



## **T-foils - Litteraturstudie**

Transport- og Boligministeriet

FORCE 118-36904

---

<b><u>LIST OF CONTENTS:</u></b>	<b><u>PAGE:</u></b>
1. INTRODUKTION.....	1
2. T-FOILS – EKSISTERENDE FORSKNINGRESULTATER.....	1
3. EFFEKT AF T-FOIL PÅ EXPRESS 1 OG MAX .....	3
3.1. Express 1 .....	3
3.2. Max .....	4
3.3. Operationelle konditioner .....	5
3.4. Observationer fra litteraturen .....	6
4. RESUME .....	8
5. REFERENCER .....	9

## 1. Introduktion

FORCE Technology har af Transport- og Boligministeriet fået til opgave at vurdere, hvor meget en såkaldt T-foil vil kunne bidrage med at reducere søsygeindekset på Molslinjens katamaranfærger *Express 1* og *Max* på ruten Ystad-Rønne. Vurderingen er baseret på tilgængelig litteratur omkring hurtigfærger. Da *Express 1* og *Max* i forvejen er udstyret med trim tabs agter (også kaldet "trim flaps" eller "stern tabs") skal dette studie forsøge at afdække effekten fra T-foils alene. Færgerne har følgende hoveddimensioner:

		Express 1	Max
Incat produkt navn		INCAT 112m	INCAT 91m
Overalt længde	Loa	112.5	91.3
Vandlinje længde	Lwl	105.2	83.6
Bredde	B	30.5	26

*Table 1.1 - Hoveddimensioner for Express 1 og Max*

## 2. T-foils – eksisterende forskningsresultater

Siden introduktionen af hurtigfærger i 1960 og 70'erne har passagerkomforten altid været en central udfordring. Derfor er der tidligt, efter de første katamaranfærger blev bygget, blevet udviklet løsninger til at reducere de lodrette bevægelser, der er den dominerende parameter ift. søsyge.

Der er gennem tiden blevet afprøvet forskellige former for vandret placerede foils ("undervandsvinger"), både passive og aktivt styrede. Sidstnævnte har vist sig at være de mest effektive (Hassani, Alterskjær, Fathi, Selvik, & Sæther, 2014), (Schack, 1995). I 1994 blev et Ride Control System (RCS) bestående af T-foils i forskibet og trim tabs agter introduceret på "Condor 10", en 74m wave-piercer katamaranfærge (WPC). Her blev det demonstreret, at det er muligt at mere end halvere de lodrette accelerationer og dermed søsygeindekset (MSI), sammenlignet med situationen hvor systemet var slukket (Schack, 1995). Ligeledes demonstreres der af (Haywood, Duncan, Klaka, & Bennett, 1995) reduktioner på 33-55% for sammenligning af to 40m katamaranfærger med finner i forskibet og flaps agter.

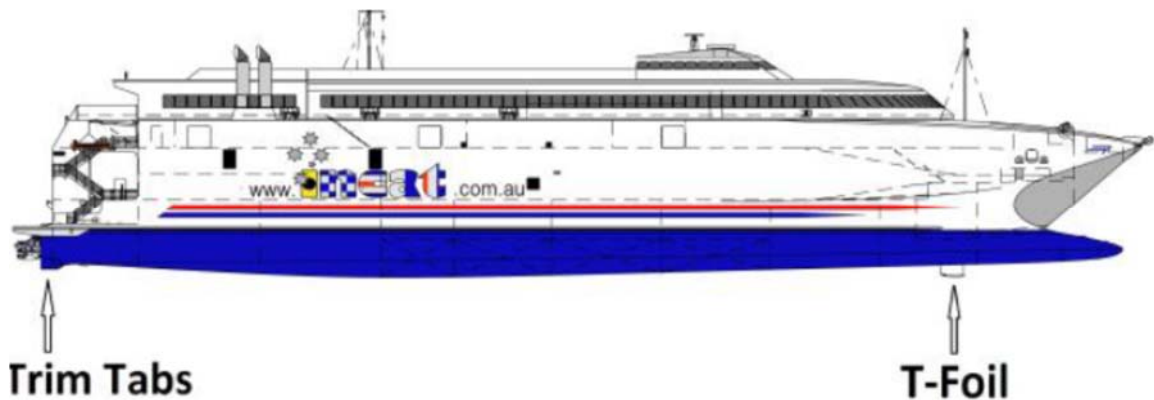
Lignende RCS er også blevet brugt på enkeltskrogsfærger. Der findes resultater fra modelforsøg med en 2.5m model af en 110m "deep-V" enkeltskrogsfærge med og uden trim tabs og T-foil. Reduktionen i MSI dokumenteres til 50-75% ved 40kn (Giron-Sierra, 2001).

I (Haywood A. J., 2001) er det illustreret, hvorledes de lodrette accelerationer for en enkeltskrogsfærge reduceres med aktiv RCS som følge af den relative bølgeretning. Heraf ses det at accelerationerne reduceres mest i bølgeretninger på omkring 60° skråt forfra (op til 50%) mens reduktionen er mindre i direkte modsø. Dog er bevægelserne uden RCS 60° skråt forfra op til dobbelt så store som i modsø.

Omfattende fuldskala forsøg på en 98m WPC (INCAT Hull 61) er blevet udført af US Navy og hovedresultater er dokumenteret i (Jacobi, Thomas, Davis, Holloway, & Davidson, 2012). Katamaranen var udstyret med trim tabs og en optrækkelig T-foil. Prøveturen inkluderede dels forsøg hvor T-foil'en var foldet op og dermed ikke aktiveret, mens trim tabs var aktive og dels forsøg hvor T-foil'en var nede og aktiveret, mens trim tabs var aktive. Sammenligning af resultaterne med og uden aktiv T-foil viser en reduktion på op til 20% de lodrette bevægelser (amplituder) ved 30 knob og 1.7-1.9m bølger. Der er dog ingen information om lodrette accelerationer eller MSI. Søtilstanden for forsøgene er ydermere sparsomt dokumenteret.

Senest er der publiceret en række artikler fra modelforsøg med en INCAT 112m (WPC) bl.a. beskrevet i (Alavimehr, Lavroff, Davis, Holloway, & Thomas, 2017). Modellen er konstrueret hydroelastisk således, at den har tilsvarende skrogstivhed som den virkelige færge og den er udstyret med trim tabs agter og T-foils i forskibet som illustreret i Figur 2.1. Dette er antageligt et søsterskib til Express 1.

Modelforsøg med en 2.5m model (Figur 3.1) blev udført med og uden RCS og med forskellige kontrolalgoritmer og det konkluderes, at søsyge kan reduceres med op til 40% vha. T-foil og trim tabs, afhængig af mødefrekvens og bølgehøjder. Den er blevet testet i modsø med bølgehøjder på 2.69m og 4.03m og bølgeperioder (regelmæssige) 6-19s, samt en fart på 37 knob.



Figur 2.1 - RCS på 112m INCAT fra (Alavimehr, Davis, Lavroff, Holloway, & A. Thomas, 2016)

### 3. Effekt af T-foil på Express 1 og Max

#### 3.1. Express 1

*Express 1* antages at være søsterskib til INCAT 112m. Derfor kan resultaterne fra modelforsøg beskrevet i (Alavimehr, Davis, Lavroff, Holloway, & A. Thomas, 2016) og (Alavimehr, Lavroff, Davis, Holloway, & Thomas, 2017) i nogen grad anvendes til vurdering af effekten fra T-foils på søsygeindekset. Disse undersøgelser afdækker dog kun ændringen med og uden T-foils og trim tabs, og ikke alene effekten fra T-foils. Derudover er der kun undersøgt for sejlads i modsø og ikke skråt forfra, som kan have en ligeså stor eller større effekt som beskrevet i (Davis & Holloway, 2003) og (Haywood, Duncan, Klaka, & Bennett, 1995).

*Express 1* er udstyret med trim tabs, men desværre er der begrænset information i litteraturen for forsøg, der er udført med trim tabs alene, så den er ingen direkte reference til denne konfiguration. Dog viser (Jacobi, Thomas, Davis, Holloway, & Davidson, 2012) resultater, der er udført for en 98m WPC. Denne undersøgelse er dog kun udført i bølger op til 1.9m og 30 knob, hvilket er mindre end i de konditioner som *Express 1* oplever, og samtidig er der kun rapporteret reduktioner i de lodrette bevægelser og ikke accelerationerne.

Dog er der udført undersøgelser af virkningen af selve trim tabs uden INCAT 112m modellen (Bell, Arnold, Lavroff, & Davis, 2013) hvor der måles lodrette kræfter i samme størrelsesorden der er målt i modelforsøg for T-foils alene i (Alavimehr, J; Davis, M R; Lavroff, J, 2015). Det giver dog ikke information om hvor meget trim tabs bidrager til de lodrette accelerationer i den forreste del af skibet når de er monteret på skibet.



Figur 3.1 – 2.5m hydroelastisk model af 112m INCAT WPC monteret med RCS (Alavimehr, Lavroff, Davis, Holloway, & Thomas, 2017)

## 3.2. Max

Der findes ikke umiddelbart lige så omfattende studier for INCAT 91m som for INCAT 112m beskrevet i forrige afsnit. Dog findes der studier for WPC på omkring 80m. Det er generelt accepteret, at skibes lodrette bevægelser reduceres i takt med at længden øges.

Dette er bl.a. dokumenteret af Det Norske Veritas (DNV) i (Schack, 1995) i Figur 194) for en katamaran med 40 knob i modsø. Heraf fremgår det at de lodrette accelerationer er omtrent 25% højere i forskibet for et 84m langt fartøj end et 105m langt fartøj. Estimatet inkluderer ikke effekter af aktiv dæmpning.

Der er altså større bevægelser at dæmpe og generelt for hydrodynamisk dæmpning gælder det, at dæmpningseffekten stiger med bevægelsernes størrelse (amplitude). Derfor vurderes det, at en T-foil kan have større relativ effekt på *Max* end *Express 1*.

Dette understøttes yderligere i litteraturen, hvor f.eks. (Davis & Halloway, 2003) rapporterer en reduktion på 35% for en 80m katamaran og (Haywood, Duncan, Klaka, & Bennett, 1995) rapporterer 30-60% reduktion for en 79m katamaran med 35 knob i 2m modsø. Endvidere er det i (Schack, 1995) beskrevet, at accelerationer kan reduceres op til 50% for en 74m WPC.

### 3.3. Operationelle konditioner

*Express 1* og *Max* sejler som udgangspunkt på hovedparten af overfarten med konstant kurs mellem Rønne og Ystad. Kursen fra Rønne til Ystad er  $\sim 300^\circ$  og fra Ystad til Rønne  $\sim 120^\circ$ .

De værste søtilstande som færgerne kan operere i uden at have ret til at aflyse, har en signifikant bølgehøjde ( $H_s$ ) på 3.0m. Et bølgespektrum med denne  $H_s$  kan have forskellige bølgeperioder eller bølgelængder, hvilket er afgørende for, hvorledes skibet bevæger sig i søen. Hvis bølgerne er meget korte, vil skibet ikke bevæge sig meget, men påvirkning vil måske mærkes som vandrette accelerationer og hvis bølgerne er meget lange, vil hele skibet derimod blive hævet op og ned så langsomt at det måske ikke mærkes eller føles ubehageligt.

I (Friezer, 2016) er der benyttet tre forskellige bølgespektre på ruten specificeret af historiske data fra Dansk Hydraulisk Institut (DHI), følgende "peak" periode,  $T_p$ : 7.1s, 7.4s og 7.6s.

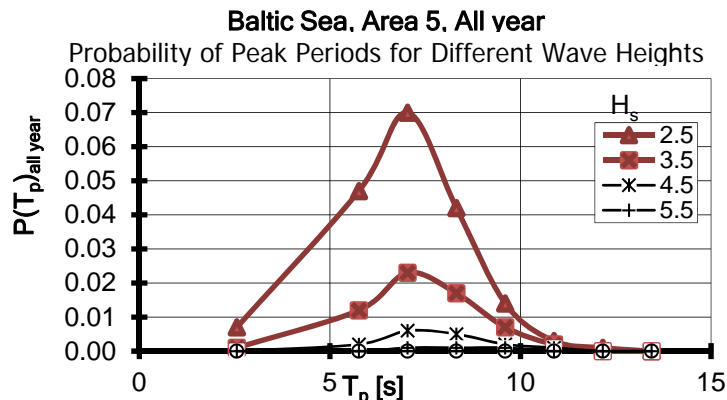
Disse perioder er fornuftige og stemmer overens med statistiske data fra BMT's bølgeatlas for hele Østersøen, som illustreret i Figur 3.2, der dog kun er repræsenteret ved  $H_s$  2.5 og 3.5m.

Ydermere er de fremherskende bølgeretninger vigtige, da skibets gensvar både er bestemt af den relative bølgeretning, mødefrekvensen og højden. Mødefrekvensen (encounter frequency) er bestemt ud fra hvilken vinkel, skibet møder bølgerne med, samt bølgeperioden.

De fremherskende bølgeretninger er også beskrevet i (Friezer, 2016) til  $220-260^\circ$ . Ovennævnte data kan bruges til at beskrive mødefrekvensen som funktion af bølgeretning. I Table 3.1 ses oversigten for Rønne-Ystad, der er overfarten, der vil være mest følsom for de givne bølgeretninger. Heraf fremgår det, at mødefrekvensen er mellem 0.17 og 0.32Hz, eller den dimensionsløse mødefrekvens er 3.4-6.6 for *Express 1* og 3.1-5.9 for *MAX*. I direkte modsøl vil mødefrekvensen være højere: 6.9-7.7 og 6.2-6.9 for hhv. *Express 1* og *Max*.

Forward speed	U	knots	36	36	36	36	36	36	36	36	36
Forward speed	U	m/s	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5
<b>Relative wave direction*</b>		<b>deg</b>	<b>80</b>	<b>40</b>	<b>0</b>	<b>80</b>	<b>40</b>	<b>0</b>	<b>80</b>	<b>40</b>	<b>0</b>
Kurs Rønne-Ystad		deg	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Fremherskende bølgeretning		deg	220	260	300	220	260	300	220	260	300
Wave period	$T_p$	s	7.1	7.1	7.1	7.4	7.4	7.4	7.6	7.6	7.6
Wave frequency	f	Hz	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13
Circular wave frequency	omega	rad/s	0.88	0.88	0.88	0.85	0.85	0.85	0.83	0.83	0.83
Circular encounter frequency	omega_e	rad/s	1.14	2.02	2.36	1.09	1.89	2.21	1.05	1.81	2.12
Encounter period	$T_e$	s	5.50	3.12	2.66	5.79	3.32	2.84	5.98	3.46	2.97
Encounter frq	$f_e$	Hz	0.18	0.32	0.38	0.17	0.30	0.35	0.17	0.29	0.34
<b>Dimensionless encounter frequency – Express 1</b>	<b>my_e</b>	-	<b>3.7</b>	<b>6.6</b>	<b>7.7</b>	<b>3.6</b>	<b>6.2</b>	<b>7.2</b>	<b>3.4</b>	<b>5.9</b>	<b>6.9</b>
<b>Dimensionless encounter frequency – Max</b>	<b>my_e</b>	-	<b>3.3</b>	<b>5.9</b>	<b>6.9</b>	<b>3.2</b>	<b>5.5</b>	<b>6.5</b>	<b>3.1</b>	<b>5.3</b>	<b>6.2</b>

Table 3.1 - Bølgeperioder og mødefrekvenser ( $0\text{deg}$ =head seas,  $90\text{deg}$ =beam seas) for Rønne-Ystad



Figur 3.2 – BMT bølgestatistiske data for Østersøen

### 3.4. Observationer fra litteraturen

I *Table 3.2* opsummeres de vigtigste parametre fra undersøgelserne i de relevante artikler. I tabellen er skrogtypen defineret som enten katamaran eller enkeltskrog (mono) og dernæst fartøjets længde. Metoden er enten "prøvetur" (sea trial), modelforsøg eller simuleringer/beregninger (Sim). Bølgeretning er specificeret, lavest og højeste reduktion i MSI eller RMS af acc., farten hvis den er opgivet, og dernæst bølgefrequenserne, der er rapporteret.

Artikler	Skrog-type	Skrog-længde	Metode	Bølge-retning	Reduktion i RMS/MSI med RCS		Fart	Bølge Min frq	Bølge Max frq	Bølge Peak frq	Kommentar
					%	%					
Schack, 1995	Cat	74	Sea trial		50	-	-	0.15	0.4	0.25	Condor catamarans
Haywood, Duncan, Klaka, & Bennett, 1995	Cat	40	Sea trial	Head	40	55	-	-	-	-	-
Haywood, Duncan, Klaka, & Bennett, 1995	Cat	40	Sea trial	Beam	44	52	-	-	-	-	-
Haywood, Duncan, Klaka, & Bennett, 1995	Cat	40	Sea trial	Bow quar	33	44	-	-	-	-	-
Haywood, Duncan, Klaka, & Bennett, 1995	Cat	79	Sim	Head	30	60	35	0.2	0.5	0.3	-
Haywood A. J., 2001	Mono	100	Sim	Bow quart	40		-	0.1	0.4		-
Haywood A. J., 2001	Mono	100	Sim	Head	30		-	-	-	-	-
Haywood A. J., 2001	Cat	32	-	Head-Stern	sign.	sign.	-	-	-	-	Pitch motion reduction 60-80%
Davis, M. R., & Halloway, D. (2003)	Cat	80	Sim	Head, quart	35	-	36	-	-	-	Simulations with different hull configurations
Giron-Sierra J. E., 2001	Mono	110	Model tests	-	40	75	-	-	-	-	-
Alavimehr, Lavroff, Davis, Holloway, & Thomas, 2017	Cat	112	Model tests	Head	25	40	37	0.05	0.13	-	-
Hassani, Alterskjær, Fathi, Selvik, & Sæther, 2014	Cat	-	Model tests	30° of bow	23*	61**	30	0.11	0.11	-	HSV II, Two horizontal foils and two interceptors
Jacobi, Thomas, Davis, Holloway, & Davidson, 2012	Cat	98	Sea trial	Head, Bow, Beam	20***	-	30	-	-	-	HSV-2 <i>Swift</i> (USNavy), INCAT Hull 61, trim tabs and retractable T-foil, reduction in heave ~20%

Table 3.2 – Oversigt af tidligere undersøgelser (\*heave acc, \*\*pitch acc, \*\*\*heave amplitude)



Table 3.2 viser, at der i de præsenterede studier er mulighed for at reducere søsyge indekset med 25-75% vha. trim tabs og T-foils kombineret for både enkeltskrogsfartøjer og katamaraner. De fleste studier har fokuseret på sejlads i modsø, da dette er nemmere at teste og beregne, men flere studier har også undersøgt andre bølgeretninger. Her tegner der sig et billede af, at vinkler skråt forfra op til 60-80 grader fra ret for, giver søsyge indeks i samme størrelsesorden som i direkte modsø og i visse tilfælde højere.

Bevægelserne og reduktionen heraf vha. RCS afhænger til dels af bølge- og mødefrekvensen. I de studier, hvor bølgefrekvenserne er angivet, dækker de, de forventede frekvenser for *Express 1* og *Max* jævnfør afsnit 3.3 og 3.2.

Da de største accelerationer opstår i forskibet, hvilket er dokumenteret i bl.a. (Davis & Halloway, 2003), vurderes en stor vandret kontrolflade monteret i forskibet, som en T-foil er, at have dominerende effekt på de lodrette accelerationer i forskibet i.f.h.t. effekten fra trim tabs som sidder i agterskibet. Mens trim tabs kan have en gavnlig effekt på at begrænse rullebevægelserne og trim (Alavimehr, J; Davis, M R; Lavroff, J, 2015) , menes de at have en begrænset effekt på de lodrette accelerationer i forskibet, da trim tab påvirker pitch bevægelse vha. pitch moment og ikke direkte som en T-foil.

Det er vigtigt at trim tabs og T-foil styres aktivt vha. et kontrolsystem, hvor en eller flere sensorer assisterer med at trim tabs og T-foil bliver styret optimalt.

Alle de præsenterede studier har kun undersøgt bevægelser i centerlinjen og der er derfor ikke inkluderet positioner væk fra centerlinjen, hvor rulleaccelerationer påvirker den lodrette acceleration. Figur 3.3 illustrerer passagerpositionerne på *Express 1*, hvoraf det tydeligt ses, at en væsentlig del af positionerne er væk fra skibets centerlinje. Passagerfordelingen for *Max* er sammenlignelig og det samme princip gælder derfor.



Figur 3.3 – Passagerpositioner ombord på *Express 1*

## 4. Resume

Det demonstreres entydigt i den studerede litteratur, at der kan reduceres væsentligt i de lodrette accelerationer ved brug af et RCS, der består af trim tabs agter og en T-foil for.

Det vurderes på baggrund af nærværende litteraturstudie, at det bør være muligt at forbedre komfortniveauet på både *Express 1* og *Max* mærkbart ved i forskibet at påmontere en T-foil (Figur 4.1), der arbejder sammen med de eksisterende trim tabs.

Da der ikke er udført forsøg eller simuleringer med *Express 1* eller *Max* og trim tabs, kan det ikke pga. nærværende studie med sikkerhed bestemmes, hvor meget søsygeindekset kan reduceres ved at introducere T-foils. Det vurderes dog, at en reduktion for *Express 1* på 20% kan være opnåelig.

Søsyge indekset for *Max* forventes at kunne reduceres mere som beskrevet i afsnit 3.2 og det vurderes at en reduktion på 25-30% kan være opnåelig.

Hvis søsygeindekset ønskes verificeret, bør det beregnes i alle passagerpositioner. Derfor er rul en vigtig parameter at inkludere, da en væsentlig del af passagerne er placeret væk fra centerlinjen.

Der er naturligvis stadig en del spørgsmål der ikke er besvaret fuldt i denne undersøgelse såsom: effekten af skrå sø, skroggeometri (længde, bredde, enkeltskrog, katamaran, facon), trim tabs/T-foil kombineret, passagerpositioner ombord, eksakte operation konditioner, med flere. Derfor er angivne dæmpningsniveauer udelukkede indikationer og kan ikke garanteres.

De citerede artikler omhandler både data fra prøveture, modelforsøg og simuleringer, og fra forskellige forskningsgrupper, hvilket øger pålideligheden.



Figur 4.1 – T-foil inden installation på 112m INCAT WPC (Alavimehr, Lavroff, Davis, Holloway, & Thomas, 2017)

## 5. Referencer

- Alavimehr, J., Davis, M., Lavroff, J., Holloway, D., & A. Thomas, G. (2016). Response of a high-speed wave-piercing catamaran to an active ride control system. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part A: International Journal of Maritime Engineering*, 325-335.
- Alavimehr, J., Lavroff, J., Davis, M., Holloway, D., & Thomas, G. (2017, March). An Experimental Investigation of Ride Control Algorithms for High-Speed Catamarans Part 1 : Ship Motions. *Journal of Ship Research*, 61.
- Alavimehr, J; Davis, M R; Lavroff, J. (2015). Low Reynolds Number Performance Of A Model Scale T-Foil. *Trans RINA*, 157.
- Bell, J., Arnold, T., Lavroff, J., & Davis, M. (2013). Measured Loading Response of Model Motion Control Stern Tabs. *International Journal of Maritime Engineering*, 155, A1-A7.
- Davis, M. R., & Holloway, D. (2003). Motion and passenger discomfort on high speed catamarans in oblique seas. *International shipbuilding progress*, 50, 333-370.
- Friezer, S. (2016). *Seakeeping Report on Ystad to Rønne Ferry route with 91 and 112m Incat Wave Piercing Catamarans*. Retrieved September
- Giron-Sierra, J. E. (2001). Experimental study of controlled flaps and T-foils for comfort improvement of a fast ferry. *Proc. IFAC Intl. Conf. Control Applications in Marine Systems*. Glasgow.
- Hassani, V., Alterskjær, S., Fathi, D., Selvik, O., & Sæther, L. (2014). Experimental results on motion regulation in high speed marine vessels. *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, (pp. 487-492). Palermo, Italy.
- Haywood, A. J. (2001). Practical Aspects of Ride Control Systems for High Speed Ferries. *IFAC Proceedings*, 34, pp. 485-491.
- Haywood, A., Duncan, A., Klaka, K., & Bennett, J. (1995, May). The development of a ride control system for fast ferries. *Control Engineering Practice*, 3(5).
- Jacobi, G., Thomas, G., Davis, M., Holloway, D. S., & Davidson, G. R. (2012, Jul-Sep). Full-scale motions of a large high speed catamaran. The influence of wave environment, speed and ride control system. *International Journal of Maritime Engineering (Transactions RINA)*, 154, Part A3.
- Schack, C. (1995). *Skrogudvikling af Hurtiggående Færger med henblik på sødygtighed og lav modstand - Et Design Studium*. Lyngby: Danmark Tekniske Universitet.



Copyright © FORCE Technology

---

FORCE Technology  
Division for Maritime Industry  
Hjortekærsvej 99  
2800 Kgs. Lyngby, Denmark  
Tel. +45 43 25 07 00  
Fax +45 43 25 07 01  
[info@forcetechnology.dk](mailto:info@forcetechnology.dk)  
[www.forcetechnology.com](http://www.forcetechnology.com)

FORCE Technology  
Headquarters  
Park Allé 345  
2605 Brøndby, Denmark  
Tel. +45 43 25 00 00  
Fax +45 43 25 00 10  
[info@forcetechnology.dk](mailto:info@forcetechnology.dk)  
[www.forcetechnology.com](http://www.forcetechnology.com)