

Trafikdage på AUC 99

Energiforbrug og emissionsforhold for søtransport sammenlignet med lastbiltransport

Af

civilingeniør Hans Otto Holmegaard Kristensen

Danmarks Rederiforening

Energiforbrug og emissionsforhold for søtransport sammenlignet med lastbiltransport

Af civilingeniør Hans Otto Holmegaard Kristensen. Danmarks Rederiforening

Introduktion

Denne artikel indeholder resultatet af nogle systematiske beregninger af emissioner og energiforbrug for forskellige typer skibstransport og lastbiltransport. De undersøgte skibstyper er containerskibe (100 - 7500 TEU's), bulk carriers (2000 - 200.000 tons lasteevne) samt Ro-Ro-fartøjer (1000 - 3500 lanemeter).

Da der i de kommende år vil træde forskellige krav i kraft vedr. skibsfartens NOx emissionsforhold - og for lastbilernes vedkommende, foruden NOx emissionskrav, også grænser for udledning af CO, HC samt partikler - indeholder denne artikel en række beregninger der viser, hvilken indflydelse disse nye krav får for transport til søs i forhold til transport med lastbil.

Beregningsmetoder

For at få en dybere indsigt i de forskellige skibstypers energiforbrug og emissionsforhold er der i undersøgelsen benyttet et computerprogram, der på basis af specifikation af det pågældende skibs lastekapacitet (antal TEU's for containerskibe, tons nyttelast for bulk carriers samt antal lanemeter for Ro-Ro skibe) bestemmer et repræsentativt sæt hoveddimensioner, på basis af hvilke programmet kan beregne skibets nødvendige fremdrivningseffekt for en given fart (Guldhammer & Harvald, ref. 1).

Hoveddimensionerne for de enkelte skibstyper, som programmet fastlægger, er bestemt ud fra en statistisk analyse af en lang række containerskibe, bulk carriers samt Ro-Ro skibe. Med den valgte beregningsmetodik får man bestemt skibets hoveddata, som repræsentative værdier for et skib ud fra den specificerede lasteevne. Samtidig er programmet dog opbygget, så der gives mulighed for at afvige fra de middelværdier, der foreslås af programmet, så man individuelt kan foretage mere specifikke parameteranalyser (ændring af bredde, sidehøjde, fart, letvægt, fordeling mellem last og dødvægt, valg af motortype etc.).

Som et alternativ til den valgte metode kunne man ved at analysere de relevante data (lasteevne, maskineffekt og tilhørende servicefart) for en række skibe have beregnet energiforbruget pr. transportenhed (eksempelvis kg olie pr. transporteret tons pr. km). En sådan metode vil imidlertid ikke give noget nærmere detailkendskab til indflydelsen af de enkelte parametre, herunder specielt farten og skibets lasteevne. Endvidere vil en sådan statistisk analyse give resultater med en relativ stor spredning, hvorfor den kun vil være af indikativ karakter.

For at kunne sammenligne en skibstransports energi- og emissionsforhold med en tilsvarende transport med lastbil indeholder det benyttede beregningsprogram udover den skibsspecifikke analysemodel også en beregningsmodel, der fastlægger energiforbruget og emissionsforholdene for lastbiltransport på basis af oplysninger om lastbilens lastmængde og lastbilmotorens standard (opfyldende enten nuværende eller kommende miljøkrav). Med de to analysemodeller for henholdsvis skibe og lastbiler kan programmet overordnet beregne energiforbruget og emissionsforholdene for en samlet transportkæde bestående af flg. led:

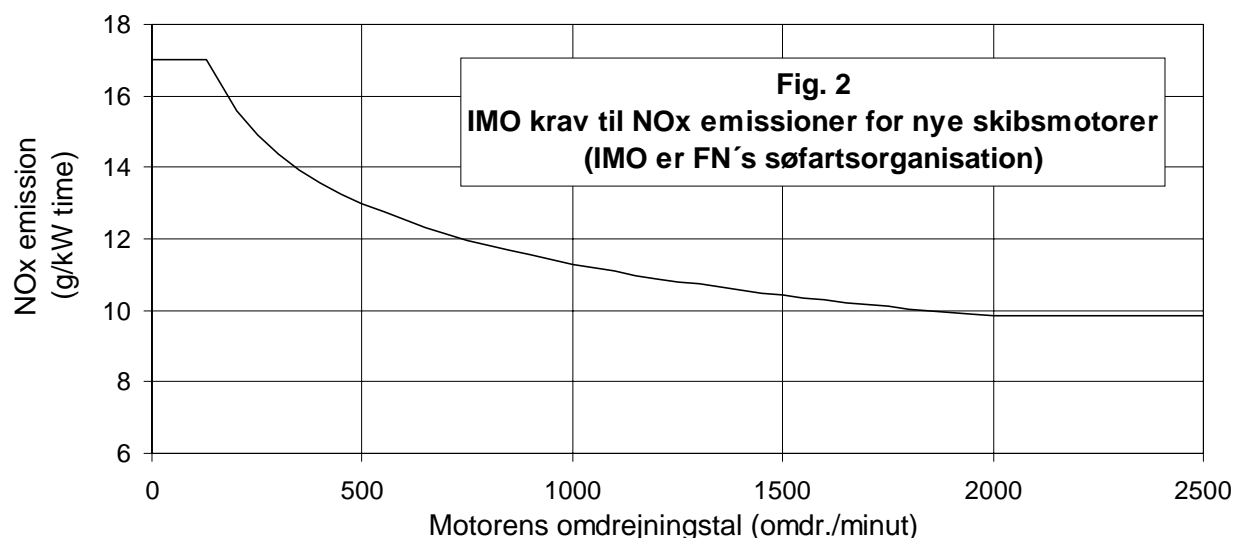
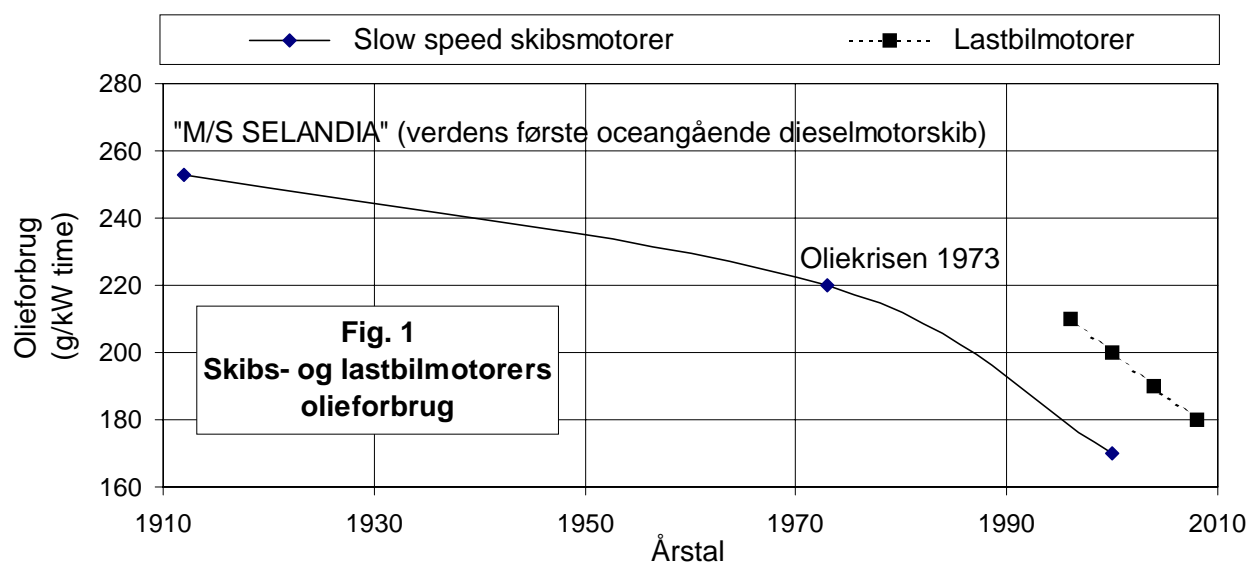
1. Transport med lastbil til udskibningshavn
2. Sejlads fra udskibningshavn til modtagerhavn
3. Transport med lastbil fra modtagerhavn

Ved at specificere de enkelte transportdistancer samt energiforbruget til omladning i havn kan programmet beregne det samlede energiforbrug og tilhørende emissionsudslip for hele transportkæden. Programmet foretager også en detaljeret analyse, hvor de enkelte energiforbrug og emissionsudslip relateres til lastenhet pr. transporteret kilometer for henholdsvis skib og lastbil. Det er den sidstnævnte beregningsfacilitet, der er anvendt i nærværende analysearbejde.

Energiforbrug/specifikt brændolieforbrug for skibs- og lastbilmotorer

Det specifikke energiforbrug (gram olie pr. kW time) for skibsmotorer har specielt i de senere år undergået en forbedring bl.a. som følge af oliekrisen i 1973. Et eksempel for slow speed motorer er vist i fig. 1, hvor det ses, at det specifikke brændolieforbrug siden 1973 er reduceret med 20-25 pct.

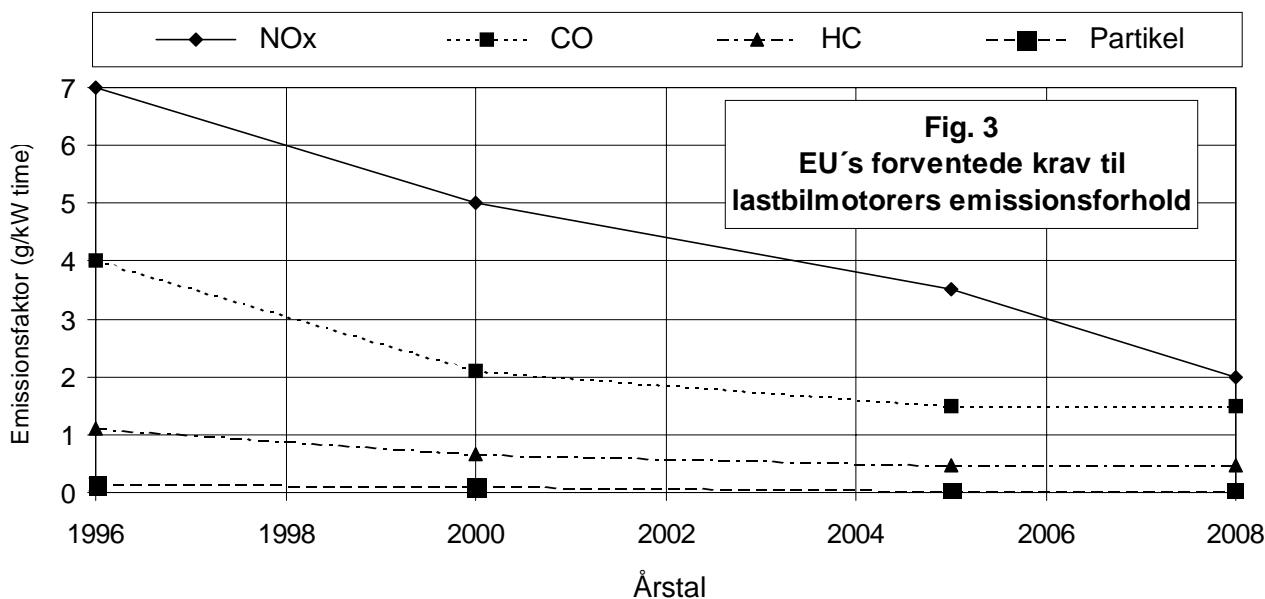
Lastbilmotorer undergår i disse år en lignende udvikling, som for skibsmotorerne. Det forventes i branchen, at det specifikke brændolieforbrug vil falde med ca. 10 pct. inden for de næste 10 år, jvfr. fig. 1, der viser den forventede udvikling for en typisk moderne lastbilmotor.



Emissionsforhold for skibe og lastbiler

Fra 1. januar 2000 vil der via FN's søfartsorganisation, IMO (Marpol Annex VI) blive indført nye grænseværdier til NO_x emissioner for nye skibsmotorer, iflg. hvilke NO_x emissionen ikke må overstige grænserne vist i fig. 2. Da reglerne imidlertid ikke er ratificerede af tilstrækkelig mange lande, indføres kravene foreløbig på frivillig basis, idet grænseværdierne automatisk vil være gældende ved Annex IV's ikrafttræden for skibsmotorer bygget efter den 1. januar 2000.

For lastbilmotorer gælder der allerede krav, de såkaldte Euro 2 normer, der har været gældende siden 1996. Imidlertid er endnu strengere krav på vej med en forventet gradvis implementering i 2000 (Euro 3 norm), 2005 (Euro 4 norm) og muligvis også 2008. Disse krav vil foruden grænseværdier for NO_x emissioner også omfatte grænseværdier for udslip af HC, CO samt partikler som vist i fig. 3.



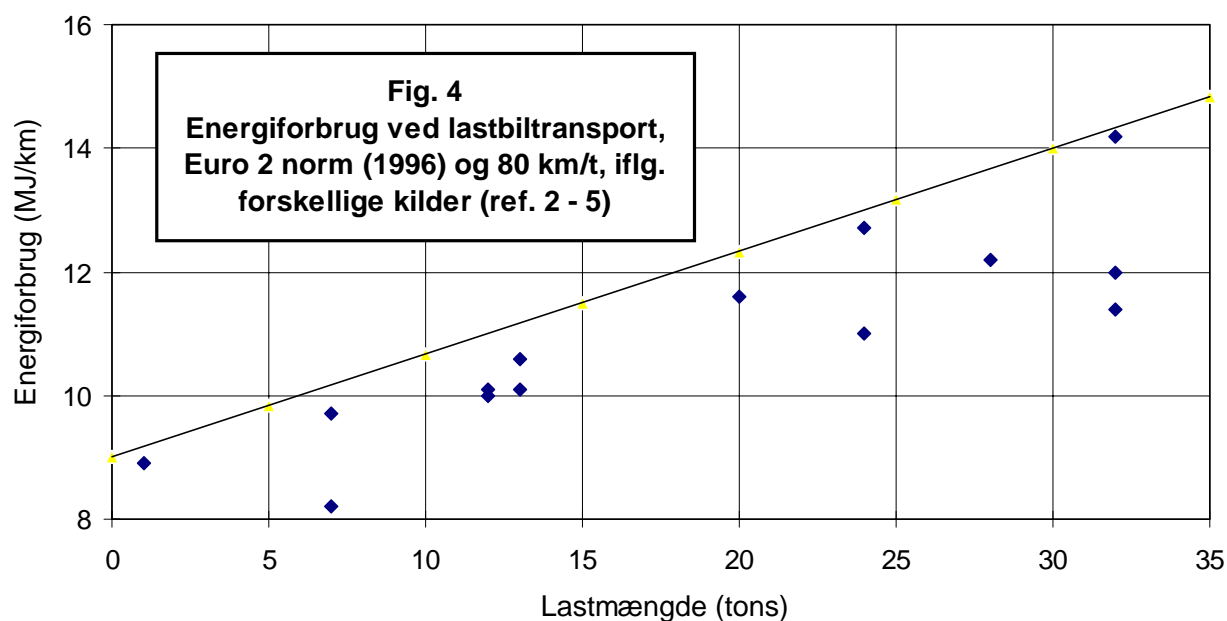
Lastbilers energiforbrug

En lastbils energiforbrug afhænger primært af den transporterede last, lastbilens egenvægt, motortypen, dens luftmodstand og sidst, men ikke mindst kørselstypen (kørsel i by versus kørsel på motorvej med konstant fart).

I nærværende analyse er benyttet energidata for lastbiler fra Trafikministeriets TEMA-model (ref. 2), Foreningen af Danske Eksportvognmænd (ref. 3), trafikforsker Kaj Jørgensen på DTU (ref. 4) og endelig data indhentet hos et par store vogmandsfirmaer (ref. 5).

På basis af disse forskellige oplysninger er der i fig. 4 vist sammenhængen mellem transporteret lastmængde og energiforbrug pr. kørt km. De viste data svarer til lastbiler, der opfylder den nuværende strengeste EU norm (Euro 2) med en konstant kørselshastighed på 80 km/time. I diagrammet er ligeledes vist den lineære sammenhæng mellem lastmængde og energiforbrug pr. km, som er benyttet i analyserne i denne rapport, svarende til Euro 2 norm. For analyser svarende til de kommende normer foretager computerprogrammet de fornødne korrektioner af energiforbruget i henhold til den forventede udvikling vist i fig. 1 og fig. 3.

Det skal bemærkes, at den benyttede lineære approksimation vist i fig. 4 svarer til ideelle forhold, da trafikken i en samlet transportkæde næppe vil foregå ved konstant fart på 80 km/time. For mere blandet kørsel vil energiforbruget pr. km øges.



Opsummering af emissionsforhold for lastbiler og skibe

I analyserne for lastbiltransporten i denne rapport er der som tidligere nævnt taget udgangspunkt i EU's kommende krav (fig. 3). NO_x emissions grænseværdierne bliver formodentlig de vanskeligste at opfylde, hvorimod kravene til HC og CO emissioner er væsentligt nemmere at opfylde, idet en stor del af lastbilerne allerede opfylder de kommende krav til disse emissionsprodukter.

Det skal dog tilføjes, at for såvel lastbilmotorer og som skibsmotorer kan der være store variationer i størrelsen af de enkelte emissioner afhængig af bl.a. motorens belastning og driftsform (steady state/transient). Bl.a. skal det nævnes, at testbetingelserne for lastbilmotorerne er helt anderledes end de praktiske kørselsforhold, hvorfor emissionsforholdene (NO_x, CO og HC) for lastbilmotorer skal anvendes med forsigtighed.

For skibstransportanalyserne er der som basis for NO_x emissionerne taget udgangspunkt i IMO's kommende krav, som motorfabrikanterne mener at kunne opfylde i fremtiden. Med hensyn til HC, CO og partikel emissioner er benyttet nogle repræsentative middelværdier fundet ved bl.a. et stort internationalt forskningsprogram vedr. skibsmotorers emissionsforhold (ref. 6) samt ud fra oplysninger fra motorfabrikanterne MAN B&W samt Wärtsilä (ref. 7). For skibsmotorer er variationen ved almindelig drift (steady state) iflg. ref. 6:

NO_x: 8 - 20 g/kW time
 HC: 0,2 - 1,0 g/kW time
 CO: 0,4 - 4,0 g/kW time
 Partikler: 0,1 - 2,0 g/kW time

CO₂ udslippet, som er en væsentlig faktor med betydning for drivhuseffekten, er ikke omfattet af specifikke grænseværdier, som de øvrige emissionsprodukter, da CO₂ emissionen alene afhænger af olieforbruget og dermed kun kan nedsættes ved at sætte grænser for energiforbruget pr. kW time, hvilket der ikke er krav til.

Grænseværdier for de enkelte emissionsprodukter er for henholdsvis skibs- og lastbilmotorer vist i tabel 1 og 2, hvor samtlige emissionsfaktorer og energiforbrug, der benyttes i beregningsmodellen er opført. Det skal bemærkes, at svovlemissioner ikke er medtaget i analysen, da disse afhænger af brændoliens svovlindhold, som for bunkerolies vedkommende kan variere fra 0,05 pct. op til 3 - 4 pct.

Tabel 1: Emissionsfaktorer og specifikt olieforbrug for skibsmotorer

		Medium speed	Slow speed
Olieforbrug	(kg/kW time)	0,19	0,17
CO ₂ emission	(kg/kW time)	0,62	0,54
NOx emission	(g/kW time)	12,0	17,0
CO emission	(g/kW time)	1,60	1,60
HC emission	(g/kW time)	0,20	0,50
Partikelemission	(g/kW time)	0,20	0,70

Tabel 2: Emissionsfaktorer og specifikke energiforbrug for lastbilmotorer

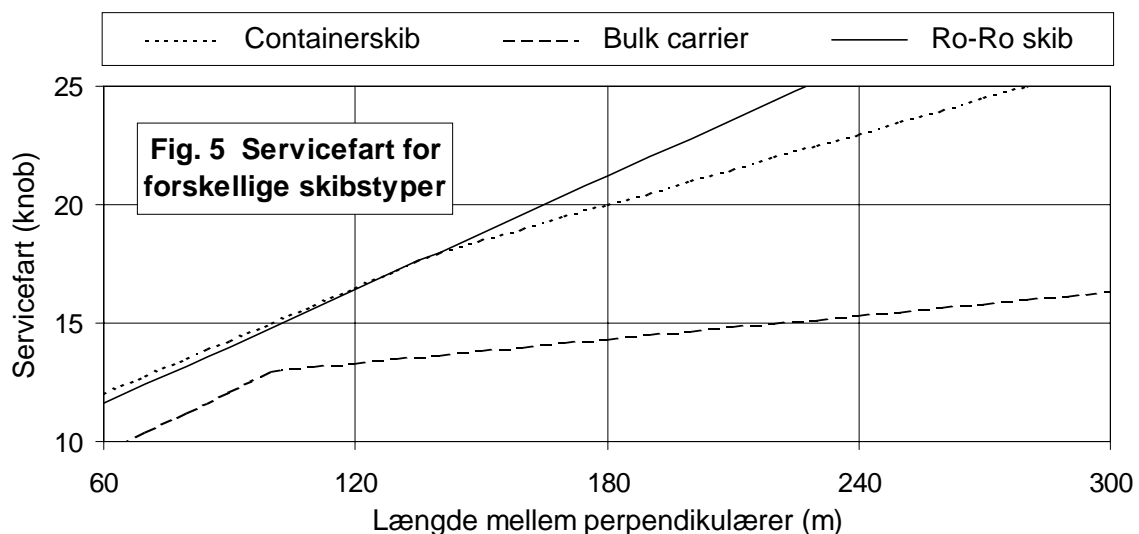
		EU - 1996	EU - 2000	EU - 2005
Olieforbrug	(kg/kW time)	0,21	0,20	0,19
CO ₂ emission	(kg/kW time)	0,68	0,65	0,62
NOx emission	(g/kW time)	7,0	5,0	3,5
CO emission	(g/kW time)	4,00	2,10	1,50
HC emission	(g/kW time)	1,10	0,66	0,46
Partikel emission	(g/kW time)	0,15	0,10	0,02

Omregningsfaktorer

	Fuel olie	Dieselolie/gasolie
Energi pr. kg olie målt i MJ	40,5	43,0
CO ₂ udslip pr. tons olie (tons)	3,17	3,25

Servicefart

En væsentlig faktor, der har betydning for energiforbruget, er skibets servicefart. Servicefarten øges normalt med skibets længde, hvilket også afspejler sig i det statistiske basismateriale for de 3 skibstyper. Sammenhængen mellem skibslængde og fart (fundet på basis af de statistiske analyser), som er benyttet i hovedparten af analyserne, er vist i fig. 5.



Systematiske beregninger

Der er for de 3 skibstyper foretaget systematiske beregninger for forskellige skibsstørrelser, idet skibe med følgende kapaciteter er undersøgt:

Containerskibe: 100, 500, 1500, 2500, 4500, 5500, 6500 samt 7500 TEU
(TEU = 20 fods container).

Bulk carriers: 2000, 5000, 10.000, 20.000, 40.000, 60.000, 80.000, 100.000, 120.000, 140.000, 160.000, 180.000 og 200.000 tons nyttelast.

Ro-Ro skibe: 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 og 3500 lanemeter

I analyserne er det antaget at skibenes lasteevne udnyttes 100 pct. hvilket også er tilfældet for lastbilernes vedkommende, så de to transportformer sammenlignes på en ensartet basis. For bulk carrier analysen og Ro-Ro skibs analysen er der regnet med en total lastbilvægt på 40 tons, svarende til maks. tilladelig vægt i udlandet, dvs. ca. 24 tons last, idet en lastbils typiske egenvægt er ca. 16 tons. For analysen med containerskibe er der sammenlignet med landtransport med 2 containere á 10 tons pr. lastbil, da den statistiske analyse har vist, at et containerskibs nyttelast svarer til ca. 10 tons pr. TEU.

Baseret på typiske nøgletal er der for containerskibe op til Panmax bredde (maks. tilladelig bredde i Panama kanalen) regnet med, at nyttelasten udgør 75 pct. af dødvægten, mens der for en bredde større end 32,2 m er regnet med et nyttelast/dødvægts forhold på 85 pct. som følge af et relativt mindre behov for såvel ballastvand som brændolie.

For bulk carriers er der på basis af erfaringstal, regnet med, at forholdet mellem nyttelast og dødvægt er 90 pct. for skibe med mindre end 10.000 nyttelast og 95 pct. for skibe større end 10.000 tons. For Ro-Ro skibene er nyttelast/dødvægts forholdet sat til 75 pct. Det skal i denne forbindelse nævnes, at computerprogrammet er opbygget, så brugeren for de 3 skibstyper selv kan specificere forholdet mellem nyttelast og dødvægt. Ved en kapacitetsudnyttelse på mindre en 100 pct. af skibets maksimale dødvægt er det i øvrigt også muligt at specificere, hvor stor en del af den ubenyttede dødvægt, der evt. skal benyttes som vandballast kompenstation for dels opfyldelse af stabilitetskriterier samt for at få tilstrækkelig dybgang.

Sammenhængen mellem dødvægt og skibslængde for de 3 undersøgte skibstyper er vist i fig. 6. Ro-Ro skibe har en markant lavere dødvægt i forhold til skibslængden. Hertil kommer, at af den nyttelast, som et Ro-Ro skib medfører, medgår kun ca. 60 pct. til reel last, idet et 18 m lastvognstog har en maksimalvægt på 40 tons, hvoraf ca. 16 tons som tidligere nævnt udgør lastbilens egenvægt. Dette forhold medfører, at den reelle nyttelast for et Ro-Ro skib i sammenligning med containerskibe og specielt bulk carriers er særdeles lav, hvilket i det efterfølgende viser sig i form af et relativt større energiforbrug (og tilsvarende emissionsudslip) pr. tons nyttelast pr. km for Ro-Ro skibe. Da servicefarten har en stor indflydelse på energiforbruget, er der for Ro-Ro skibe foretaget beregninger, der viser indflydelsen af en fartreduktion på 2 knob.

Det er antaget, at containerskibe og bulk carriers fremdrives af slow speed motorer, mens der for Ro-Ro skibenes vedkommende er regnet med medium speed motorer som hovedfremdrivningskilde. En ændring af motortype vil resultere i en ændring af energiforbruget på 15 - 20 pct. på grund af det lavere specifikke brændstofforbrug for slow speed motorer i forhold til medium speed motorer og på grund af fuel oilies (til slow speed motorer) lavere brændværdi i forhold til dieselolie (til medium speed motorer).

Resultatet af de udførte beregninger er vist i figur 7 - 12, som danner basis for konklusionerne vedr. skibstransport i forhold til lastbiltransport. Energiforbrug og emissioner er angivet som funktion af lastekapaciteten for den enkelte skibstype, og hvor intet andet er nævnt, svarer tallene til den servicefart, der er angivet i fig. 5 og for lastbilernes vedkommende til en konstant fart på 80 km/time.

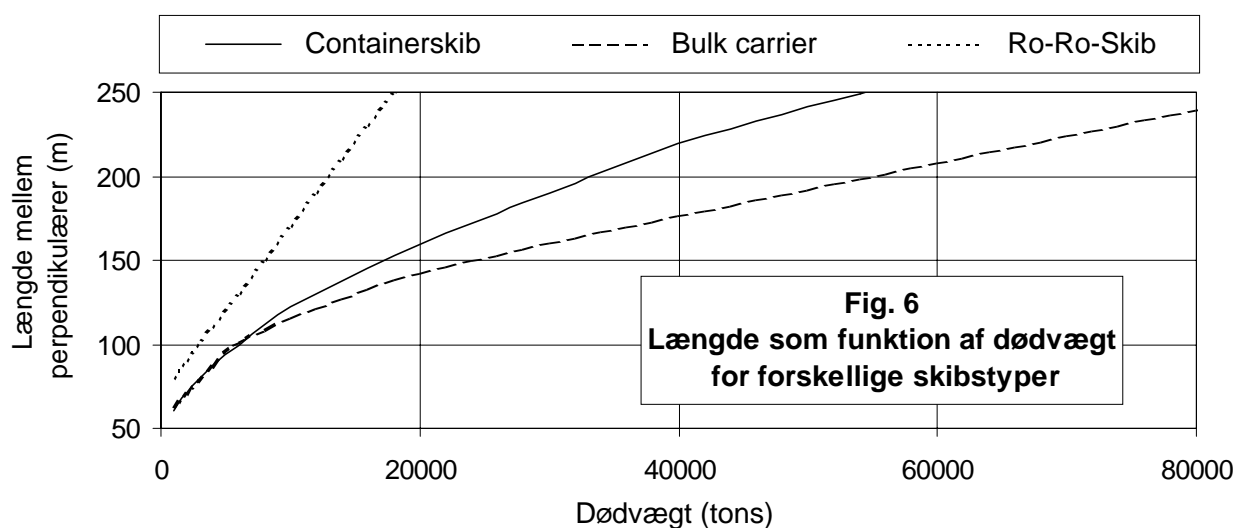


Fig. 6
Længde som funktion af dødvægt for forskellige skibstyper

Konklusion og opsummering

På basis af de udførte beregninger kan følgende konkluderes:

1. For containerskibe, og specielt for bulk carriers, falder energiforbruget pr. lastenhet pr. transportkilometer (i det efterfølgende benævnt det specifikke energiforbrug) med øget skibsstørrelse, dvs. en "stordriftsfordele" kan høstes.
2. Det specifikke energiforbrug for containerskibe og bulk carriers er væsentligt lavere end for lastbiltransport med den mest markante forskel for bulk carriers som følge af ovennævnte "stordriftsfordele".
3. Som kontrast til containerskibe og bulkcarriers stiger det specifikke energiforbrug for Ro-Ro skibe med øget skibsstørrelse til et niveau, der er 1½ til 2½ gange større end niveauet for lastbiler. Mindskes den gennemsnitlige servicefart for Ro-Ro skibe med 2 knob mindskes det specifikke energiforbrug til et niveau, der er 1 – 2 gange større end for lastbiler.
4. På grund direkte proportionalitet mellem energiforbrug og CO₂ udslip er ovenstående konklusioner (pkt. 1 - 3) også gældende med hensyn til CO₂ emissioner.
5. For bulk carriers er NO_x emissionen pr. tons last pr. km generelt 3 – 4 gange lavere end for lastbiler, der opfylder EU's nuværende normer (EU type 2). For lastbiler opfyldende EU's kommende normer vil forholdene ændres, således, at NO_x emissionen pr. tons last pr. km for bulk carriers på ca. 25.000 tons nyttelast vil ligge på samme niveau som for en lastbil, der skal opfylde 2005 kravene (EU type 4). For bulk carriers på mere end ca. 60.000 tons nyttelast vil lastbilernes NO_x emissionen pr. tons last pr. km svarende til EU type 4 motorer imidlertid være ca. dobbelt så stor som for en bulk carrier.
6. For containerskibe er NO_x emissionen pr. tons last pr. km generelt på samme niveau som for lastbiler, der opfylder EU's nuværende normer (EU type 2). For lastbiler opfyldende EU's kommende normer vil forholdene ændres, således, at NO_x emissionen pr. tons last pr. km for containerskibe større end 2000 TEU vil være henholdsvis ca. 115

pct. af lastbilniveauet i 2000 og ca. 160 pct. af lastbilniveauet i 2005. For containerskibe mindre end 2000 TEU stiger NOx emissionen pr. tons last pr. km, således at niveauet for en lastbil med en type 4 motor vil være ca. 47 pct. af niveauet for et 500 TEU containerskib.

7. For Ro-Ro skibe gælder der helt generelt, at NOx udslippet pr. ton billast pr. km er 3 til 4½ gange større end for lastbiltransporten, størst for de store Ro-Ro skibe. Dette forhold samt et lignende forhold med hensyn til energiforbrug skyldes, som tidligere nævnt, Ro-Ro skibenes relative lille reelle nyttelast, dvs. den samlede last på lastbiler og evt. løstrailere. At servicefarten samtidig øges relativt mere med længden for Ro-Ro skibe end for de øvrige skibstyper er blot en forstærkende faktor for det større energiforbrug og emissionsudslip for Ro-Ro skibe i forhold til lastbiler, hvorfor der for denne skibstype er udført beregninger, hvor skibets servicefart er reduceret med 2 knob. Disse beregninger viser, at energiforbruget pr. ton nyttelast pr. km for Ro-Ro skibe falder med 20 – 25 pct. ved den reducerede fart (fig. 11 og 12).
8. CO og HC emissioner skal som tidligere nævnt tages med et vist forbehold på grund af forskel i testbetingelserne og de virkelige kørselsforhold, netop fordi det er grænseværdierne svarende til testbetingelserne, der er benyttet ved beregningerne for lastbilerne i denne rapport. Da samtidig CO og HC emissionerne iflg. flere forskere har en sekundær betydning, skal der ikke her drages nogle yderligere konklusioner vedr. disse to emissionsprodukter.

Table 3: Opsummering af beregninger (100 pct. udnyttelsesgrad for skib og lastbil).

	Energiforbrug pr. ton last pr. km	CO ₂ udslip pr. ton last pr. km	NOx udslip pr. ton last pr. km	CO udslip pr. ton last pr. km	HC udslip pr. ton last pr. km	Partikel udslip pr. ton last pr. km
	MJ/ton/km	g/ton/km	g/ton/km	g/ton/km	g/ton/km	g/ton/km
Containerskib (100 TEU)	0,27	21	0,64	0,061	0,019	0,026
Containerskib (500 TEU)	0,21	17	0,51	0,049	0,015	0,020
Containerskib (1500 TEU)	0,18	14	0,43	0,042	0,013	0,017
Containerskib (7000 TEU)	0,16	12	0,39	0,037	0,012	0,016
Lastbil EU 2 (1996)	0,62	47	0,48	0,27	0,075	0,010
Lastbil EU 3 (2000)	0,59	44	0,34	0,14	0,045	0,007
Lastbil EU 4 (2005)	0,56	42	0,24	0,10	0,031	0,001
Bulk carrier (2000 t last)	0,19	14	0,44	0,043	0,013	0,017
Bulk carrier (20000 t last)	0,09	7	0,20	0,019	0,006	0,008
Bulk carrier (200000 t last)	0,03	2	0,07	0,006	0,002	0,003
Lastbil EU 2 (1996)	0,54	41	0,42	0,24	0,066	0,009
Lastbil EU 3 (2000)	0,52	39	0,30	0,13	0,040	0,006
Lastbil EU 4 (2005)	0,49	37	0,21	0,09	0,028	0,001
Ro-Ro skib (1000 lanemeter)	0,84	64	1,23	0,16	0,051	0,020
Ro-Ro skib (2000 lanemeter)	0,99	75	1,46	0,19	0,061	0,024
Ro-Ro skib (3000 lanemeter)	1,24	94	1,82	0,24	0,076	0,030
Lastbil EU 2 (1996)	0,54	41	0,42	0,24	0,066	0,009
Lastbil EU 3 (2000)	0,52	39	0,30	0,13	0,040	0,006
Lastbil EU 4 (2005)	0,49	37	0,21	0,09	0,028	0,001

For containerskibs beregningerne er der regnet med 2 x 10 tons last pr. lastbil (10 tons pr. TEU), mens der for de to andre skibstyper er regnet med 24 tons last pr. lastbil, hvilket forklarer forskellen i energiforbrug og emissioner for lastbiltransporten i containerskibs analysen i forhold til analysen for bulk carriers og Ro-Ro skibe.

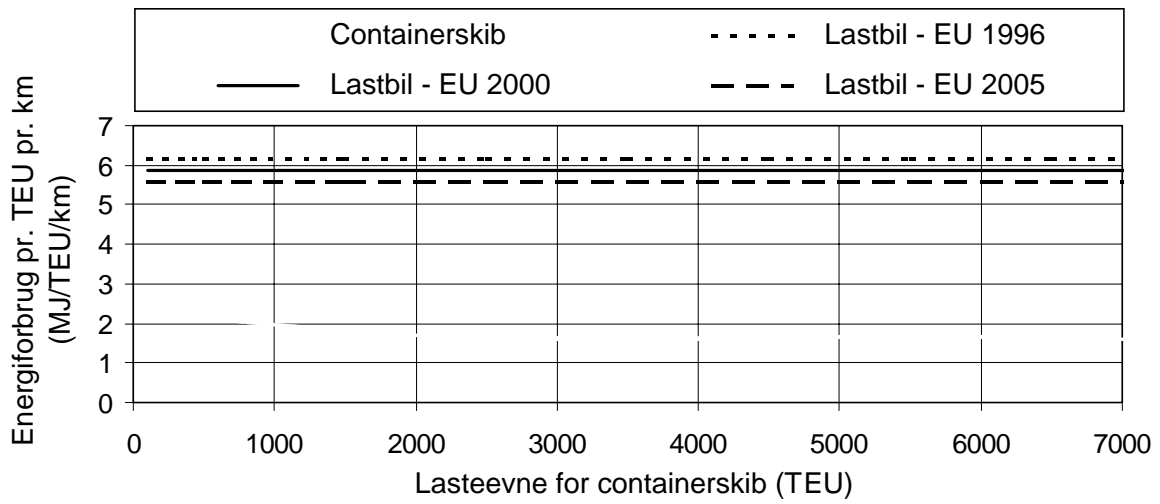


Fig. 7 Energiforbrug for containerskibs transport versus lastbiltransport

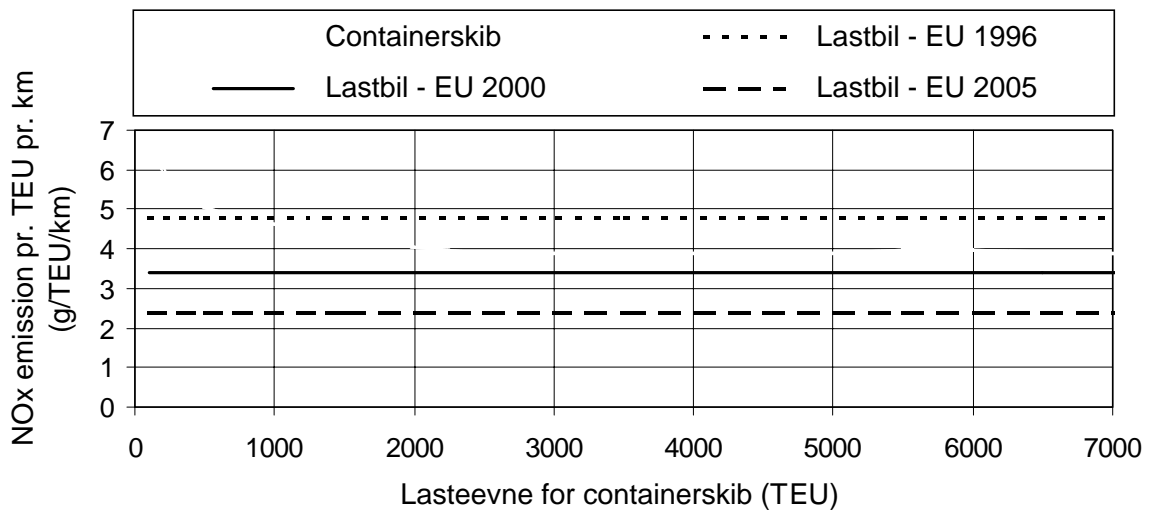


Fig. 8 NOx emissioner for containerskibs transport versus lastbiltransport

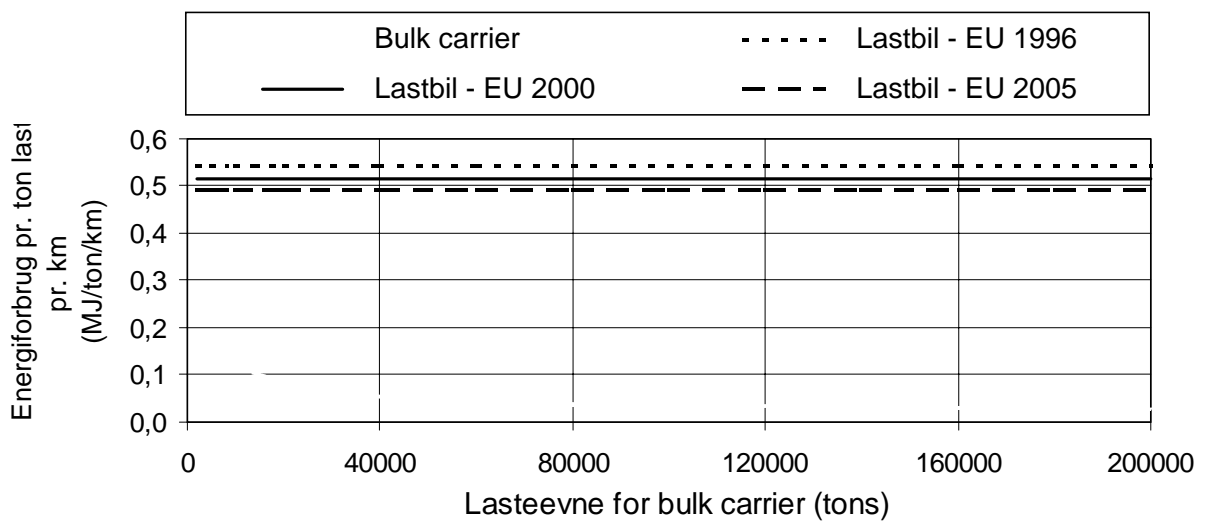


Fig. 9 Energiforbrug for bulk carrier transport versus lastbiltransport

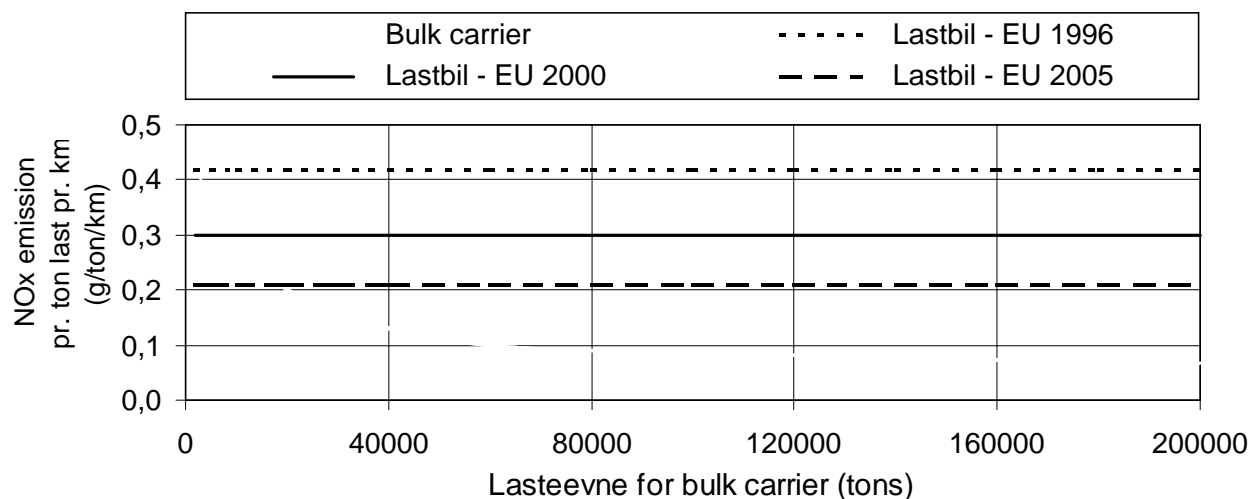


Fig. 10 NOx emissioner for bulk carrier transport versus lastbiltransport

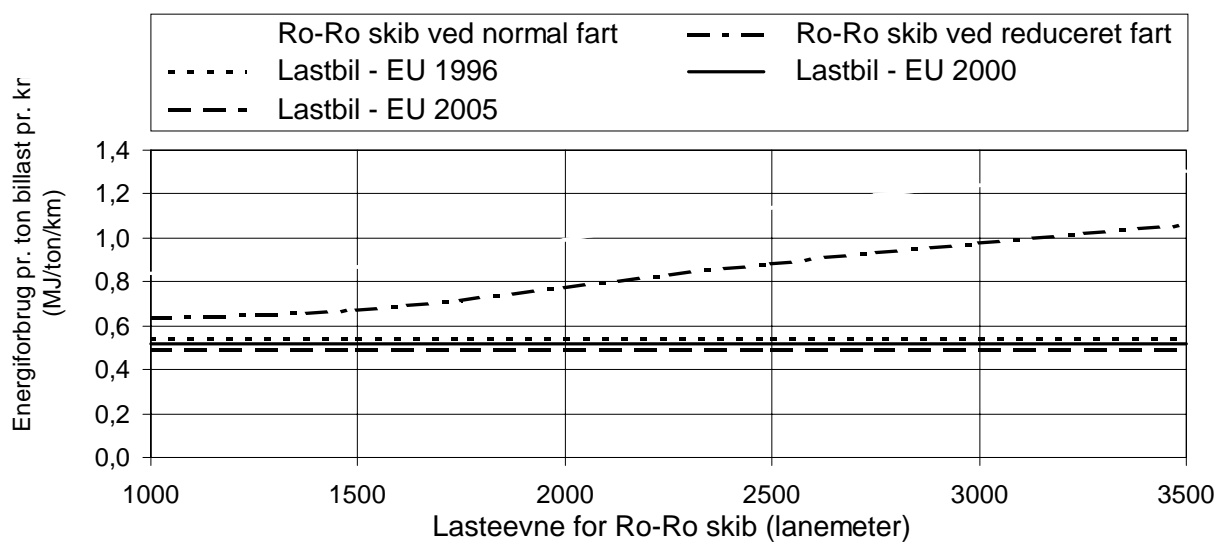


Fig. 11 Energiforbrug for Ro-Ro skibs transport versus lastbiltransport

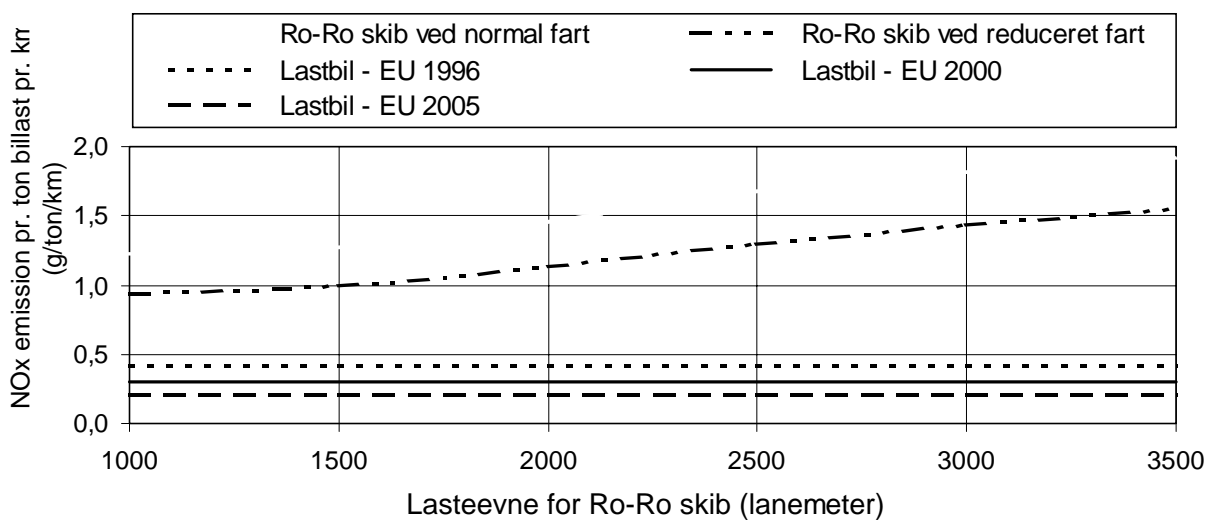


Fig. 12 NOx emissioner for Ro-Ro skibs transport versus lastbiltransport

Referenceliste

- Ref. 1: Gulddammer og Harvald: "Ship Resistance". Akademisk Forlag 1974
- Ref. 2: TEMA – En model for transporters emissioner. Trafikministeriet 1996.
- Ref. 3: Miljø og sikkerhed – Håndbog for vejtransport. Udgivet af Foreningen af Danske Eksportvognmænd i 1997
- Ref. 4: Kaj Jørgensen (Institut for Bygninger og Energi - DTU): Bidrag til undersøgelsen af godstransportens turkæder – energi og emissionsfaktorer for tog og lastbiler. November 1998
- Ref. 5: Oplysninger fået ved henvendelse til vognmandsfirmaerne Johs. Rasmussen samt Leo Sørensen
- Ref. 6: Lloyds Register: Marine Exhaust Emissions Research Programme, 1995
- Ref. 7: MEPC studies – pollution solutions. The Motor Ship, Januar 1999, s. 32 – 33.