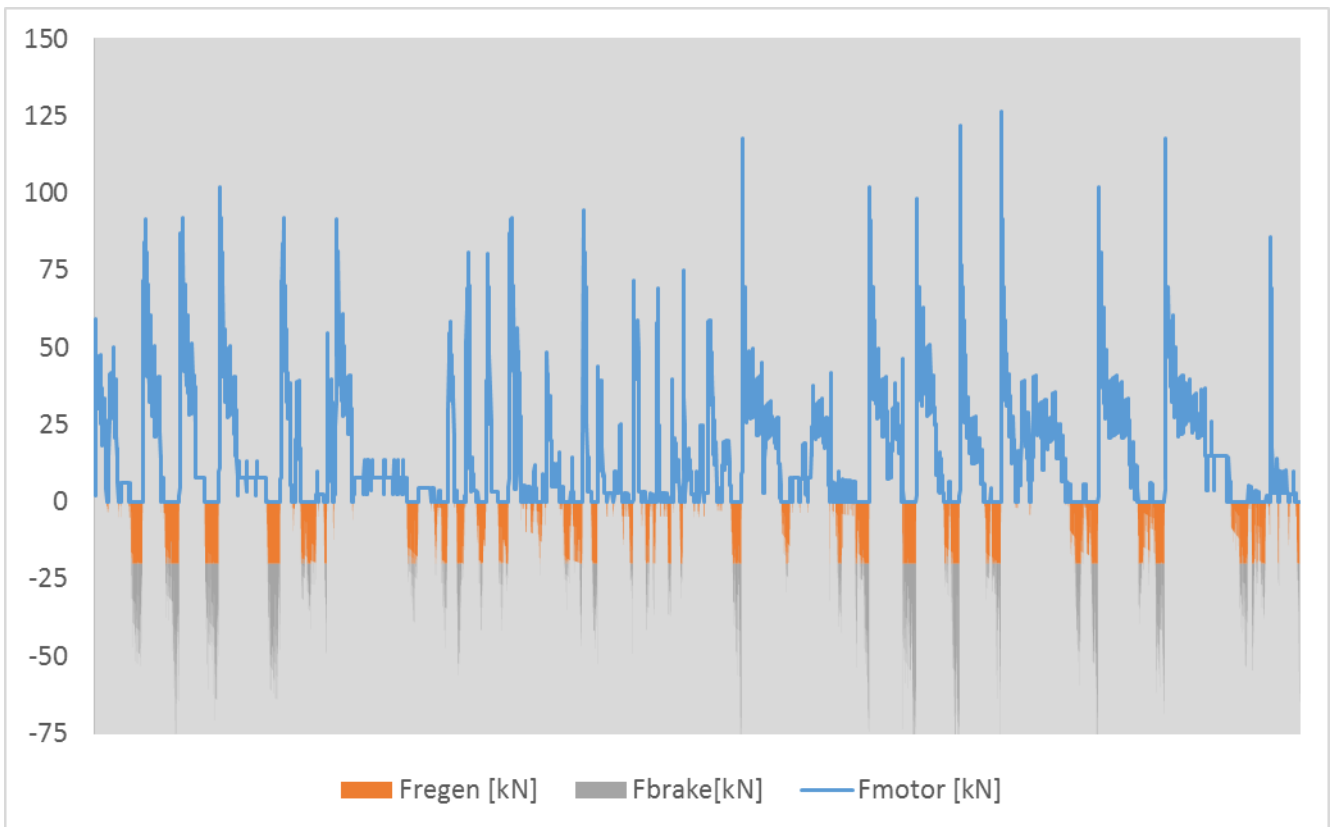
	Køremodstand MJ/km	Bremsetab MJ/km	Diesel MJ/km	Totalvirkningsgrad	Diesel MJ/sædekm
Helsingør-Ringsted	6.72	8.2	50.4	13.3%	0.33
Nykøbing F-Østerport	6.32	4.9	45.1	13.7%	0.30
Taastrup-Holbæk	5.05	5.9	35.6	14.1%	0.24
Holbæk-Østerport	5.25	6.5	37.8	13.8%	0.25
Roskilde-Gadstrup (MR)	5.05	5.0	32.9	15.3%	0.25

Med simuleringen er det også muligt at udskifte et dieseltog med et elektrisk drevet. Dette er vist i Figur 25 og Figur 26.

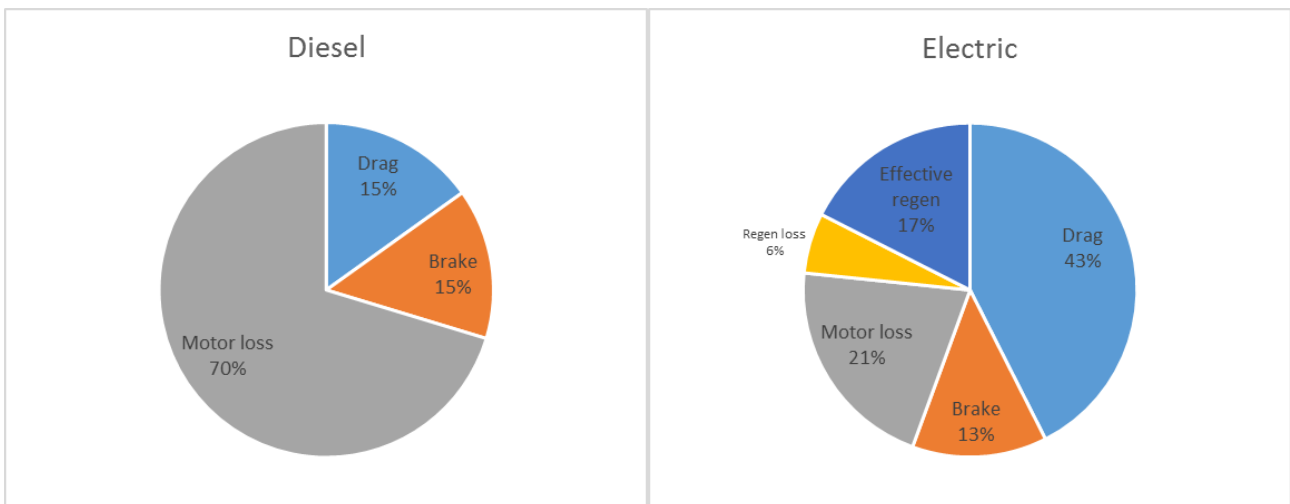


Figur 25 Simulering af dieseltogsæt på Helsingør - Ringsted

Ved elektrisk drift opnås der regenerering af bremseenergi, 17 % af den tilførte energi ifølge denne simulering.



Figur 26 Simulering af elektrisk togsæt på Helsingør - Ringsted



Figur 27 Elektrisk togsæt opnår i 52 % virkningsgrad i dette regneeksempel, fordi en del af energien (17%) føres tilbage på nettet. Dieseltogset opnår ca. 15% virkningsgrad.

2.9. Generalisering af hastighedsprofil (regnearksmodel)

For at sammenligne forskellige togsæts performance uden at skulle gennemføre en komplet Backward Facing Step simulation, kan det være nyttigt at anvende et generaliseret hastighedsprofil.

I projektet er derfor udviklet en regnearksmodel, som beregner både det mekaniske og det samlede forbrug an tog ud fra kun 5 ruteparametre. I modellen kan togets masse samt faktorerne A, B, C og D angives frit.

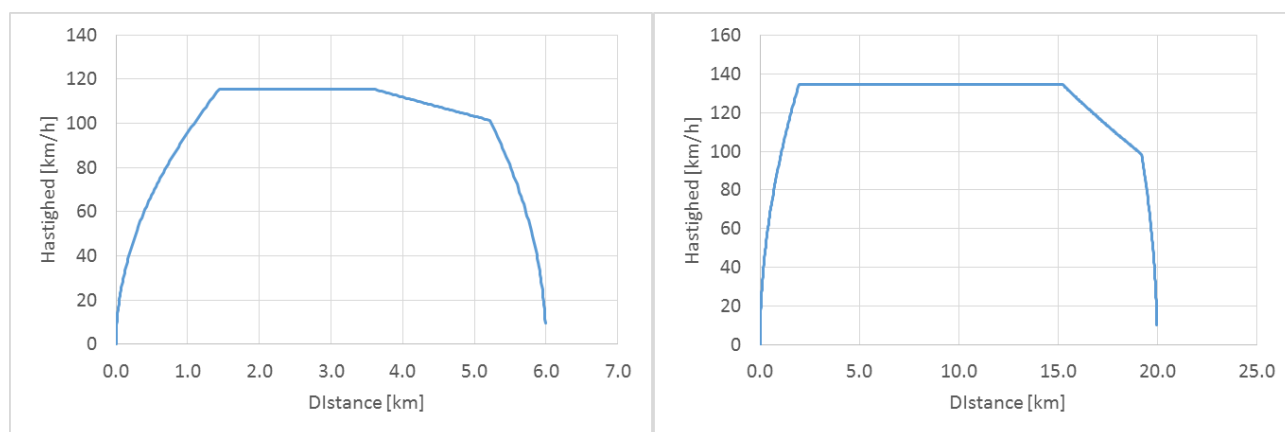
Formelgrundlaget for modellen findes i en særskilt Excel-fil. Grundlæggende anvendes Ligning 7 under acceleration og bremsning, mens Ligning 6 anvendes ved coasting og cruising. Dette sparer regnetid og giver kun en minimal afvigelse i forhold til en fuldstændig Backward Facing Step simulation.

Det er kontrolleret, at regnearksmodellen stemmer overens med Backward Facing Step simulationen. Regnearksmodellen er imidlertid væsentligt enklere at benytte.

For at beregne totalforbrug i regnearksmodellen, skal man blot anvende de samme drivlinjevirkningsgrader som blev anvendt i simulationen.

Til brug i regnearksmodellen er der defineret to generiske togstrækninger, til henholdsvis lokaltog og IC/Reg. tog. Profilerne svarer nogenlunde til de gennemsnitshastigheder, som der køres med på danske jernbaner.

De generiske togstrækning er sammensat af 4 faser, acceleration, cruising, coasting og nedbremsning, som det ses i Figur 28.



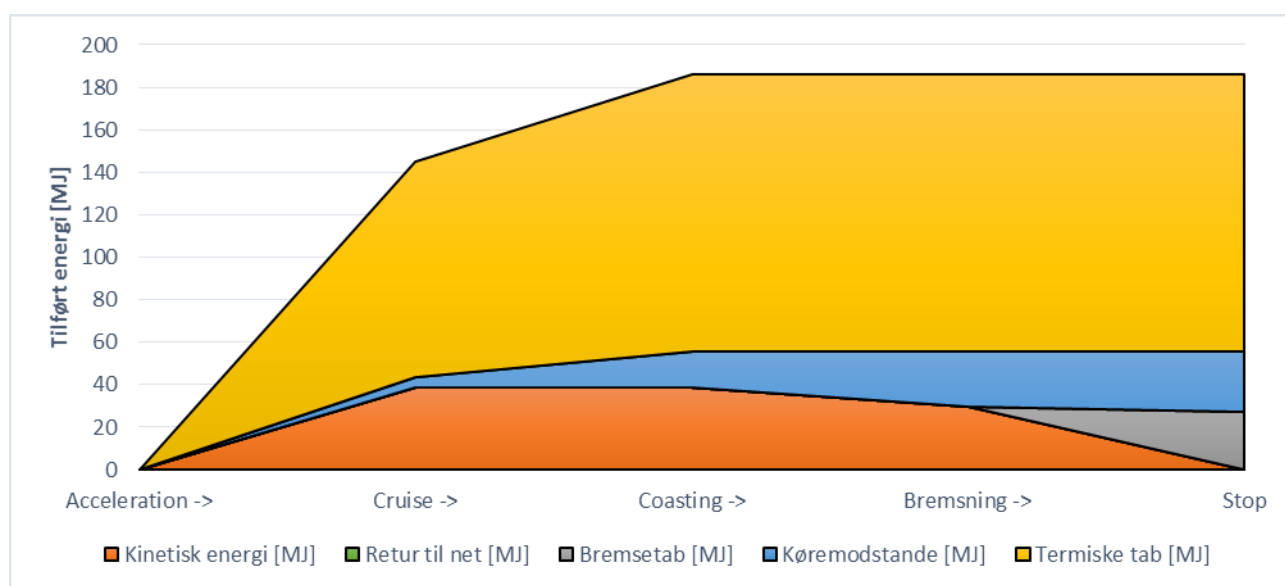
Figur 28: Generisk hastighedsprofil for lokaltog (t.v.) og IC/Reg. tog (t.h.)

Parametrene for de to hastighedsprofiler ses i

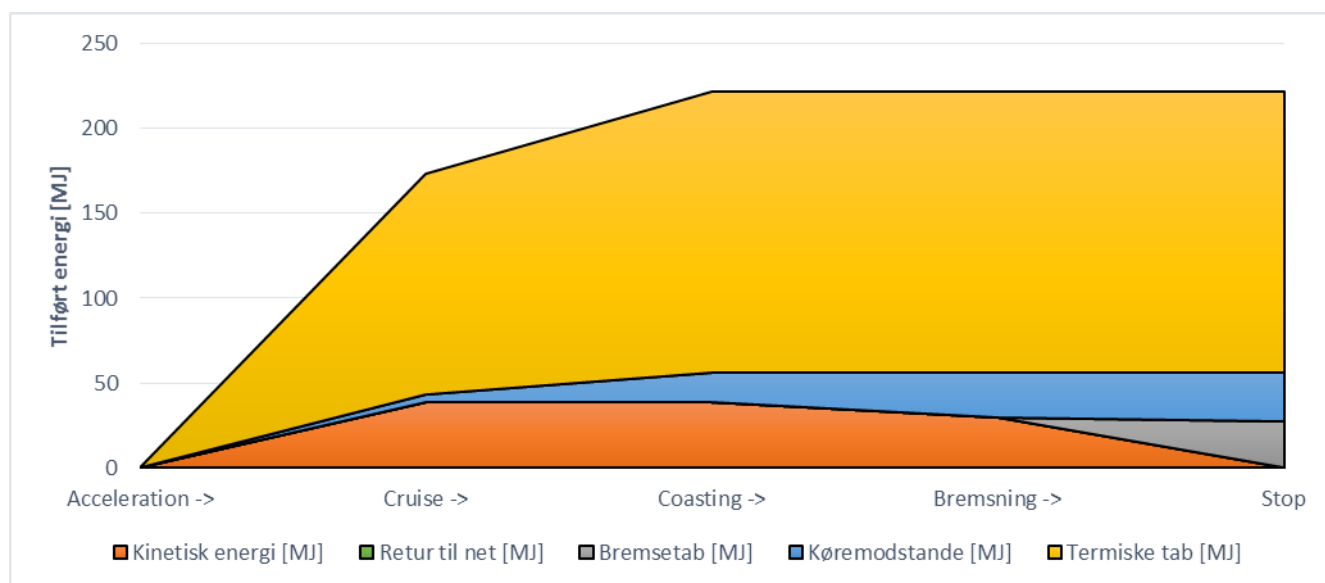
Tabel 6: Input til regnearksmodellen

Distance	6 km	Distance	20 km
Acc rate	0.36 m/s ²	Acc rate	0.36 m/s ²
Cruise speed	115 km/h	Cruise speed	135 km/h
Coast distance	1.6 km	Coast distance	4 km
Decel distance	800 m	Decel distance	800 m
Motor eff.	30%	Motor eff.	30%
Regen eff.	0%	Regen eff.	0%
Stop time	1 min	Stop time	1.5 min

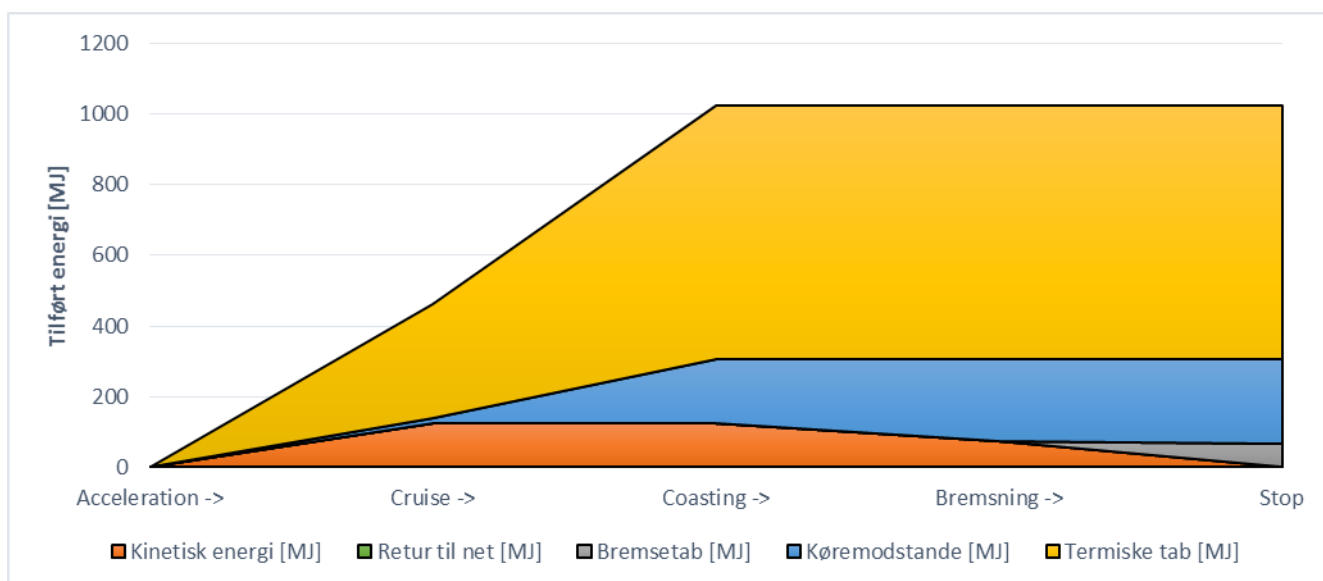
Resultatet af regnearksmodellen fremgår af følgende figurer og tabeller.



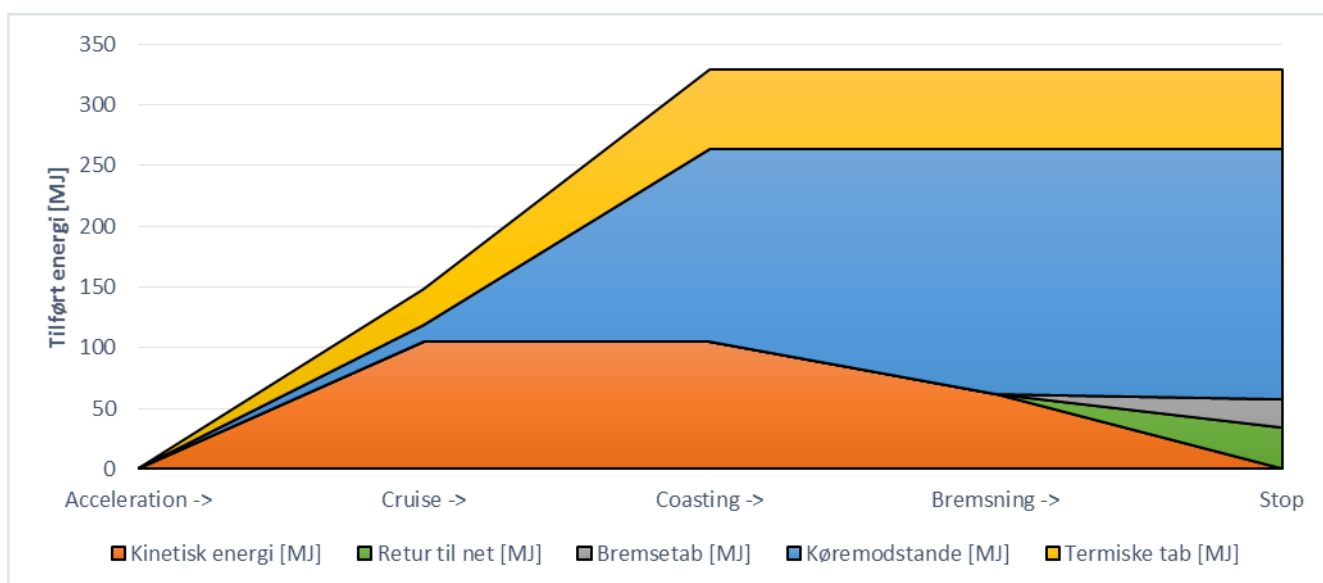
Figur 29: Regnearksmodel for diesel lokaltog.



Figur 30: Regnearksmodel for gas-lokaltog



Figur 31: Regnearksmode for diesel IC/Reg. tog



Figur 32: Regnearksmode for elektrisk IC/Reg. tog

Den totale virkningsgrad i Figur 29 og Figur 32 er henholdsvis 16,4 % for dieseltog og 58 % for eltog.

På tilsvarende vis er beregnet for gas-lokaltog (med et tillæg på 19%) samt diesel-IC tog.

Delresultater fra regnearksmodeellen ses i de følgende tabeller.

Tabel 7 Regnearksmodel for diesel lokaltog

Masse				MJ/km	MJ/sædekm	Procent
A	76 ton					
A	1.5 N/kN		Køremodstand	4.7	0.041	
B	0.0025 N/kN/kmh		Bremseenergi	4.6	0.040	
C	0.323 N/kmh ²		Drivlinje ydelse	9.3	0.082	
D	0 N/kN/kmh ³		Retur til net	0.0	0.000	0.0%
Sæder	114		Forbrug	31.0	0.272	
Avg. Speed	80.7 km/h		Virkningsgrad			15.2%
Eff. Speed	65.9 km/h		Stop time			18.3%

Ækv. Speed **102.75686**

Tabel 8 Regnearksmodel for gas-lokaltog

Masse				MJ/km	MJ/sædekm	Procent
A	76 ton					
A	1.5 N/kN		Køremodstand	4.7	0.041	
B	0.0025 N/kN/kmh		Bremseenergi	4.6	0.040	
C	0.323 N/kmh ²		Drivlinje ydelse	9.3	0.082	
D	0 N/kN/kmh ³		Retur til net	0.0	0.000	0.0%
Sæder	114		Forbrug	36.9	0.324	
Avg. Speed	80.7 km/h		Virkningsgrad			12.8%
Eff. Speed	65.9 km/h		Stop time			18.3%

Ækv. Speed **102.75686**

Tabel 9 Regnearksmodel for diesel IC/Reg. tog

Masse				MJ/km	MJ/sædekm	Procent
A	175 ton					
A	1.5 N/kN		Køremodstand	12.0	0.058	
B	0.0025 N/kN/kmh		Bremseenergi	3.4	0.016	
C	0.525 N/kmh ²		Drivlinje ydelse	15.3	0.075	
D	0 N/kN/kmh ³		Retur til net	0.0	0.000	0.0%
Sæder	205		Forbrug	51.1	0.249	
Avg. Speed	113.6 km/h		Virkningsgrad			23.4%
Eff. Speed	99.5 km/h		Stop time			12.4%

Ækv. Speed **129.63629**

Tabel 10 Regnearksmodel for elektrisk IC/Reg. tog

Masse				MJ/km	MJ/sædekm	Procent
A	150 ton					
A	1.5 N/kN		Køremodstand	10.3	0.045	
B	0.0025 N/kN/kmh		Bremseenergi	1.2	0.005	
C	0.452 N/kmh ²		Drivlinje ydelse	11.4	0.050	
D	0 N/kN/kmh ³		Retur til net	1.7	0.008	10.5%
Sæder	227		Forbrug	14.7	0.065	
Avg. Speed	113.5 km/h		Virkningsgrad			69.8%
Eff. Speed	99.4 km/h		Stop time			12.4%

Ækv. Speed **129.63629**

Regnearksmodellen beregner også distance og hastighed i hver af de 4 faser, men dette er ikke umiddelbart vigtigt for resultatet.

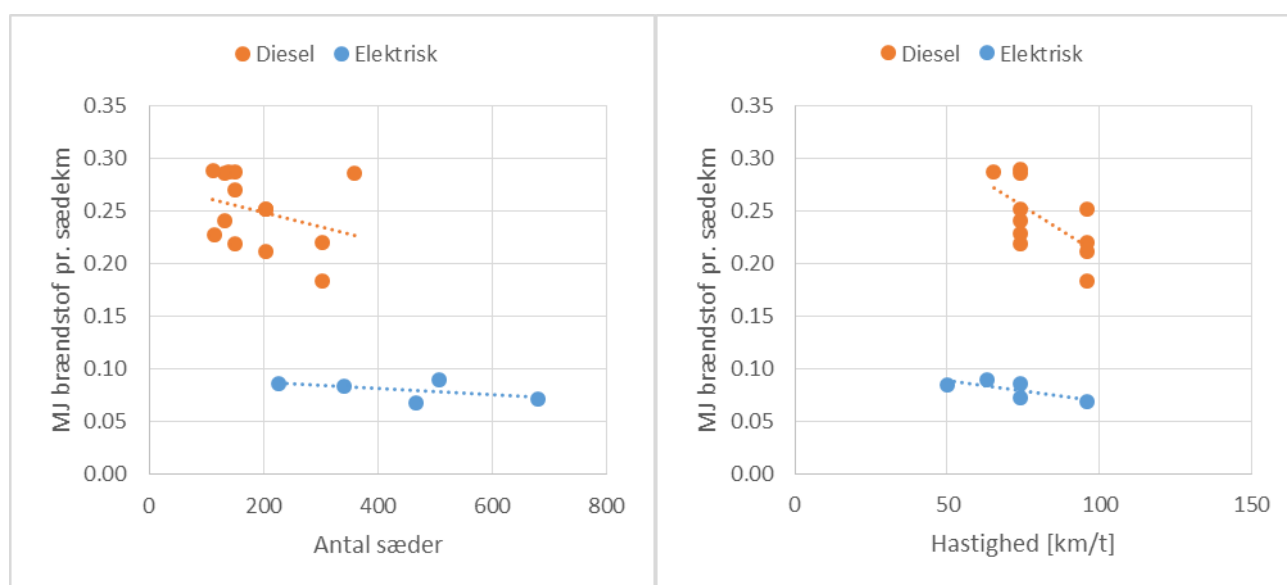
2.10. Realforbrug iflg. DSB og TEMA 2015

Energiforbruget for DSB som landsgennemsnit fremgår af DSB Miljørapport 2014. Tallene er baseret på faktiske målinger af diesel- og elforbrug. I DSB tallene indgår de aktuelle belægningsprocenter, samt stilstandstabene også.

TEMA 2015 modellen oplyser ligeledes energiforbrug under danske forhold, men uden belægningsprocenter, så enheden er pladskilometer eller sædekilometer.

For elektriske tog er der inkluderet 5 % tab i køreledninger.

Samlet overblik over TEMA2015 og DSB oplysninger ses i Figur 33.



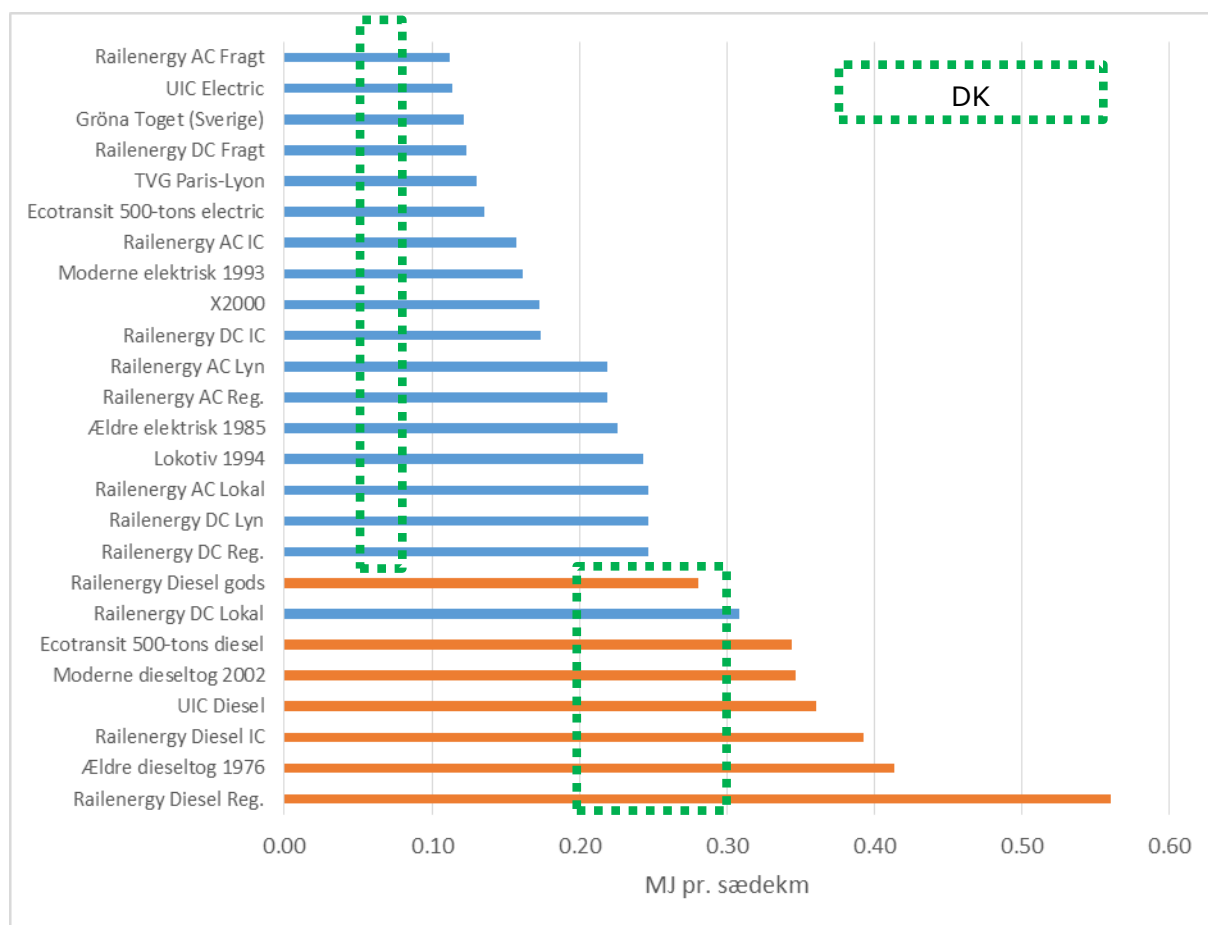
Figur 33: Totalt energiforbrug an tog pr. sædekilometer jf. DSB og TEMA 2015 (landsgennemsnit)

Det fremgår at dieseltogsættene bruger mellem 0,2 og 0,3 MJ brændstof pr. sædekilometer, men de elektriske tog kun bruger 0,07 - 0,09 MJ el pr. sædekilometer. Forskellen skal til dels findes i at de elektriske togsæt som anvendes i TEMA 2015 modellen har flere pladser end de typiske dieseltogsæt i samme model.

Togtyperne i Figur 33 er de samme som i Figur 18.

2.11. International sammenligning af realforbrug

Det er vanskeligt at sammenligne internationale kilder direkte, da forudsætningerne for angivelse af togenes energiforbrug varierer meget. Dels er togenes størrelse og hastighed meget forskellig, dels er der forskel på om tallene angives som mekanisk energi, tilført energi eller CO₂, samt om forbruget er angivet pr. ton, pr. sæde eller pr. passager. For at kunne sammenligne tallene har det været nødvendigt at lave nogle grove forudsætninger om antal sæder pr. ton samt CO₂ pr. kWh. På trods af den store usikkerhed, som derfor må tillægges disse tal, er de vist samlet i Figur 34.

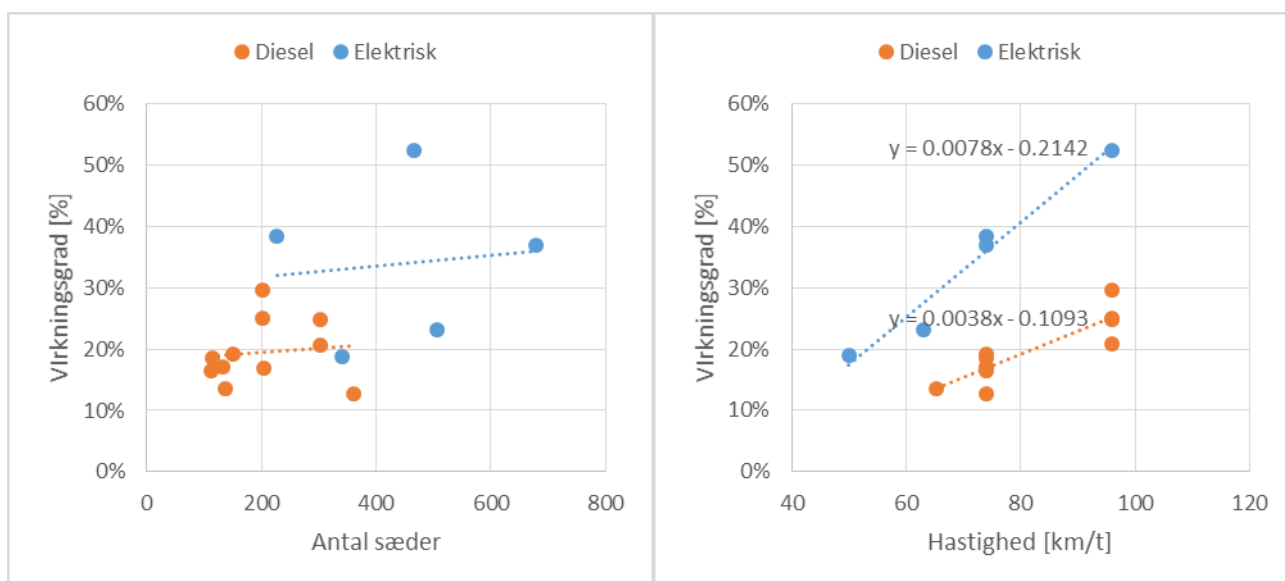


Figur 34 Samling af udenlandske toges energiforbrug ifølge forskellige kilder.

Det kan konkluderes at de danske tog, både for diesel- og elektriske tog, ligger i den pæne ende hvad angår energiforbrug pr. sædekilometer.

2.12. Realiserede virkningsgrader (landsgennemsnit)

Det er vanskeligt at beregne virkningsgrader på baggrund af landsgennemsnittene i Afsnit 2.10, da det enkelte togs nøjagtige konfiguration og hastighedsprofil ikke er kendt. Virkningsgraderne må derfor beregnes som gennemsnit ud fra tallene i Figur 17 og Figur 33. I praksis opnår et dieseltogsæt, inklusive diverse tab og hjælpekraft, ca. 30 % i de bedste tilfælde. Hertil kræves at toget kører med en gennemsnitsfart af knapt 100 km/t, som vist i Figur 35.

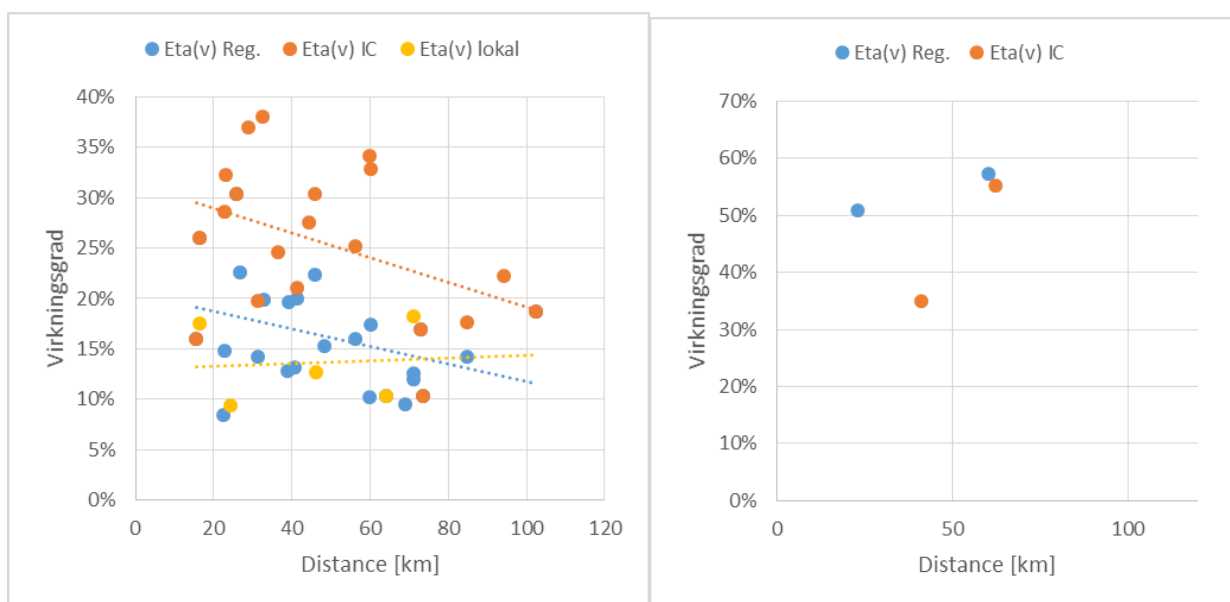


Figur 35: Realiserede virkningsgrader for togsæt under danske forhold

De eldrevne tog opnår virkningsgrader på op til ca. 50%. Igen er det en klar forudsætning, at rejsehastigheden skal være omkring de 100 km/t.

Ud fra de samme forudsætninger som blev anvendt i Figur 17 kan der beregnes en forventelig virkningsgrad på hvert enkelt banesegment alene baseret på gennemsnitshastigheden ved hjælp af regressionsformlen i Figur 35. Men dette er selvsagt noget usikkert.

Resultatet ses i Figur 36.



Figur 36: Forventede virkningsgrader baseret på gennemsnitshastighed for danske tog på danske togstrækninger, diesel t.v., el t.h.

2.13. Forventet udvikling

Danske togsæt som IC3/IC4 og det elektriske ER/ET er relativt energioekonomiske når man sammenligner internationalt. Det skyldes blandt andet en fornuftig aerodynamik og en lav egenvægt pr. sæde.

Grundet de relativt korte banesegmenter og mange stop undervejs har bremseenergien stor indflydelse på togdriften i Danmark. For dieseltog kan bremseenergien fx udgøre halvdelen af det samlede mekaniske arbejde på en 6 km strækning. Det er derfor helt afgørende for at optimere virkningsgraden på især regionaltog at indføre regenerativ bremsning, som det kendes fra de elektriske tog på fx Øresundsbanen. Teknologien kendes fra dieselbusser, men er desværre ikke udbredt på dieseltogsæt. Regenerering udnyttes kun passivt til at drive hjælpekræftssystemer.

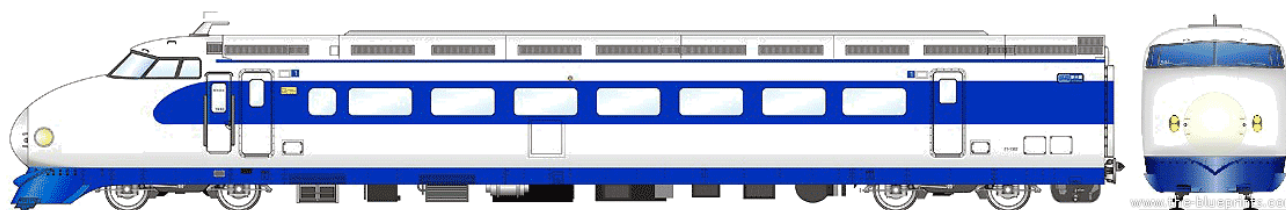
Virkningsgraden stiger generelt med hastigheden, da stilstandstab og hjælpekræfter mv. får mindre betydning, og der er længere mellem stationerne. Derfor kan det være hensigtsmæssigt at øge gennemsnitshastigheden. Det franske TGV tog fra Paris til Lyon (250 km/t) har for eksempel en beregnet totalvirkningsgrad på 80 %.

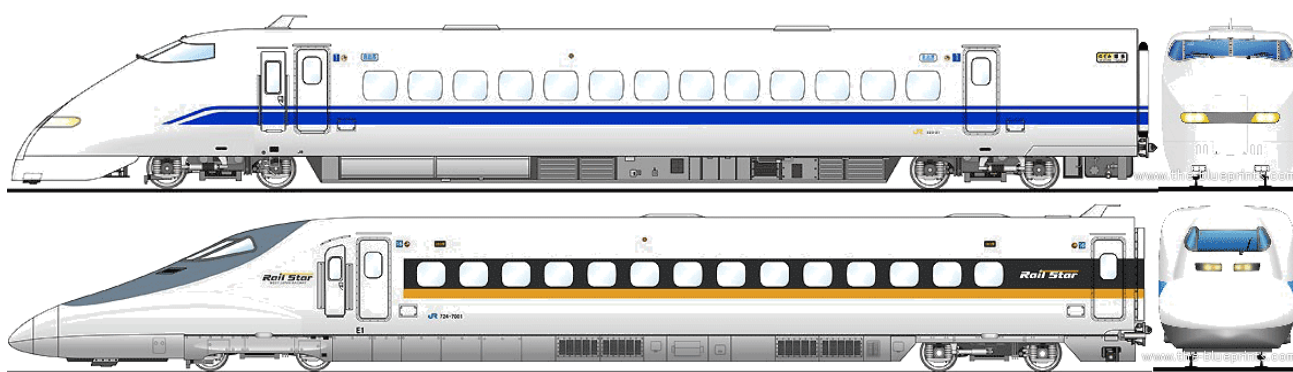
Det energitekniske potentiale for elektriske tog er meget stort, da der kan opnås både høj rejsehastighed og lavt energiforbrug. Nogle af verdens hurtigste og mest effektive tog som fx japanske Shinkansen (Figur 37), franske TGV og tyske ICE er elektriske.

Der er stadig et marked for dieseltogsæt, men udviklingen synes stagnerende. Der er fx ikke opnået nogen energimæssig gevinst med skiftet fra IC3 til IC4. Dieselmotoren kan optimeres til ca. 55 % virkningsgrad. Gasmotoren vil ligge ca. 9% under, men på sigt nærme sig dieselmotoren (jf. afsnittet om biler, busser og lastbiler i AD-modellen). Grundet megen stilstandstab og forbrug til hjælpekræftssystemer er motorenes virkningsgrad noget lavere på tog.

Gasmotoriserede tog er i øvrigt meget sjældne.

Ved at indføre teknologi som fx magnetiske hjælpeskiner (MAGLEV) kan rullemodstanden og lejevirkningen reduceres betragteligt. Der er dog ikke udsigt til at MAGLEV skinner bliver udlagt i Danmark.





Figur 37: Japanske supertog (Shinkansen)

2.14. Konklusion

AD-modellen indeholder 4 forskellige togtyper. Ud fra analysen i Afsnit 2.2-2.13 anbefales følgende værdier til AD-modellen.

Diesel Lokaltog: Baseret på en gennemsnitshastighed på 62 km/h er den bedste opnåelige virkningsgrad for dieseltogsæt ca. 11 %. Den nuværende State of the art er togsæt med et mekanisk energiforbrug på ca. 0,03 MJ pr. sædekilometer ved 62 km/h. Samlet dieselforbrug blive da 0,27 MJ pr. sædekilometer.



Figur 38: Arriva Lint 41 - et moderne letvægt diesel lokaltog

Gas Lokaltog: Tog med gasmotorer findes ikke i den nuværende drift, men der kan ud fra tilsvarende erfaringer i bus- og lastbilmotorer sættes et forventeligt merforbrug af energi pr. personkilometer på 19 %. Altså vil et gas-lokaltog bruge ca. 0,33 MJ pr. sædekilometer.

Diesel IC-reg.tog: IC- og regionaltog kører ca. 85 km/h i gennemsnit, og den bedste opnåelige virkningsgrad i dette område er ca. 23%. Den nuværende State of the art er togsæt med et forbrug er 0,25 MJ pr. sædekilometer.



Figur 39: DSB Litra MQ - et moderne dieseltog af typen Siemens Desiro

El IC-reg.tog: Elektrisk tog med en gennemsnitsfart på 85 km/h har en virkningsgrad på ca. 64%. Forbruget er ca. 0,07 MJ pr. sædekilometer.



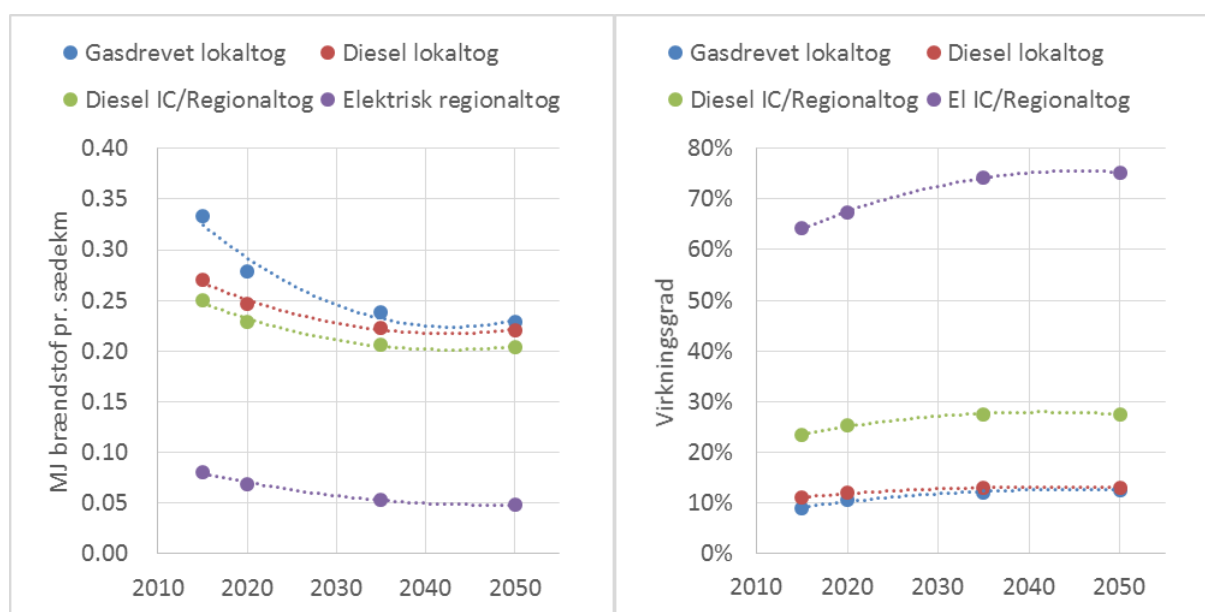
Figur 40: DSB Litra ET - et moderne elektrisk togsæt af typen Bombardier Contessa

Konklusionens detaljer baseres på regnearksmodellen i Tabel 7 - Tabel 10. Udviklingen i virkningsgrader antages at følge udviklingen på lastbiler og busser med tilsvarende motortyper.

Tabel 11: Anbefalede data til AD-model

Teknologi	2015	2020	2035	2050
Diesel lokaltog 68 ton, 114 sæder				
Brændstofforbrug MJ/sædekilometer	0,27	0,25	0,22	0,22
Mekanisk energi MJ/sædekm	0,030	0,029	0,029	0,029
Virkningsgrad	11%	12%	13%	13%
Gas lokaltog 68 ton, 114 sæder				
Brændstofforbrug MJ/sædekilometer	0,33	0,28	0,24	0,23
Mekanisk energi MJ/sædekm	0,030	0,029	0,029	0,029
Virkningsgrad	9%	11%	12%	13%
Diesel IC-regionaltog 160 ton, 205 sæder				
Brændstofforbrug MJ/sædekilometer	0,25	0,23	0,21	0,20
Mekanisk energi MJ/sædekm	0,059	0,058	0,057	0,056
Virkningsgrad	23%	25%	28%	28%
El IC-regionaltog 153 ton, 227 sæder				
Brændstofforbrug MJ/sædekilometer	0,070	0,067	0,055	0,048
Mekanisk energi MJ/sædekm	0,045	0,045	0,041	0,037
Virkningsgrad	64%	67%	74%	75%

Figur 41 viser konklusionen i overblik.



Figur 41: Konklusion på energiforbrug for tog under danske forhold