

Skibsteknisk beregningsgrundlag

**Udarbejdet af
Hans Otto Kristensen**

Trafikministeriet

2000

Indholdsfortegnelse

INTRODUKTION.....	1
BEREGNINGSMETODE	1
CONTAINERSKIBE	
Generel beskrivelse	3
Servicefart	3
Fremdrivnings- og hjælpemaskineri	4
Figurer	4
BULK CARRIERS (MASSEGODSSKIBE)	
Generel beskrivelse	6
Servicefart	7
Fremdrivnings- og hjælpemaskineri	7
Figurer	7
RO-RO LASTSKIBE	
Generel beskrivelse	9
Dødvægt og nyttelast	10
Servicefart	10
Fremdrivningsmaskineri	11
Figurer	11
RO-RO PASSAGERSKIBE (KONVENTIONELLE FÆRGER)	
Generel beskrivelse	13
Lastekapacitet, dødvægt og nyttelast	14
Servicefart	14
Fremdrivningsmaskineri	14
Figurer	15
HURTIGFÆRGER	
Lovgivningsmæssig udvikling	19
Enkeltskrogsfærger kontra katamaranfærger	19
HURTIGE BILFØRENDE ENKELTSKROGSFÆRGER	
Personbilkapacitet	20
Nyttelast og dødvægt	20
Fart	21
Hjælpemaskineffekt.....	21
Forskel i maskinvægt for henholdsvis gasturbiner dieselmotorer.....	21
Figurer	22
HURTIGE BILFØRENDE KATAMARANFÆRGER	
Personbilkapacitet	25
Nyttelast og dødvægt	25
Fart	26
Hjælpemaskineffekt.....	26
Figurer	26

ENERGIFORBRUG OG EMISSIONSFAKTORER

Motortyper og historisk udvikling	29
International regulering af skibsmotorers emissioner	31
Slow speed motorer	31
Medium speed motorer	31
High speed motorer	31
Gasturbiner	32
CO ₂ emissioner	32
NO _x emissioner	32
Svovlemissioner	33
Partikelemissioner.....	33
HC og CO emissioner	33
Opsummeringstabel over skibsmotorers energiforbrug og emissioner	34

MODELBEREGNINGER SOM GRUNDLAG FOR TEMA MODELLEN	34
---	----

SAMMENLIGNING AF TEMA MODELBEREGNINGER MED STATISTISKE DATA	34
---	----

REFERENCELISTE	40
----------------------	----

ORDFORKLARING	42
---------------------	----

BILAG

BILAG A : Resultater af modelberegninger for containerskibe til brug for udvikling af regressionsformler for TEMA modellen

BILAG B : Resultater af modelberegninger for massegodsskibe til brug for udvikling af regressionsformler for TEMA modellen

BILAG C : Resultater af modelberegninger for Ro-Ro lastskibe til brug for udvikling af regressionsformler for TEMA modellen

BILAG D : Resultater af modelberegninger for konventionelle færger (lastbiltransport) til brug for udvikling af regressionsformler for TEMA modellen

BILAG E : Resultater af modelberegninger for konventionelle færger (personbiltransport) til brug for udvikling af regressionsformler for TEMA modellen

BILAG F : Resultater af modelberegninger for hurtige enkeltskrogfærger (dieselmaskineri) til brug for udvikling af regressionsformler for TEMA modellen

BILAG G : Resultater af modelberegninger for hurtige enkeltskrogfærger (gasturbiner) til brug for udvikling af regressionsformler for TEMA modellen

BILAG H : Resultater af modelberegninger for hurtige katamaranfærger (dieselmaskineri) til brug for udvikling af regressionsformler for TEMA modellen

BILAG I : Resultater af modelberegninger for hurtige katamaranfærger (gasturbiner) til brug for udvikling af regressionsformler for TEMA modellen

INTRODUKTION

Denne rapport beskriver baggrunden for den matematiske grundmodel (KOMBI-TRANS), der er basis for den generelle skibstekniske del af TEMA 2000 modellen. Rapporten indeholder også en beskrivelse af de enkelte skibstyper, der indgår i beregningsmodellen samt hvilke udviklingstendenser, der har været indenfor de sidste 5 – 10 år indenfor de enkelte skibstyper med speciel vægt på færger, herunder såvel konventionelle bilfærger samt bilførende hurtigfærger (enkeltskrogfartøjer samt katamaraner).

At sidstnævnte skibstyper fremhæves, skal ses på baggrund af, at Trafikministeriet i 1995 udgav publikationen "Nye færgetyper" (ref. 1) udarbejdet af civ. ing. Hans Otto Kristensen (på daværende tidspunkt ansat hos Carl Bro A/S). Der er, siden den publikation blev udgivet, sket en voldsom udvikling indenfor for specielt hurtigfærger, idet antallet af bilførende hurtigfærger er steget fra 28 i 1995 (ref. 2) til 118 ved slutningen af 1999 (ref. 3). Det er derfor fundet hensigtsmæssigt at lade nærværende rapport også være en opdatering af publikationen "Nye færgetyper" med hensyn til energiforbrugstal samt generelle data for såvel hurtigfærger som konventionelle færger. Opdateringen af "Nye færgetyper" skal i den sammenhæng ses i lyset af, at Hans Otto Kristensen har stået for udviklingen af den generelle skibstekniske beregningsdel i den nye TEMA model, og det er derfor naturligt, at han i den anledning har foretaget den beskrevne opdatering.

Det skal nævnes, at TEMA modellen også indeholder et skibsteknisk beregningsmodul for færger, hvor man tager udgangspunkt i de konkrete færger på de enkelte ruter. Denne beregningsdel er udarbejdet af COWI.

BEREGNINGSMETODE.

Den skibstekniske beregningsmodel er udviklet for følgende skibstyper og -størrelser:

- Containerskibe: 100 - 7000 TEU (TEU = standardcontainer med en længde på 20 fod)
- Bulk carriers (massegodsskibe): 2000 – 150.000 tons lasteevne
- Ro-Ro lastskibe: 700 - 3500 lanemeter (længde af vognbaner)
- Ro-Ro passagerskibe (konventionelle bilførende passagerfærger): 15 - 1000 PBE (personbil-enheder)
- Hurtige bilførende enkeltskrogfartøjer: 50 - 300 PBE
- Hurtige bilførende katamaranfærger: 50 - 300 PBE

For hver af de nævnte skibstyper er der foretaget en statistisk analyse af skibenes lasteevne, hoveddimensioner og øvrige data, der har betydning for bestemmelsen af den nødvendige fremdrivningseffekt. På basis af den statistiske analyse er sammenhængen mellem de forskellige parametre bestemt for hver skibstype, så beregningsmodellen på basis af kravet til lastekapacitet for den pågældende skibstype beregner et sæt repræsentative hoveddimensioner inklusiv et forslag til servicefart, der for alle skibstyper afhænger af skibets størrelse og dermed lasteevnen.

Når hoveddimensionerne samt skibets fart er fastlagt, foretager programmet en beregning af den nødvendige fremdrivningseffekt ved hjælp af nogle forskellige empiriske beregningsmetoder (ref. 4 - 6). Disse beregningsmetoders nøjagtighed er blevet undersøgt ved at sammenligne beregningsresultaterne fra metoderne med fuldskalamålinger/observationer for nogle udvalgte skibe, hvor der findes dokumenterede fuldskalamålinger. Også for hurtigfærgernes vedkommende er der foretaget sådanne sammenlignende analyser. Disse analyser viser, at de anvendte empiriske beregningsmetoder (ref. 4 - 6) er rimeligt pålidelige.

De af programmet foreslåede hoveddimensioner kan ændres individuelt, så man kan se, hvilken indflydelse den pågældende parameter har på fremdrivningseffekten. Til brug for udviklingen af TEMA modellen er der dog kun benyttet de statistisk bestemte standardværdier, hvis fastlæggelse vil blive gennemgået i det efterfølgende sammen med en generel beskrivelse af de enkelte skibstyper.

Strukturen i beregningsmodellen er vist i fig. 1, hvoraf det tydeligt fremgår hvilke parametre, der indgår i beregningerne.

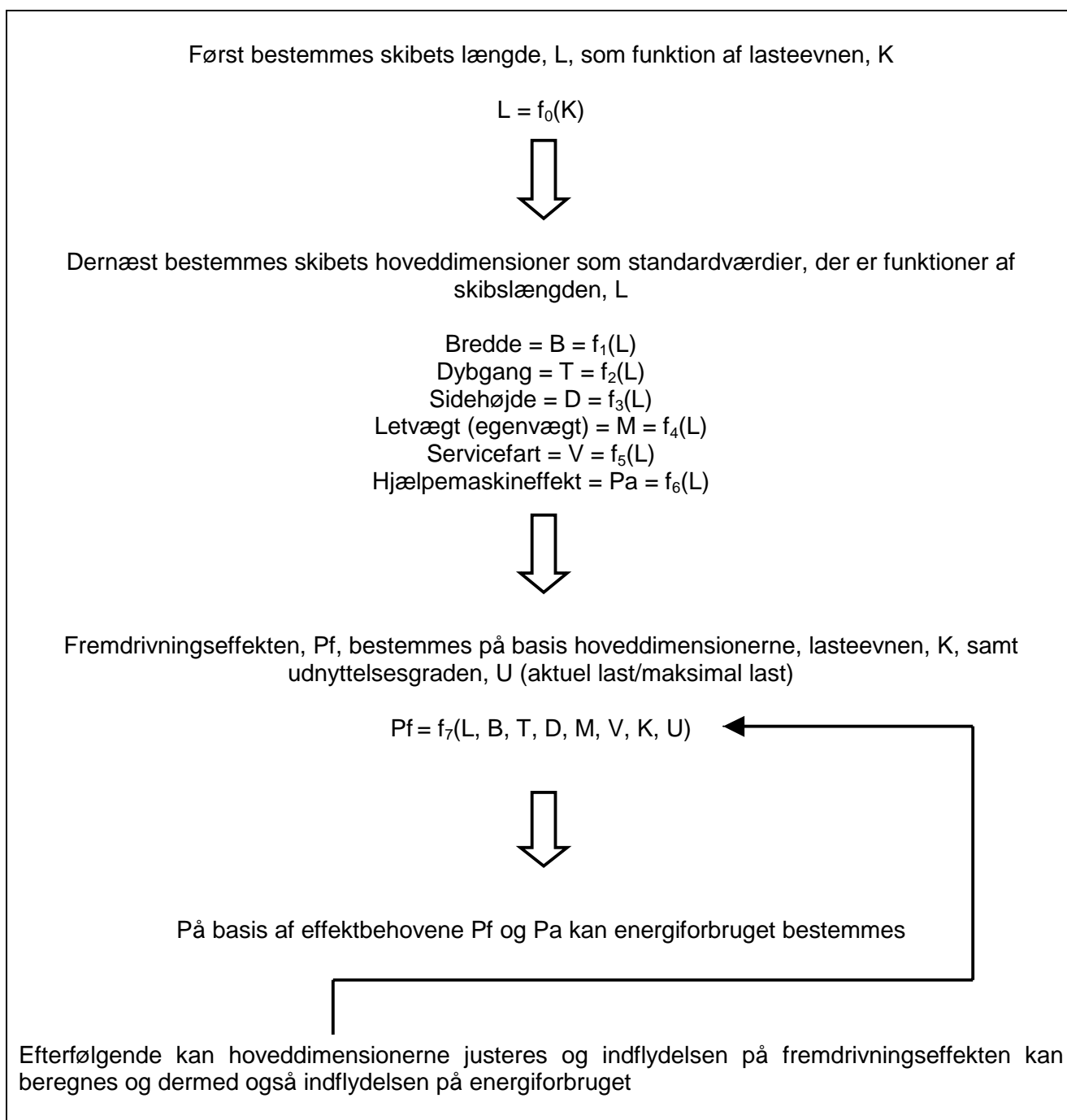


Fig. 1 Principskitse for beregningsmodellen KOMBI-TRANS til bestemmelse af energiforbruget for forskellige skibstyper

CONTAINERSKIBE

Generel beskrivelse

Som navnet antyder, benyttes containerskibe til transport af containere, hvoraf der findes 2 typer, med en længde på henholdsvis 20 fod og 40 fod (TEU og FEU). 20 fods containere er de mest udbredte og benyttes derfor som måleenhed for et containerskibs lastekapacitet.

De største containerskibe, der hidtil er bygget, har en kapacitet på ca. 7000 TEU med en længde på ca. 300 m (fig. 2). Udviklingen vil med stor sandsynlighed fortsætte mod større skibe, idet sådanne allerede befinder sig på projektstadiet. Fremover bliver det dybgangs- og længdebegrænsninger (omkring 350 m), der vil være begrænsende for størrelsen af containerskibene (ref. 7). Også havnenes laste- og losseudstyr i form af store kraner vil blive bestemmende for hvor store skibe, der kan betjenes.

Udviklingen af containerskibe er i det hele taget præget af en høj vækstrate, idet antallet af containerskibe de sidste år er vokset med ca. 10 % pr. år målt i antal skibe og ca. 14 % pr. år målt i antal TEU (ref. 7). I dag udgør containerskibenes samlede dødvægt på 61 millioner tons ca. 8,1 % af verdens samlede dødvægttonnage (ref. 7)

I mange år var den størst tilladte bredde af skibe, der kunne passere Panamakanalen, nærmest en magisk grænse for hvor bredde containerskibe kunne blive. Denne grænse på 32,2 m blev overskredet i 80'erne, og der er siden bygget en del containerskibe, der er bredere jfr. fig. 3, hvor det ses, at nogle af de største containerskibe, der er bygget, har en maksimal bredde på ca. 43 m.

Transport af containere må betegnes som volumenintensiv, dog ikke så udpræget som f.eks. transport af lastbiler med Ro-Ro skibe (se senere). Antages det som et kvalificeret skøn (i hvert fald op til Panmax bredde), at nyttelasten udgør ca. 75 % af dødvægten, bliver den gennemsnitlige vægt pr. TEU ca. 10 tons (fig. 4). For skibe med en bredde større end 32,2 m (over ca. 4000 TEU) er det ikke så påkrævet at have vandballast ombord i skibets bund- og sidetanke af hensyn til stabiliteten, hvorfor nyttelasten for denne skibsstørrelse er ca. 85 pct. af dødvægten. De to antagelser angående størrelsen af nyttelast er benyttet ved udviklingen af TEMA modellens beregningsgrundlag for containerskibe (bilag A).

En af grundene til at det er påkrævet at kunne føre en vis mængde vandballast ombord på et containerskib er, at en stor del af containerne oftest føres som dækslast, idet de staves stakkevis på skibets lugedæksler. At de placeres på lugedækslerne kræver, at containerne fastgøres med specielle beslag, såkaldt lashing. Desværre kan disse fastgørelser af containerne ikke altid modstå de store påvirkninger, som et skib kan udsættes for i dårligt vejr, hvorfor containerne undertiden falder/kastes udenbords, specielt når skibet ruller fra side til side.

Servicefart

Servicefarten varierer fra ca. 11 knob til ca. 26 knob, med størst fart for de længste og dermed største skibe. For samme længde kan farten ofte variere indenfor et interval på +/- 10 % fra middelværdien (fig. 5).

Fremdrivnings- og hjælpemaskineri

En stor del af containerskibene over ca. 1000 TEU fremdrives af slow speed motorer (se senere), mens hjælpemaskineriet, der benyttes til drift af skibets generatorer, der leverer strøm til forbrug om bord, består af medium speed motorer (se senere). Det viser sig at, der er omtrentlig lineær sammenhæng mellem skibets størrelse (længde mellem perpendicularer) og den installerede hjælpemaskineffekt (fig. 6). I modelberegningerne er det antaget, at gennemsnitligt kun 1/3 af hjælpemaskineffekten benyttes kontinuerligt, idet det oftest kun er under manøvrering i havn, man benytter høj effekt til eksempelvis at generere strøm til skibets tværpropellere, der benyttes til at bevæge skibets sideværts eller holde det op imod vind og strøm.

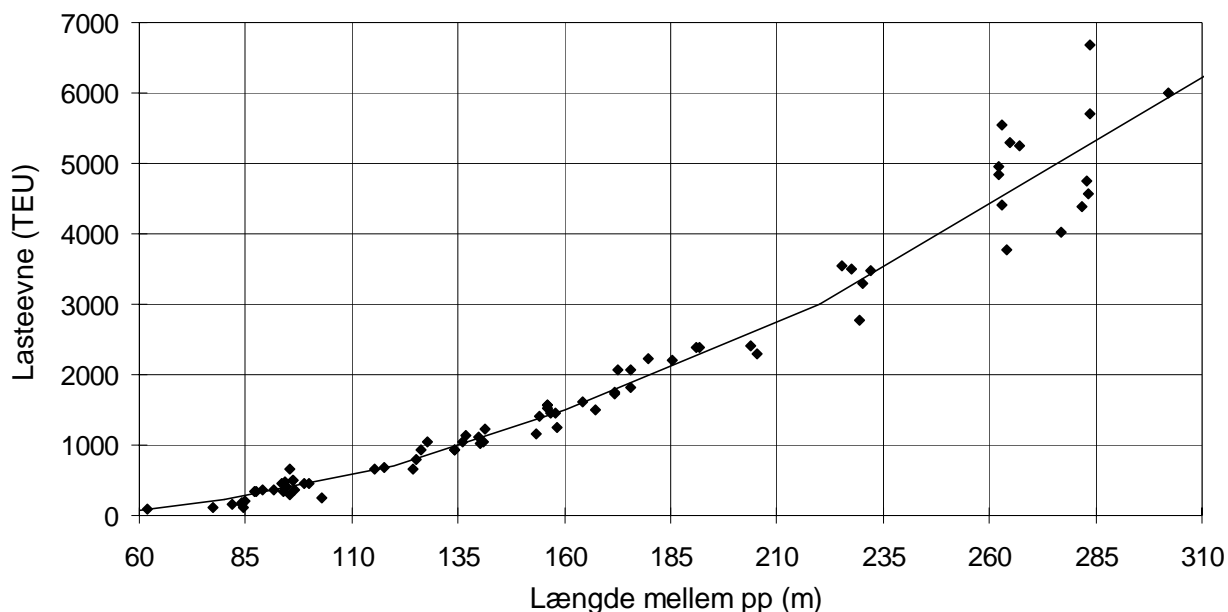


Fig. 2 Sammenhæng mellem skibslængde og lastevne for containerskibe

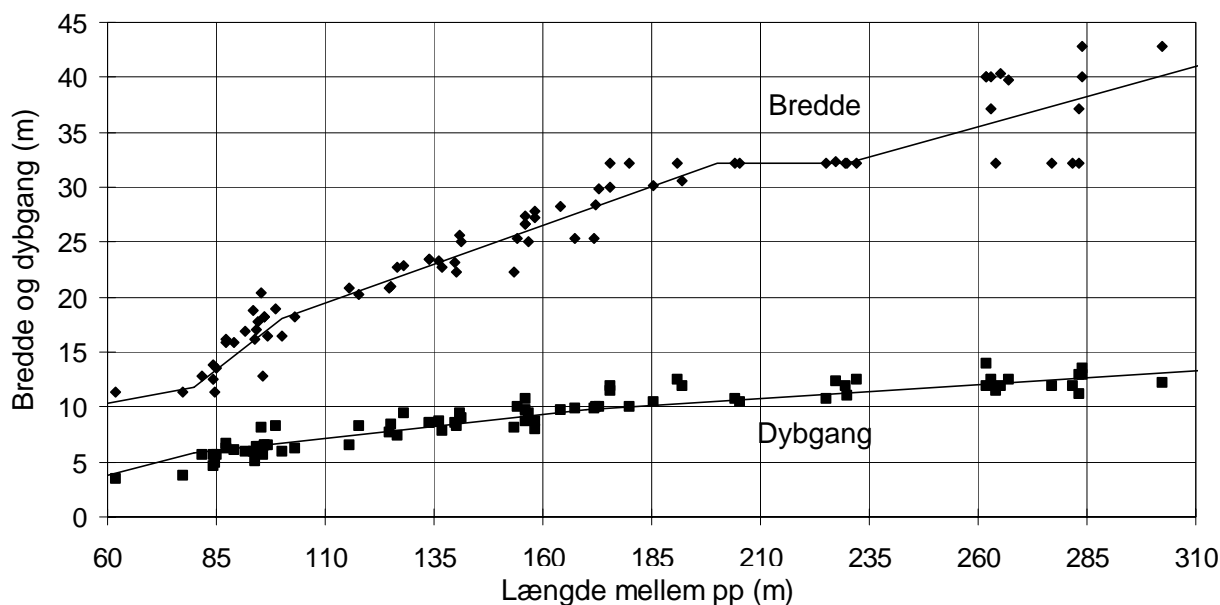


Fig. 3 Sammenhæng mellem skibslængde samt bredde og dybgang for containerskibe

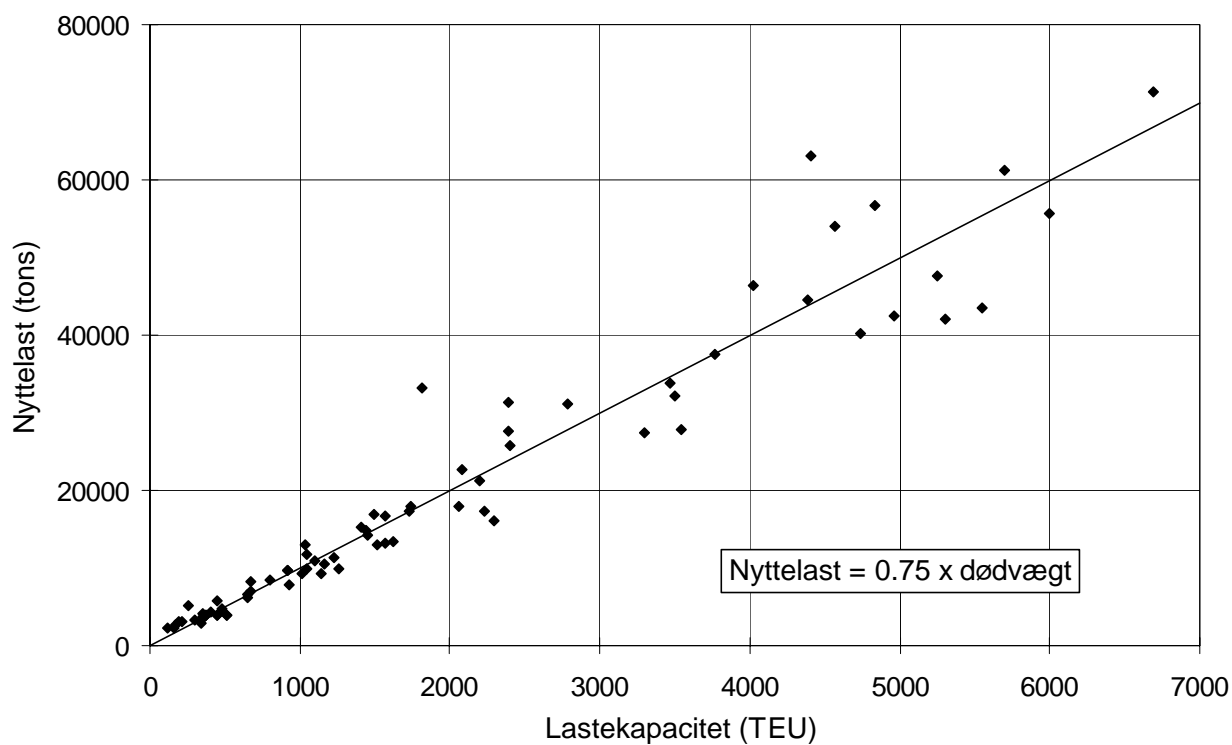


Fig. 4 Sammenhæng mellem lastekapacitet i TEU og nyttelast i tons for containerskibe

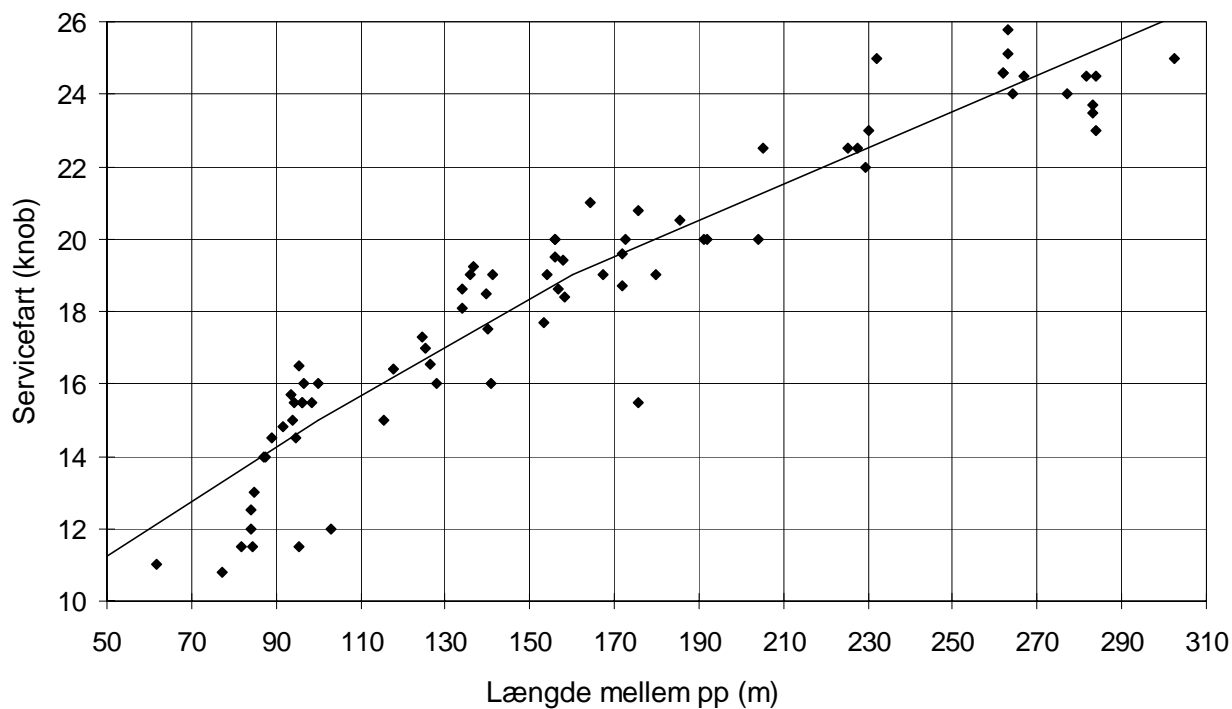


Fig. 5 Sammenhæng mellem skibslængde og servicefart for containerskibe

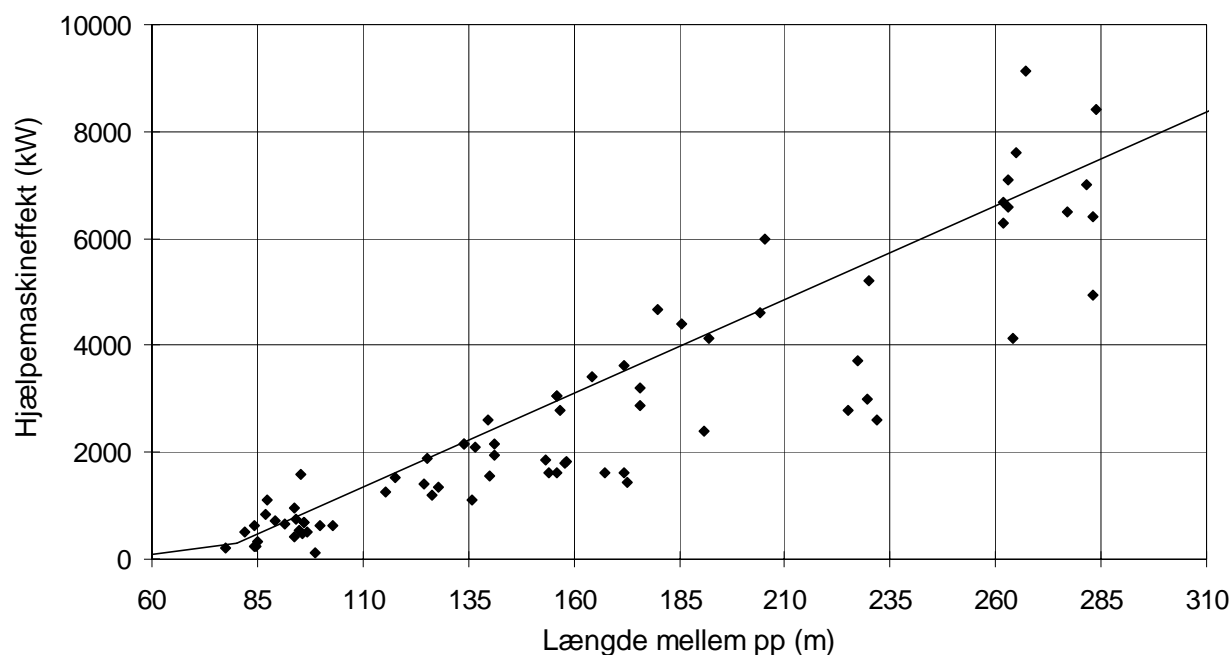


Fig. 6 Sammenhæng mellem skibets længde og den installerede hjælpemaskineffekt for container skibe

BULK CARRIERS (MASSEGODSSKIBE)

Generel beskrivelse

Bulk carriers er skibe, der kan transportere last i bulk dvs. i løs granuleret form. Skibene kaldes undertiden også for massegodsskibe, men oftest benyttes i fagkredse kun den engelske betegnelse bulk carriers.

Disse skibe benyttes primært til transport af korn, malm, kul og lignende produkter i løs form. Skibenes dødvægt varierer fra nogle få tusinde tons og helt op til godt 200.000 tons for de største skibe (fig. 7). Denne skibstype hører således med til nogle af skibsfartens virkelige store og tunge lasttransportører (foruden tankskibe). Da lasten samtidig transporteres i løs form, så den pakkes tæt, kan denne skibstype flytte en meget stor vægt i forhold til dens længde.

De store bulk carriers har en stor bredde og dybgang i forhold til længden (fig. 8), hvilket yderligere er medvirkende til deres store lasteevne. Samtidig er skibene oftest ret fyldige, idet de har en blokkoeficient (se ordforklaring s. 42) på 0,75 – 0,85 i modsætning til containerskibes lavere blokkoeficient på 0,65 – 0,75.

Også for bulk carriers gør den magiske Panmax bredde sig gældende, idet skibe omkring 180 til 240 m typisk har Panmax bredde på 32,2 m (fig. 8). Da bulk carriers ikke har nogen dækslast som containerskibene og derfor sjældent har stabilitetsproblemer, fører de normalt ikke så meget vandballast, når de er lastede. Samtidig er servicefarten for bulk carriers relativ lille, hvilket medfører et forholdsvis lavt effektbehov med deraf følgende lille olieforbrug i forhold til skibets størrelse. Da der således ikke er behov for så store mængde bunkersolie og vandballast, udgør

nyttelasten derfor en relativ stor del af dødvægten, typisk fra ca. 90 % og op til ca. 95 %, med den største procentsats for store bulk carriers over ca. 10.000 tons dødvægt, hvilket er antaget i de udførte grundlæggende modelberegninger.

Servicefart

Som nævnt er servicefarten for bulk carriers relativ lav (fig. 9), hvilket skyldes skibenes store fyldighed i form af en høj blokkoefficient. En højere fart vil kræve uforholdsvist mere maskineffekt og dermed medføre et større olieforbrug. En anden og mere sekundær grund til, at farten for bulk carriers ikke er så høj er, at lasten oftest er en "lavværdilast", hvor fragtpriisen skal holdes på et lavt niveau, hvilket lav fart og dermed lavt olieforbrug er medvirkende til. For bulk carriers varierer farten fra ca. 10 knob til 16 – 17 knob, med størst fart for de længste og dermed største skibe. For samme længde kan farten ofte variere indenfor et interval på +/- 10 % fra middelværdien.

Fremdrivnings- og hjælpemaskineri

De fleste bulk carriers over 10.000 – 20.000 tons dødvægt fremdrives af slow speed motorer, mens hjælpemaskineriet, der benyttes til drift af skibets generatorer, der leverer strøm til forbrug om bord, består af medium speed motorer.

Det viser sig at, der er omtrentlig lineær sammenhæng mellem skibets størrelse (længde mellem pærendikulærer) og den installerede hjælpemaskineffekt (fig. 10). I modelberegningerne er det antaget, at gennemsnitligt kun 1/3 af hjælpemaskineffekten benyttes kontinuerligt, idet det oftest kun er under manøvrering i havn, man benytter høj effekt til at generere strøm til eksempelvis skibets tværpærellere, der benyttes til at bevæge skibets sideværts eller holde det op imod vind og strøm.

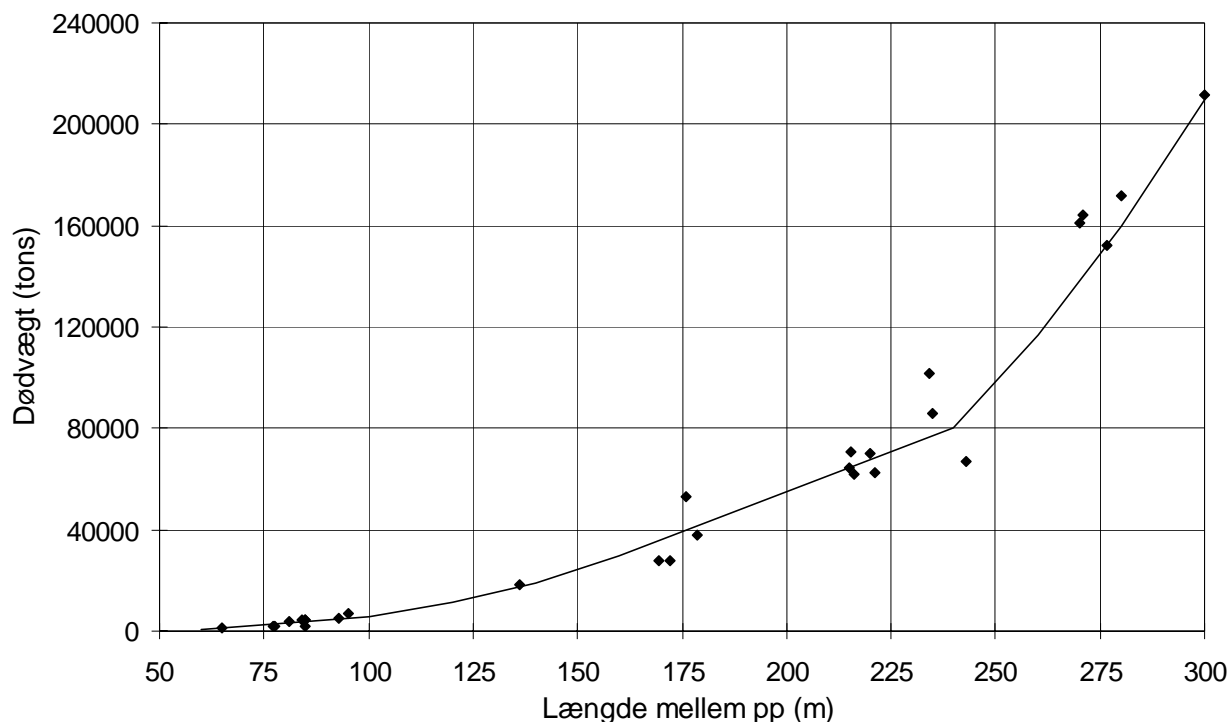


Fig. 7 Sammenhæng mellem skibslængde og dødvægt for bulk carriers

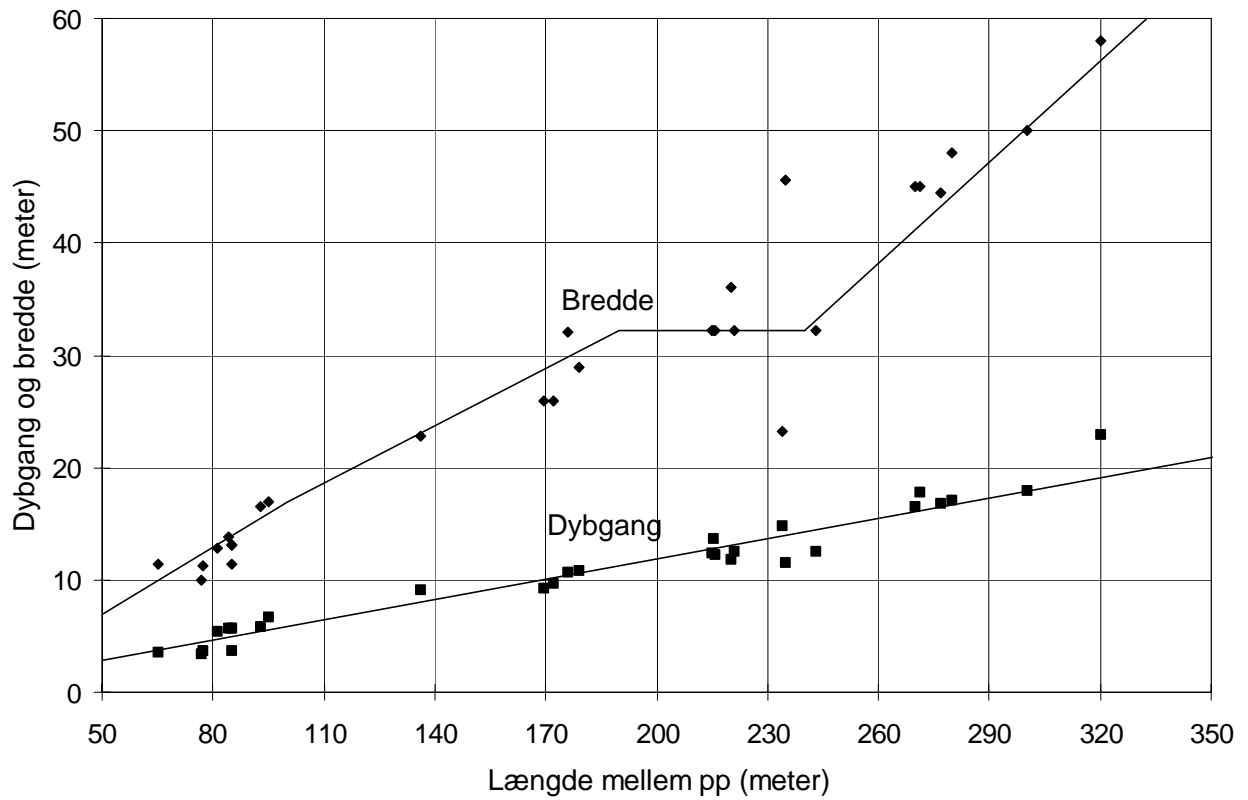


Fig. 8 Sammenhæng mellem skibslængde samt bredde og dybgang for bulk carriers

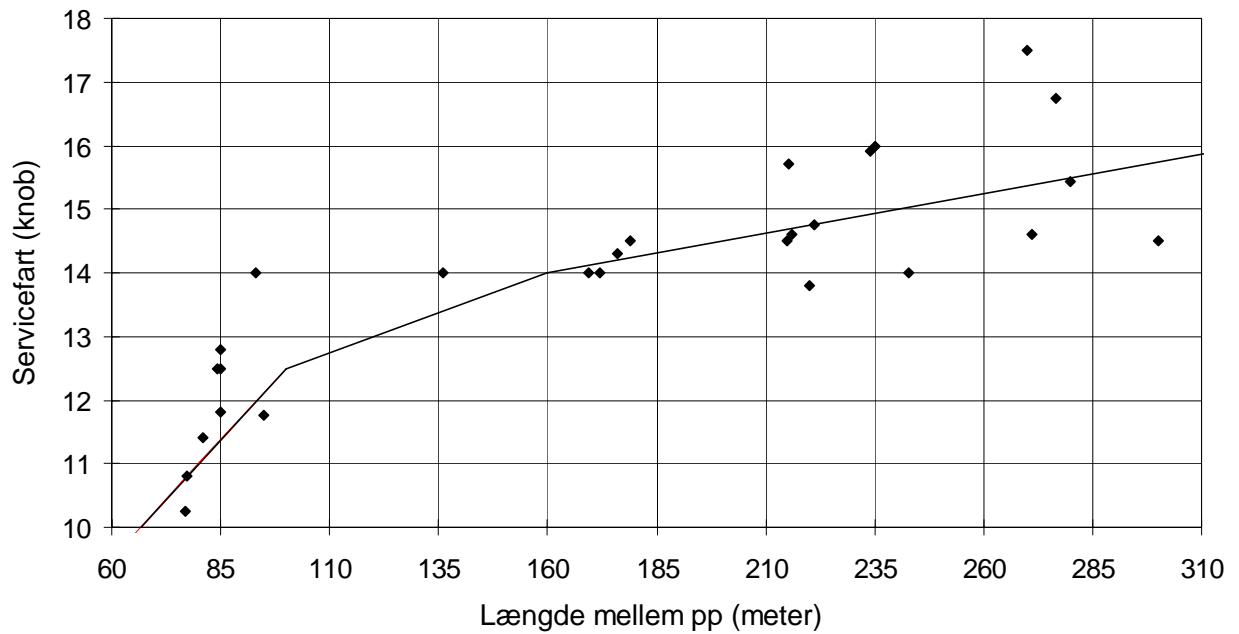


Fig. 9 Sammenhæng mellem skibslængde og servicefart for bulk carriers

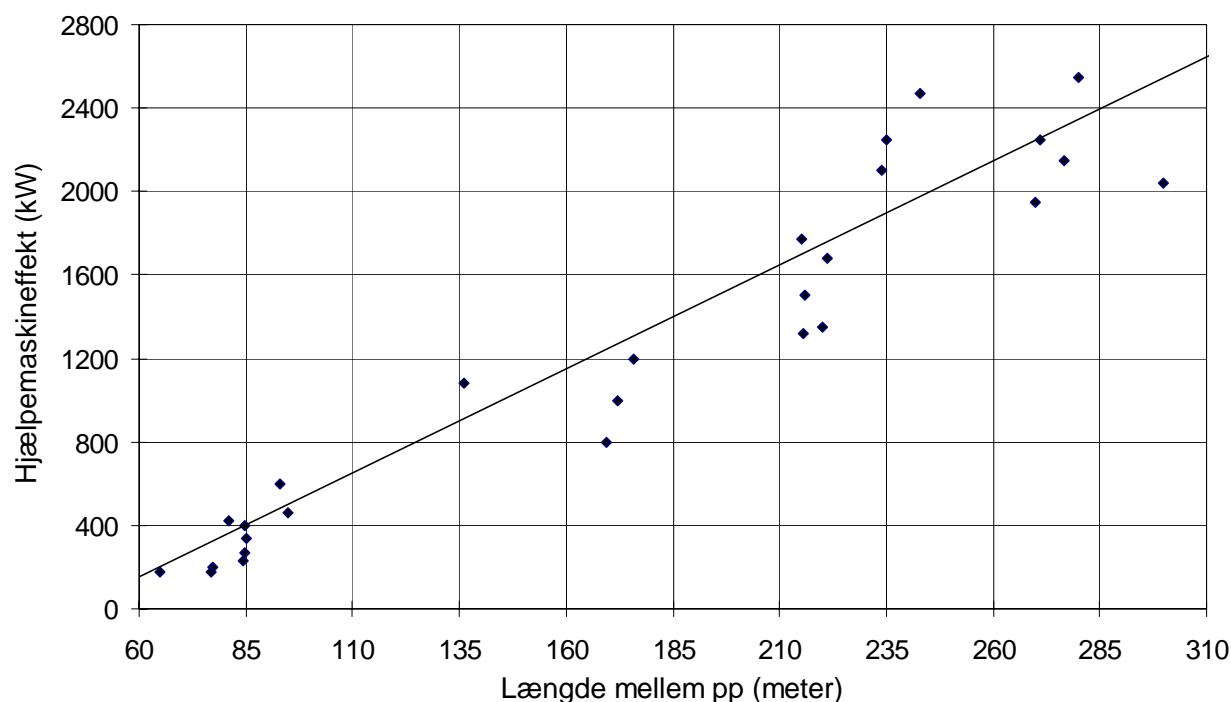


Fig. 10 Sammenhæng mellem skibets længde og den installerede hjælpe-maskineffekt for bulk carriers

RO-RO LASTSKIBE

Generel beskrivelse

Ro-Ro lastskibe benyttes til transport af rullende last dvs. primært lastbiler og løstrailere (Ro-Ro = Roll on - Roll off). Undertiden transporteres også containere på Ro-Ro skibe. Det kan enten gøres ved at containerne transporteres med en almindelig lastbil eller det kan ske ved at transportere containere på såkaldte MAFI-trailere, som er meget lave trailere, der gør det muligt at placere 2 containere ovenpå hinanden. Endelig kan man også placere containerne frit på dækket, hvilket dog sjældent benyttes. Frihøjden på dækket skal for laster med MAFI-trailere være ekstra stor (mindst 6,0 m i forhold til en nødvendig højde på ca. 4,5 m for transport af lastbiler og løstrailere).

Også tunge speciallaste kan som regel transporteres på Ro-Ro skibe, som eksempelvis entreprenørmateriel og militære køretøjer. Nogle få Ro-Ro lastskibe er desuden indrettet som jernbanefærger, dvs. med skinner, så jernbanevogne kan køres ombord.

Ro-Ro lastskibenes primære formål er som nævnt transport af rullende last, men ofte er de udstyret med aptering til 12 passagerer, idet 12 passagerer er det maksimale antal passagerer et lastskib kan medføre, så det stadig klassificeres som lastskib lovgivningsmæssigt.

Indenfor de seneste år har man dog set, at flere og flere Ro-Ro skibe har passagerapting til nogle få hundrede passagerer, dvs. med mulighed for at transportere lastbilchauffører eller "almindelige" passagerer, der måske ikke nødvendigvis er økonomisk basis for at befordre med en konventionel færgerute, men som det i kraft af, at der alligevel sejles på en given rute, kan være

økonomisk attraktivt for rederiet at medtage. Ro-Ro skibe med en sådan mindre passageraptering kaldes undertiden også Ro-Pax færger (For Mols-Liniens konventionelle færger samt Scandlines færgerne ASK og URD benyttes denne betegnelse).

Hovedparten af Ro-Ro lastskibene har en kapacitet på 1500 til 3000 m vognbane (lanemeter), idet der dog også er skibe ned til 1000 lanemeter og foreløbig et par enkelte skibe med mere end 3000 lanemeter (fig. 11). I de kommende år vil man sandsynligvis se flere og flere Ro-Ro skibe med en kapacitet i det øvre område, og det er næppe usandsynligt, at skibe med en lastekapacitet på op til 3500 lanemeter vil vinde indpas indenfor en kortere årrække.

Skibene er normalt indrettet med mulighed for rullende last på 3 dækniveauer:

- 1) I bunden af skibet (på tanktoppen)
- 2) Hoveddækket, dvs. det dæk man kører ind på via landrampe(r) samt
- 3) Vejr-dækket som er det øverste dæk, der kan være mere eller mindre overdækket.

Der er dog også enkelte skibe med op 4 dæksniveauer.

Adgang fra hoveddækket til henholdsvis øverste og nederste dæk sker enten via faste eller bevægelige ramper, der kan løftes, så de lukker vandtæt mellem hvert dæksniveau af hensyn til skibets stabilitet, hvis det får en lækage (lækstabilitet). På nogle enkelte Ro-Ro lastskibe bevæges lasten fra et dæksniveau til et andet med en elevator. Eksempelvis er verdens største skibselevator installeret på jernbanefærgen SKÅNE, der sejler mellem Sverige og Tyskland. Elevatoren kan løfte i alt 816 tons på en samlet sporlængde på 102 m. Færgen har i øvrigt verdens højeste antal lanemeter (3295).

Dødvægt og nyttelast

Ro-Ro lastskibes dødvægt stiger naturligvis med lasteevnen dvs. den samlede længde af vognbaner. Det har vist sig statistisk, at middelværdien for Ro-Ro lastskibenes dødvægt svarer til ca. 4 tons pr. m vognbane (fig. 13). Nyttelasten, udgør oftest ca. 75 pct. af dødvægten, dvs. 3 ton pr. meter vognbane. Denne enhedsvægt er benyttet i de udførte modelberegninger.

Den maksimale tilladte vægt af et lastvognstog på 16-18 m er 40 tons, hvilket svarer til en nyttelast på maks. 2,5 t/m. For en løstrailer på 14 m er maksimalvægten typisk ca. 30 tons svarende til 2,1 t/m. Dette betyder, at Ro-Ro skibe, som er designet til 3 t/m reelt har en overkapacitet, der betyder, at skibets skrogform er lidt for fyldig. Foretager man en nøjere afstemning af dødvægten til netop lastbiler og løstrailere, vil nyttelasten kunne reduceres med ca. 25 pct. svarende til en dødvægt på 3 tons pr. m vognbane. På grund af en slankere skrogform vil olieforbruget kunne nedsættes med 10-15 pct. i forhold til den hidtil gældende praksis. Denne tendens vil nok vinde mere indpas fremover, efterhånden som skibene bliver større og farten dermed øges. Denne udviklingstendens er ikke inkluderet i de udførte beregninger.

Servicefart

Ro-Ro lastskibes servicefart varierer fra 14 -15 knob til 23 - 24 knob, med størst fart for de længste og dermed største skibe. For samme længde kan farten ofte variere indenfor et interval på +/- 15 % fra middelværdien (fig. 14).

Fremdrivningsmaskineri

Langt de fleste Ro-Ro skibe fremdrives af medium speed-motorer, hvilket betyder, at det beregnede energiforbrug er baseret på denne teknologi svarende til et specifikt olieforbrug på 0,19 kg/kW time.

Hjælpemaskineriet består ligeledes af medium speed motorer. Det viser sig at, der er omtrentlig lineær sammenhæng mellem skibets størrelse (længde mellem perpendicularer) og den installerede effekt (fig. 15). I beregningerne er det antaget, at gennemsnitligt kun 1/3 af hjælpemaskineffekten benyttes kontinuerligt.

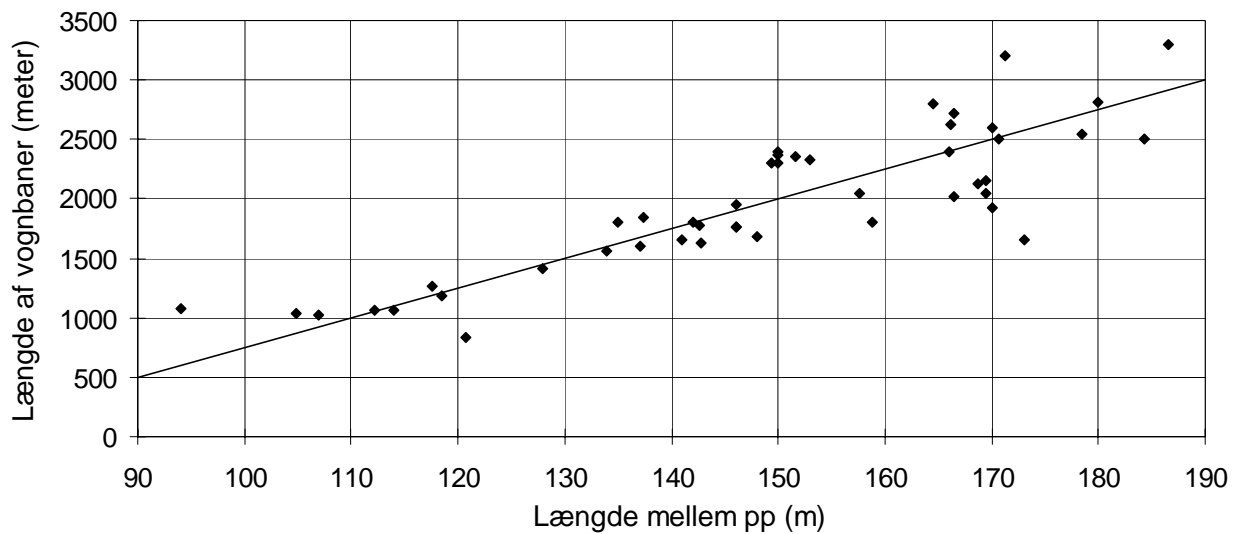


Fig.11 Sammenhæng mellem skibslængde og længde af vognbaner for Ro-Ro lastskibe

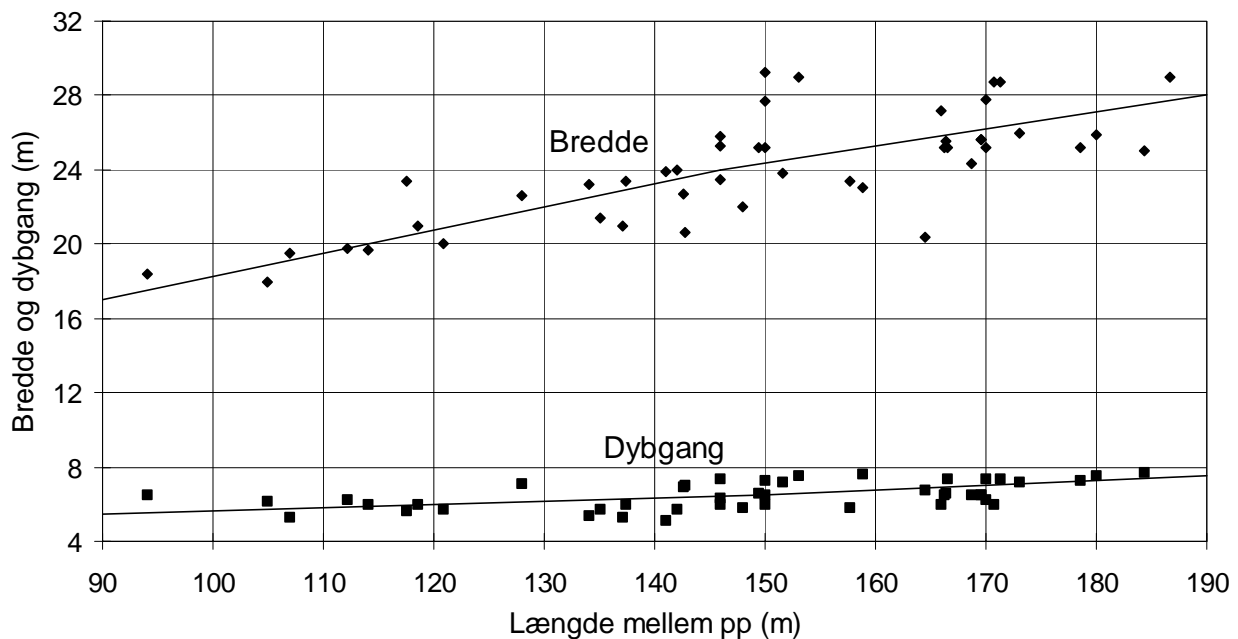


Fig. 12 Sammenhæng mellem skibslængde samt bredde og dybgang for Ro-Ro lastskibe

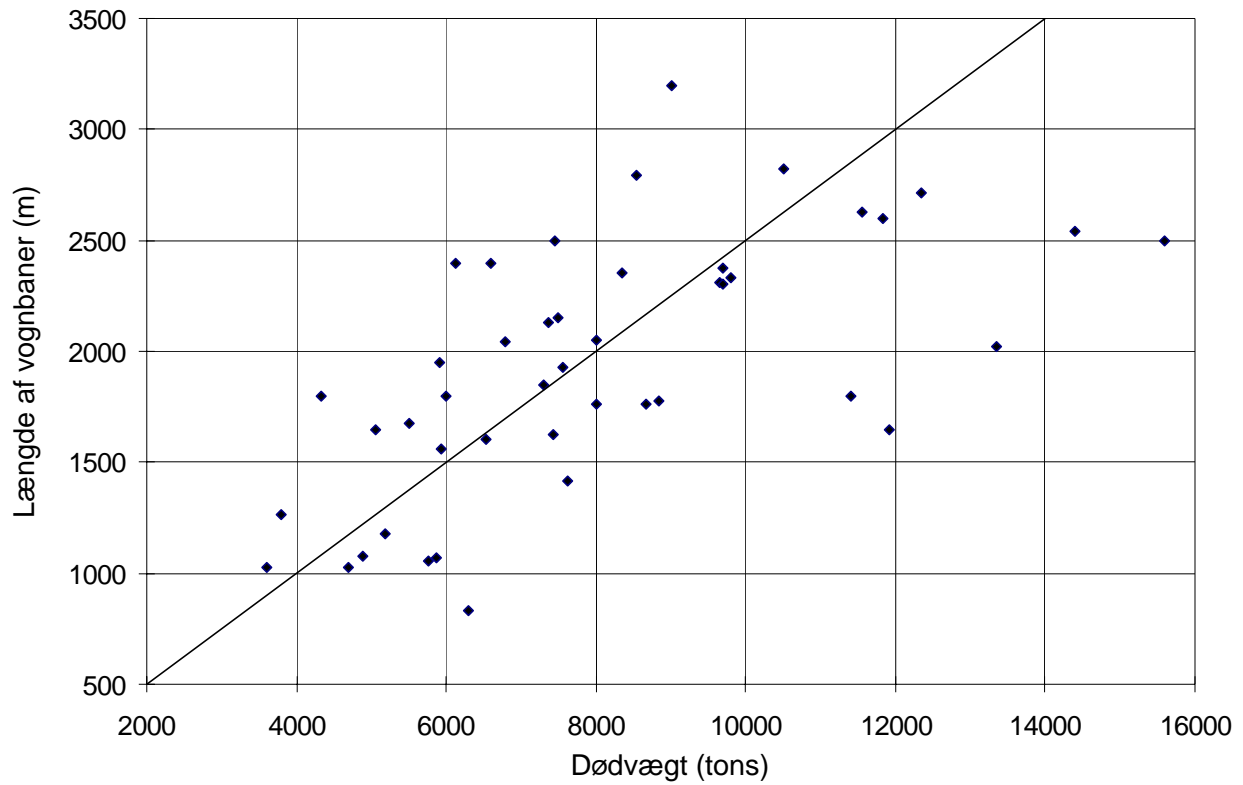


Fig. 13 Sammenhæng mellem dødvægt og længde af vognbaner for Ro-Ro lastskibe

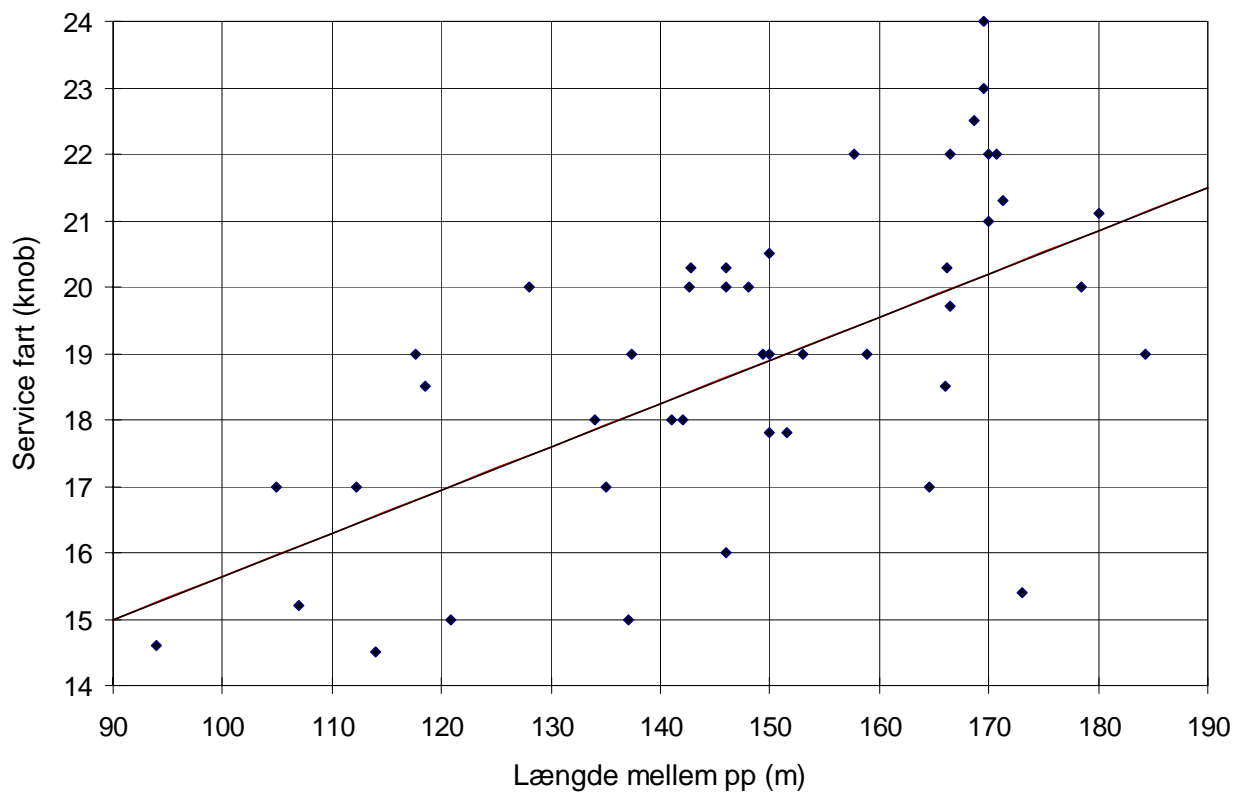


Fig. 14 Sammenhæng mellem skibslængde og servicefart for Ro-Ro lastskibe

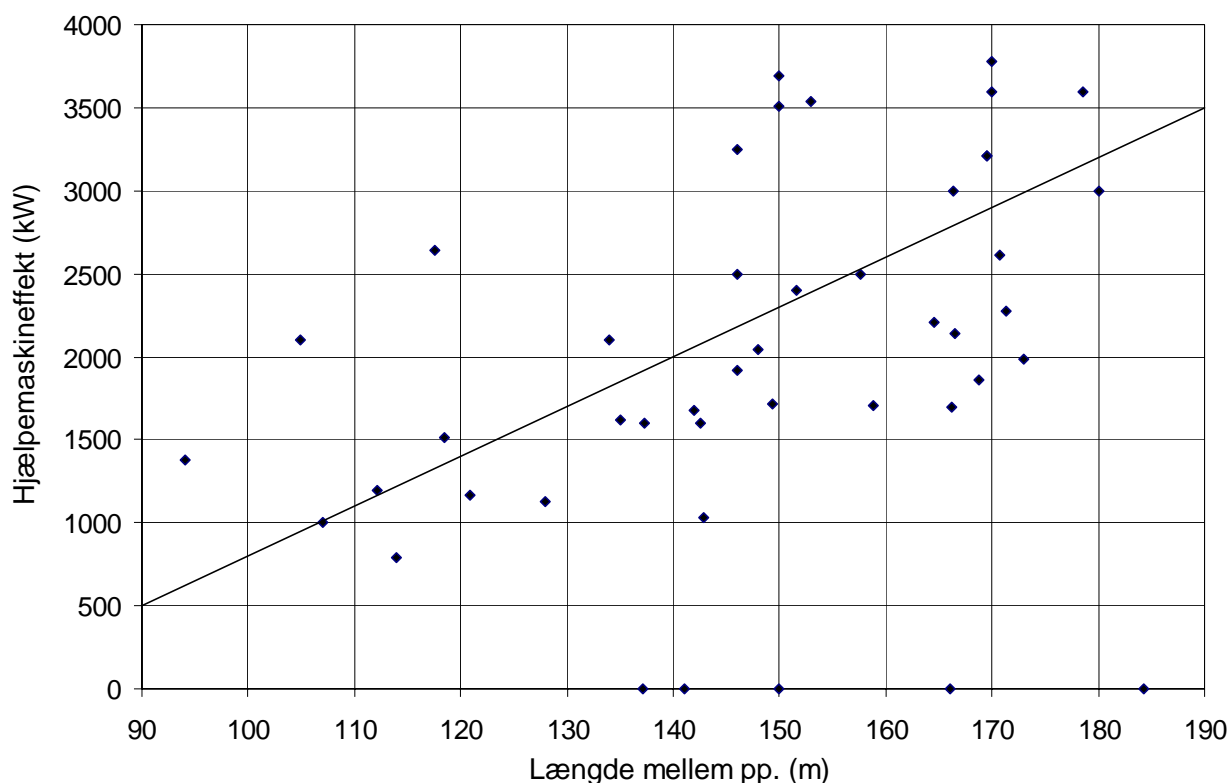


Fig. 15 Sammenhæng mellem skibslængde og hjælpemaskineffekt for Ro-Ro lastskibe

RO-RO PASSAGERSKIBE (KONVENTIONELLE FÆRGER)

Generel beskrivelse

Denne skibstype er hvad man normalt forstår ved en almindelig færge, hvorfor den efterfølgende blot vil blive benævnt færge. At almindelige færger i fagkredse mere specifikt benævnes Ro-Ro passagerskibe skyldes, at disse skibe kan medtage rullende last og passagerer samtidig i modsætning til Ro-Ro lastskibene, der oftest udelukkende kun befordrer last, som tidligere beskrevet i denne rapport.

De fleste Ro-Ro passagerskibe bygges som regel til at kunne medtage såvel personbiler som lastbiler og løstrailere. Når der transporteres lastbiler, skal frihøjden på vogndækket være ca. 4,5 m, mens frihøjden for færger til kun personbiltransport skal være ca. 3 m. Tunge speciallaste kan som regel transporteres på færger, som eksempelvis entreprenørmateriel og militære køretøjer. Nogle få færger er desuden indrettet som jernbanefærger, dvs. med skinner så jernbanevogne kan køres ombord (mange af Scandlines færger var/er af denne type).

En færges primære opgave er som nævnt at transportere såvel biler som passagerer. Færgerne kan derudover opdeles i to kategorier, dagfærger og natfærger. Den førstnævnte type benyttes til relativt korte overfarter med en maksimal overfartstid på 6 – 7 timer. Dagfærgerne har ingen overnatningsfaciliteter til passagererne, dvs. kahytter, mens natfærgerne har overnatningsfaciliteter til passagererne primært i form af kahytter, men også som køjer i større rum.

Opdelingen i dag- og natfærger, betyder, at der for færgerne kan være ret stor spredning størrelsesmæssigt for samme passagerantal (fig. 16). Endvidere er nogle af de større færger konstrueret med op til flere dæk til transport af den rullende last. Herudover kan de enkelte dæk være forsynet med hængedæk, som er nogle bevægelige ekstra dæk, der kan løftes op (stuves) ved transport af lastbiler, mens man ved transport af mange personbiler kan sænke hængedækkene, så der på et enkelt hoveddæk kan føres personbiler i 2 niveauer. Med 2 lastbildæk, vil der herved kunne transporteres personbiler i 4 dæksniveauer, hvilket giver en sådan færge en ganske betydelig personbilkapacitet. Dette medfører, at der for samme skibslængde kan være en ret stor variation i antallet af personbiler, som færgen kan medføre (fig. 17).

De mindste færger har en kapacitet på meget få personbiler (2-3) og enkelte har en kapacitet over 1000 personbiler, mens den mest udprægede maksimalkapacitet ligger på 700 - 900 personbiler. I de kommende år vil man sandsynligvis se flere og flere færger med en personbilkapacitet i det øvre område, dvs. tæt på 1000 personbiler.

Lastekapacitet, dødvægt og nyttelast

Da et Ro-Ro passagerskibs primære opgave er at befordre personbiler, er det naturligt at lade lastekapaciteten i form af antal personbiler være den karakteristiske størrelsesparameter, som færgens længde primært vil afhænge af (fig. 17). Det skal dog også nævnes, at kategoriseringen som dag- og natfærge også kan have en indflydelse på færgens størrelse, men det vil oftest være en indflydelse, der påvirker antallet af dæk, dvs. skibets højde.

En færges dødvægt stiger naturligt med lastekapaciteten (fig. 19), og det har vist sig, at nyttelasten dvs. vægten af biler og passagerer, udgør ca. 60 pct. af dødvægten.

Da langt de fleste færger som tidligere nævnt er i stand til at medføre lastbiler og løstrailere er der også en naturlig sammenhæng mellem personbilkapaciteten og den samlede længde af lastbilvognbaner (fig. 20). Det har vist sig statistisk, at middelværdien for færgernes nyttelast svarer til 2 - 3 tons pr. m vognbane (fig. 21). De viste sammenhænge i fig. 17, 20 og 21 resulterer i den viste relation mellem skibslængden og dødvægten i fig. 19.

Servicefart

Færgernes servicefart varierer fra lidt under 10 knob for de helt små færger op til 25 – 26 knob for de største færger. For samme længde kan farten ofte variere indenfor et interval på +/- 15 % fra middelværdien (fig. 22).

Fremdrivningsmaskineri

Langt de fleste Ro-Ro passagerskibe fremdrives af medium speed-motorer, hvilket også er tilfældet for hjælpemaskineriet. Det viser sig at, der er omtrentlig lineær sammenhæng mellem skibets størrelse (længde mellem perpendicularer) og den installerede effekt (fig. 23). I beregningerne er det antaget, at gennemsnitligt kun halvdelen af hjælpemaskineffekten benyttes kontinuerligt.

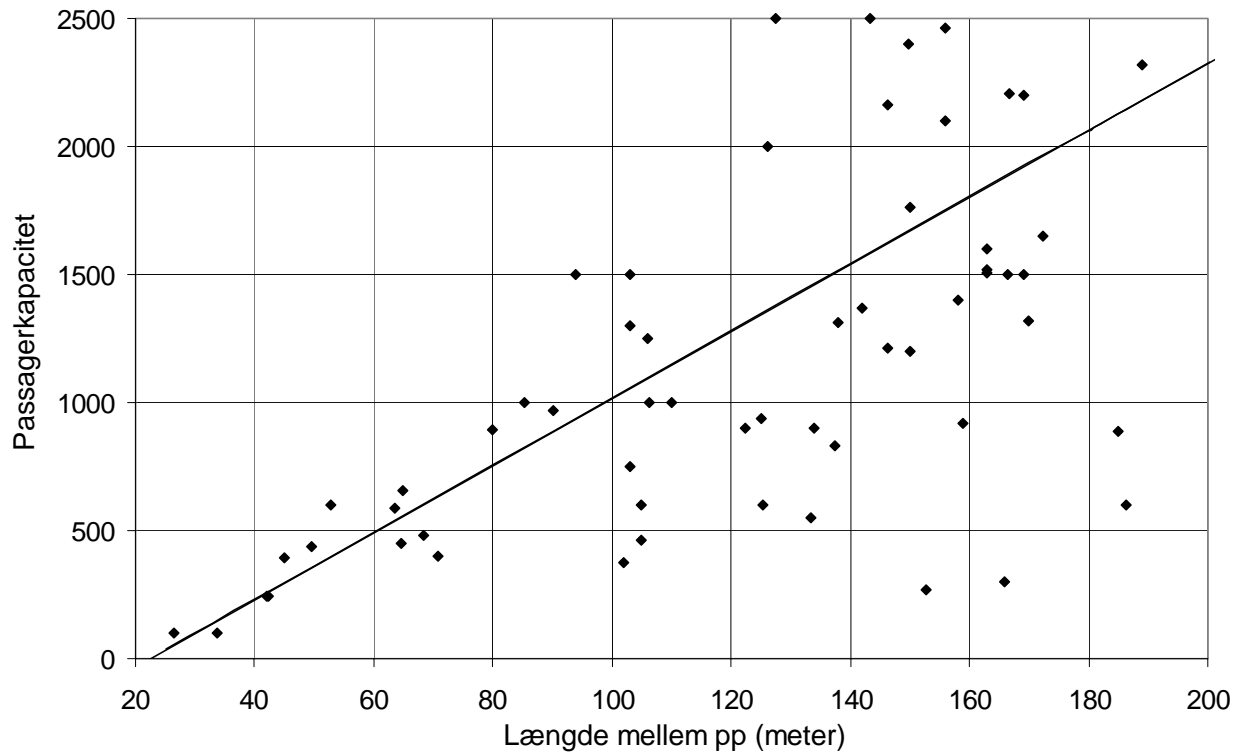


Fig. 16 Sammenhæng mellem skibslængde og passagerkapacitet for almindelige færger

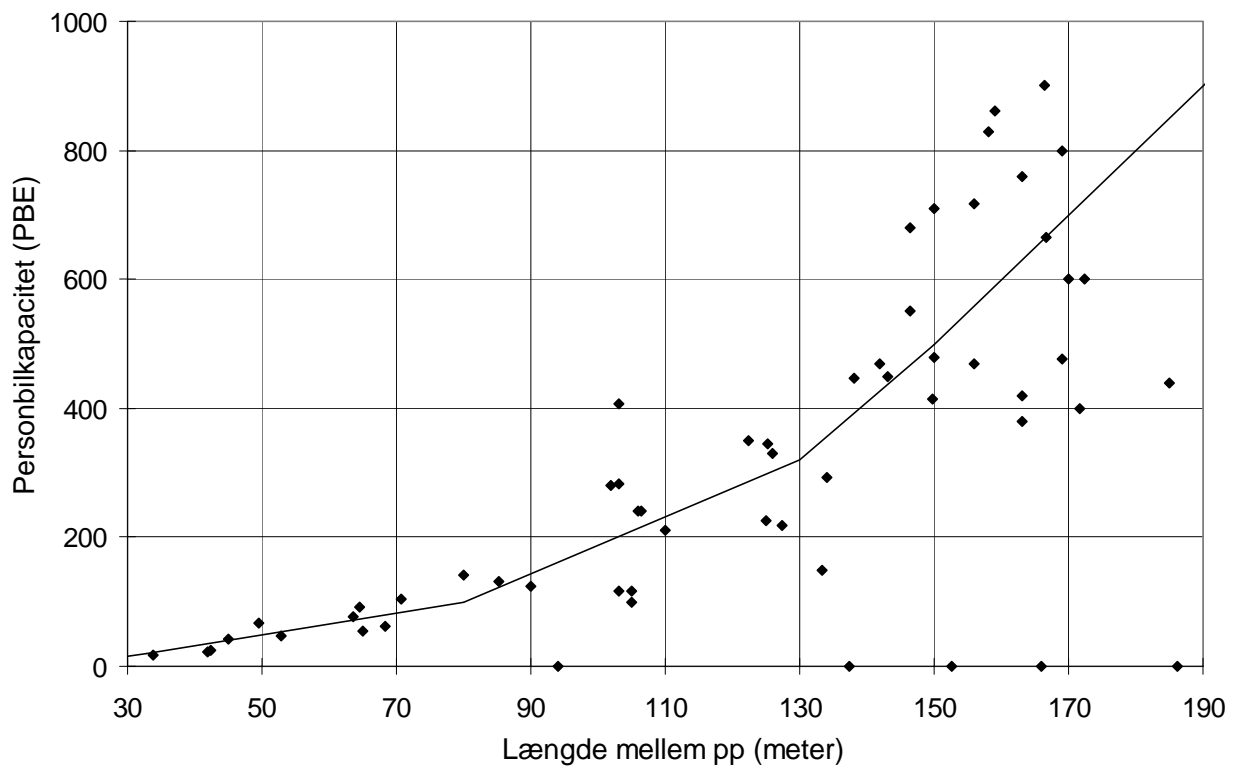


Fig. 17 Sammenhæng mellem skibslængde for personbilkapacitet for almindelige færger

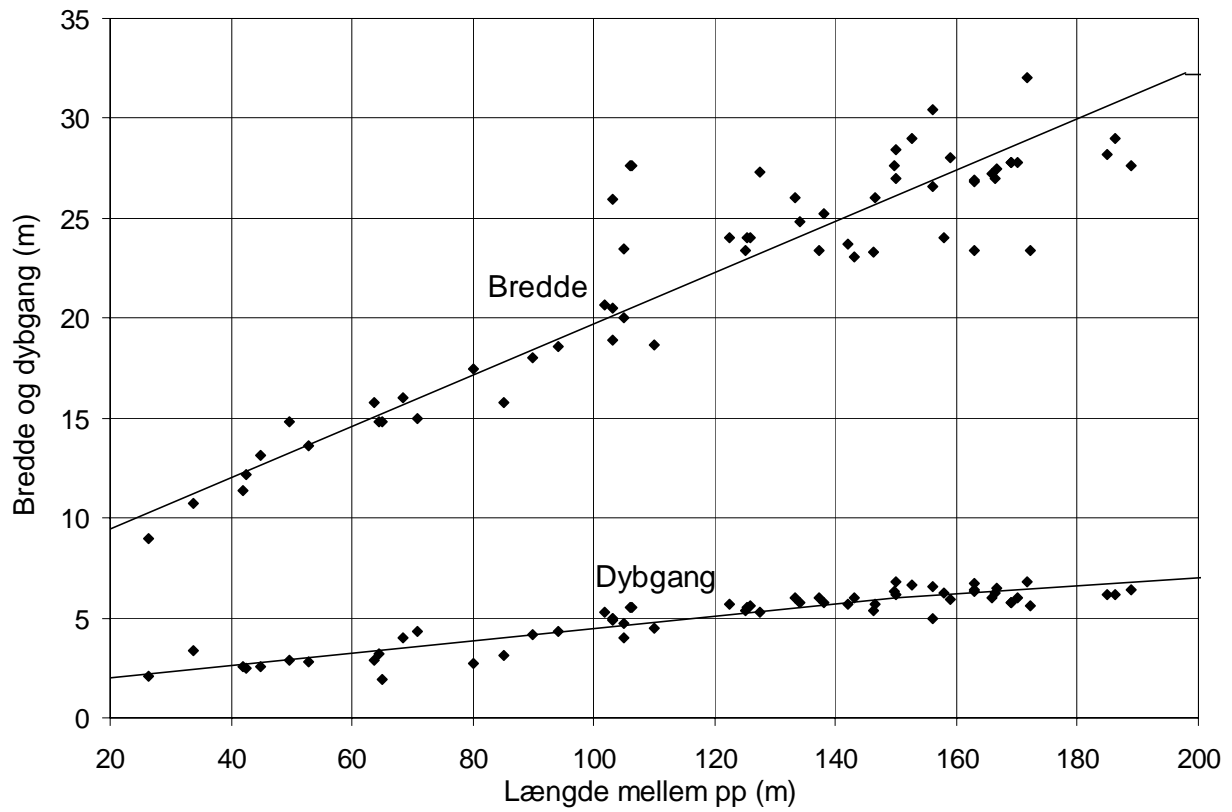


Fig. 18 Sammenhæng mellem skibslængde samt bredde og dybgang for almindelige færger

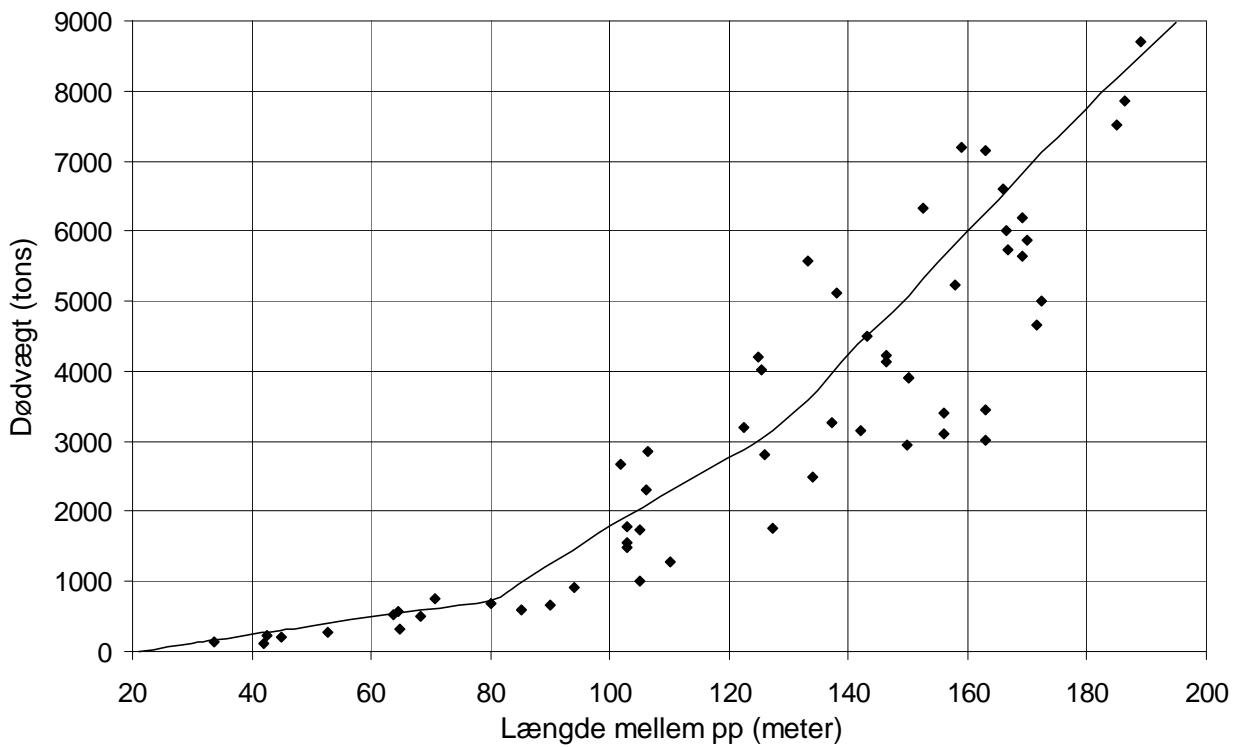


Fig. 19 Sammenhæng mellem skibslængde og dødvægt for almindelige færger

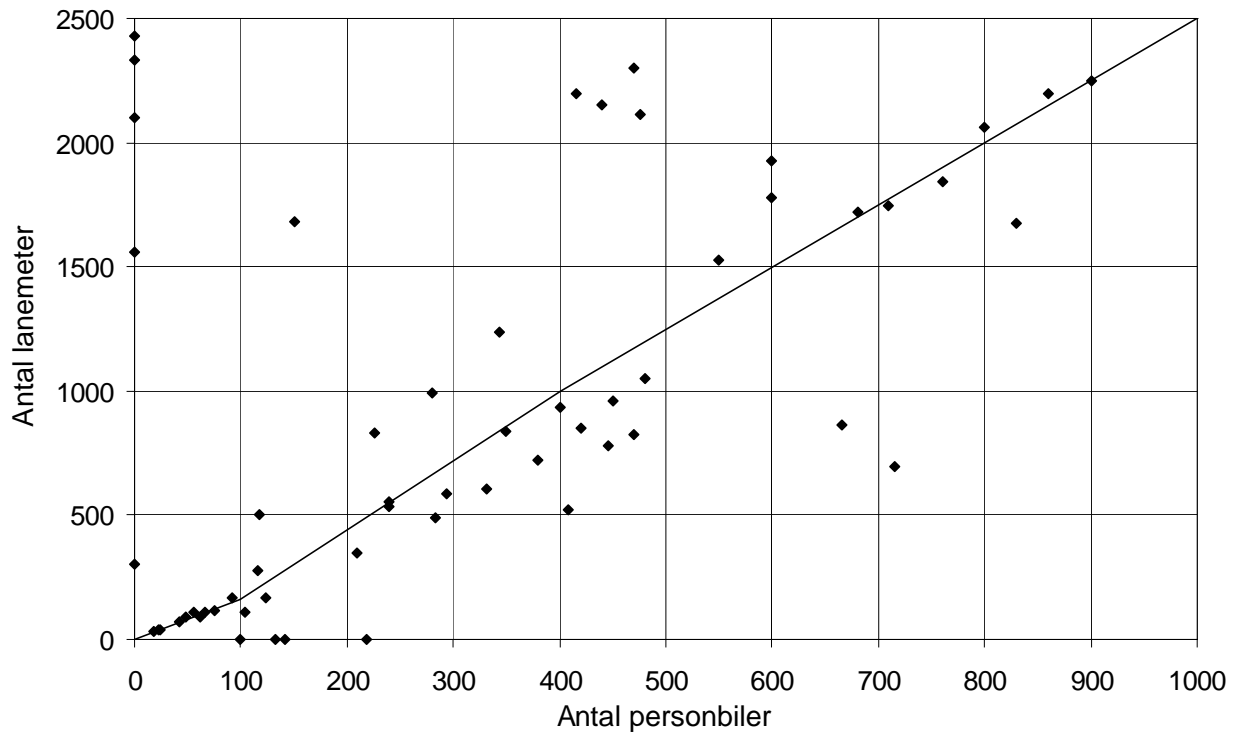


Fig. 20 Sammenhæng mellem personbilkapacitet og længde af vognbaner til lastbiler/løstrailere for almindelige færger

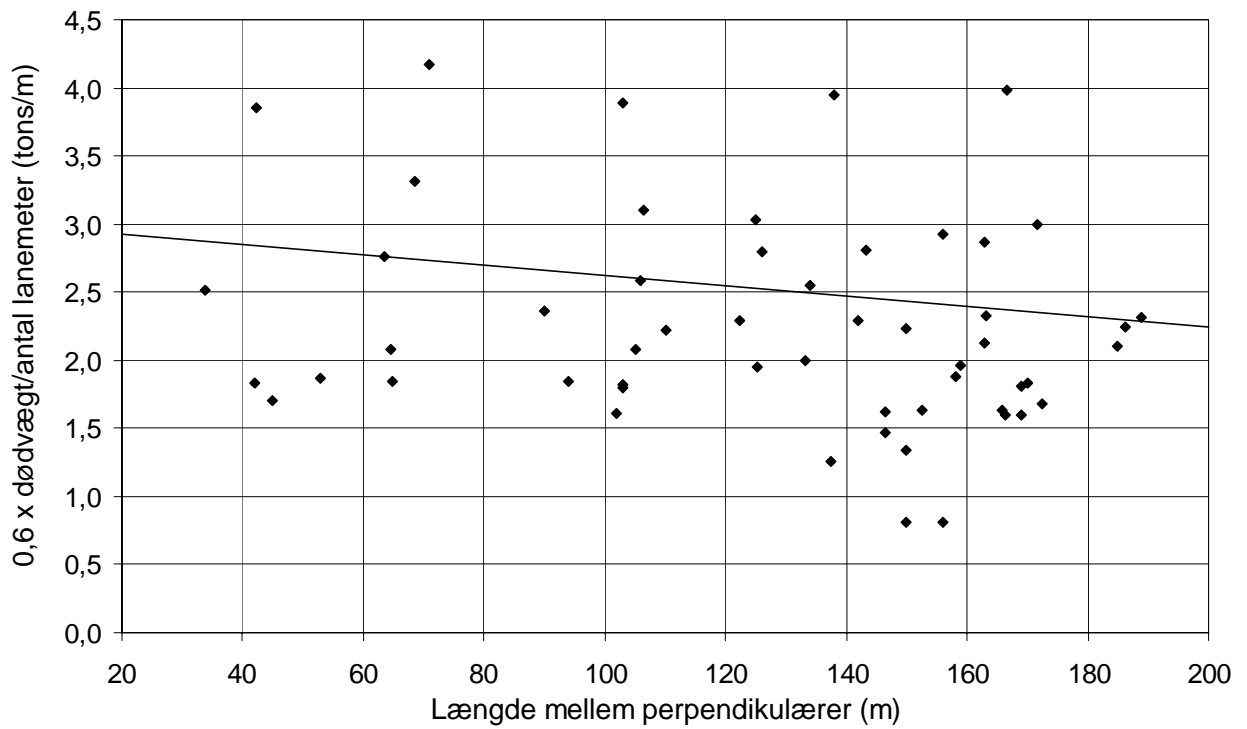


Fig. 21 Sammenhæng mellem skibslængde og vægt pr. m vognbane til lastbiler for almindelige færger

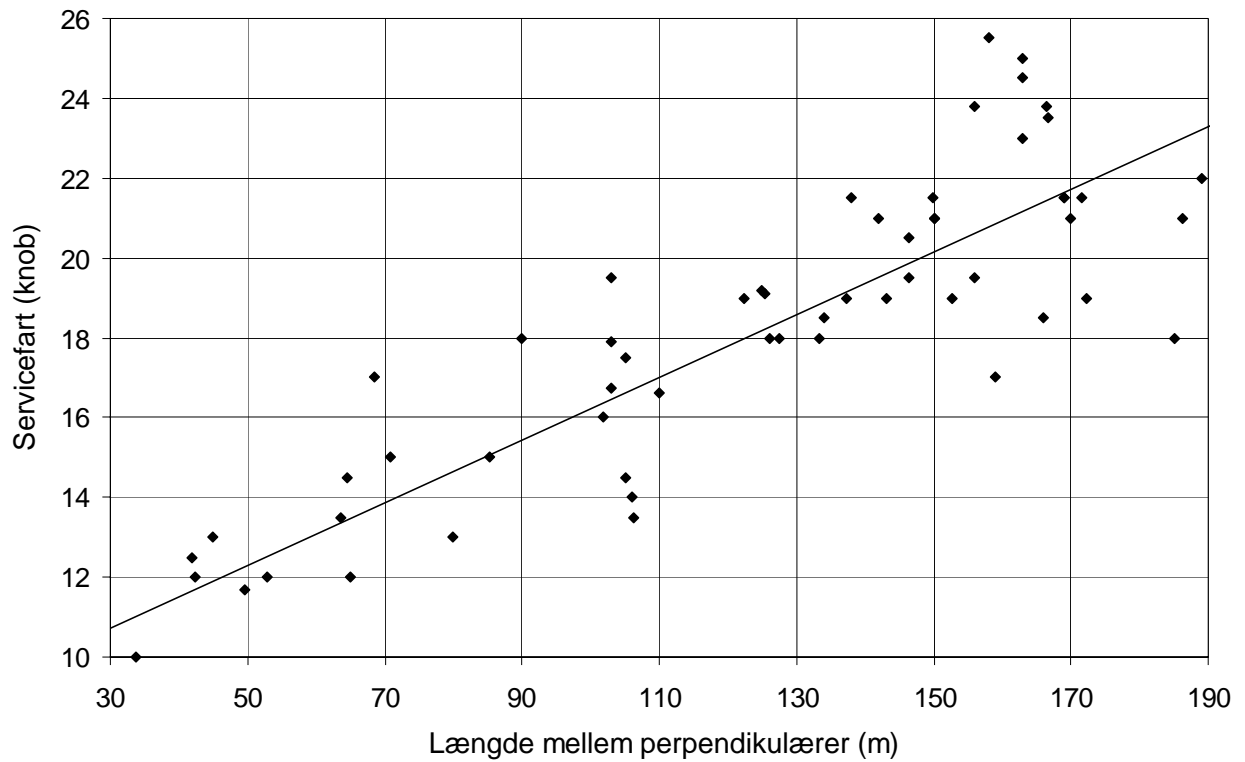


Fig. 22 Sammenhæng mellem skibslængde og servicefart for almindelige færger

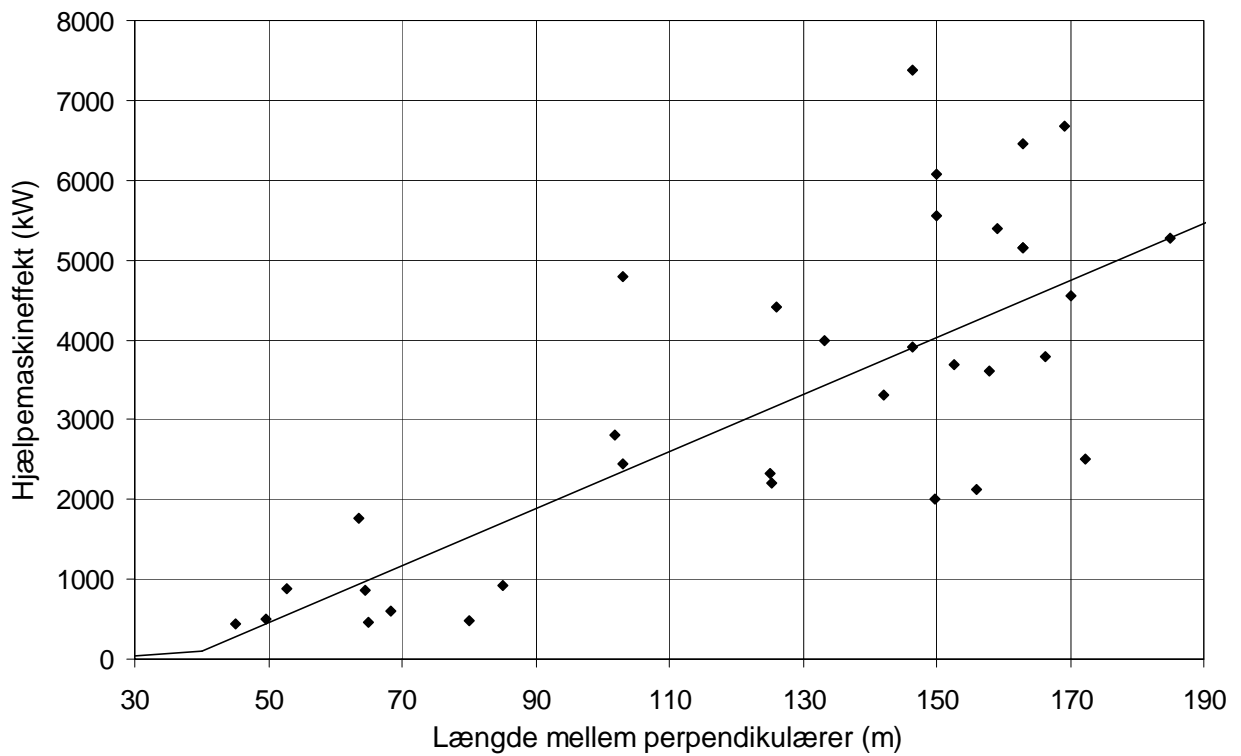


Fig. 23 Sammenhæng mellem skibslængde og hjælpemaskineffekt for almindelige færger

HURTIGFÆRGER

Lovgivningsmæssig udvikling

Inden for de sidste 4 år er antallet af bilførende hurtigfærger steget ca. 420 %, jvfr. indledningen, s.1, og der tegner sig nu et mere detaljeret billede af udviklingen end for blot få år siden. Der er gennem de senere år indhøstet en række erfaringer (ofte dyrekøbte) med hensyn til såvel konstruktion som drift og vedligehold af disse skibe, og disse erfaringer har en afsmittende indvirkning på de hurtigfærger, der fortløbende bygges. Samtidig sker der også en lovgivningsmæssig udvikling i relation til hurtigfærgerne, idet FN's søfartsorganisation IMO er i gang med at revidere det omfattende regelværk, der gælder for disse skibe, nemlig den såkaldte HSC kode (ref. 8), der trådte i kraft 1. januar 1996. Samtlige danske bilførende hurtigfærger er konstrueret og godkendt i henhold til HSC-koden, da dansk national lovgivning for disse fartøjer er identisk med den internationale lovgivning, som HSC-koden udgør.

HSC kodens revision forventes afsluttet omkring 2000, med en formodet ikrafttrædelse et par år senere. Revisionen omfatter bl.a. de stabilitetskrav, der stilles til færgerne i tilfælde af skade på skroget, hvorved vand kan trænge ind i skibet (lækstabilitet). Reglerne vil blive skærpet ret drastisk, og den tendens, der er set med en række af de hurtigfærger, som specielt er bygget i Italien, hvor man har en lang garage i bunden af skibet til biler, vil med stor sandsynligvis ikke fortsætte, som situationen tegner sig i øjeblikket under regelrevisionen. Det kan i øvrigt nævnes, at Danmark deltager særdeles aktivt i IMO's regelarbejde vedr. HSC-kodens revision sammen med bl.a. Australien, som er verdens førende nation med hensyn til bygning af hurtige katamaranfærger.

Ud over indflydelsen som følge af ændrede internationale regler, er der i Danmark indført en helt speciel miljølovgivning for hurtigfærger, som trådte i kraft den 23. oktober 1998 (ref. 9). Disse miljøregler udgør verdens mest restriktive miljølovgivning for hurtigfærger, hvilket gør, at Danmark på internationalt plan klart indtager en særstilling, som bevirker, at en række andre lande nøje følger udviklingen i Danmark på dette felt.

Lovgivningen blev til på baggrund af, at regeringen i 1996 nedsatte et såkaldt hurtigfærgeudvalg, der på 3 - 4 måneder skulle kulegrave, de miljøproblemer, som hurtigfærgerne gav anledning til. Udvalget færdiggjorde deres rapport i februar 1997 med en række forslag til regulering af hurtigfærgernes konstruktion og sejladsmønster, så de ikke påvirker miljøet mere end de konventionelle færger.

Alle eksisterende hurtigfærger skal ifølge de nye regler miljøgodkendes, og ingen ny færgerute kan i dag etableres i Danmark eller til og fra Danmark, før der foreligger en miljøgodkendelse af ruten, dvs. godkendelse af såvel skib som selve sejlruten.

Et af de meget væsentlige punkter i miljølovgivningen er kravene til den maksimale støj, disse fartøjer må udsende. Kravene betyder med stor sandsynlighed, at kun hurtigfærger, der allerede fra konstruktionsstadiet er designet til de danske særregler, fremover vil kunne komme til at sejle i Danmark. Færger, som ikke fra begyndelsen er konstrueret til disse regler vil oftest skulle ombygges, i de fleste tilfælde ved montage af ekstra eller nye lyddæmpere, hvilket ofte viser sig teknisk vanskeligt, på grund af meget begrænsede pladsforhold i maskinrummene på disse skibe.

Enkeltskrogsfærger kontra katamaranfærger

Som allerede påpeget i rapporten "Nye færgetyper", kan de bilførende hurtigfærger opdeles i to typer, nemlig enkeltskrogsfartøjer og katamaranfartøjer med to skrog. Hovedparten (72 %) af de

bilførende hurtigfærger er katamaranfærger, hvilket skyldes, at disse byder på nogle fordele i forhold til enkeltskrogsfartøjerne. De væsentlige fordele er følgende:

- 1) På en katamaranfærge kan man opnå et meget regulært rektangulært bildæk layout, med mulighed for lastning og losning i flere vognbaner ad gangen, hvilket i forhold til enkeltskrogsfærgerne giver korte havnetider, hvilket har stor betydning for relativt korte sejlruiter.
- 2) Katamaranfærger vil formodentlig have nemmere ved at opfylde de nye skærpede lækstabilitetskrav i forhold til enkeltskrogsfartøjerne.
- 3) Som det efterfølgende vil fremgå af denne rapport, kan der for samme energiforbrug pr. bil pr. km opnås en større fart for en katamaranfærge end for en enkeltskrogsfærge af samme størrelse.

Ovennævnte fordele er væsentlige for valget af færgetype, men katamaranfærgerne har også visse ulemper, hvilket selvfølgelig er grunden til, at der stadig bygges enkeltskrogsfærger. Ulemperne er bl.a. at en katamaranfærge altid skal have mindst to maskinrum, et i hvert skrog. Pladsforholdene i katamaranfærgernes maskinrum er ofte meget trange, hvilket kan give ulemper i forbindelse med installation af bl.a. lyddæmpere, som tidligere påpeget. Et katamaranskrog er vanskeligt at bygge på grund af vanskelige tilkomstforhold for skibsværftsarbejderne i de meget slanke skibsskrog (specielt helt forude i skibet). Dette vanskeliggør også evt. reparation af denne skibstype.

I det efterfølgende vil hovedparametrene for de to bilførende hurtigfærgetyper blive gennemgået på basis af indsamlet statistisk materiale for de fleste af de færger, der til dato er bygget af den pågældende type.

HURTIGE BILFØRENDE ENKELTSKROGSFÆRGER

Personbilkapacitet

Hovedparten af de bilførende enkeltskrogsfærger har en kapacitet på ca. 150 personbiler, mens nogle enkelte færger har en kapacitet på 240 og helt op til 460 personbilenheder (fig. 24). Sidstnævnte meget høje kapacitet opnås bl.a. ved brug af et lavtliggende bildæk (garage), der som omtalt næppe vil kunne tillades i fremtiden. Endvidere opnås den høje kapacitet ved, at de personbilenheder, som det italienske byggeværft har projekteret de pågældende skibe til, er ca. 20 cm smallere, end hvad der eksempelvis kan accepteres af danskere redere og søfartsmyndigheder. Alt i alt betyder dette, at den reelle kapacitet på 460 bilenheder reduceres med ca. 100 personbilenheder, når det lavtliggende dæk fraregnes og når der foretages en omregning til danske standarder med hensyn til personbilmodulet, som iflg. danske forhold bør være ca. 4,5 x 2,25 m, når mellemrum mellem bilerne medregnes.

Nyttelast og dødvægt

En analyse af forholdene vedr. nyttelast og dødvægt viser, at nyttelasten for såvel enkeltskrogsfærger som katamaraner er ca. 80 % af dødvægten. Endvidere viser analysen, at nyttelasten for bilførende enkeltskrogsfærger ligger fra 1,5 tons til ca. 2,5 tons pr. personbil, hvorfor der i analyserne til udviklingen af TEMA modellen for enkeltskrogsfærger er benyttet en standardværdi på 2 tons pr. bil (nyttelast), som giver den lineære sammenhæng mellem bilkapacitet og dødvægt, der er vist i fig. 26 (2,5 tons dødvægt pr. personbil).

Fart

En analyse af sammenhængen mellem skibsstørrelse og farten ved fuld last for hurtige enkeltskrogsfærger viser, at farten generelt øges med længden, som for alle andre skibstyper (fig. 29). Samtidig viser analysen også, at der for samme skibslængde kan være en meget stor spredning i farten, hvilket skyldes store individuelle forskelle mellem de enkelte fartøjer. Det skal dog ikke udelukkes, at netop fartoplysningerne fra værfterne, som bl.a. denne analyse bygger på, i mangel af bedre, i nogle tilfælde kan være for optimistiske, idet det skal erindres, at netop en opgivet høj fart har en vis reklameværdi for det pågældende fartøj.

Et sidste forhold, der specielt for hurtigfærger har indflydelse på farten, er at disse fartøjers fart øges, når de sejler på lav vanddybde i modsætning til, hvad der gælder for konventionelle langsomme færger og i øvrigt alle andre skibe, der sejler ved en mere moderat fart, hvilket senere vil blive beskrevet på side 35 og 39. At hurtigfærgernes fart øges på lav vanddybde skyldes et specielt hydrodynamisk forhold, idet skibene ved høj fart sejler i det såkaldte overkritiske område (en parallel til fænomenet der opstår, når et fly bryder lydturen). I det overkritiske område kan ved vanddybder på 10 – 15 m ofte ses en fartforøgelse på 2 – 3 knob i forhold til farten på dybt vand. Med dette forhold i betragtning kan det ikke udelukkes, at nogle af de angivne farter netop relaterer sig til lav vanddybde, hvilket giver den store spredning.

Dette forhold giver hurtigfærgerne en fordel i forhold til de konventionelle færger, der ved samme vanddybde vil få reduceret deres fart af samme størrelsesorden, som hurtigfærgernes fartgevinst.

Hjælpemaskineffekt

Som for alle andre skibstyper øges hjælpemaskineffekten med skibsstørrelsen og det har vist sig, at den installerede hjælpemaskineffekt er ca. 4 % af hovedmotorernes effekt dvs. fremdrivningseffekten. I modelberegningerne er det antaget, at halvdelen af denne effekt benyttes kontinuerligt, dvs. 2 % af fremdrivningseffekten medgår til eksterne energiforbrug (lys, varme og ventilation).

Forskel i maskinvægt for henholdsvis gasturbiner og dieselmotorer

Gasturbiner er kendetegnet ved en meget lav vægt i forhold deres effekt, dvs. de er meget effektintensive, hvilket selvfølgelig også har givet dem deres enerådende placering i flyindustrien. Denne klare vægtmæssige fordel kan også udnyttes i hurtigfærgeindustrien ved at benytte gasturbiner til fremdrivning af hurtigfærger, idet en vægtreduktion for disse skibe har en gunstig indflydelse på den nødvendige fremdrivningseffekt, da maskinvægten for disse skibe udgør en relativ større andel af den samlede skibsvægt end for konventionelle skibe. I den benyttede beregningsmodel og dermed de for TEMA modellens grundlæggende beregninger er der netop taget hensyn til dette forhold.

Af fig. 30 og 36 fremgår, hvilken reduktion af maskinvægten, der kan opnås ved at anvende gasturbiner i stedet for konventionelle medium speed dieselmotorer til fremdrivning af henholdsvis hurtige enkeltskrogsfærger og hurtige katamaranfærger. Diagrammerne er udarbejdet på basis af nogle rederiers konkrete undersøgelser samt på basis af nogle publicerede beregningsmetoder og data (ref. 10 og 11). Vægtreduktionen svarer til knap 10 % af skibets displacement, hvilket reducerer den installerede effekt tilsvarende med knap 10 %, gældende for såvel enkeltskrogsfartøjer som katamaraner. Da imidlertid gasturbiner forbruger ca. 20 % mere olie pr. kW time end dieselmotorer, vil et fartøj fremdrevet med gasturbiner forbruge godt 10 pct. mere

brændstof end et tilsvarende fartøj fremdrevet med dieselmaskineri, hvilket også vil blive præsenteret senere i denne rapport.

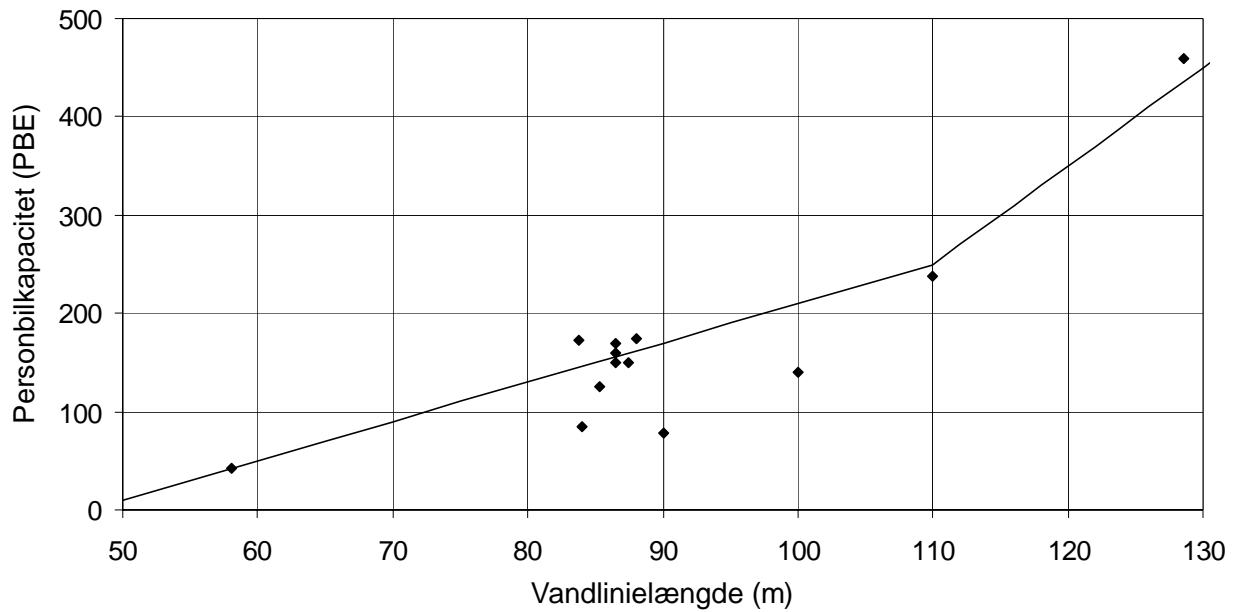


Fig. 24 Sammenhæng mellem skibslængde og bilkapacitet for hurtige bilførende enkeltskrogs færger

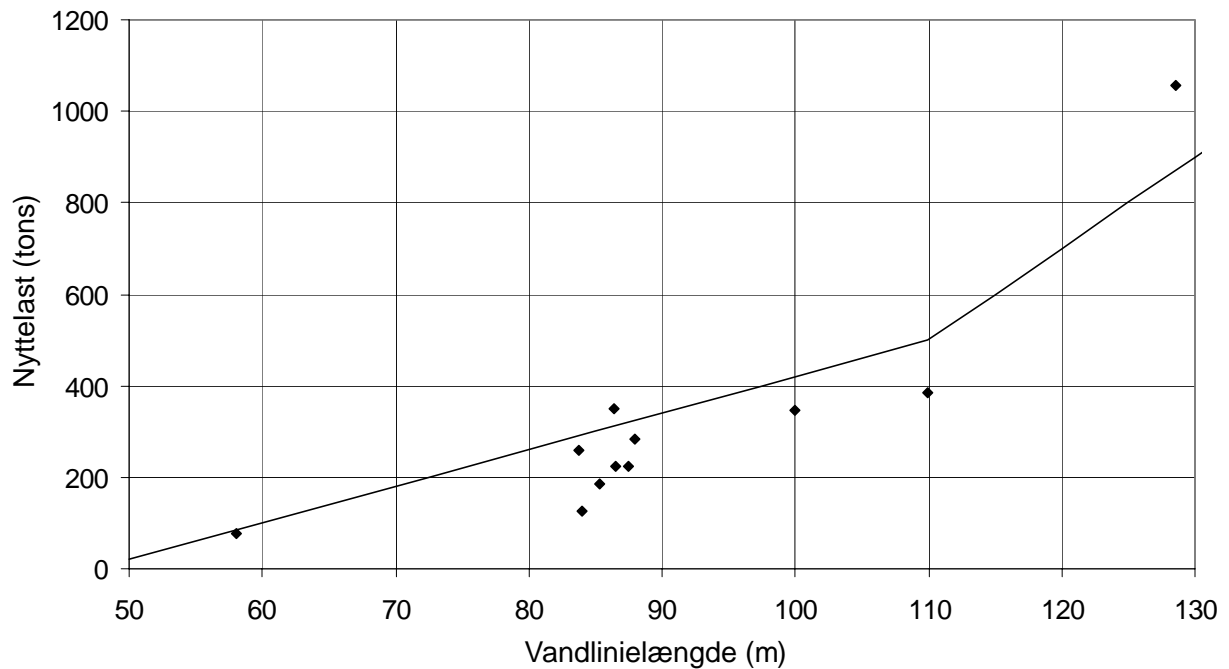


Fig. 25 Sammenhæng mellem skibslængde og nyttelast for hurtige bilførende enkeltskrogsfærger

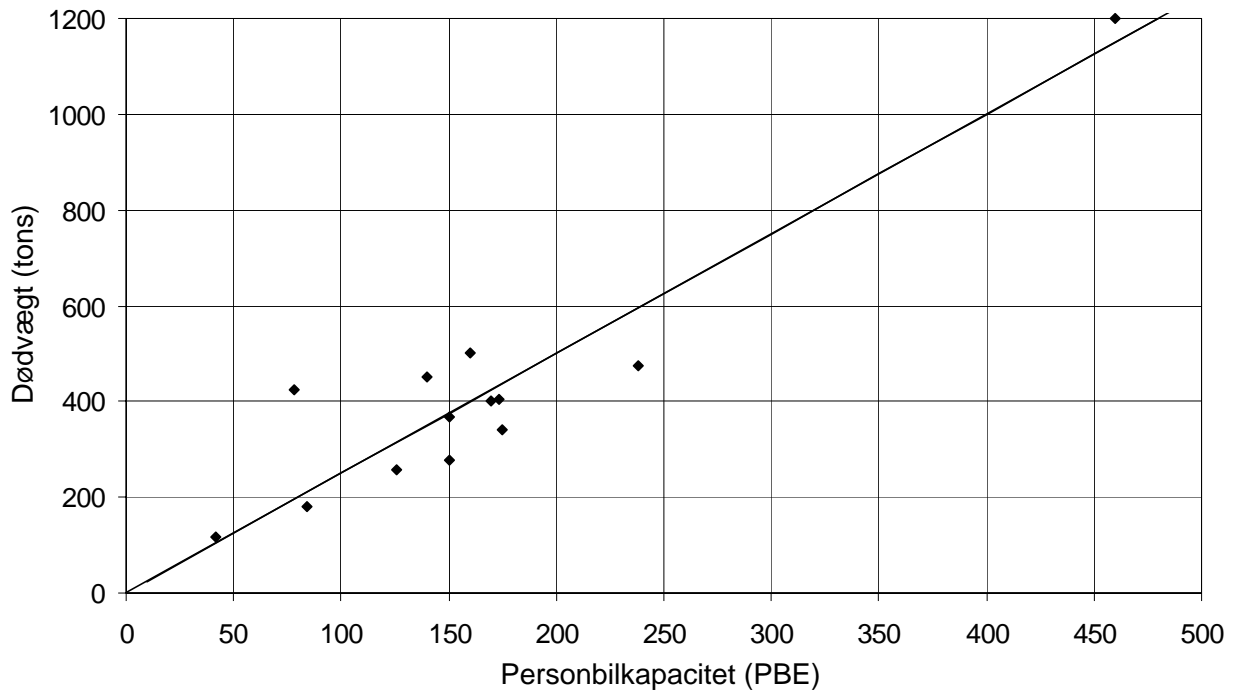


Fig. 26 Sammenhæng mellem bilkapacitet og dødvægt for hurtige bilførende enkeltskrogsfærger

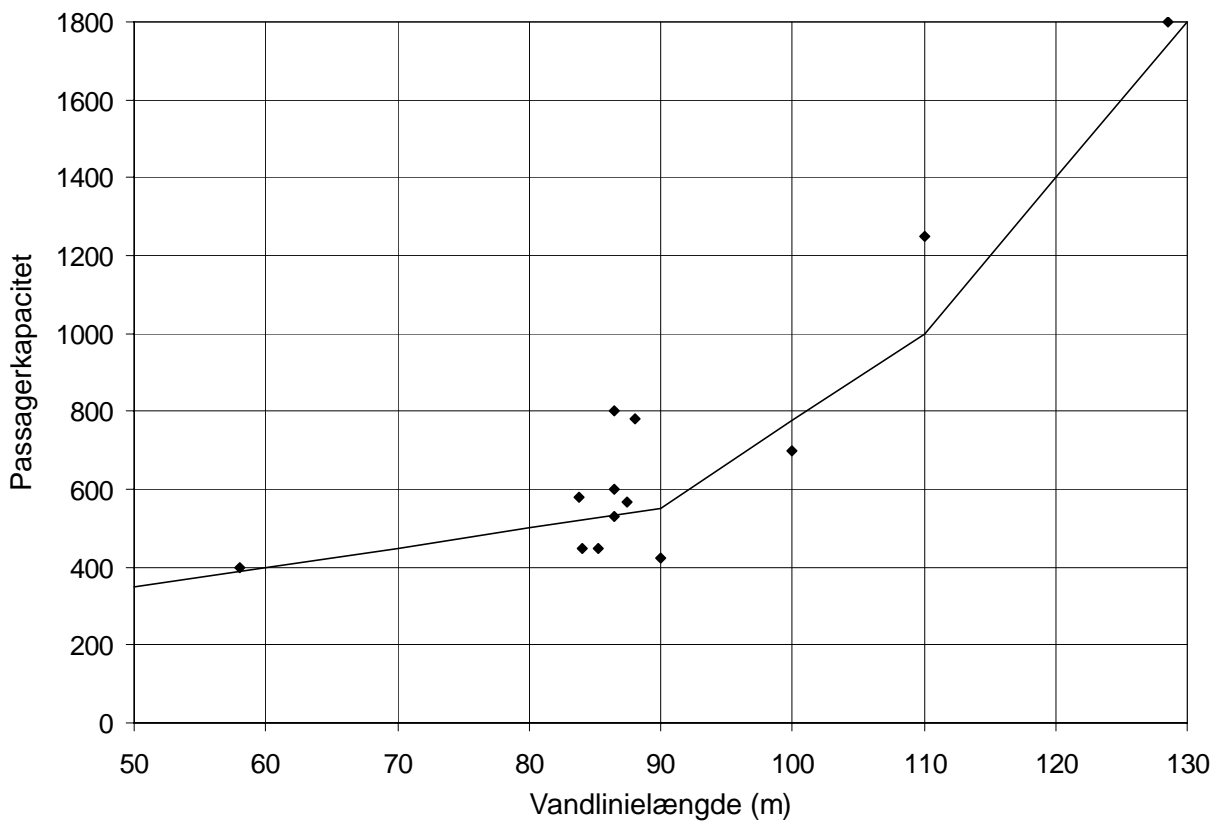


Fig. 27 Sammenhæng mellem skibslængde og passagerkapacitet for hurtige enkeltskrogsfærger

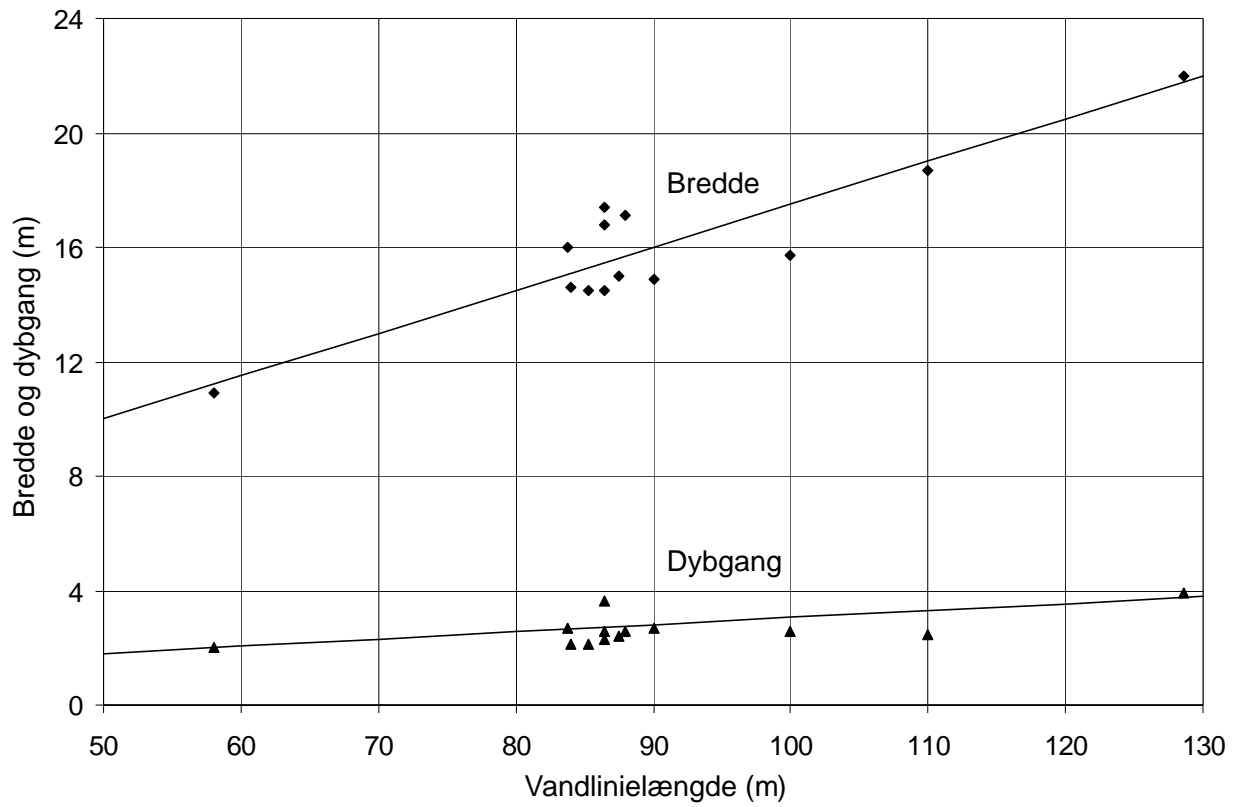


Fig. 28 Sammenhæng mellem skibslængde samt bredde og dybgang for hurtige bilførende enkeltskrogsfærger

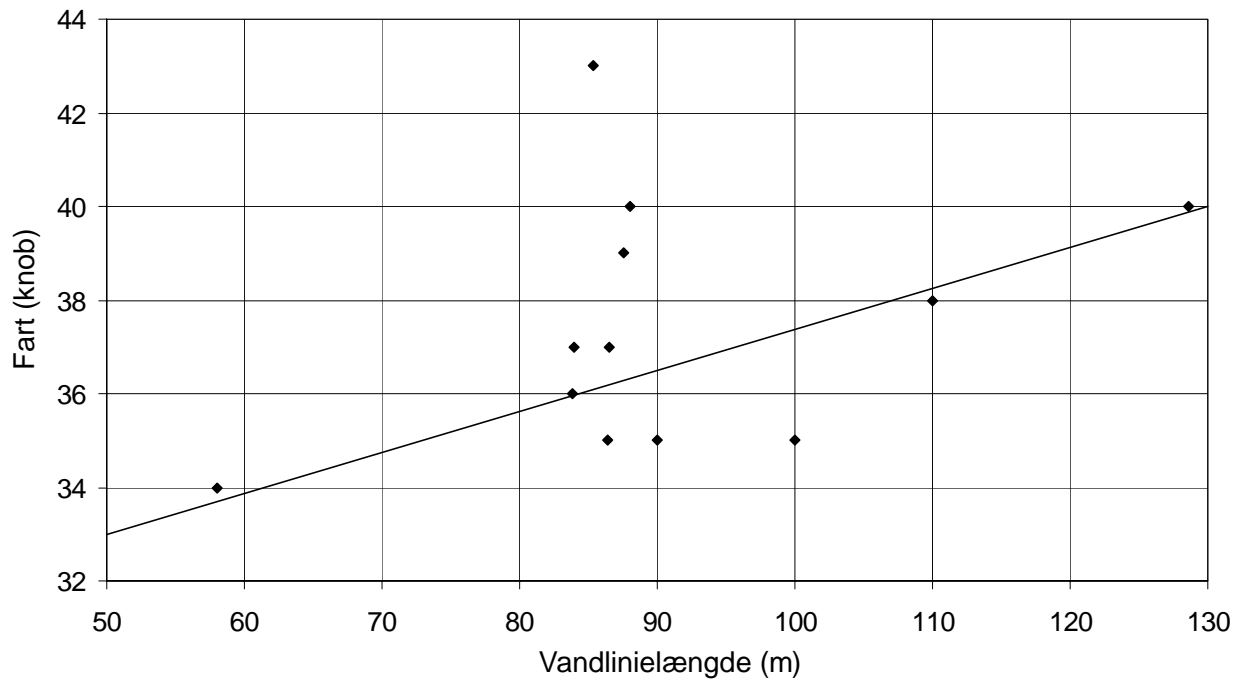


Fig. 29 Sammenhæng mellem skibslængde og fart for hurtige bilførende enkeltskrogsfærger

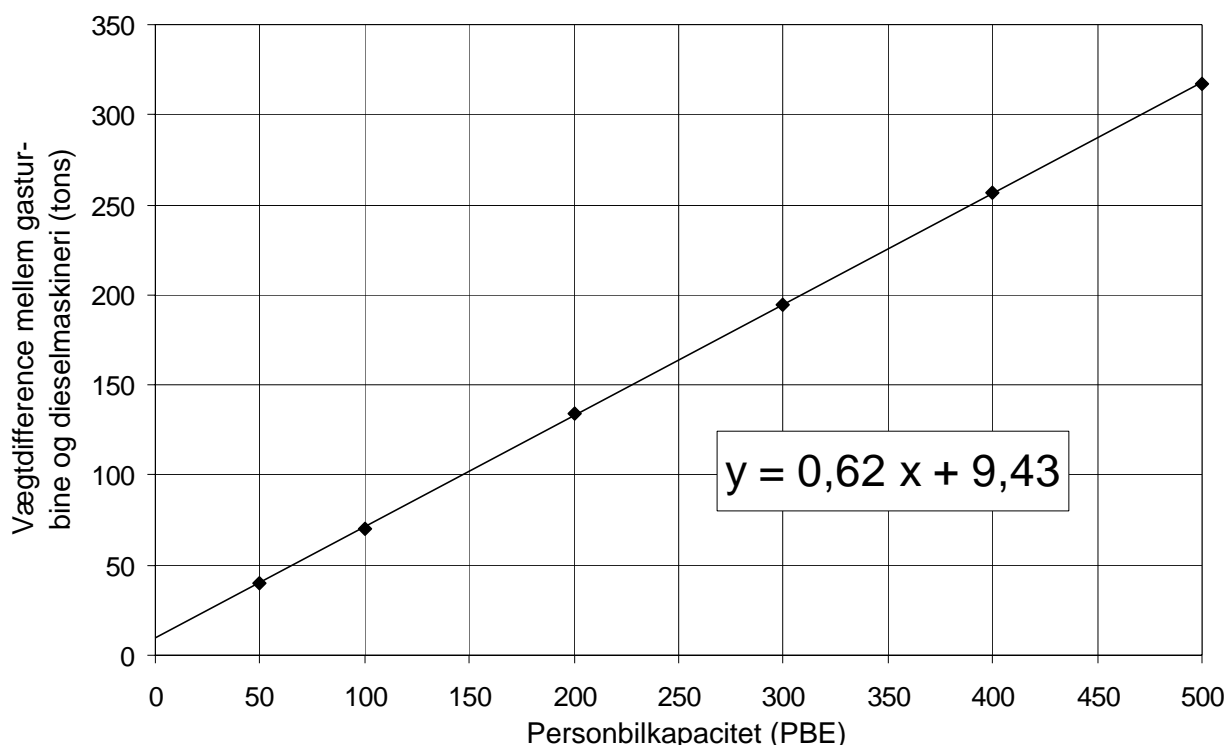


Fig. 30 Beregnet vægtdifference mellem gasturbinemaskineri og dieselmaskineri for hurtige enkeltskrogsfærger iflg. ref. 10

HURTIGE BILFØRENDE KATAMARANFÆRGER

Personbilkapacitet

Hovedparten af de bilførende katamaranfærger har en kapacitet fra ca. 100 til ca. 250 personbiler (fig. 31), mens Stena Lines 3 store HSS 1500 katamaranfærger har en kapacitet på 375 personbilenheder, hvilket er verdens største katamaranfærger. I modsætning til de store hurtige enkeltskrogsfærger opnås den høje kapacitet på Stena Lines færger med personbilenheder, der opfylder danske reder- og myndighedsnormer (skibene er bygget til at opfylde svensk lovgivning). Samtidig opnås den store bilkapacitet ved et vogndækslayout, der formodentlig næppe med den kommende lovgivning vil blive forbudt i modsætning til vogndæksindretningen på nogle af de store enkeltskrogsfærger (som der ikke findes nogen af i Danmark). Der er således tale om 375 reelle personbilenheder uden diverse mere eller mindre tvivlsomme forudsætninger.

Nyttelast og dødvægt

Som tidligere nævnt viser de statistiske analyser, at nyttelasten for katamaraner udgør ca. 80 % af dødvægten. Endvidere viser de statistiske analyser, at dødvægten for bilførende katamaranfærger ligger fra ca. 2 tons til ca. 4 tons pr. personbil (fig. 32), hvorfor der i analyserne for TEMA modellens udvikling er benyttet en variation som vist i fig. 32. Denne dødvægtsfordeling giver den i fig. 33 viste sammenhæng mellem bilkapacitet og dødvægt.

Fart

En analyse af sammenhængen mellem skibsstørrelse og farten ved fuld last for hurtige bilførende katamaranfærger viser, at farten generelt øges med længden (fig. 35). Også for katamaranfærgerne er der i lighed med de hurtige enkeltskrogsfærger en meget stor spredning i farten for de enkelte færger. De samme bemærkninger, som gør sig gældende for enkeltskrogsfærgerne, gælder også for katamaranfærgerne bl.a. med hensyn til indflydelsen af lav vanddybde.

En nærmere analyse af fartforholdene for henholdsvis katamaranfærger og enkeltskrogsfærger viser, at katamaranfærgernes fart er 2,5 – 3,0 knob højere end farten for enkeltskrogsfærgerne ved samme personbilkapacitet. Ved at foretage systematiske beregninger for henholdsvis hurtige enkeltskrogsfærger og katamaranfærger viser det sig, at for samme bilkapacitet og fart er fremdrivningseffektbehovet for katamaranfærgerne 15 – 25 % lavere end for enkeltskrogsfærgerne, som stort set svarer til en fartdifference på 2,5 – 3,0 knob, hvilket forklarer den statistisk konstaterede fartforskel mellem de to færgetyper.

Hjælpemaskineffekt

Også for hurtige katamaranfærger har det vist sig, at den installerede hjælpemaskineffekt er ca. 4 % af hovedmotorernes effekt i lighed med forholdene for enkeltskrogsfærgerne. I modelberegningerne er det antaget, at halvdelen af denne effekt benyttes kontinuerligt, dvs. 2 % af fremdrivningseffekten medgår til eksterne energiforbrug.

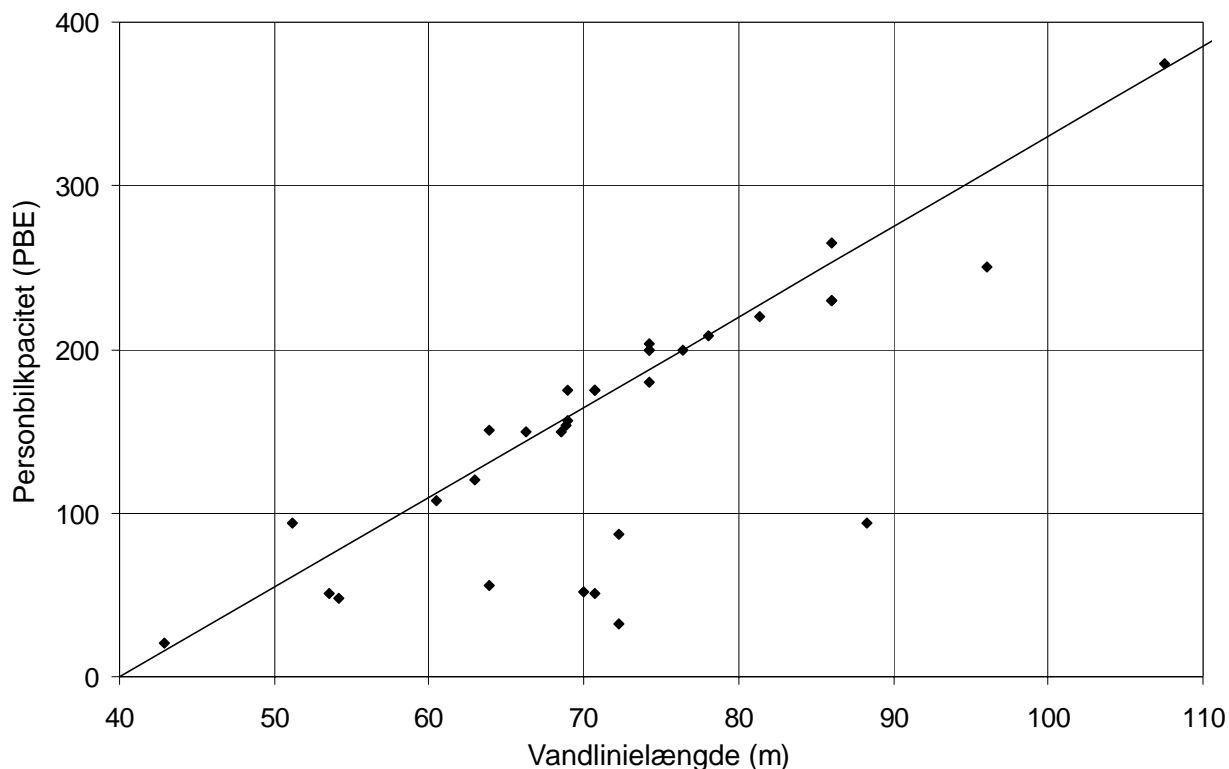


Fig. 31 Sammenhæng mellem skibslængde og bilkapacitet for hurtige bilførende katamaranfærger

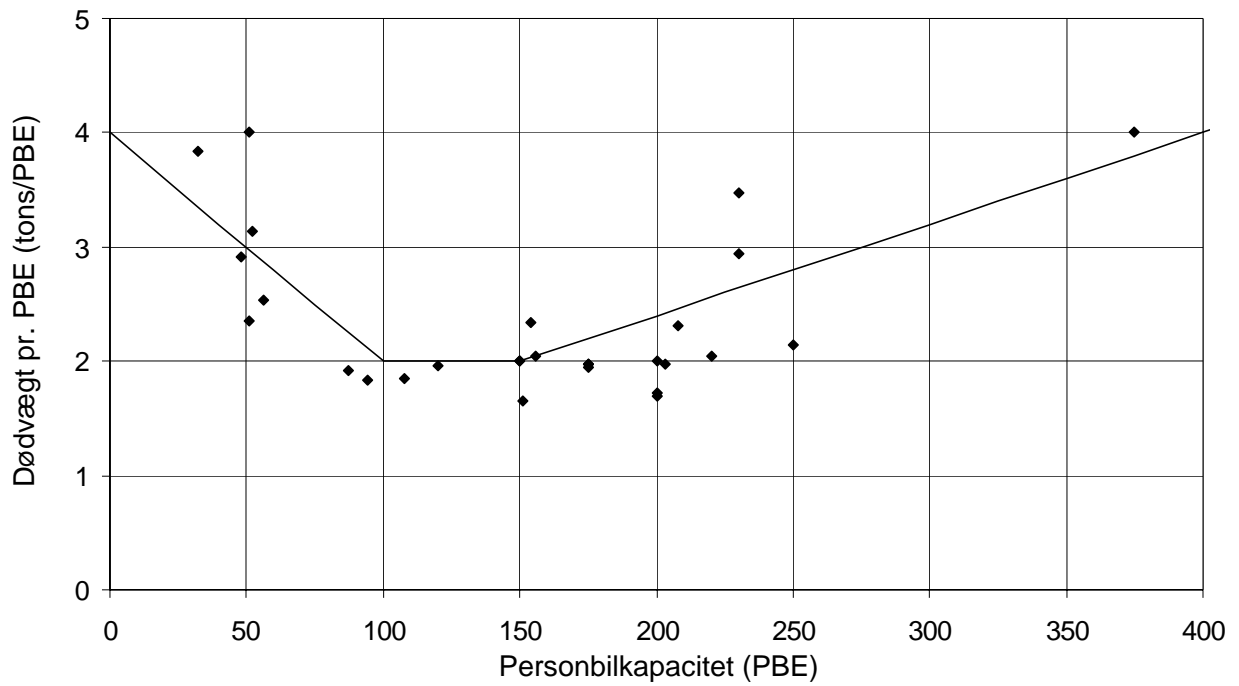


Fig. 32 Sammenhæng mellem bilkapacitet og dødvægt pr. bilenhed for hurtige katamaranfærger

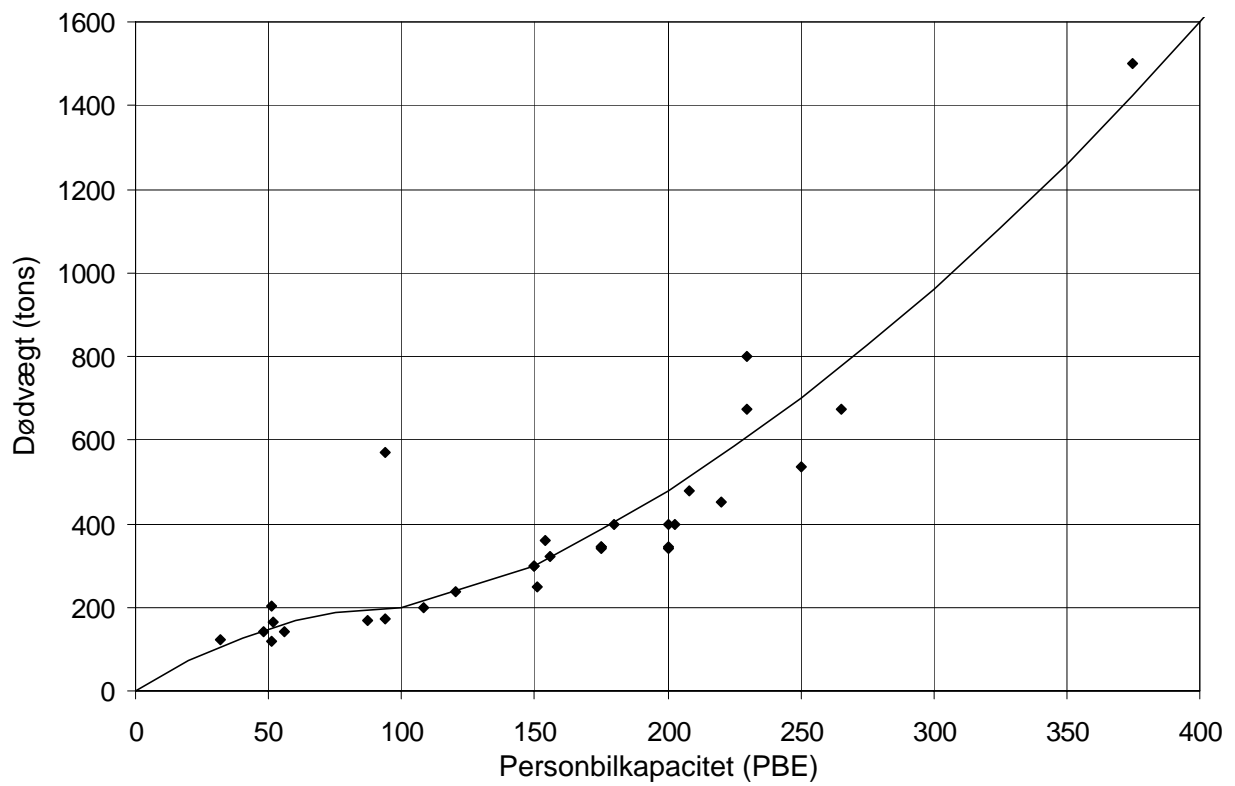


Fig. 33 Sammenhæng mellem bilkapacitet og dødvægt for hurtige bilførende katamaranfærger

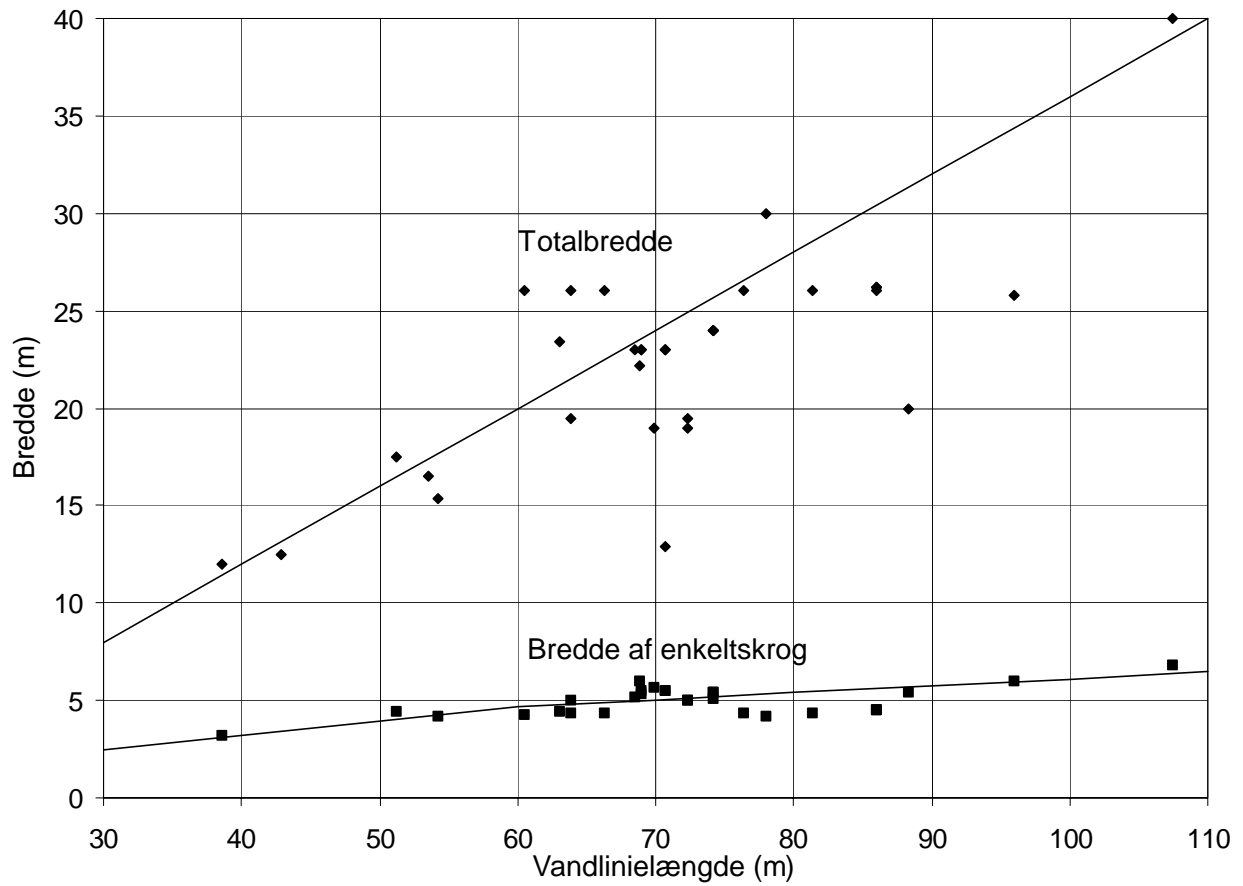


Fig. 34 Sammenhæng mellem skibslængde og bredde for hurtige bilførende katamaranfærger

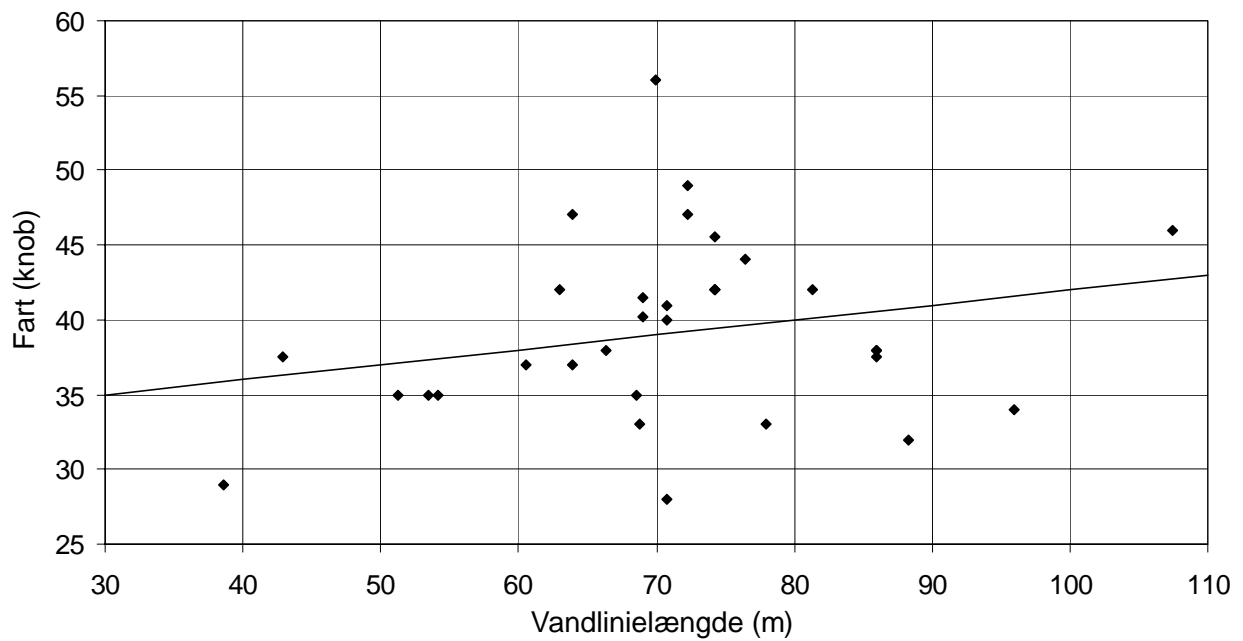


Fig. 35 Sammenhæng mellem skibslængde og fart for hurtige bilførende katamaranfærger

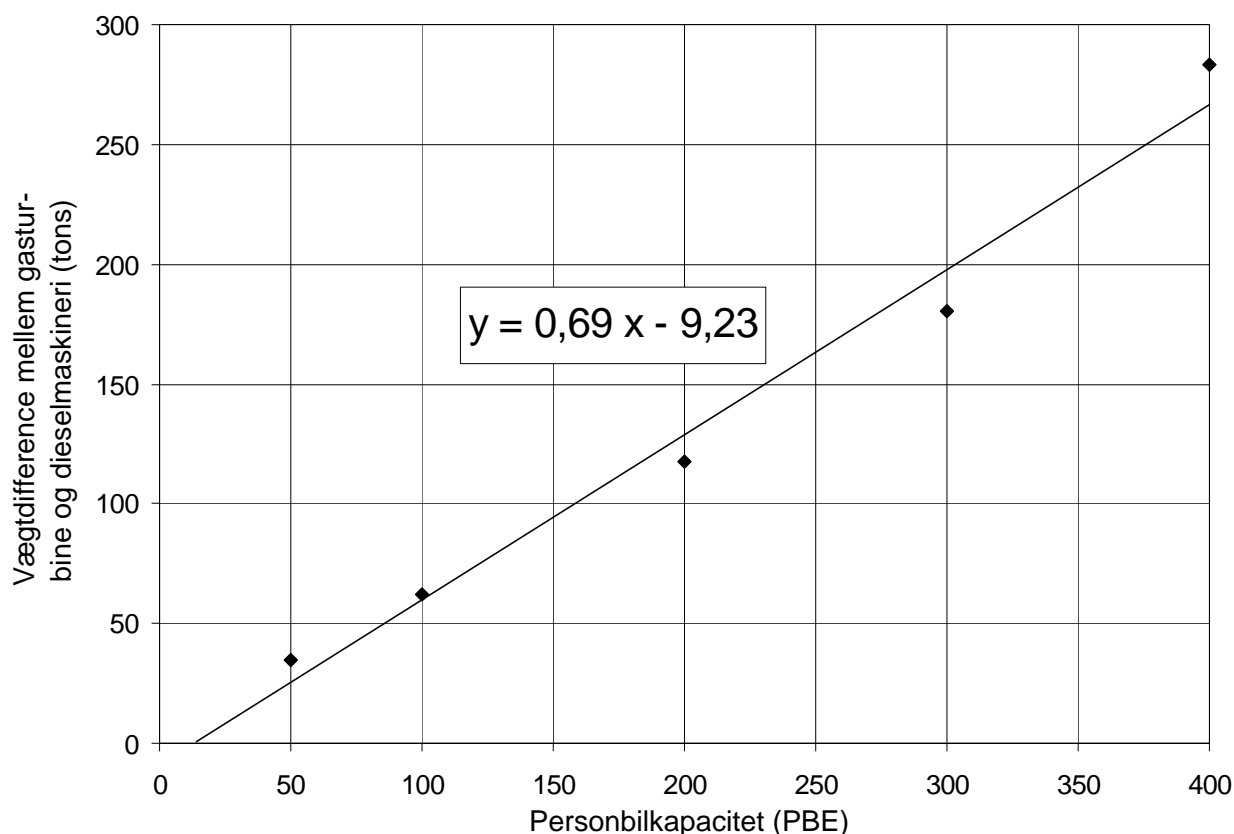


Fig. 36 Beregnet vægtdifference mellem gasturbinemaskineri og dieselmaskineri for hurtige katamaranfærger iflg. ref. 10

ENERGIFORBRUG OG EMISSIONSFAKTORER

Motortyper og historiske udvikling

For at kunne foretage beregninger af energiforbrug og emissioner for de forskellige skibstyper, skal man kende energiforbruget og udslippet af emissionsprodukter for motorerne, som benyttes til at fremdrive de enkelte skibstyper. Disse forhold blive gennemgået i det efterfølgende.

Til fremdrivning af de forskellige skibstyper skelnes der mellem flg. motortyper:

- Slow speed motorer (50 – 150 omdr./minut)
- Medium speed motorer (400 – 800 omdr./minut)
- High speed motorer (1000 – 3000 omdr./minut)
- Gasturbiner

Det specifikke energiforbrug (gram olie pr. kW time) for skibsmotorer har undergået en udvikling mod stadig lavere værdier siden verdens første oceangående dieselmotorskib, SELANDIA, i 1912 blev sat i fart (fig. 37). Siden oliekrisen i 1973 er udviklingen gået endnu hurtigere, idet det specifikke brændolieforbrug fra 1973 til i dag er reduceret med 20-25 % jvfr. den viste udvikling for slow-speed motorer. En lignende udvikling har fundet sted for medium speed og high speed motorer.

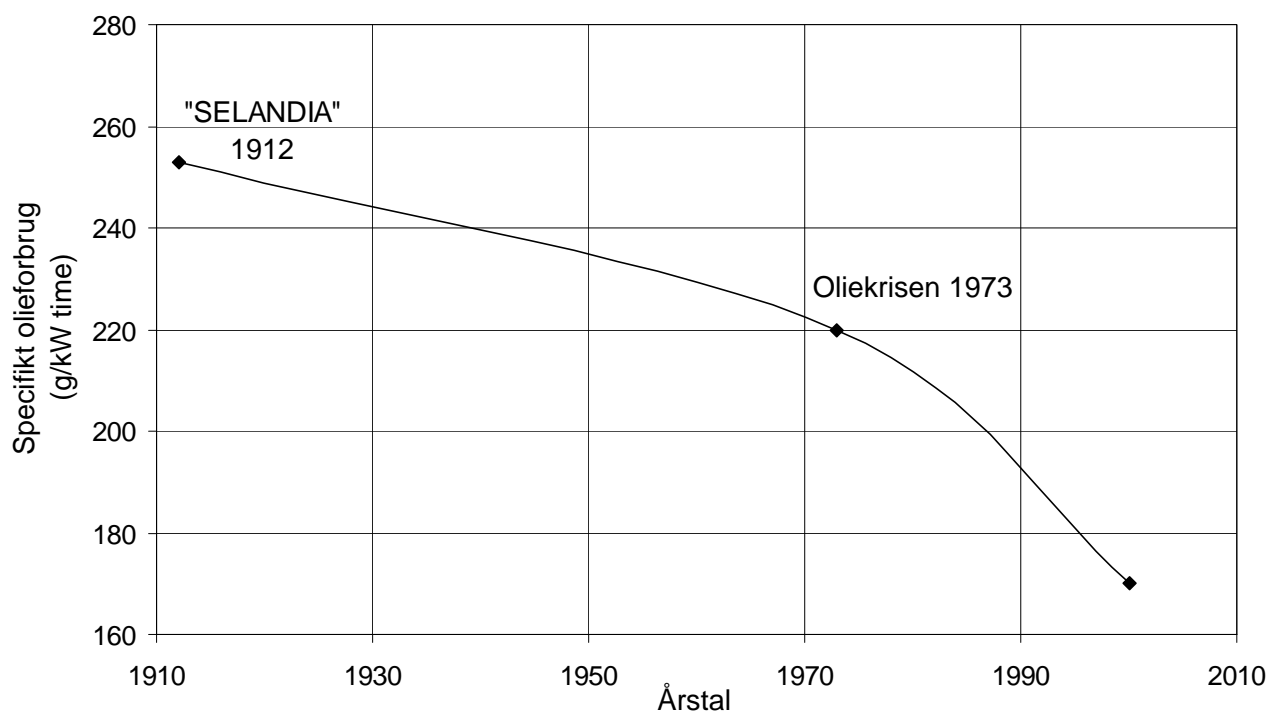


Fig. 37 Historisk udvikling af slow speed skibsmotorers specifikke olieforbrug

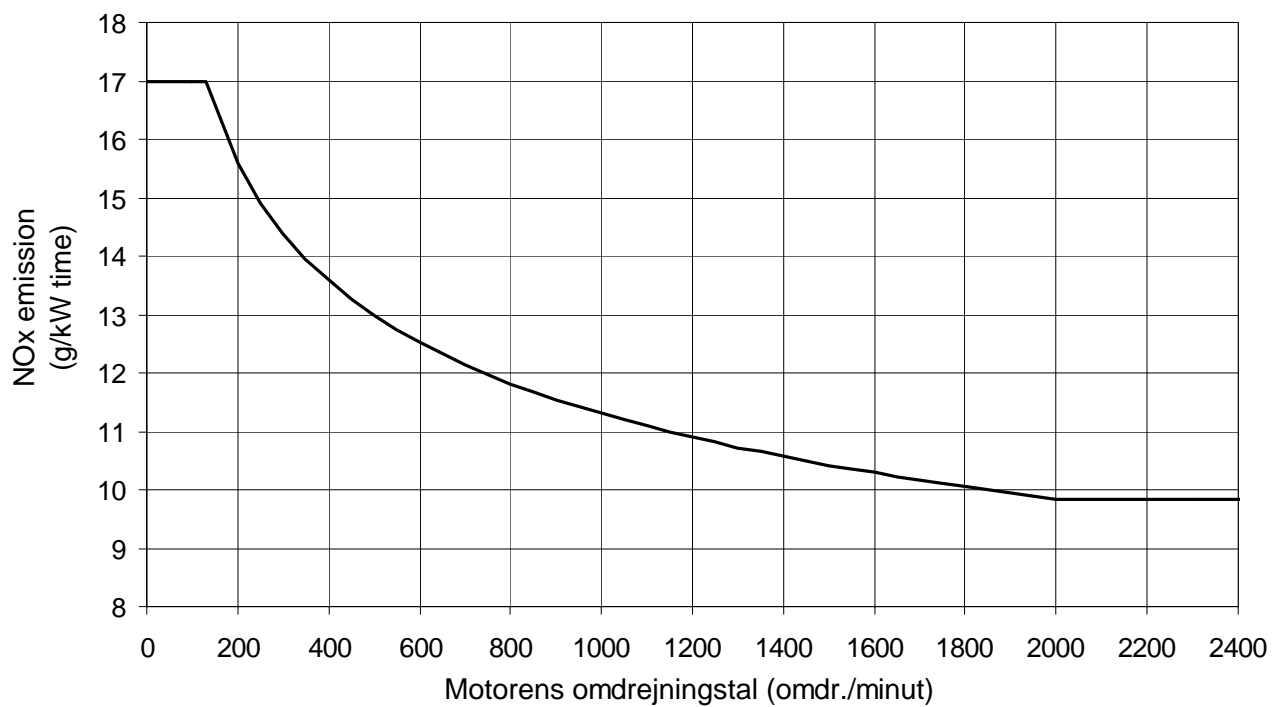


Fig. 38 IMO's kommende krav til NOx emissioner for nye skibsmotorer

International regulering af skibsmotorers emissioner

Fra 1. januar 2000 vil der via FN's søfartsorganisation, IMO (Marpol Annex VI), blive indført nye grænseværdier til NOx emissioner for nye skibsmotorer, iflg. hvilke NOx emissionen ikke må overstige grænserne vist i fig. 38. 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.

Udover krav til NOx emissioner arbejdes der i IMO på at få nedbragt svovlemissionerne og i førortalte Annex VI er der krav om et maksimalt svovlindhold i olien på 4,5 % (vægt). Strængere krav kan stilles til det der benævnes "SOx Emission Control Areas", hvor skibe, der opererer i disse områder, ikke må benytte bunkersolie med en svovlprocent højere end 1,5. Østersøen forventes udnævnt til et sådant SOx Emission Control Area, og senest er også Nordsøen blevet fremdraget under forhandlingerne som et potentielt område herfor.

Slow speed motorer

Slow speed motorer benyttes i udpræget grad til fremdrivning af containerskibe og bulk carriers over en længde på ca. 100 m, idet der bygges slow speed motorer med en mindste effekt svarende til hvad der kræves for containerskibe og bulk carriers på ca. 100 m længde.

I TEMA modellens beregninger er det antaget, at containerskibe og bulk carriers fremdrives af slow speed motorer, som forbrænder fuel olie. Det er antaget, at motorernes forbrug er 170 g/kW time, hvilket er en passende værdi for dagens standard.

Medium speed motorer

For Ro-Ro skibene er der regnet med, at disse fremdrives af medium speed motorer, hvilket er gældende for hovedparten af denne skibstype, idet der dog findes enkelte undtagelser, eksempelvis Mols-Liniens Ro-Ro passagerfærger, der fremdrives af slow speed motorer, samt de tidligere Kalundborg-Århus færger Peder Paars og Niels Klim.

Flere medium speed motorer er i stand til at forbrænde fuel olie, men til brug for fremdrivning af Ro-Ro skibe og hjælpemotorer på alle skibstyper er det dog meget ofte dieselolie eller gasolie, som motorerne forbruger, og som derfor også danner baggrund for TEMA modelberegningerne. Det er antaget, at motorernes forbrug er 190 g/kW time, hvilket er en passende værdi for dagens standard.

High speed motorer

Både de bilførende enkeltskrogfærger og de bilførende katamaranfærger antages fremdrevet af high speed motorer. Til bilførende højhastighedsfærger er tre motorfabrikanter i dag dominerende, nemlig Ruston, Caterpillar og MTU. Et specifikt olieforbrug på 200 g/kW time er anvendt i beregningerne, omtrent svarende til den laveste værdi for de omtalte motortyper.

Med hensyn til dieselmotorer for hurtigfærger er det interessant at bemærke, at den største effekt for sådanne motorer i dag (1999) er ca. 7000 kW. Dette forhold sammenholdt med den omstændighed, at man for katamaranfærger af pladsmæssige grunde kun kan installere 4 dieselmotorer til fremdrivning (2 i hvert skrog), betyder at disse skibe i dag maksimalt kan have installeret godt 28000 kW. Dette lægger en naturlig grænse for såvel størrelsen som den

maksimal fart som dieseldrevne katamaranfærger kan opnå, hvilket også er årsagen til den tidligere påpegede store mængde katamaranfærger med en kapacitet på 150 – 200 personbiler samt en maksimal fart på omkring 40 knob (fig. 31 og 35)

Gasturbiner

På grund af den beskrevne effektbegrænsning for dieselmotorerne ser man, at bilførende hurtigfærger i stigende grad fremdrives af gasturbiner, da gasturbinerne kan yde langt større effekt pr. enhed end selv de største dieselmotorer. Typiske eksempler på gasturbinedrevne færger er Mols Liniens to danskbyggede hurtigfærger, Mai Mols og Mie Mols, samt Stena Lines i alt 4 katamaranfærger (3 stk. HSS 1500 samt 1 stk. HSS 900). Tallene 1500 og 900 refererer til skibenes dødvægt på henholdsvis 1500 og 900 tons.

Gasturbinernes specifikke brændstofforbrug stiger relativt meget ved lavere belastning, men ved fuld effekt er et specifikt brændolieforbrug på 240 g/kW time antaget på basis af oplysninger fra forskellige gasturbinefabrikanter.

CO₂ emissioner

CO₂ emissioner er baseret på data fra Energistyrelsens statistik (ref. 11), som er baseret på årlige indberetninger fra olieraffinaderier. Følgende tal er derfor benyttet:

Fuel olie:	78 g CO ₂ pr. MJ svarende til 3,16 kg CO ₂ pr. kg olie, idet varmfylden for fuelolie er ca. 40,5 MJ/kg
Diesellole og gasolie:	74 g CO ₂ pr. MJ svarende til 3,17 kg CO ₂ pr. kg olie, idet varmfylden for diesel- og gasolie er ca. 42,8 MJ/kg

NOx emissioner

Motorernes NOx emissioner er dels bestemt udfra Lloyds Registers store undersøgelse fra 1995 (ref. 13) sammenholdt med en vurdering af den efterfølgende udvikling set i lyset af indførelsen af NOx grænseværdier via FN's internationale søfartsorganisation IMO.

Baseret på de nyeste oplysninger (ref. 14) fra verdens største producent af slow speed motorer, MAN B&W, er middelværdien for NOx emissioner bestemt til ca. 17 g/kW time, idet værdien for motorer med almindelige indsprøjtningdyser ligger fra 14 til 22 g/kW time, mens værdien for motorer med low NOx dyser ligger fra 13 til 17 g/kW time. Der er således god overensstemmelse mellem Lloyds Registers og MAN B&W's tal samt IMO's kommende grænseværdi på 17 g/kW time for slow speed motorer.

For medium speed og high speed motorer ligger NOx emissionsniveauet generelt lavere end for slow speed motorer. På basis af de seneste data fra MAN B&W (ref. 14) må Lloyds Registers NOx værdi på 12 g/kW time anses som et passende valg for medium speed motorer. Et NOx emissionsudslip på 11 g/kW time anses tilsvarende som et passende valg for high speed motorer, da dette svarer til IMO's NOx grænseværdi (fig. 38) ved ca. 1000 omdr./minut, som er det omtrentlige omdrejningstal for dieselmotorerne til de bilførende hurtigfærger.

Gasturbiner er generelt kendetegnet ved meget lave NOx emissioner, idet NOx emissioner på 1 - 2 g/kW time har været nævnt for visse typer gasturbiner (ref. 15). For flere af de hurtigfærger, der er i

drift, er rapporteret om NO_x emissioner på ca. 4 g/kW time, hvorfor denne værdi anses som en realistisk værdi.

Svovlemissioner

Svovlprocenten (vægtmæssig) for bunkersolie varierer fra ca. 4,5 % og ned til ca. 0,1 %. Det kan være vanskeligt at angive talværdier for et typisk svovlindhold for de forskellige skibstyper, da olien ofte købes på spotmarkedet til laveste pris. Undertiden kan man få svovlfattig olie til lav pris og til andre tider indeholder den billige olie meget svovl. Undersøgelser af svovlindholdet for bunkersolie viser meget store variationer på verdensplan (ref. 16).

For de forskellige skibstyper anses flg. svovlprocenter for et passende valg baseret på oplysninger fra forskellige rederier:

- Containerskibe og bulk carriers: 3 %
- Ro-Ro lastskibe: 1,5 %
- Ro-Ro passagerskibe: 0,5 %
- Hurtigfærger: 0,1 %

Partikelemissioner

Partikelemissionen afhænger af oliens svovlindhold som bl.a. påvist i Lloyds Registers undersøgelse (ref. 13) fra hvilken sammenhængen mellem svovlindhold og partikelemissionen for dieselmotorer benyttes (fig. 23 på s. 32 i ref. 13).

En partikelemission for gasturbiner på 0,1 g/kW time er baseret på oplysninger fra gasturbinefabrikanter.

HC og CO emissioner

HC og CO emissionsfaktorerne for dieselmotorer er også baseret på Lloyds Registers undersøgelse, mens faktorerne for gasturbiner er baseret på oplysninger fra gasturbinefabrikanter.

Det skal dog tilføjes, at der kan være store variationer i størrelsen af de enkelte emissioner afhængig af bl.a. motorens belastning og driftsform (steady state/transient). For skibsmotorer er variationen ved almindelig drift (steady state) iflg. ref. 13:

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, 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.

Samtlige emissionsfaktorer er opsummeret i tabel 1 på næste side.

Skibstype	Containerskibe og bulk carriers	Ro-Ro lastskibe	Ro-Ro passagerskibe	Bilførende hurtigfærger	Bilførende hurtigfærger
Motorstype	Slow speed	Medium speed	Medium speed	High speed	Gasturbine
Olietype	Fuel olie	Diesel/gasolie	Diesel/gasolie	Diesel/gasolie	Diesel/gasolie
Specifikt olieforbrug (kg/kW time)	0,17	0,19	0,19	0,20	0,24
NOx emission (g/kW time)	17,0	12,0	12,0	11,0	4,0
CO emission (g/kW time)	1,60	1,60	1,60	1,60	0,10
HC emission (g/kW time)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,35
Partikel emission (g/kW time)	1,38	0,44	0,24	0,23	0,10
Svovlindhold i olie (pct.)	3,0	1,5	0,5	0,1	0,1
SO ₂ emission (g/kW time)	10,71	5,99	2,00	0,42	0,50
CO ₂ emission (g/MJ)	78,0	74,0	74,0	74,0	74,0
NOx emission (g/MJ)	2,5	1,5	1,5	1,3	0,4
CO emission (g/MJ)	0,23	0,20	0,20	0,19	0,01
HC emission (g/MJ)	0,073	0,061	0,061	0,058	0,034
Partikel emission (g/MJ)	0,200	0,054	0,029	0,026	0,010
SO ₂ emission (g/MJ)	1,56	0,74	0,25	0,05	0,05
CO ₂ emission (g/kg olie)	3159	3167	3167	3167	3167
Partikelemission (g/kg olie)	8,1	2,3	1,2	1,1	0,4
Oliens brændværdi (MJ/kg)	40,5	42,8	42,8	42,8	42,8

Tabel 1 Emissionsfaktorer anvendt i TEMA modellens skibstekniske beregningsdel

MODELBEREGNINGER SOM GRUNDLAG FOR TEMA MODELLEN

For at kunne opstille regressionsformler til beregning af energiforbruget for de forskellige skibstyper ved forskellig fart og belægningsprocent er der i Bilag A – I vist resultatet af alle de udførte modelberegninger. Der er endvidere vist, hvilke regressionsformler, der på basis af modelberegningerne danner grundlag for TEMA modellen.

Formlerne i TEMA modellen for beregning af energiforbruget er for hver skibstype sammensat som produktet af 2 polynomieformler, hvor den ene formel, $f(K)$, beregner energiforbruget som funktion af skibets lastekapacitet, K , (målt i tons, TEU, lanemeter eller personbiler) ved 100 % belægning, mens en anden formel, $g(U)$, korrigerer energiforbrugsformlen for 100 % belægning, så denne omregnes til den aktuelle belægningsprocent U . Udtrykket for energiforbruget, $E(K,U)$, får derved flg. generelle form:

$$E(K,U) = f(K) \times g(U)$$

Den viste formel er for hver skibstype udviklet for i alt 3 forskellige farter, nemlig skibets antagne standardfart (servicefart), standardfarten – 10 % samt standardfarten + 10 %. For en vilkårlig fart i området fra standardfarten - 10 % til standardfarten + 10 % foretager TEMA modellen en parabolisk interpolation mellem de 3 beskrevne forudbereggede værdier.

SAMMENLIGNING AF TEMA MODELBEREGNINGER MED STATISTISKE DATA

For at vurdere de udførte modelberegninger er der i det efterfølgende foretaget en række sammenligninger med det energiforbrug, der kan beregnes ud fra skibets maskineffekt, lasteevne samt servicefart.

Det er selvfølgelig en forsimplet metode at beregne energiforbruget på basis af disse tre hovedparametre, da netop denne erkendelse er basis for udviklingen af det omfattende beregningsprogram. Men i mangel af bedre er det trods alt valgt at foretage sammenligningen for at give den bedst mulige vurdering af beregningsmetoden, der danner baggrund for TEMA modellen. Resultatet af sammenligningerne er vist i de efterfølgende figurer (fig. 39 – 45) og skal kort kommenteres.

Af figur 39 fremgår det, at TEMA modellens beregnede energiforbrug for containerskibe ligger i overkanten af det statistisk beregnede forbrug. Der er en vis spredning i de statistisk beregnede tal, hvilket dels kan forklares ved, at servicefarten ikke altid er veldefineret, som omtalt i forbindelse med bl.a. hurtigfærgernes fartangivelse. Det er således ikke altid oplyst ved hvilken motoreffekt farten opnås, men det er som regel ved 85 – 90 % af maksimal ydelse. Det fremgår heller ikke altid helt klart af de forskellige skibsdata ved, hvilken dybgang den opgivne fart opnås. Dette, sammenholdt med en række øvrige individuelle forskelle mellem skibene, endog for samme lasteevne, forklarer den spredning, der forekommer i de statistisk beregnede tal.

Netop disse aspekter har været en af de væsentlige grunde til udviklingen af det omtalte beregningsprogram, da ønsket med dette program har været at udvikle en helt objektiv beregningsmetode, der er uafhængig af diverse evt. fejlagtige og tvivlsomme data.

De anførte kommentarer vedr. spredningen i de statistisk beregnede energital for containerskibe gælder også for alle de øvrige analyserede skibstyper. For de konventionelle færgers vedkommende gælder der yderligere, at flere af disse skibe sejler på lav vanddybde, hvor fremdrivningsmodstanden øges, hvilket medfører et øget energiforbrug. Færger til sejlads på lavere vanddybder vil få installeret en forøget maskineffekt, hvorfor det statistisk beregnede energiforbrug vil blive tilsvarende højt, og dermed højere end TEMA modellens beregningsresultat, da det øgede energiforbrug på grund af lav vanddybde ikke er inkluderet i TEMA beregningerne på fig. 42 og 43, hvor beregningerne svarer til dybt vand. Det procentvise energiforbrugstillæg som følge af sejlads på lav vanddybde, som er beregnet på basis af ref. 17 og 18, er vist i fig. 46.

Den øvrige variation i de statistisk bestemte energital for de konventionelle færger skyldes den beskrevne relativ store variation i lastekapacitet som funktion af skibets længde vist i henholdsvis fig. 17 og 20.

Af fig. 44 ses det, at for de hurtige enkeltskrogsfærger ligger det af TEMA modellen beregnede forbrug højere end det simpelt statistisk bestemte energiforbrug. Det sidstnævnte energiforbrug er beregnet på basis af de officielt opgivne bilkapaciteter og farter, som sandsynligvis er lidt for høje som tidligere nævnt. I TEMA grundmodellen er der foretaget en vurdering, der giver mere realistiske værdier, så farten svarer til dybt vand og bilkapaciteten afspejler en mere realistisk bilstørrelse med de nødvendige mellemrum mellem bilerne og hvor der delvis er set bort fra biler under hoveddækket. Denne vurdering har været mest påkrævet for enkeltskrogsfærgerne, hvorfor TEMA modellens energital i området fra ca. 150 – 250 personbiler for disse fartøjer ligger 15 – 20 % over de statistisk bestemte energital.

Det er nærliggende at sammenligne energiforbruget pr. personbil pr. km for hurtigfærger med det tilsvarende energiforbrug for konventionelle langsomme færger. Resultatet af en sådan sammenligning er vist i fig. 47, hvor det ses, at hurtigfærgernes energiforbrug er ca. 3 gange større end det tilsvarende forbrug for konventionelle færger ved skibe med samme bilkapacitet. Hvis en hurtigfærge sammenlignes med en konventionel færge med den dobbelte kapacitet, som inden for samme tidsrum omtrent vil kunne transportere samme lastmængde som en hurtigfærge, bliver forholdet i energiforbrug mellem de to færgetyper kun ændret relativt lidt (fig. 47).

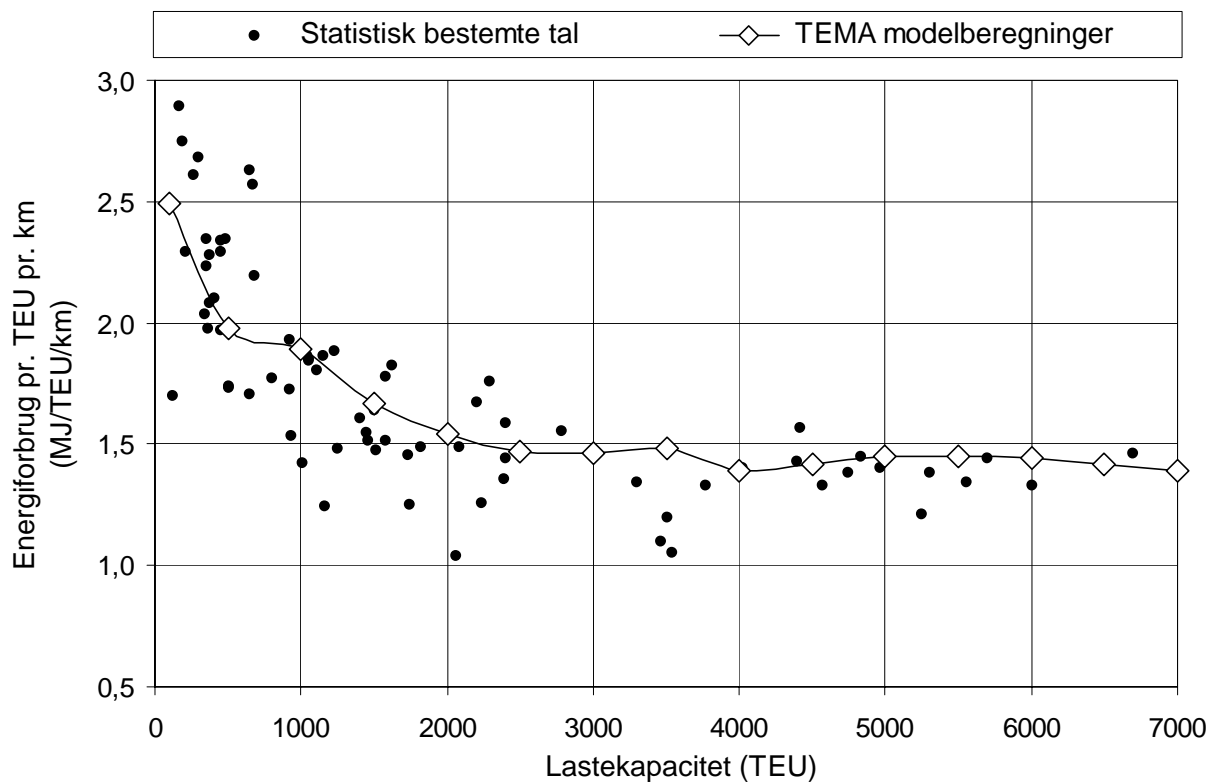


Fig. 39 Modelberegninger og statistisk bestemte energital for containerskibe (1 TEU = 10 tons)

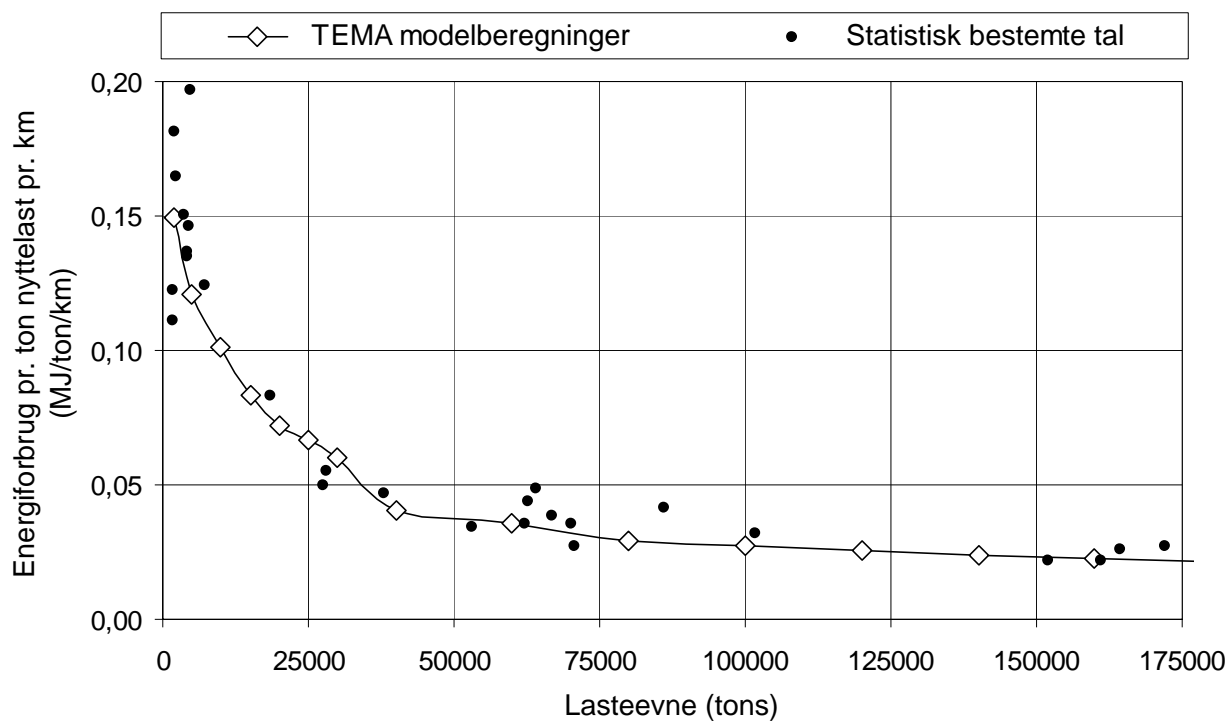


Fig. 40 Modelberegninger og statistisk bestemte energital for massegodsskibe

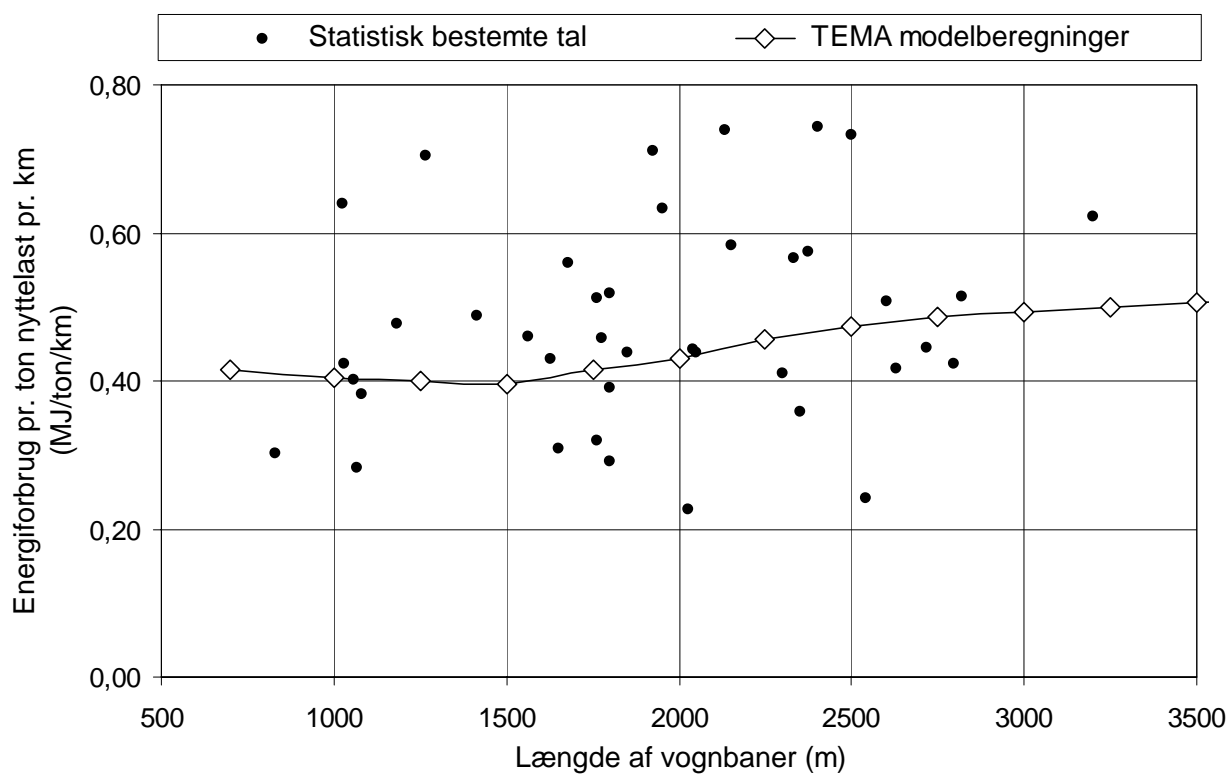


Fig. 41 Modelberegninger og statistisk bestemte energital for Ro-Ro lastskibe

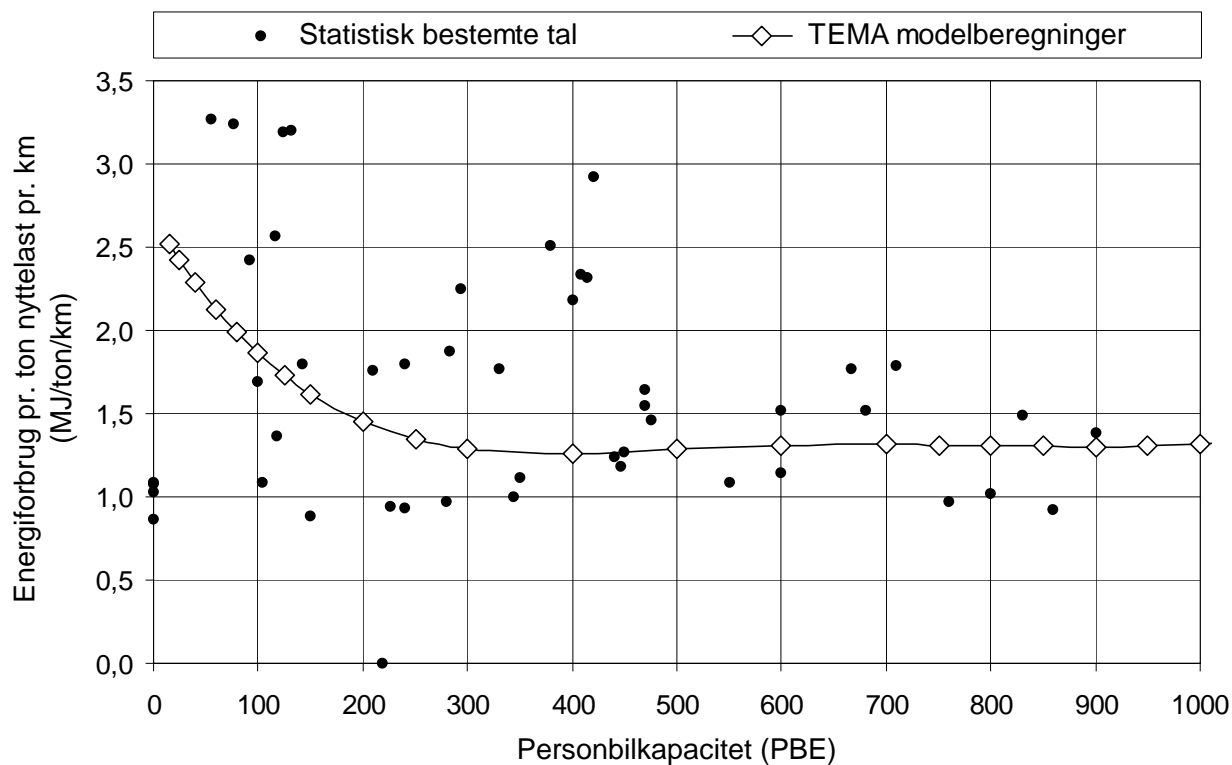


Fig. 42 Modelberegninger og statistisk bestemte energital for konventionelle passagerfærger

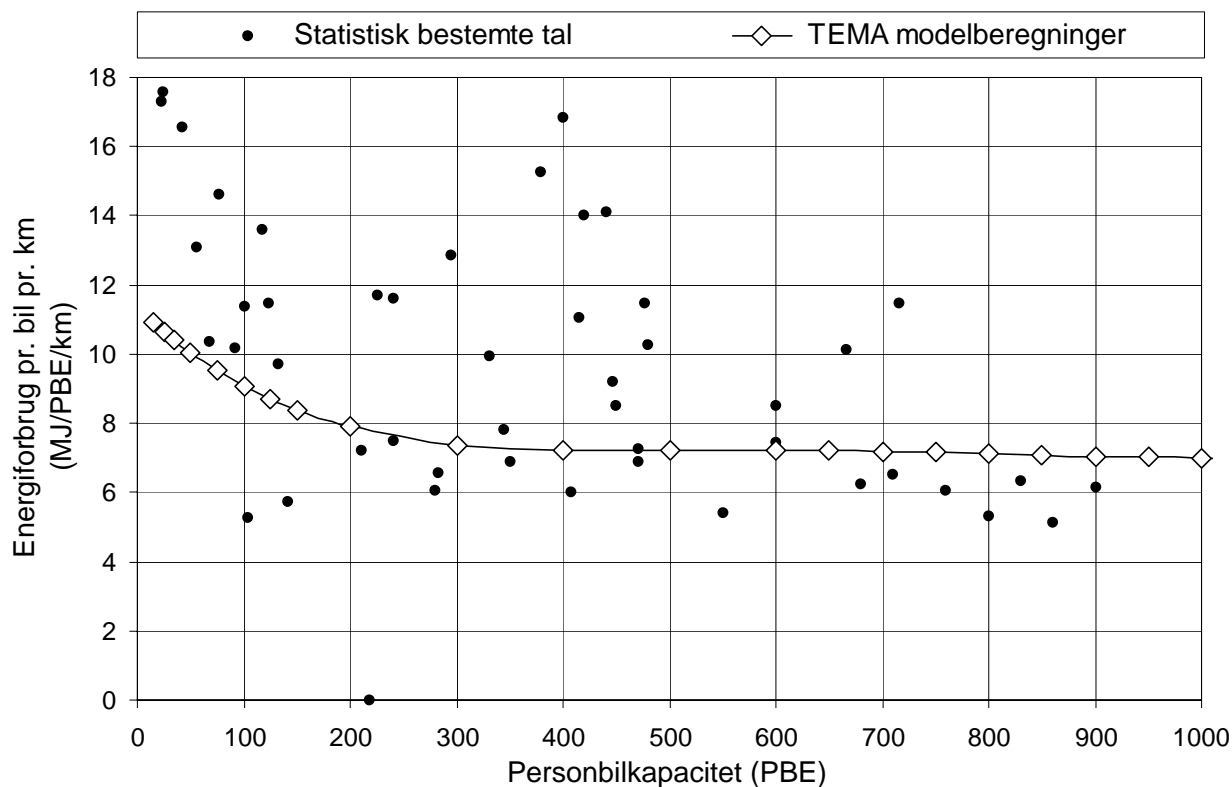


Fig. 43 Modelberegninger og statistisk bestemte energital for konventionelle passagerfærger

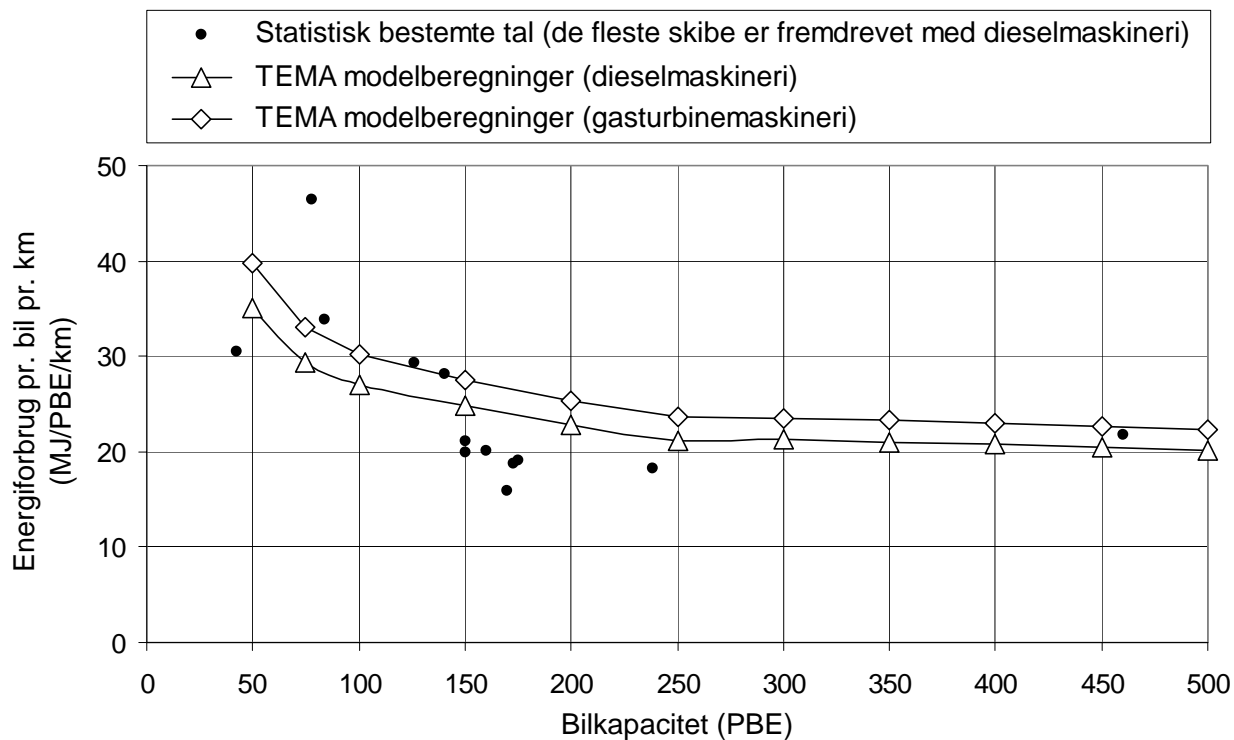


Fig. 44 Modelberegninger og statistisk bestemte energital for hurtige enkeltskrogsfærger (dieselmaskineri)

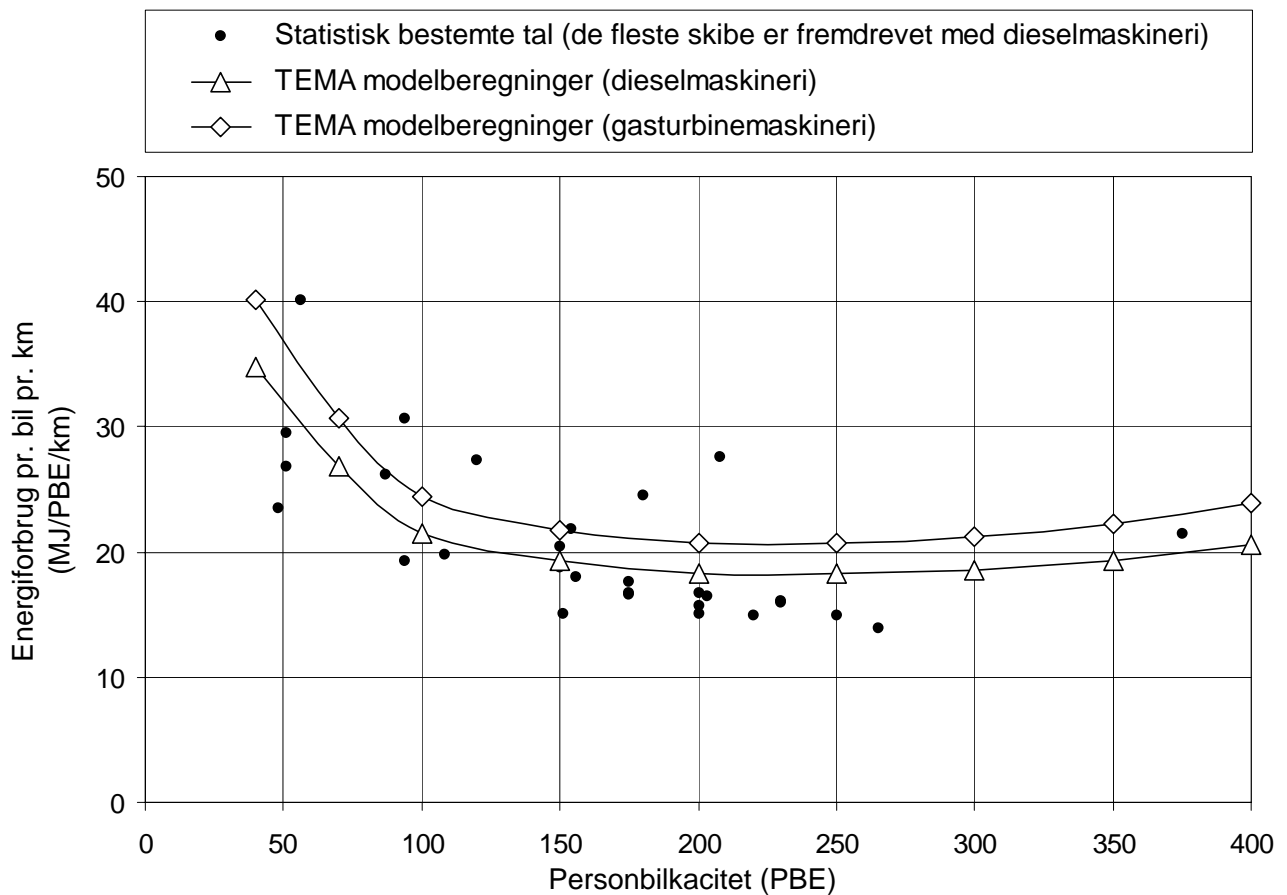


Fig. 45 Modelberegninger og statistisk bestemte energital for hurtige katamaranfærger

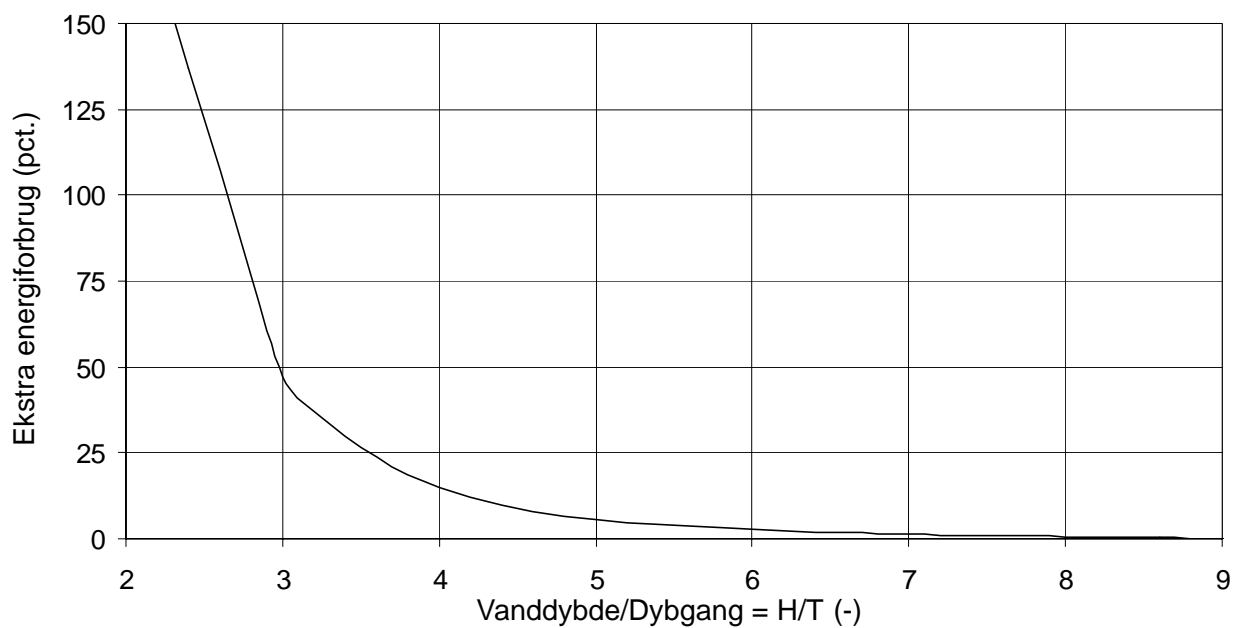


Fig. 46 Forøget energiforbrug for konventionelle (langsomme) færger som følge af lav vanddybde

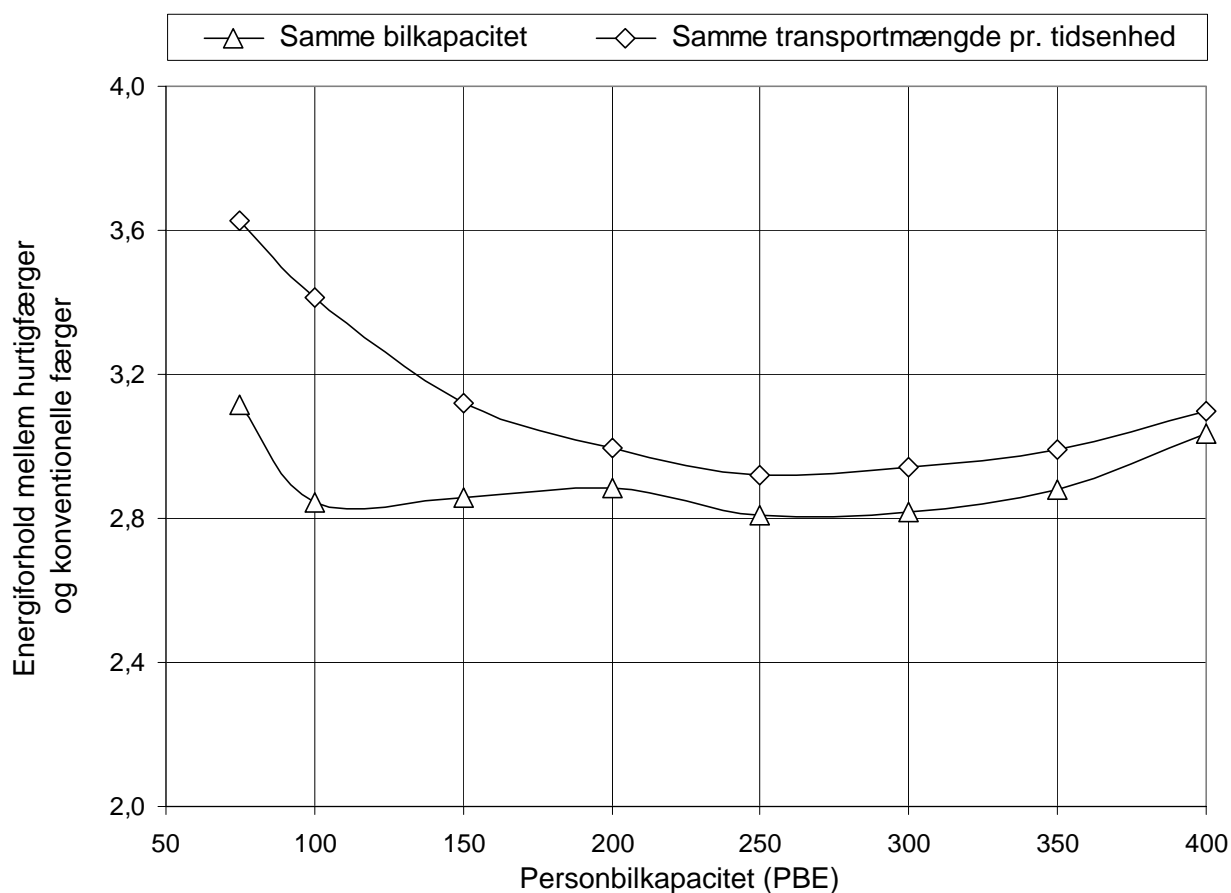


Fig. 47 Forhold mellem energiforbrug for hurtigfærger og konventionelle langsomme færger under forskellige betingelser

REFERENCELISTE

- Ref. 1 Kristensen. H. O: Nye færgetyper. Trafikministeriet. Marts 1995
- Ref. 2 HiSpeed 95. Udgivet af Ship Pax Information, Hamstad 1995.
- Ref. 3 HiSpeed 99. Udgivet af Ship Pax Information, Hamstad 1999.
- Ref. 4 Gulddammer og Harvald: Ship Resistance. Akademisk Forlag 1974
- Ref. 5 Oossanen, P. van: Resistance Prediction of small high-speed displacement vessels: State of the art. International Shipbuilding Progress, Vol. 27, No. 313.
- Ref. 6 Insel, M & Molland, A. F: An investigation into the resistance components of high speed displacement catamarans. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 134, 1992.
- Ref. 7 Improving the design and operation of container ships. The Naval Architect, June 1999, p. 23 - 24.

- Ref. 8 International Code of Safety for High-Speed Craft (HSC Code). International Maritime Organization, London 1995.
- Ref. 9 Miljø- og Energiministeriets bekendtgørelse nr. 821 af 23. oktober 1997: Bekendtgørelse om miljøgodkendelse af hurtigfærgeruter.
- Ref. 10 Molland, A. F. & Karayannis, T: Development of a concept exploration and assessment model for advanced fast marine vehicles. Proceedings of IMDC 97 Conference (University of Newcastle 1997) p. 249 – 265.
- Ref. 11 Fast Ferry International, December 1996, p. 20.
- Ref. 12 Energistatistik 98 udgivet af Energistyrelsen
- Ref. 13 Marine Exhaust Emissions Research Programme, Lloyds Register of Shipping 1995.
- Ref. 14 Datablade for NOx emissioner for slow speed og medium speed motorer fra MAN B&W præsenteret den 27. oktober 1999 på Skibsteknisk Selskabs konference "Miljørigtig transport – men hvordan ?"
- Ref. 15 "Turbines´ high-speed spin to popularity" by Colin Sowman. The Motor Ship, December 1996, s. 15 - 16.
- Ref. 16 "Do you know what´s in your bunkers ?" by Colin Sowman. The Motor Ship, December 1997, s. 17.
- Ref. 17 Lackenby, H: The effect of shallow water on ship speed. The Engine and Marine Engine-BUILDER, sept. 1963, p. 446 – 450.
- Ref. 18 Principles of Naval Architecture. Udgivet af Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol. II, p. 42 – 46.

Ved udarbejdelsen af de statistiske analyser er der benyttet oplysninger fra en lang række fagtidsskrifter og -bøger samt oplysninger fra en række rederier. Det vil være meget omfattende at nævne samtlige kilder systematisk, men flg. publikationer har dannet baggrund for en meget stor mængde af de analyserede data:

- Significant Ships, årgang 1990 til 1998 udgivet af Royal Institution of Naval Architects (RINA) i London
- "Design". Årgangene fra 1982 til 1998. En årligt udkommende bog om design af færger og Ro-Ro skibe samt krydstogtskibe udgivet af Ship Pax Information i Halmstad
- Det tyske månedstidsskrift "Schiff und Hafen", hvor specielt afsnittet "New Ships" har været flittigt benyttet

ORDFORKLARING

Blokkoefficient (Cb)

Et skibs deplacementsvolumen divideret med rumfanget af en kasse med målene:

$L \times B \times T$ = skibets længde \times skibets bredde \times skibets dybgang. Med denne definition vil blokkoefficienten maksimalt kunne antage værdien 1 (kasseformet pram). Blokkoefficienten varierer fra ca. 0,50 (hurtigfærger) til ca. 0,85 (bulk carriers og tankskibe).

Bunkersolie

Betegnelse for den olie, der benyttes til fremdrivning af et skib

Displacement

Et skibs totalvægt, dvs. vægten af det vand som skibsskroget fortrænger (deplacerer) , jvfr. Archimedes lov.

Displacementsvolumen

Rumfanget af det vand som et skib fortrænger

Dødvægt (Dw)

Dødvægten omfatter vægten af den last et skib kan medføre (benævnes ofte nyttelasten) samt vægten af alle beholdninger ombord (olie, drikkevand, proviant, reservedele, besætning, ballastvand). Dødvægten kan også betegnes som skibets vægt minus dets egenvægt, der betegnes letvægten.

Egenvægt (letvægt)

Vægten af et skib uden last, forsyninger, besætning, olie og vand. Letvægten er således den vægt, som et skib har, når det umiddelbart er færdigbygget på et værft, inden nogen som helst øvrig vægt føres ombord.

Knob

Et skibs fart måles normalt i knob, som svarer til en fart på 1 sømil pr. time, som er lig med 1,852 km pr. time eller 0,5144 m/s.

Lastekapacitet

Lastekapaciteten er den maksimale mængde last af den aktuelle lasttype et skib kan transportere. For containerskibe er enheden derfor containere (TEU), og for Ro-Ro lastskibe er det antal vognbanemeter (lanemeter) til placering af lastbiler og løstrailere. Det samme kan være gældende for konventionelle passagerfærger, men oftest vil det være personbilenheder (PBE), hvilket også er tilfældet for de bilførende hurtigfærger.

Nyttelast (lasteevne)

Nyttelasten er vægten af den last, som et skib kan transportere, dvs. vægten af containere, og for færgers vedkommende er det vægten af biler og passagerer tilsammen. På engelsk benyttes udtrykket payload (den last man betaler for at få transporteret), hvilket ofte også benyttes på dansk.

Perpendikulærlængde (Lpp)

Dette begreb betegner afstanden mellem den såkaldte agterste perpendikulær og den forreste perpendikulær. Agterste perpendikulær er normalt den lodrette rorstamme agter (hvorom roret drejes), mens forreste perpendikulær er vandliniens skæring med forstævnen. Man er dog ikke definitivt bundet til at placere agterste perpendikulær ved rorstammen og slet ikke, hvis skibet ikke er forsynet med et rør. I så fald vælger man et andet kendetegnende punkt agter som værende

agterste perpendicular, eksempelvis agterstævnens skæring med vandlinien. Sidstnævnte definition af agterste perpendicular har DSB/Scandlines ofte benyttet på deres færger, også selvom disse har været forsynet med ror.

Servicefart

Servicefarten er den hastighed, som et skib normalt sejler med (når skibet er i service). Et skibs servicefart kan som regel opnås ved en ydelse af fremdrivningsmotorerne, der svarer til 80 – 90 % af motorenes maksimale effekt, MCR (Maximum Continuous Rating). Driftsteknisk og energioekonomisk er det mest fordelagtigt kun at belaste motorerne op til denne procentsats og samtidig betyder det, at skibet har en vis fartreserve/effektreserve, der kan være nyttig hvis man enten skal indhente en tidsforsinkelse eller hvis skibets fremdrivningsmodstand af en eller anden grund øges (eksempelvis dårligt vejr).

TEU/FEU

Containere findes i to størrelser med en længde på henholdsvis 20 og 40 fod (Twenty Feet Equivalent Unit og Forty Feet Equivalent Unit).

Tværpropeller

En speciel propeller, der er anbragt i rør, der er indbygget på tværs i et skib, så vand kan suges ind i den ene side af skibet og pumpes ud på den anden side. Reaktionskraften som følge af denne tværgående vandstrøm, kan benyttes til at manøvrere et skib med eller til at holde det op i mod tværgående vind eller strøm.

Vandlinielængde (L_{vl})

Den totale længde af et skib målt fra agterstævnens skæring med vandlinien og frem til forstævnen. Vandlinielængden er længere end perpendicular længden, idet denne længde normalt ligger mellem 92 og 100 pct. af vandlinielængden, med en stærk koncentration ved ca. 96 pct. af vandlinielængden.