



CHALMERS



Modern användning av vind för framdrivning av kommersiella fartyg

En ekonomisk analys av alternativa lösningar

Examensarbete inom sjökaptensprogrammet

MORTEN BENDZ

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, 2021

Modern användning av vind för framdrivning av kommersiella fartyg

En ekonomisk analys av alternativa lösningar

Examensarbete inom sjökaptensprogrammet

MORTEN BENDZ

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Avdelningen för maritima studier
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, 2021

Modern användning av vind för framdrivning av kommersiella fartyg
En ekonomisk analys av alternativa lösningar

MORTEN BENDZ

© MORTEN BENDZ, 2021

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Fullriggaren Christian Radich på väg in i New Yorks hamn 1960. Källa: Britannica Image
Quest, ©The Granger Collection

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Chalmers tekniska högskola
Göteborg, Sverige 2021

FÖRORD

”Navigare nessece est”, att segla är nödvändigt. Vinden har länge använts av människan som energikälla, bland annat för förflyttning av gods för handelsutbyte. Segel för utnyttjande av vindkraften för framdrivning av fartyg har använts i åtminstone 5500 år (Ghosh & Shukla, 2009). Kan det vara så att tiden med enbart maskinell framdrivning; först ångkraft och sedermera förbränningsmotorkraft, är ett kort kapitel i människans och jordens historia när det gäller transporter till sjöss?

Denna studie är en examensuppsats på Sjökapstensprogrammet på Chalmers tekniska högskola. Studien är gjord under hösten och vintern 2020-21.

Jag vill rikta ett stort tack till handledare Martin Larsson, till examinator Fredrik Olindersson och till stöd och utbildning från Chalmers bibliotek. Ni har bistått med ovärderlig och nödvändig hjälp för att denna studie skulle komma till.

Vidare vill jag rikta ett tack till de mycket kompetenta och framåtskridande tjänstemän på Norsepower Oy och Marina Läroverket som jag haft förmånen att intervjuas.

Då studien skrevs under brinnande Corona/Covid 19-epidemi har arbetet till väldigt stor del utförts i hemmet. Köksbordet i Bromma utanför Stockholm har varit den främsta arbetsplatsen men resor till Göteborg och landstället på Tjörn har givit välkommen omväxling.

Modern användning av vind för framdrivning av kommersiella fartyg

En ekonomisk analys av alternativa lösningar

MORTEN BENDZ

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Chalmers tekniska högskola

SAMMANDRAG

I och med ökat fokus på miljön, främst den globala uppvärmningen, och det faktum att sjöfarten står för två och en halv till tre procent av de globala utsläppen av koldioxid (Andersson, Brynolf, Lindgren, & Wilewska-Bien, 2016) har under senare år ett antal olika lösningar där kraften i vinden tas till vara för framdrift av kommersiella fartyg studerats och utvecklats.

Fyra lösningar för användandet av vindens kraft för framdrivning studeras i denna rapport. Lösningarnas ekonomiska hållbarhet studeras i investeringskalkyler. De ställs mot traditionell framdrift genom analys av kostnader samt bränslebesparing och därigenom ekonomisk besparing vid olika scenarier för kostnadsutveckling av bränslen samt vid olika internräntor. Löpande kostnader tas hänsyn till i kalkylen. De lösningar som studeras är traditionella segel, vingsegel, Flettnerrotorer och drakar/kites.

Resultatet från studien visar att nuvärden på investeringar i segellösningar med bränslepriser på nivån vid årsskiftet 2020/2021 och internränta på 10 procent blir positiva för samtliga studerade lösningar vilket innebär att de är lönsamma. Pay back-tiderna på moderna segellösningar ligger på runt åtta år. Vid högre drivmedelspris ökar nuvärdena och pay back-tiderna minskar.

I dagsläget är det endast Flettnerrotorer som används för kommersiell sjöfart. Ungefär 20 rotorer finns installerade på sex till sju fartyg. Kites har använts på åtminstone två fartyg i kommersiell drift men är inte i bruk i dagsläget.

Segellösningar är dels ett sätt för rederier att skapa bättre ekonomi genom omkring tioprocentiga bränsleförbrukningsminskningar och dels ett sätt att visa sig och framstå som ansvarstagande i miljöfrågan.

Då investeringarna har förhållandevis långa avskrivningstider och inte ger några markanta förbättringar i rederiernas ekonomi är de inte på något sätt självklara för rederier att göra. Högre drivmedelspriser liksom internationella regleringar av utsläpp och därigenom ökade kostnader kan sannolikt påskynda och öka antalet installerade segelssystem på kommersiella fartyg.

Investeringar i segellösningar konkurrerar om investeringskapital med andra rederi-investeringar som i vissa fall kan tänkas ha bättre ekonomiska nyckeltal.

Nyckelord: segelfartyg, kite, drake, "Flettner rotor", segel, vingsegel, ekonomi, investering

Modern use of wind for propulsion of commercial vessels

An economical analyses of different alternatives

MORTEN BENDZ

Department of Mechanics and Maritime Sciences
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The wind force has been used for propulsion of vessels during a very long period in the history of mankind. In comparison, steam- and motor propelled vessels have been used during a relatively short period of this history. With the increased focus on environmental issues, especially global warming and the fact that shipping stands for between two and a half and three percent of the global emissions of carbon dioxide (Andersson, Brynolf, Lindgren, & Wilewska-Bien, 2016), the use of wind for auxiliary propulsion has been studied quite a lot over the last decades.

Four different means of using the wind for propulsion of merchant vessels is studied in this report. The economical sustainability of the four different solutions is studied and compared in investment calculations and also compared to traditional diesel engine propulsion by analyses of costs and possible fuel consumption reductions. The different solutions studied are; Traditional sails, Rigid or Wing sails, Flettner rotors and Kites.

The results shows that the net present values of investments with today's (year end 2020) price levels of fuels and at an interest rate of ten percent are positive. This indicates that the investments are profitable. The pay back-times of the investments are around eight years. At higher fuel prices the net present value increases and the pay back-times decreases.

In today's shipping industry only the Flettner rotors are being used. About 20 rotors on six to seven commercial vessels are active. Kites have been used on a couple of vessels but are no longer in use.

Sailing solutions are means for shipping companies to create lower cost shipping with fuel savings of about ten percent but also means to show their intentions regarding acting more responsibly from an environmental perspective.

Since investments in sailing solutions do have fairly long depreciation times and does not have that much positive effect on the economy of the shipping companies they are far from natural to take. Increased fuel prices or extra cost on polluting by international regulations could possibly escalate investments in sailing solutions.

Investments in wind assisted propulsion systems do compete with other possibly more profitable investments in the shipping sector.

The report is written in Swedish.

Keywords: sailing vessel, kite, Flettner rotor, wing sail, sail, economy, investment

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. Inledning.....	1
1.1. Syfte	2
1.2. Frågeställningar.....	2
1.3. Avgränsningar	2
2. Teori	2
2.1. Bakgrund.....	3
2.2. Seglets funktion.....	3
2.3. Traditionella segel.....	5
2.4. Vingsegel.....	7
2.5. Magnuseffekten.....	7
2.6. Flettnerrotorn.....	8
2.7. Kite/Drake/Höghöjdssegel	10
2.8. Jämförelse mellan effekten och bränslebesparingen som kan utvinnas ur de olika segellösningarna	11
3. Metod	14
3.1. Investeringskalkylering	14
3.2. Investeringskalkylering med nuvärdesmetoden.....	15
3.3. Etiska, ekologiska, samhällsmässiga och miljömässiga aspekter	15
4. Resultat.....	16
4.1. Traditionella segel.....	17
4.2. Vingsegel	18
4.3. Flettnerrotorer	19
4.4. Kites	20
4.5. Jämförelse mellan alternativa segellösningar	20
4.6. Känslighetsanalys.....	21
5. Diskussion	23
5.1. Traditionella segel - diskussion.....	24
5.2. Vingsegel - diskussion	25
5.3. Flettnerrotorer och kites - diskussion.....	25
5.4. Diskussion kring pay back-tid och räntabilitet	26
5.5. Metoddiskussion	27
6. Slutsatser	29
6.1. Rekommendationer till fortsatt arbete.....	30
Källförteckning.....	31

FIGURFÖRTECKNING

Figur 1 Tryckskillnader skapas när ett segel länkar av vindens riktning (Tuvstedt, 2009)	3
Figur 2 Krafter på ett segels buk (Tuvstedt, 2009)	4
Figur 3 Lyft-, sid- och motkrafter illustrerade (Tuvstedt, 2009)	4
Figur 4 Segel och segelfartyg (Britannica Image Quest)	6
Figur 5 Magnuseffekten på en roterande cylinder (Norsepower oy, 2020)	7
Figur 6 Relativ bränsleförbrukning per Nm för testfartyg som en function av TWA (Ringsberg & Tillig, 2020)	8
Figur 7 Kite för extra framdrivning på växellastfartyg	9
Figur 8 Årliga överskott investering Traditionella segel	17
Figur 9 Årliga överskott investering i 2 st. Vingsegel om 710 watt	18
Figur 10 Årliga överskott investering i flettnerrotorer	19
Figur 11 Årliga överskott investering i kite	20

TABELLFÖRTECKNING

Tabell 1 Genomsnittliga bränslebesparingar för fartyg med kite som extra framdrivning	13
Tabell 2 Sammanställda nycketal för studerade segellösningar	16
Tabell 3 Nycketal Traditionella segelfartyg	17
Tabell 4 Nycketal Vingsegel	18
Tabell 5 Nycketal 2 st flettnerrotorer	19
Tabell 6 Nycketal 4 st flettnerrotorer	19
Tabell 7 Nycketal Kite	20
Tabell 8 Nycketal för segellösningar med internränta/kalkylränta 5 procent	21
Tabell 9 Nycketal för segellösningar med 50 procent förhöjt drivmedelspris	22
Tabell 10 Nycketal för segellösningar med 100 procent förhöjt drivmedelspris	22

FÖRKORTNINGAR OCH BEGREPP

Colreg	”Collision regulations”, internationella sjövägsregler
CSR	”Corporate social responsibility”, företags sociala ansvarstagande
DWT	Dödsviktston, lastförmåga i ton
kN	Kilonewton, enhet för kraft
kW	Kilowatt, enhet för effekt
kWh	Kilowattimmar, enhet för energi
MGO	Marin gasolja, lågsvavligt fartygsbränsle
Nm	Nautisk mil
ROI	”Return on investment”, avkastning på investerat kapital
RoRo	”Roll on – roll off”, fartyg anpassat för rullbar lastning
T/S	”Training ship”, traditionsfartyg
TWA	”True wind angle”, verklig vindriktning
USD	US Dollar
SB-vinkel	Styrbordsvinkel, riktning från förstäv åt styrbord 360 grader
”Weather routing”	Anpassning av färdväg med utnyttjande av väderprognoser

1. INLEDNING

Sjöfarten står för 90 procent av jordens transporter och två och en halv till tre procent av koldioxidutsläppen. Vad gäller övriga utsläpp, främst kväveoxider, svaveloxider och partiklar står sjöfarten för större andelar beroende på användandet av tyngre fraktioner av fossila bränslen (Andersson, Brynolf, Lindgren, & Wilewska-Bien, 2016). Sjöfartens förväntade framtida utsläpp av koldioxid är för 2050 20-25 procent. Detta beroende på den ökande handeln och övriga industriernas strävan mot koldioxidneutralitet (Parker, Rehmatulla, Smith, & Stulgis, 2015).

IMO, "International Maritime Organization" har satt mål för reduktion av utsläppen av växthusgaser för jordens flotta med 50 procent till 2050 baserat på utsläppen 2008 (International Maritime Organization, 2018). För att nå detta mål kommer rederier runt om i världen behöva ta avsevärda steg. Ett möjligt steg kan vara att minska bränsleförbrukningen och därmed utsläppen genom att till viss del "återgå till forna tiders sjöfart" och utnyttja vinden för framdrift.

Sjöfarten används för merparten av de transporter som utförs på jorden och är i de flesta fall mycket konkurrenskraftig kostnadsmässigt. Konkurrenskraften och effektiviteten måste emellertid ställas i relation till hållbarhetsfaktorer, såväl ekonomiska som miljömässiga. Då rederier studerar möjliga lösningar för användandet av oceanernas vindar för framdrivning av fartygen, antingen som huvudkälla till framdrift eller som ett komplement för att i viss utsträckning minska bränsleförbrukningen, är det av vikt att ställa de investeringar och löpande kostnader som moderna segellösningar etc. innebär i relation till de bränslebesparingar som kan komma att göras (Allwright, G, International Windship Association, 2017).

De ekonomiska aspekterna av förändrad, eller delvis förändrad, framdrivning av fartyg, har ett antal olika vinklar. Till att börja med är det den rena investeringen, kostnaden för arrangemanget ombord som behöver beaktas. Vidare kan naturligtvis segellösningar komma att innebära ökade underhållskostnader då ytterligare utrustning är installerad ombord som skall hållas i funktion. Besättningen kan komma att behöva utökas för att lösa den dagliga driften då någon eller några av segellösningarna används. Tyngden och placeringen av segellösningar och dess supportsystem kan innebära dels minskade lastmöjligheter av utrymmesskäl, dels beroende på deplacementsökning och dels beroende på stabilitet. En ytterligare ekonomisk problematik ligger i eventuellt förlängd restid då segellösningar används (Ringsberg & Tillig, 2020). Om det är frågan om en åtgärd för att ge extra framdrift och därigenom till del minska bränslekostnaden är sannolikt denna del mindre och kanske försumbar men i de fall restiden över en ocean fördubblas eller åtminstone ökar avsevärt är denna aspekt viktig.

Mycket av drivkraften för att skapa transportlösningar till sjöss som förbrukar mindre fossila drivmedel än dagens lösningar ligger i miljöåtaganden. För att drivkraften att skifta, eller delvis skifta framdrivning, till förnybara källor behöver dock den ekonomiska moroten också sannolikt finnas för rederier då dessa har avkastningsförväntande ägare. Den ekonomiska aspekten kan inkomma som både bonus och malus, d.v.s. både i form av besparingar/lönsamhetsförbättringar och i form av utebliven "bestraffning" såsom straffavgifter, straffskatter eller dylikt (Allwright, G, International Windship Association, 2017).

Denna studie analyserar ur ett ekonomiskt perspektiv några lösningar där vindens kraft används för framdrivning av kommersiella fartyg. För att utröna huruvida segellösningar på

kommersiella fartyg kan tänkas vara lönsamma i relation till förbränningsmotorer och för att bygga en inbördes jämförelse görs i studien investeringskalkyler på segellösningar. Känslighetsanalyser görs avseende olika drivmedelspriser såväl som olika internräntenivåer.

1.1. Syfte

Syftet med studien är att gå igenom de befintliga segellösningar som idag används, tidigare har använts och som är under utveckling; att utröna vilka ekonomiska konsekvenser det innebär att installera och använda dessa lösningar samt att undersöka om de kan skapa en totalt sett bättre ekonomisk transport än transport med rena förbränningsmotordrivna fartyg. Ansatsen är att ge läsaren en tillräcklig teknisk förståelse genom redogörelse för teorier och ekonomisk insikt genom investeringskalkyler på de olika alternativen för att därigenom framställa de ekonomiska effekterna av införande av segellösningar på kommersiella fartyg.

1.2. Frågeställningar

Vilka kostnader innebär det att konstruera, applicera och använda segellösningar på befintliga och/eller nya fartyg?

Vilka blir de ekonomiska konsekvenserna vid investeringskalkylering av konvertering från framdrift med hjälp av enbart förbränningsmotorer till att delvis använda vindens kraft?

Vid vilken prisnivå på fossila bränslen skapas lönsam segelfartygsdrift?

1.3. Avgränsningar

De miljömässiga aspekterna av segelfartygslösningar etc. behandlas i rapporten genom presentation av minskad bränsleförbrukning. Den absolut största miljöbelastningen från sjöfarten ligger i förbränningen av fossila bränslen (Andersson, Brynolf, Lindgren, & Wilewska-Bien, 2016) vilket gör att rapporten ger god vägledning inom miljöområdet trots att inte detaljer om utsläppsminskningar presenteras.

Rapporten studerar fyra tekniker för att tillvarata vindens kraft för framdrivning och begränsar sig till dessa. De lösningar som studeras är där vinden direkt används för framdrivning. Lösningar där vindkraftverk används för länkning till framdrivningen eller för generering av elektricitet som sedan används för framdrivning behandlas inte.

Studien syftar till att ekonomiska konsekvenser av installation av segellösningar kartläggs.

De aerodynamiska förklaringarna till framdrift genom segel baseras på tidigare genomförd forskning och analys. Denna redogörs för i teoriavsnitten.

Eventuella anpassningar ombord för att skapa likvärdiga möjligheter för lastning och lossning då segellösningar finns antas inte bidra till markant ökade kostnader.

2. TEORI

2.1. Bakgrund

Segling, användandet av vindens kraft för framdrift av fartyg, bygger på tryckskillnader och avlänkning av den vindström som träffar fartygets segel samt utnyttjande av tryckkraften från luftens rörelse. Segling var en av de första lösningarna för fartygstransporter av människor och gods och har använts i minst 5 500 år (Ghosh & Shukla, 2009).

I och med den industriella revolutionen under främst 1800-talets senare del kom segelfartygen att börja konkurreras ut av ångdrivna fartyg. Med hjälp av maskinell drift kom sjöfarten också att bli betydligt mer förutsägbar avseende ledtider. Segelfartygen hamnade i stiltjebälten och i områden och perioder med svagare vindar vilket gjorde dess restider osäkra och varierande. Vetetraden mellan Australien och England på 1930-talet tog i genomsnitt runt 110 dygn för de fyrmastade barkerna som trafikerade den men restiden kunde variera mellan Pommerns rekord 75 dygn till en god bit över dess genomsnitt 108 dygn (Skogsjö & Örjans, 2002).

Ångmaskinen kom sedermera att konkurreras ut av dieselmotorn. Bakgrunden till detta är den betydligt högre verkningsgrad som dieselmotorn har. Dagens sjöfart använder som bränsle i första hand tyngre fraktioner från raffinerad råolja; tjockolja i olika densiteter och viskositeter samt marin gasolja med tillräckligt låg svavelhalt för att följa IMOs svaveldirektiv 2020 (International Maritime Organization, 2020). Tjockolja med svavelhalt över 0,5 procent kombineras med skrubbers för att rena avgaserna vilket också är i enlighet med IMO 2020.

2.2. Seglets funktion

Två krafter från vinden påverkar segelfartyget och kan användas för framdrift. Det är dels luftmotståndet eller vindens direkta tryckkraft om segelfartyget har medvind och dels den så kallade lyftkraften.

Redogörelse för lyftkraft:

Mängden lyftkraft eller "lift" på engelska, som kan tas ut ur seglet beror på hur mycket seglet förmår ändra vindens riktning och i vilken utsträckning det därigenom skapas tryckskillnader mellan seglets två sidor. Figur 1 åskådliggör seglets avlänkning av vinden och skapandet av tryckskillnader (Tuvstedt, 2009).

Figur 1

Tryckskillnader skapas när ett segel lämnar av vindens riktning



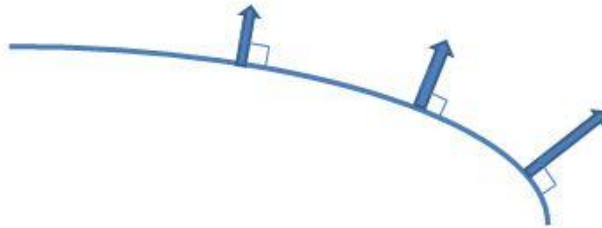
Egenkonstruerad figur. Källa: (Tuvstedt, 2009)

Lyftkraften som för segelfartyget framåt är samma kraft som gör att flygplan kan flyga. Den starka strömningen runt flygplansvingen tack vare farten framåt skapar tryckskillnader vid avlänkningen av luftströmmen och ger lyftkraft.

I figur 2 syns att kraften; lyftkraften, som utvinns ur seglet vid ändringen av vindens riktning alltid är riktad vinkelrätt mot tangenten på seglets yta (Tuvstedt, 2009).

Figur 2

Krafter på ett segels buk



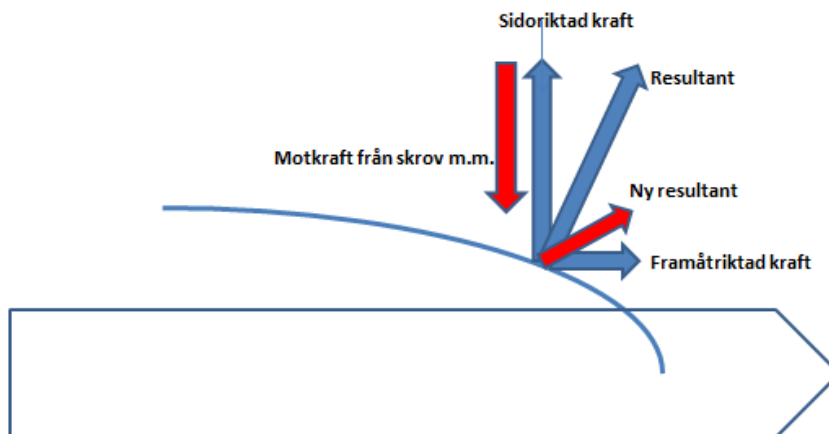
Notering: Vid varje punkt på seglet verkar lyftkraften vinkelrätt mot tangenten

Egenkonstruerad figur, Källa: (Tuvstedt, 2009)

Den sammanlagda lyftkraften som seglet skapar kan delas upp i en framåtriktad och en sidoriktad vektor vilket åskådliggörs i figur 3. Skrovform, roder och köl används för att motverka de sidoriktade krafter som segellösningar skapar så att det främst är rörelsen i fartygets långskepplinje som används (Tuvstedt, 2009).

Figur 3

Lyft-, sid- och motkrafter illustrerade



Egenkonstruerad figur. Källa: (Tuvstedt, 2009)

Det är viktigt att poängtera att segel verkar i den skenbara vinden. Skenbar vind är kombinationen av rådande verklig vind och fartvinden som skapas av fartygets framfart. Således blir den vind som används för att driva fartyget framåt kraftigare och kommer mer förligt ifrån med ökande hastighet på fartyget. Detta fenomen är inte minst viktigt att ta hänsyn till då segel används för att skapa extra framdrivning av ett fartyg som redan har viss fart åstadkommen med maskinkraft.

Storleken på kraften som tas ut från ett segel behöver anpassas efter vindens styrka och riktning i förhållande till fartyget. Vid kombinationen stor bukighet på seglet och kraftig vind kommer den sidoriktade kraften bli för stor för att kunna kompenseras och vid kombinationen för plant segel och svag vind utnyttjas istället för lite av vindens kraft med följden att framdrivningen inte blir optimerad (Tuvstedt, 2009).

Den andra kraften, luftmotståndet eller vid medvind tryckkraften från vinden, behöver övervinnas vid segling med vinden in för om tvärs och används för framdrivning vid vinden in akter om tvärs. På engelska kallas luftmotståndet eller den kraft som skjuter oss framåt vid akterliga vindar för ”drag” (Atkinson & Binns, 2018).

Vid medvind då farten framåt är lägre än vindhastigheten är luftmotståndet negativt, d.v.s. det hjälper till i framdrivningen, det skapas tryckkraft istället. I vinklar på verklig vind mellan ungefär 140 och 220 grader SB-vinkel från kursen är i stort sett den enda kraften som ger framdrift under segel denna kraft (Atkinson & Binns, 2018). Detta redovisade faktum är anledningen till varför det går snabbare att segla med vinden in snett akterifrån än rakt akterifrån. Då utnyttjas även lyftkraften för framdrivningen. För att utnyttja lyftkraften hålls en högre kurs mot vinden så att den skenbara vinden ligger utanför den vinkel som bara möjliggör utnyttjandet av det negativa luftmotståndet, alltså att vinden ”trycker” fartyget framåt (Atkinson & Binns, 2018).

Den sammanlagda kraft som ger fartyget framdrivning med hjälp av seglet är resultanten av lyftkraften och luftmotståndet/tryckkraften. För att skapa framdrift måste således resultanten av de två krafterna vara riktad någorlunda förut.

2.3. Traditionella segel

De sista kommersiellt hållbara transporterna med rena segelfartyg utfördes av större stålfartyg med tre till fyra master med företrädesvis råsegel. Dessa så kallade barker trafikerade på 1930-talet vetetraden från Australien till England (Skogsjö & Öljans, 2002). Den åländska fyrmastbarken Pommern står som exempel.

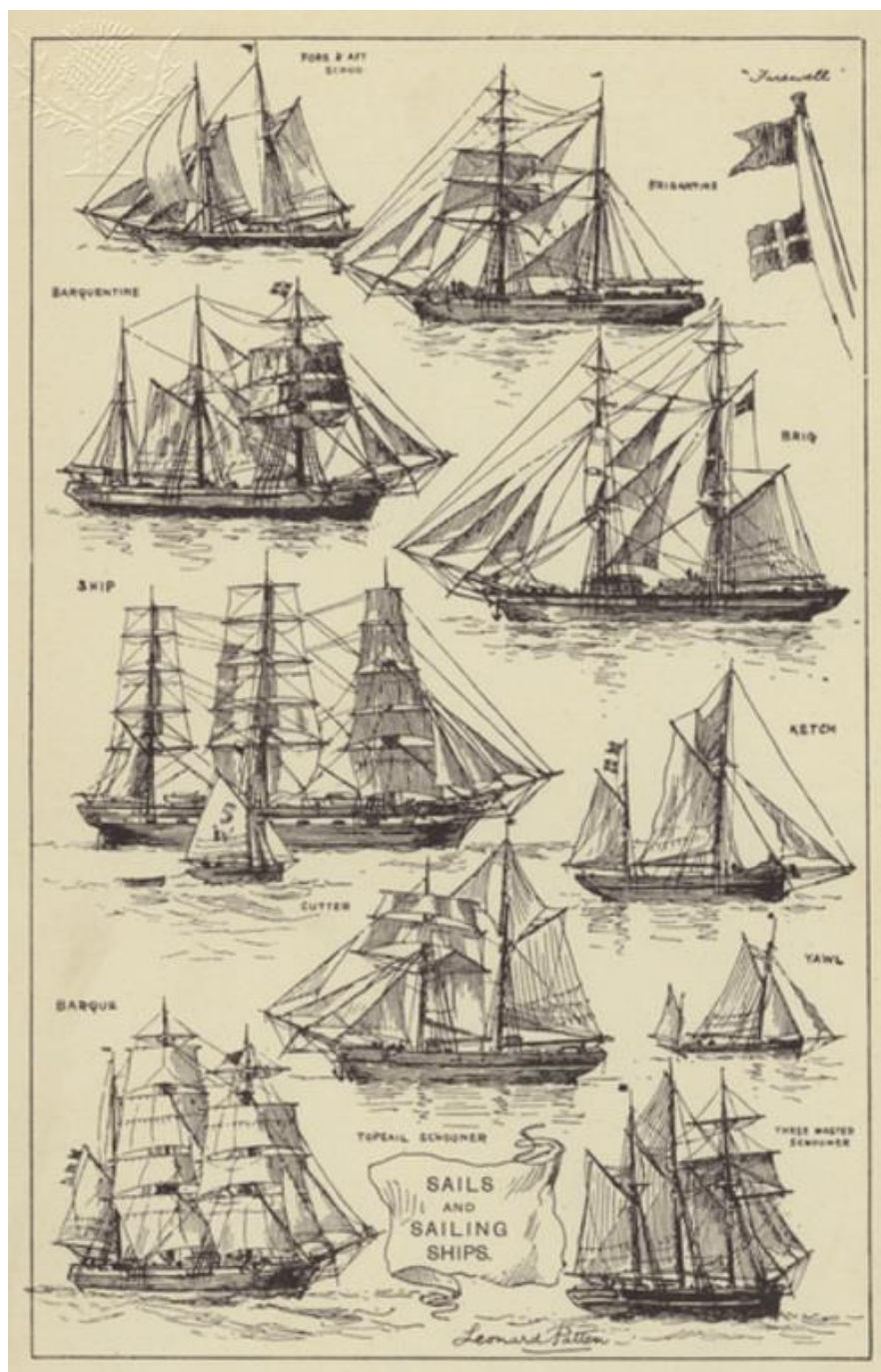
Pommern har en egen vikt på 4000 ton, lastade 4050 ton och bar en segelyta på 3240 kvadratmeter. Hon gjorde resan från Australien till England på i genomsnitt 108 dygn. Den effektiva distansen uppgår till 11800 nautiska mil (runt Godahoppssudden). Pommern och övriga vetetransporterande fartyg gick emellertid oftast österut runt Kap Horn och följde sedan på Atlanten vindarna först österut och efter passage av ekvatorn västerut för att undvika hästlatituder och få akterliga vindar i så stor utsträckning som möjligt (Skogsjö & Öljans, 2002).

Traditionella segel kan vara de fyrkantssegel, råsegel som framförallt var Pommerns framdrivning, de kan vara trekantiga seglen samt gaffelsegel, toppsegel och olika typer av moderna segel i lättare material; spinnaker, gennaker och ”code zero”. Olika varianter på segelfartyg och segel visas i figur 4. Det fartyg som kallas ”Ship” är en så kallad fullriggare. Detta fartyg har råsegel på samtliga master. Användandet av fyrkantssegel/råsegel för med sig att fartygen kan bära större segelyta och därigenom få större möjlig framdrivande kraft än vid användande av andra segel. Den vanligaste typen av segel på moderna segelyachter är de så kallade Bermuda-seglen, trekantiga segel på stagad mast i form av storsegel, försegel eller mesansegel.

För att utnyttja den kraftigare vinden högre upp i luften finns det olika typer av lösningar. En skonare har till exempel så kallade gaffelsegel vilka hissas med två fall och är ganska kvadratiska. T.ex. briggen och ketchen i figur 4 har dessa segel. De tar till vara vinden högre upp på ett bättre sätt än trekantsegel och kompletteras ofta med toppsegel (Schenzle, Weiss, & Weselmann, 1985).

Figur 4

Segel och segelfartyg



Källa: Britannica Image Quest © Look and Learn / Bridgeman Images

2.4. Vingsegel

Det har visat sig att vingsegel, d.v.s. segel av solid konstruktion ofta ger bättre aerodynamisk effekt än ”mjuka segel”, alltså traditionella segel i någon form av duk. Vingseglet kan optimeras konstruktionsmässigt så att luftmotståndet minskas medan den framåt drivande kraften blir större än för motsvarande segelyta då ett traditionellt duksegel används. Relationen mellan lyftkraft och luftmotstånd blir fördelaktigare för vingsegel än för det traditionella dukseglet (Ghosh & Shukla, 2009). Vingseglet är inte heller begränsat till den vanliga trekantsformen för duksegel då masterna normalt inte är stagade. Genom att kraftcentrum förskjuts uppåt med mer kvadratisk form uppnås högre kraft i och med att vinden ökar med höjden.

Det förekommer en rad olika typer och modeller av vingsegel eller rigida segel. Atkinson & Binns (2018) skapade en något förenklad kraftprofil för vingsegel som är användbar för jämförelser mellan olika typer av vingsegel.

Funktionen för framdrivning är i stort sett densamma för såväl mjuka traditionella segel som hårda segel/vingsegel med en sidoverkande kraft vinkelrätt mot tangenten på seglets buk (Tuvstedt, 2009), samt luftmotståndet som kan vara negativt och ge oss framdrift genom att vinden helt enkelt trycker fartyget framåt.

Tester har visat att i gynnsam vind kan rigida vingsegel på fartyg med stora displacement, till och med bulklasterfartyg, nå goda bränslebesparingar (Ikeda, Li, Nakashima, & Nihei, 2015).

Vid segling skapas en sidoriiktad kraft som ger upphov till krängning eller ”heal” på engelska. Krängningen innebär att fartygets momentana stabilitet förändras. Utgångsläget blir ett annat än vid framfart utan krängning och stabilitetskriterier behöver uppdateras. Genom detta kan lastkapaciteten komma att förändras till det sämre. Vid rätt hantering blir avdriften från fartyg med vingsegel acceptabel och krängningen, ”heal” blir i stort sett försumbar. Detta gäller även då flera vingsegel används samtidigt ombord. Vid skenbar vind på 30-40 grader och vindstyrka på 15 meter per sekund når krängningen på ett exempelfartyg bara 1,2 grader (Ikeda, Li, Nakashima, & Nihei, 2015).

En nackdel med vingsegel är att de inte på samma enkla sätt som segel av duk kan revas. I och med att segel inte fyller någon funktion vid vind rakt förifrån utan då endast ger luftmotstånd är det önskvärt att på något sätt kunna reva även vingsegel. Wallenius projekt Oceanbird har en lösning där vingseglet har en teleskopisk funktion så att de revas genom att hela konstruktionen dras ihop likt ett teleskop (Wallenius, 2020).

Global maritime energy efficiency partnerships (2020) har ungefärliga uppgifter på anskaffningskostnader för vingsegel. Ett segel som eftermonteras på fartyg och förväntas ge en effekt på 710 kW kostar mellan 170 000 och 300 000 USD per mast inklusive installation. Framtida förväntningar på effekt är för vingsegelmast ökning till 1 200 kW med möjlig användning under 15 procent av drifttiden.

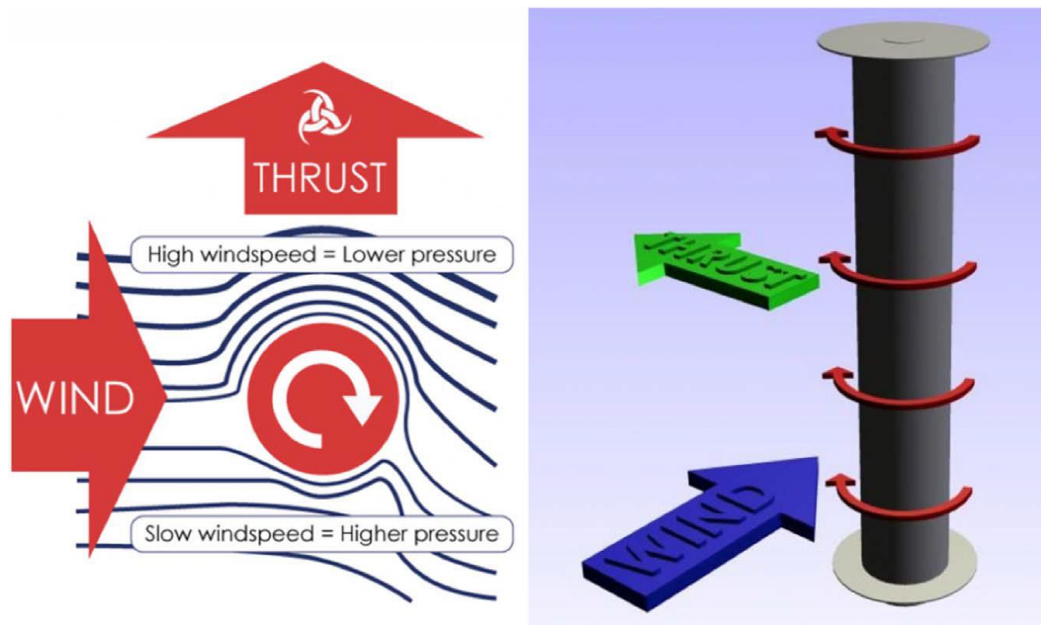
2.5. Magnuseffekten

Då en roterande kropp rör sig genom luften (eller annan gas eller vätska) skapas en kraft att flytta kroppen vinkelrätt mot rörelseriktningen på luftströmmen. Effekten var känd redan av Newton men är namngiven av den tyske kemisten Heinrich Gustav Magnus (Creative commons

Wikipedia, 2020). Exempel på Magnuseffekten kan ses när en fotboll eller golfboll skruvas, d.v.s. sätts i rotation. Den kommer då inte att färdas rakt fram utan vika av tack vare Magnuseffekten.

Det blir samma effekt som beskrivs ovan om luftmassan rör sig i förhållande till kroppen eller vid en kombination av de båda. Alltså då vind påverkar t.ex. en fartygsinstallerad Flettnerrotor som syns i figur 5. För ett fartyg är det den skenbara vinden som rotorn agerar i.

Figur 5
Magnuseffekten på en roterande cylinder



Publicerad med tillstånd av Norsepower Oy, källa: <http://www.norsepower.com/rotor-sail-solution/technology>)

2.6. Flettnerrotorn

Redan 1922 utvecklades Flettnerrotorn som möjlig framdrivning eller främst extra framdrivningskraft för fartyg. Det var forskaren Anton Flettner som på fartyget Buckau tog hjälp av det fysikaliska fenomenet Magnuseffekten för att skapa denna framdrift, Magnuseffekten förklaras i kapitel 2.5. En fördel med Flettnerrotorn framför ordinär segeldrift är att justering av segel inte är nödvändig utan endast justering av rotationshastighet och vid större vindskiften, på över 90 grader, oftast ändrad rotationsriktning. Kraften från rotorn ger en krängning åt lovart som kan kompensera för den krängning åt lä som vinden åstadkommer på skrov och överbyggnad. Detta innebär att krängning från Flettnerrotorer därför inte påverkar stabiliteten negativt (Searcy, 2017).

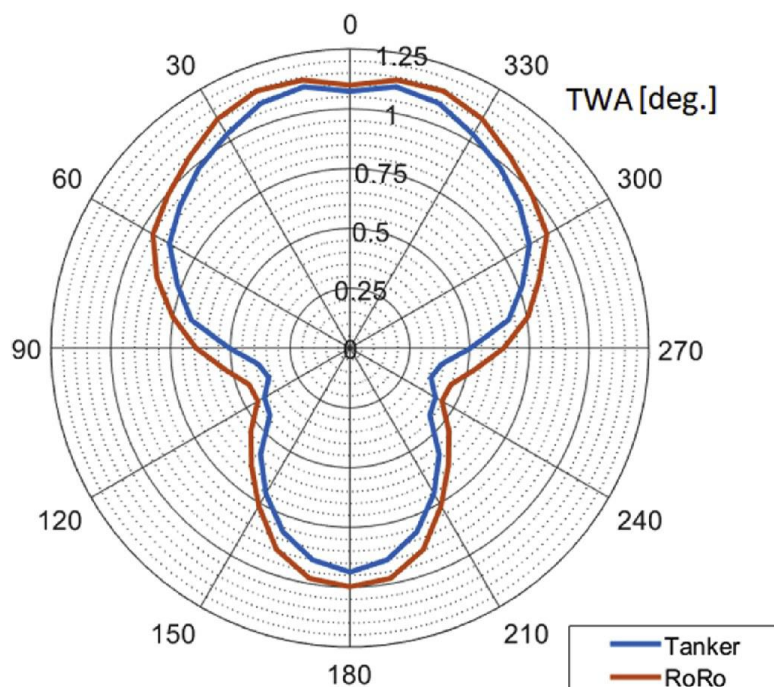
Flettnerrotorn består i en cylinder som fås att rotera med någon form av maskineri, oftast en elektrisk motor. Då vinden träffar cylindern skapas en lyftkraft i 90 graders vinkel från vinden. Flettnerrotorer skapar mer lyftkraft och därmed framdrivning per kvadratmeter yta än segel men kräver å andra sidan maskinell kraft för rotationen (Norsepower oy, 2020).

Då magnuseffekten verkar vinkelrätt mot inkommande luftström är det önskvärt att verklig vindriktning kommer in lite akter om tvärs så att den skenbara vinden blir 90 grader mot färdriktningen. Det kan vara lämpligt att anpassa kurs och eventuellt fart så att detta läge uppnås. Detta naturligtvis beroende på om den tillförda framdriftseffekt som Flettnerrotorn skapar genom bränslebesparing då kan kompensera eventuellt förlängd restid med de kostnader som detta kan innebära.

Ringsberg & Tillig (2020) kalkylerar bränsleförbrukning per nautisk mil på två exempelfartyg med monterade Flettnerrotorer i ShipClean-modellen, en prestandasimuleringsmodell. Resultaten avseende bränslebesparing framgår av figur 6. I det så kallade polardiagrammet syns bränslebesparingen genom att bränsleförbrukning vid olika vinklar på verklig vind varierar (TWA i figuren). Bränsleförbrukningen anges som en faktor per nautisk mil.

På exempelfartygen, en tanker på Stillahavsfart och ett RoRo-fartyg på Östersjöfart är i fallet med bäst utfall sex Flettnerrotorer placerade på lämpliga sätt ombord på tankern och fyra på RoRo-fartyget. De samverkar med varandra, med fartygets maskinella framdrivning och med fartygsskrovet på lämpligast möjliga sätt och har optimal rotationshastighet. I figuren framgår också tydligt att den mest favorabla vindriktningen (verklig vind) är strax akter om tvärs. Vid rakt akterlig vind och vid vind mellan 30 grader styrbord och 30 grader babord skapas i princip ingen framdrivningskraft av Flettnerrotorerna. Vid de mest favorabla förhållandena uppgår bränslebesparingen som synes till över 50 procent.

Figur 6
Relativ bränsleförbrukning per Nm för testfartyg som en funktion av TWA ("True Wind Angle"), Vindhastighet 10 m/s, fart 12 kn (tanker), 18 kn (RoRo)



Källa: (Ringsberg & Tillig, 2020)

I ett test utfört av (Azzam, Arief, & Santoso, 2018) fås fram en kraftfaktor på upp till 56 kN i vindstyrkor på 10 meter per sekund och relativt låg fartygshastighet (10 knop). En enskild rotor med 18 meters höjd och tre meter i diameter gav bränslebesparingar på mellan 0,5 och 17,4 procent beroende på vindstyrka och riktning.

Anskaffningskostnaden för en Flettnerrotor är mellan 400 000 och 950 000 USD. Ett installerat system med flera rotorerna innebär en investeringskostnad på mellan en och tre miljoner USD (Global maritime energy efficiency partnerships, 2020).

2.7. Kite/Drake/Höghöjdssegel

Kitesurfing har utvecklats till en populär sport och samma funktion är möjlig att använda som extra framdrift för kommersiell sjöfart.

Kiten, draken, tar upp mycket begränsad yta ombord, utrymmet för förvaring av den behöver inte vara större än en gammaldags telefonkiosk och utrustningen för att hissa och ta ner kiten kräver ganska begränsad däcksyta på backen/förskeppet. Företaget Skysails har en patenterad lösning där en teleskopisk mast hissar upp kiten inför att den sätts. På samma sätt används masten vid nedtagning. Då infästningen är centrerad till fartyget och nere på däck påverkar kraften från kiten inte fartygets stabilitet nämnvärt. Det skapas ingen krängning vilket har som följd att stabilitetskriterierna inte förändras. Vikten på utrustningen uppgår till ungefär 30 ton och den enda negativa effekten på lastkapaciteten är den vikt som utrustningens har (Skysail GmbH, 2020). I Figur 7 åskådliggörs en kite på 160 kvadratmeter samt dess däckmonterade utrustning.

Figur 7
Kite för extra framdrivning på växellastfartyg



Publicerad med tillstånd av Skysail GmbH, © Skysails GmbH (2020)

Vid användandet av en drake, kite, som har kontakten med fartyget endast via en draglina när den är i drift skapas en något annorlunda seglingsituation än då en vinge eller ett segel är fast monterat på fartyget. Draken har i princip samma funktion som en vinge eller ett segel och påverkas samt skapar de krafter som redogjorts för i kapitel 2.2. Det annorlunda och intressanta med draken är att den skenbara vindhastigheten kan bli betydligt högre än för fartygsmonterade segel i och med att kiten ”flyger fritt”. Då vindhastigheten (skenbar) är högre blir också lyftkraften högre och således kommer draken att kunna skapa en betydligt högre effekt per kvadratmeter än fartygsmonterade segel (Behrel, o.a., 2016).

Kiten har nackdelen att den ger framdrivande kraft för fartyg enbart då verklig vindriktning har större vinkel mot fartygets kurs än 60 grader. Då fartyget gör framfart, både med hjälp av kiten och med hjälp av ordinarie framdrivningsmaskineri blir den skenbara vinden under de 60 graderna. Kiten är lämplig som extra framdrivning, främst för fartyg som inte i grundläget är konstruerade för hög fart. Detta då den skenbara vinden vid hög fart blir mer förlig tack vare fartvinden och effekten av kiten således blir sämre (Koster & Naaijen, 2010).

Företaget Skysails har som sagts tidigare ett patent på en lösning som med framgång monterats på ett mindre antal fartyg. Enligt SkysailsMarineBrouchure (2020) är kostnaden 0,06 USD per kWh, ungefär hälften av kostnaden från huvudmaskin och Skysails GmbH menar att 10-15 procentiga besparingar av bränslet är möjliga.

En kite kan i optimala vindförhållanden skapa en framdrivande kraft för ett fartyg på 190 kN. Detta motsvarar 2000 kW av ett fartygs framdrivningsmaskineri (130 m långt växellastarfartyg med dödvikt på 9821 ton). I dessa optimala vindförhållanden kan då 60-70 procent av framdrivningskraften komma från kiten (Ahrens, Moritz, & Schmel, 2013).

Enligt Misra-Godwin (2016) uppgår kostnaden för kites i storleken 150 till 1 000 kvadratmeter till mellan 450 000 och 3 000 000 USD. Uppgifter från Skysails GmbH i mail (2020) ger anskaffningskostnad på 2 000 000 Euro (2 550 000 USD) för system med 320-400 kvadratmeter stor kite. Årliga kostnader uppgår till motsvarande 3-5 procent av investeringen.

2.8. Jämförelse mellan effekten och bränslebesparingen som kan utvinnas ur de olika segellösningarna

Bränslekostnaderna uppgår i normalfallet till två tredjedelar av ett fraktfartygs resekostnader. Av de totala kostnaderna utgör de ungefär 25 procent (Stopford, 2008).

Traditionella duksegel kan per kvadratmeter segelyta vid 10 meter per sekunds vind ge omkring en kW. Beräkningen är gjord utifrån antaganden avseende Pommern som står som modell för traditionell segeldrift i studien. Pommern hade som redogjorts för i 3.2. ett displacement fullt lastad på 8 050 ton. Den motsvarande maskineffekt som hade krävts för att skapa framdrift för Pommern är ungefär 3 500 kW. Pommern hade en segelyta på 3 240 kvadratmeter vilket alltså skulle kunna sägas ge en effekt på 1,08 kW per kvadratmeter vid kraftig vind. Kostnaden för segelinstallationen på Pommern var relativt låg. Efter första världskriget kunde åländska redare köpa denna typ av segelfartyg för i princip skrotvärdet (Skogsjö & Örjans, 2002).

Vid antaganden om inköpskostnad på 50 USD per kvadratmeter segel och motsvarande kostnad för rigg skulle Pommerns initialinvestering i rigg och segel uppgå till 324 000 USD. Antagen avskrivningstid 20 år för rigg och två år för segel. Nyinförskaffande av segel behöver ske vart

annat år till in kostnad av 162 000 USD. Marina Läroverkets segelfartyg Älva har en kostnad för införskaffandet av segel på cirka 500 SEK per kvadratmeter. Seglen ger omkring 25-30 procentiga besparingar i drivmedel och har en livslängd på omkring fem år (Marina Läroverket, 2021).

Ett vingsegel med 108 kvadratmeters segelyta skapar enligt Atkinson & Binns (2017) en maxeffekt i författarnas använda analysmodell på 171,6 kW. Vid hänsyn tagen till att denna effekt är vid gynnsam vindriktning och 18 meter per sekund kan genomsnittseffekten estimeras till 30 procent vilket ger 51,5 kW eller 0,477 kW per kvadratmeter segelyta vid blandade förhållanden. Vid användandet av ett exempelfartyg i Pommerns storlek skulle detta sannolikt kunna bära en segelyta på 1 600 kvadratmeter på fyra master och en relevant genomsnittlig effekt blir då 763 kW ($0,477 \cdot 1\,600$). Följaktligen torde vingsegel monterade på exempelfartyget kunna uppgå till 22 procent ($763/3\,500$) av framdrivningskraften om fyra master med vardera 400 kvadratmeter monteras.

Ahdour o.a. (2016) redovisar bränslebesparingar på mellan fem och 24 procent i genomsnitt för vingsegel. Bäst resultat fås från ett 90 000 DWT tankfartyg i låg fart. Fem segel 50x27 meter har då applicerats i testmiljön. Studien analyserar åtta fall med fyra olika fartyg på olika rutter. Genomsnittet i de åtta fallen är 11,1 procent bränslebesparing.

Wallenius (2020) menar att fartyget i projektet Oceanbird skall kunna uppnå genomsnittliga bränslebesparingar på 60 procent, d.v.s. att fartyget med segelkraften från fem stycken 80 meter höga vingsegel skall kunna ge merparten av framdrivningskraften på Atlantenöverfarer. Fartyget är ett billastfartyg med displacement på 32 000 ton.

I simulerad trafik mellan Mumbai och Durban når ett fartyg med installerad maskineffekt på 9 500 kW en bränslereduktion på 8,3 procent. I denna simulering kan vindkraft endast användas på 10,6 respektive 18,1 procent av dagarna på året. 70 procent av dagarna spenderas till sjöss men siffran sjunker till de låga talen beroende på stiltjebältena runt ekvatorn, "the doldrums" (Ghosh & Shukla, 2009).

I dagens sjöfart används Flettnerrotorer som ett komplement för framdrivningen på några fartyg. Viking Grace har en 24 meter hög rotor med fyra meters diameter som ger en årlig bränslebesparing på två till tre procent eller runt 300 ton per år. RoRo-fartyget M/V Estraden har två stycken 18 meter höga Flettnerrotorer med tre meters diameter som ger en bränsleförbrukningsminskning på i genomsnitt 6,1 procent och tankern Maersk Pelican har två större rotorer, 30x5 meter som enligt Lloyd's Register ger en bränslebesparing på i genomsnitt 8,2 procent (Norsepower oy, 2020). Det bör noteras att om fler rotorer hade använts hade besparingarna blivit större.

Den genomsnittliga bränslebesparingen i ShipClean-simuleringarna som Ringsberg & Tillig (2020) utfört uppgår i Stilla havs-fallet med en tanker till i genomsnitt 30 procent och i Östersjöfallet med ett RoRo-fartyg till i genomsnitt 14 procent.

Searcy (2019) har gjort en intressant analys av Flettnerrotorer i simulerad användning för Fijis nationella fartygstransporter. Med fem procents ränta skapas ett positivt nuvärde av investeringarna då bränslebesparingarna når tio procent eller mer. Fijis nationella fartygstransporter skulle enligt analyserna kunna spara mellan 10 och 15 procent genom installation av Flettnerrotorer på sina fartyg. Avskrivningstiden är 20 år och inflationen är satt till en procent medan inkomstökningarna på fraktintäkter är två procent. Nuvärdet vid tio

procent bränslebesparing är 33 000 USD eller 0,8 procent ROI och vid 15 procent 280 000 USD eller 6,6 procent ROI. Drivmedelspriserna är på 2015 års nivå. Den kumulativa bränslekostnaden hade i dessa priser och utan reducering uppgått till ungefär 12 miljoner USD.

Drakar/Kites har som nämnts i kapitel 2.6. fördelen att de verkar relativt fritt i luften och kan uppnå höga hastigheter och har generellt sett högre vindhastighet. Ett antal studier har genomförts. I tabell 1 redovisas källor och de genomsnittliga bränslebesparingar som framkommit genom litteraturstudier. Gemensamt för samtliga använda och simulerade kites är att de är förhållandevis små, mellan 160 och 500 kvadratmeter. Behrel o.a. (2016) menar att i framtiden kan kites på mellan 1 000 och 1 600 kvadratmeter komma att användas. Ahdour o.a. (2016) når en genomsnittlig besparing på 8,5 procent för samma fyra fall som gav 11,1 procent för vingsegel.

Allenström o.a. (2013) når i sin simuleringsmodell med en kite på 640 kvadratmeter besparingar på åtminstone 40 procent i många fall. Simuleringar är gjorda i olika fartygshastigheter och med olika vindstyrkor. En 320 kvadratmeter stor kite på 50 000 DWT tanker med 66 700 tons displacement skapar 10 procent bränslebesparing med 9,77 meter per sekunds vind och mer än 50 procent vid 15,68 meter per sekund. Detta vid någorlunda gynsamma vindriktningar (Behrel, o.a., 2016).

Tabell 1

Genomsnittliga bränslebesparingar för fartyg med kite som extra framdrivning

(Behrel, o.a., 2016)	(Ahdour, o.a., 2016)	(Koster & Naaijen, 2010)	(Allenström, Jansson, & Ran, 2013)	(Skysail Gmbh, 2020)
10 %	8,5 %	12 % (beräknat estimat)	15 % (beräknat estimat)	10-15 %

Notering: Uppgifter och estimeringar från litteraturstudier med angivna källor.

För att sätta bränslebesparingen i procent i relation till faktiska besparingar behöver faktorerna bränslekonsumtion och drivmedelspris föras in i diskussionen. Bränsleförbrukning varierar men vid marschfart kan estimeras 170 gram per kWh för en tvåtaktsdieselmotor och 185 gram per kWh för en fyrtaktsdieselmotor (Norsepower oy, 2020).

Kostnaden per kWh för maskindrift uppgår enligt Skysail Gmbh (2020) till 0,10 USD att jämföra med Skysails redovisade kostnader om 0,06 USD per kWh för kitesystemet. Vid drivmedelspris på 400 USD per ton och förbrukning på 185 gram per kWh blir med effektfaktorn 0,7 kostnaden per kWh 10,6 USD cent (vilket bekräftar Skysails resonemang):

$$0,185 * 0,4 \text{ (USD/kg)} / 0,7 = 0,106$$

M/S Beluga SkySails (senare BBC Skysails) hade under en period en 160 kvadratmeter stor kite installerad. Fartyget är 132 meter långt och har en dödvikt på 9 821 ton. Framdriftsmaskineriet har en effekt på 3 840 kW. Beräknade besparingar var 2,5 ton bränsle per dag (Powerlinks, 2020).

3. METOD

Tillvägagångssättet för att utröna de ekonomiska aspekterna kring segel- och andra vindbaserade framdrivningslösningar var i studien att använda en kalkyleringsmodell. En analys bestående i lönsamhets- och investeringskalkylering för var och en av de fyra ingående segellösningarna genomfördes. Nuvärdeskalkylering och pay back-tid användes som kalkyleringsformer. För skapandet av kalkyleringsmodellen sammanställdes information beträffande effekten som kan fås från de olika segellösningarna i form av bränslebesparing, så att en genomsnittlig ekonomisk nytta med vart och ett av de fyra studerade alternativen kunde tas fram. Denna effekt ställdes sedan i relation till de investeringar och kostnader som krävdes för vart och ett av alternativen.

Indata till kalkyleringen hämtades dels från tidigare gjord forskning och studier och dels från intervjuer och mailkonversationer med företrädare för rederier som arbetar med segellösningar samt med leverantörer av segellösningar. Intervjuerna i kombination med tidigare framtagen data skapade möjlighet till triangulering så att indata i kalkylerna dels hänför sig till tidigare forskning och dels till information från företrädare i branschen (Denscombe, 2018).

Den typ av intervjuer som valdes var semistrukturerade, d.v.s. det fanns ett tydligt frågeformulär som intervjun grundade sig på men ordningen i frågorna var inte strikt och utrymme fanns för de intervjuade att utveckla och lägga till (Denscombe, 2018), något som var viktigt i studien då antalet aktörer och därmed intervjuade personer var litet.

Teoriavsnittet skapades genom studier av befintlig litteratur skriven om de fyra studerade segellösningarna. Detta för att redogöra för bakgrund, teorier och krafter avseende dessa lösningar samt i viss utsträckning dess kostnader och ekonomiska konsekvenser. Vidare gjordes litteratursökningar för att ta fram material för att bygga en ekonomisk modell för investeringskalkylering.

Litteratursökning genomfördes på Chalmers bibliotek i Göteborg samt på Stockholms stadsbibliotek och Solna bibliotek. Sökord anpassade för de olika segel- och vindframdrivningsarrangemangen användes. De lämpligaste sökorden visade sig vara; ”Wing sail”, ”Kite propulsion” och ”Flettner rotor”. Sökningar gjordes dels i bibliotekens sökmotor och dels i databaserna Scopus, Student theses, Web of Science och Google Scholar.

Den ekonomiska modellen för investeringskalkylering byggdes upp med teorier från litteratur och med anpassning till rådande omständigheter inom sjöfarten. En känslighetsanalys applicerades så att det skapades möjligheter att studera de olika investeringarna vid olika bränslepriser och vid olika internränta.

Avseende sökning efter litteratur för de ekonomiska teorierna användes sökorden Investeringskalkyl, kalkyl, kalkylering, ”Investment Calculation” och ”Ship Investments”.

3.1. Investeringskalkylering

Investeringskalkylering kan utföras på några olika sätt. Den enklaste formen är den så kallade pay back- eller pay off-metoden i vilken överskottet varje år dras av från initialkostnaden till dess beloppet är nere på noll och investeringen därigenom är betald. Metoden tar inte hänsyn

till någon ränta utan ger endast den tid i år det tar att rakt betala av investeringen (Andersson, Ekström, & Gabrielsson, 2011).

3.2. Investeringskalkylering med nuvärdesmetoden

En metod som tar hänsyn till en förutbestämd ränta, så kallad internränta eller kalkylränta och diskonterar framtida intäkter och kostnader med denna för att skapa ett värde i penningvärdet vid tidpunkten för investeringen kallas nuvärdesmetoden (Andersson, Ekström, & Gabrielsson, 2011). Anledningen till att ränta används är för att företagets ägare sannolikt har avkastningskrav på investerade medel. Om det är en bankfinansierad investering förväntar sig banken en ränta och likaså att lånet betalas av på förutbestämd tid. Ränta kan sägas ha tre komponenter; inflationskompensation, en ”kostnad” för att låna ut pengarna – helt enkelt ersättningen för att utlånan själv (banken) inte har dem att tillgå - och en riskpremie. Riskpremien är en ersättning för en eventuell förlust av det utlånade kapitalet.

3.3. Etiska, ekologiska, samhällsmässiga och miljömässiga aspekter

Studien studerar tekniker som i stor utsträckning utvecklats för att minska sjöfartens miljöbelastning. Den skulle potentiellt kunna ingå i beslutsunderlag i för miljöbelastningen positiva beslut i form av implementeringar av segellösningar. Ingående studerade lösningar har i studien betraktats objektivt ur ett företagsekonomiskt perspektiv såväl som ur ett etiskt- och miljömässigt perspektiv.

Intervjuade personer identifieras inte med namn utan refereras till som representant för respektive företag.

Eventuella resor under studiens genomförande har skett med miljöklassad bil och med tåg och därigenom renderat relativt lite miljöbelastning. Intervjuer har i stor utsträckning skett telefonledes eller digitalt, dels för att undvika onödiga resor och dels i beaktande av rådande situation avseende smittspridning av Covid 19.

4. RESULTAT

Segellösningar kan i många fall ge ekonomiskt hållbar framdrift för kommersiell sjöfart. I första hand som auxilär, kompletterande, framdrivning. De investeringskalkyleringsmodeller som valts för denna studie är nuvärdesmetoden och pay back-metoden. Pay back-tiden, den tid det tar för investeringen att skapa årliga överskott så att investeringen är betald, hamnar på mellan 6,1 och 9,0 år för studerade segellösningar. Den högsta siffran avser traditionell segeldrift utan att hänsyn tagits till de längre distanser som behöver seglas och därigenom den ökade reselängden i dagar med alla dess kostnader. Samtliga lösningar skapar positiva nuvärden i grundscenariot. Detta ger att de alla är lönsamma investeringar. Nuvärden på investeringarna vid sidan om pay back-tiderna redovisas i tabell 2. Uppgifterna för kiten på 160 kvadratmeter och för vingsegel är genomsnitt från litteraturstudiernas simuleringar, för traditionella segel antaganden som redovisas i kapitel 2.8. och för Flettnerrotorerna redovisade uppgifter av den marknadsledande aktören Norsepower Oy (2020) som triangulerats med referenslitteratur. Uppgifterna för kiten på 320-400 kvadratmeter bygger på information i mailkonversation med företaget Skysails (2020). Räntabiliteten i tabellen är diskonterat nuvärde inklusive årlig avskrivning dividerat med investeringsbeloppet och internräntnivån är i grundfallet 10 procent.

Den enda av de fyra studerade segellösningarna som i dagsläget används i kommersiell drift är Flettnerrotorn. Kites har använts på några fartyg tidigare medan vingsegel ännu inte har kommersialiserats.

Tabell 2

Sammanställda nycketal för studerade segellösningar, internränta 10 %, drivmedelspris 400 USD per ton

	Investering (USD)	Nuvärde (USD)	Pay back-tid (År)	Räntabilitet (%)
Traditionella segel, depl. 8 000 ton DWT 4 000	486 000	210 711	9,0	43,36%
Vingsegel, depl. 8 000 ton DWT 4 000	600 000	591 823	6,7	98,64%
Flettnerrotorer, 2 st. 18*3 m, RoRo, depl. 18 207 ton DWT 9 700	912 000	685 636	8,1	75,18%
Flettnerrotor, 1 st 24*4m, passagerarfartyg, 57 565 GT	900 000	590 008	8,9	65,56%
Kite 160 m2, Växellastare 9 747 DWT	600 000	678 573	6,1	113,10%
kite 320-400 m2, 50 000 DWT	2 550 000	2 287 414	7,2	89,70%

Pay back-tiderna med högre drivmedelspriser blir kortare och nuvärdena blir högre. Nuvärdena påverkas vidare av internräntan. Känslighetsanalysen i kapitel 4.6. studerar scenarios med högre drivmedelspris såväl som lägre internränta.

Investeringarna i Flettnerrotorer anses ha en livslängd på 25 år, ungefär densamma som fartygen de monteras på (Norsepower, 2020). Vingsegel antas ha motsvarande livslängd liksom kite-installationen. Själva kiten byts oftast ut årligen. Traditionella segel antas behöva skiftas vartannat år och stående och löpande rigg (master, bommar, vajerstag, fall etc.) antas ha en livslängd på 20 år.

Nedan redovisas analyser av ett antal olika investeringsfall. De har som sagt samtliga renderat ett utfall med positivt nuvärde som redovisas i nedanstående tabeller. Som grund har använts en kalkyl- eller internränta på tio procent och drivmedelspris på 400 USD per ton som motsvarar ungefärligt världsmarknadspris på MGO (marin gasolja) per den 1 januari 2021 med påslag för distributionskostnader och distributörens marginal.

4.1. Traditionella segel

Traditionella segel har uppenbara nackdelar mot övriga segellösningar i det faktum att större besättning ofta behövs. Pommern och dess systerfartyg seglades med 23 mans besättning på en last om cirka 4 000 DWT (Skogsjö & Örjans, 2002). I tabell 3 redovisas nyckeltal och resultat av investeringskalkyl för traditionell segeldrift. Tabellens uppgifter bygger på beräkningar och antaganden avseende installation av traditionella segel som jämförts med Marina Läroverkets S/Y Älva (Marina Läroverket, 2021). Uppgifterna kan ge en fingervisning om vad en segelinstallation skulle kunna innebära i modern sjöfart. Driftskostnaderna består i besättningsökning på 12 personer per besättning och dubbla besättningar med genomsnittlig lön på 2 500 USD per månad. ILO (International labour organization) minimilön är 641 USD per månad för en matros (ITF Seafarers, 2021) och medellönen i Sverige var 2020 3 846 USD (32 400 SEK) (Yrkeskollen, 2020). 2 500 USD är därför ett relevant genomsnittsbelopp för personalkostnad. Beräkningarna baseras på ett fartyg med Pommerns deplacement på 8 000 ton och dödvikt på 4 000ton.

Tabell 3

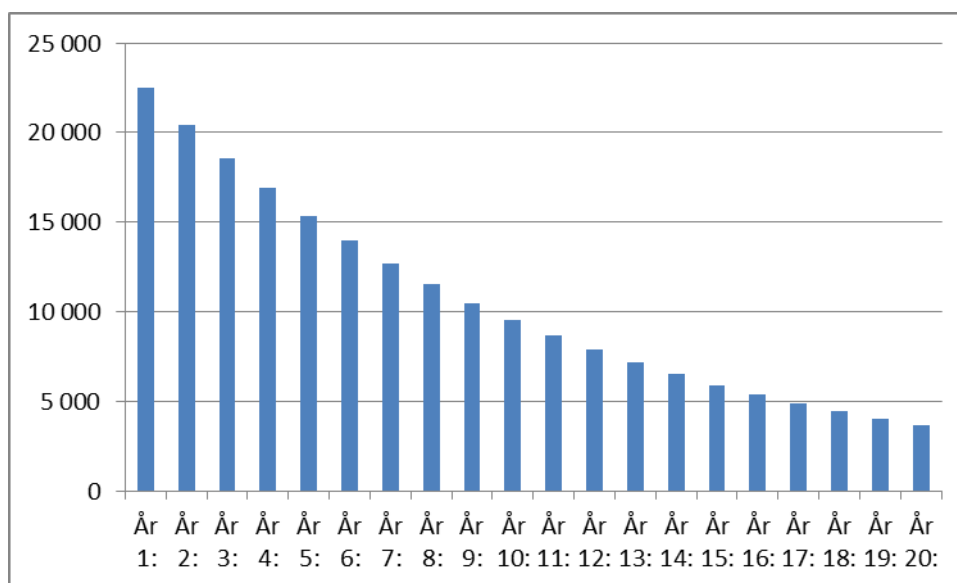
Nyckeltal Traditionellt segelfartyg med deplacement på 8 000 ton och dödvikt på 4 000 ton, internränta 10 %, drivmedelspris 400 USD per ton

Anskaffningskostnad	486 000 USD	Bränslekostnad	400 USD/ton
Årlig bränslebesparing	896 000 USD	Bränslebesparing i snitt	80,0 %
Årliga kostnader (exkl. avskrivning)	851 000 USD		
Avskrivningstid	20 År	Pay back-tid	9,0 År
Internränta	10 %	Nuvärde	210 711 USD

De årliga överskotten som leder till nuvärdet 210 711 USD bygger på bränslebesparingar på 80 procent och nyinköp av segel vartannat år (fördelat i kalkylen med halva beloppet 81 000 USD varje år). De årliga överskotten redovisas i figur 8. Avskrivningstiden på riggen är satt till 20 år.

Figur 8

Årliga överskott investering Traditionella segel (USD), fartyg med deplacement på 8000 ton och dödvikt på 4000 ton, internränta 10 %, drivmedelspris 400 USD per ton



4.2. Vingsegel

Vingsegel finns som tidigare nämnts inte installerade på några fartyg i kommersiell fraktsjöfart i dagsläget. Walleniusprojektet Oceanbird har enligt email från Wallenius (2020) inte kommit så långt i utvecklingen att några beräkningar avseende lönsamhetspotential kan göras. En hypotetisk analys kan göras baserat på uppgifter från litteraturstudien. Global maritime energy efficiency partnership (2020) redovisar kostnader på anskaffning av vingsegel. Dessa uppgår till mellan 170 000 och 300 000 USD per mast. I kalkylen, redovisad i tabell 5, räknas med installation av två stycken master med vingsegel med effekt på 710 watt vardera och anskaffningskostnad på 250 000 USD. Antaganden görs om motsvarande underhållskostnader som Flettnerrotorer och 50 procent av dess driftskostnad. Vingsegel behöver maskinellt justeras men har inte kontinuerlig rotation vilket innebär lägre driftskostnader än Flettnerrotorer. Bränslebesparingen är estimerad till 11 procent baserat på dels resonemang i kapitel 2.8. dels att seglen används 50 procent av tiden utan reseförslängning och dels på Ahdour o.a. (2016) redovisade genomsnittliga besparing på flertalet fartyg i simuleringar.

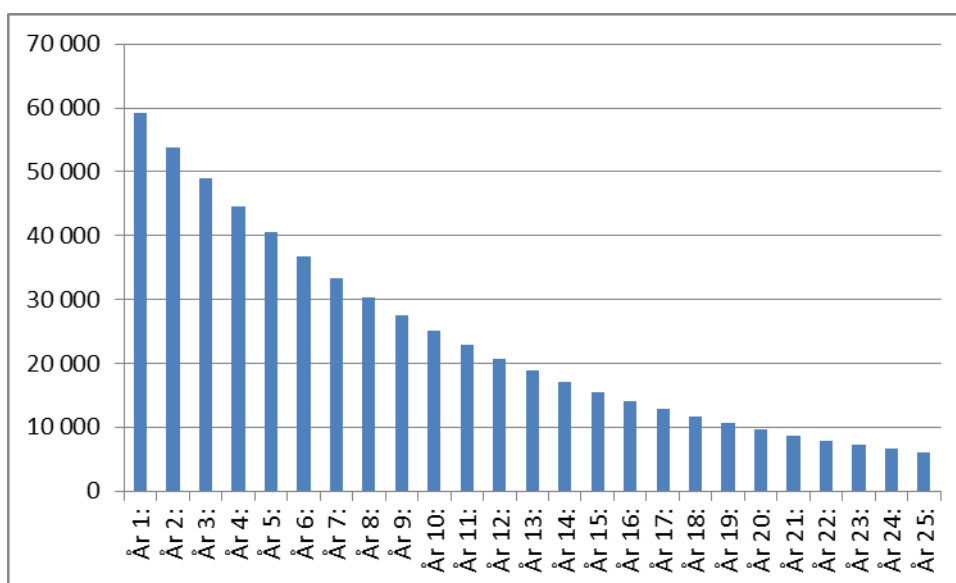
Tabell 4

Nyckeltal Vingsegel fartyg med displacement på 8000 ton och dödvikt på 4000 ton

Anskaffningskostnad	600 000 USD	Bränslekostnad	400 USD/ton
Årlig bränslebesparing	123 200 USD	Bränslebesparing i snitt	11,0 %
Årliga kostnader (exkl. avskrivning)	34 000 USD		
Avskrivningstid	25 År	Pay back-tid	6,7 År
Internränta	10 %	Nuvärde	591 823 USD

Figur 9

Årliga överskott investering i 2 Vingsegel om 710 watt (USD), displacement 8000 ton, dödvikt 4000 ton, internränta 10 %, drivmedelspris 400 USD per ton



4.3. Flettnerrotorer

Enligt Norsepower (intervju 2020) samt Global maritime energy efficiency partnership (2020) ligger anskaffningskostnaden på Flettnerrotorer på mellan 400 000 och 1 150 000 USD. Den högsta siffran hänför sig till Norsepowers största modell som är 35 meter hög. Vid sidan om dessa kostnader skall adderas ungefär 20 procent i installationskostnader (Norsepower, 2020). Beräkningar för ett RoRo-fartyg på 10 000 DWT med maskinell servicekraft på 11–12000 kW och marschfart på 19 knop visas i tabell 6 och 7. I tabell 6 framgår verkligt utfall med två installerade rotorer (18*3m) och i tabell 7 estimerat utfall med fyra rotorer. Pay back-tid och nuvärde redovisas vid tio procents internränta med bränslekostnad på 400 USD per ton. Figur 10 åskådliggör årliga överskott efter avskrivning.

Tabell 5

Nyckeltal 2 st. Flettnerrotorer (18*3m) på fartyg med dödvikt om 10 000 ton

Anskaffningskostnad	912 000 USD	Bränslekostnad	400 USD/ton
Årlig bränslebesparing	160 015 USD	Bränslebesparing i snitt	6,1 %
Årliga kostnader (exkl. avskrivning)	48 000 USD		
Avskrivningstid	25 År	Pay back-tid	8,1 År
Internränta	10 %	Nuvärde	685 636 USD

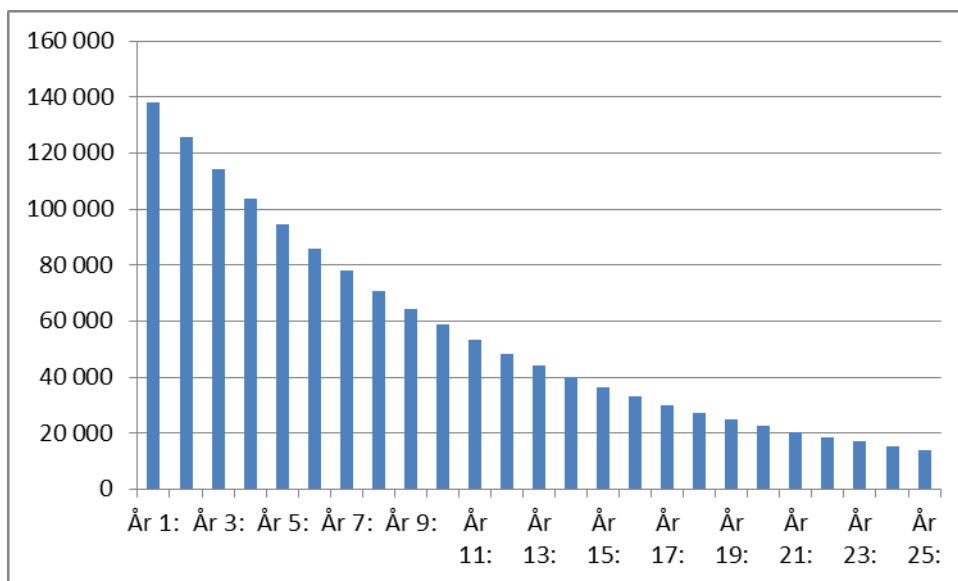
Tabell 6

Nyckeltal 4 st. Flettnerrotorer (18*3m) på fartyg med dödvikt på 10 000 ton, internränta 10 %, drivmedelspris 400 USD per ton

Anskaffningskostnad	1 800 000 USD	Bränslekostnad	400 USD/ton
Årlig bränslebesparing	320 030 USD	Bränslebesparing i snitt	12,2 %
Årliga kostnader (exkl. avskrivning)	96 000 USD		
Avskrivningstid	25 År	Pay back-tid	8,0 År
Internränta	10 %	Nuvärde	1 379 986 USD

Figur 10

Årliga överskott investering i 4 st. Flettnerrotorer, fartyg med dödvikt på 10 000 ton (USD), internränta 10 %, drivmedelspris 400 USD per ton



4.4. Kites

Kitesinstallationer är förhållandevis dyra i anskaffning. Ett fartyg på 50 000 DWT med längd om 190 meter kan utrustas med ett kite-system för i storleksordningen 2,5 miljoner USD inklusive installation. Underhållskostnaderna innefattande inköp av ny kite uppgår till tre till fem procent av detta belopp årligen. Livslängden på en kite är ungefär ett år (mail Skysails). I kalkylen räknas med fyra procent årlig driftskostnad vilken innefattar införskaffandet av ny kite.

Bränslebesparingen är ett genomsnitt av de uppgifter som redovisas i kapitel 2.8 vad avser olika källors redovisade procentuella minskningar i bränslekonsumtion.

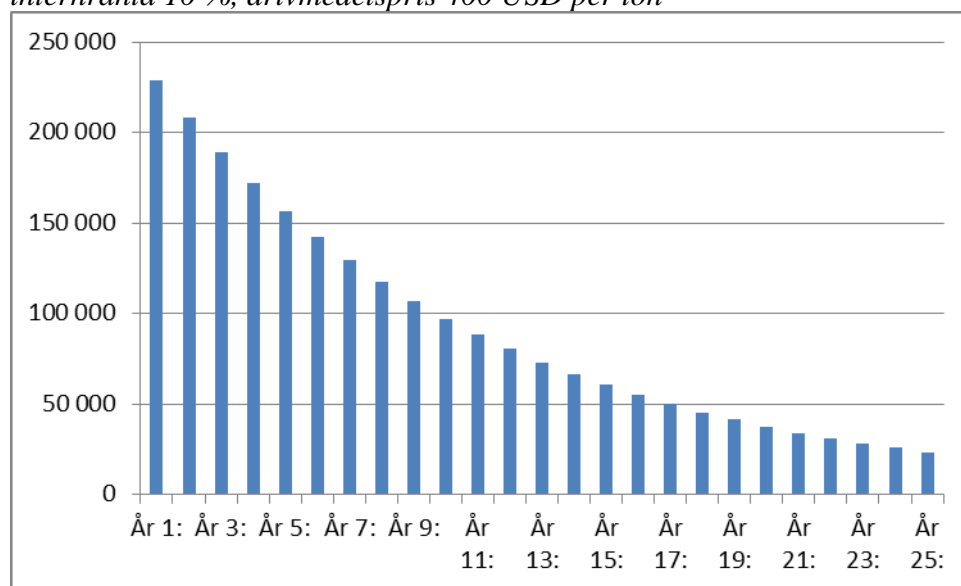
Tabell 7

Nyckeltal kite 320-400 m² på fartyg med dödvikt 50 000 ton

Anskaffningskostnad	2 550 000 USD	Bränslekostnad	400 USD/ton
Årlig bränslebesparing	456 000 USD	Bränslebesparing i snitt	12,0 %
Årliga kostnader (exkl. avskrivning)	102 000 USD		
Avskrivningstid	25 År	Pay back-tid	7,2 År
Internränta	10 %	Nuvärde	2 287 414 USD

Figur 11

Årliga överskott investering i kite på fartyg med dödvikt på 50 000 ton, (USD), internränta 10 %, drivmedelspris 400 USD per ton



4.5. Jämförelse mellan alternativa segellösningar

Samtliga analyserade segellösningar får positiva nuvärden i analysens grundscenario. Detta innebär att samtliga investeringar är lönsamma. Räntabiliteten på kiten på 160 kvadratmeter får i analysen det högsta värdet. Likaså nuvärdena blir de högsta på kitelösningarna. Investeringskostnaden för den större modellen av kiten är också den största av de analyserade fallen. Avseende kiten råder viss osäkerhet beträffande de årliga kostnaderna. Skysails (2020) menar att kiten behöver förnyas årligen och att de årliga kostnaderna uppgår till 3-5 procent. I

kalkylen har fyra procents årliga kostnader använts med antagandet att denna summa innefattar en ny kite. Det förefaller emellertid vara en låg andel av investeringen som då ligger i själva kiten varför försiktighet avseende detta investeringsscenario bör påtalas.

Traditionella segel har den längsta pay back-tiden och förhållandevis låg räntabilitet. Lösningen innebär ökade kostnader under hela livslängden med ökad besättning vilket har tagits med i kalkylen. Som tidigare nämnts så innebär traditionell segellösning också förlängda restider och därigenom ökade kostnader vilket inte tagits hänsyn till i kalkylen.

Flettnerrotorerna är det mest beprövade systemet praktiskt då det finns i drift på ett antal fartyg i dagsläget. Investeringarna ger tydligt positiva nuvärden och pay back-tider i paritet med övriga lösningar. Underhållskostnaderna är baserade på leverantören Norsepowers servicekontrakt.

4.6. Känslighetsanalys

Två känslighetsanalyser har utförts vilka redovisas i tabellerna 8-10. I den första analysen har en internränta på fem procent använts istället för grundscenariots 10 procent och i den andra analysen har drivmedelspriser på 50 respektive 100 procent högre nivå än rådande pris vid årsskiftet 2020/2021 applicerats. Prisnivå på petroleumprodukter vid tidpunkten för studien är på en relativt låg nivå. Då efterfrågan av råolja beroende på återgång till normal konsumtion efter coronaepidemin sannolikt ökar kommer samtliga drivmedelspriser troligen ha högre kostnader. Det finns också anledning att kalkylera med att det kan komma att införas straffavgifter vad gäller miljöbelastning vid användandet av fossila bränslen vilket i princip kommer att ha samma effekt som bränsleprisökning i kalkylerna.

Vid användandet av internräntan fem procent istället för 10 procent skapas betydligt högre nuvärden och bättre räntabilitet på investeringarna. I tabell 8 syns de förändrade värdena på nyckeltalen.

Tabell 8

Nyckeltal för segellösningar med internränta/kalkylränta 5 procent

	Investering (USD)	Nuvärde (USD)	Pay back-tid (År)	Räntabilitet (%)
Traditionella segel, depl. 8 000 ton DWT 4 000	486 000	308 440	9,0	63,46%
Vingsegel, depl. 8 000 ton DWT 4 000	600 000	918 925	6,7	153,15%
Flettnerrotorer, 2 st. 18*3 m, RoRo, depl. 18 207 ton DWT 9 700	912 000	1 064 589	8,1	116,73%
Flettnerrotor, 1 st 24*4m, passagerarfartyg, 57 565 GT	900 000	916 106	8,9	101,79%
Kite 160 m2, Växellastare 9 747 DWT	600 000	1 053 623	6,1	175,60%
kite 320-400 m2, 50 000 DWT	2 550 000	3 551 674	7,2	139,28%

Vid användandet av ett högre drivmedelspris, i fallet som åskådliggörs i tabell 9, är kalkylen justerad till 50 procent högre pris på drivmedlet. Internräntan uppgår till den ursprungliga på 10 procent. Den högsta pay back-tiden (en enkel rotor på passagerarfartyg) kommer ner till fem år och nuvärden och räntabilitet förbättras avsevärt, speciellt avseende traditionella segel.

Tabell 9

Nyckeltal för segellösningar med 50 procent förhöjt drivmedelspris, internränta 10 %

	Investering (USD)	Nuvärde (USD)	Pay back-tid (År)	Räntabilitet (%)
Traditionella segel, depl. 8 000 ton DWT 4 000	486 000	4 024 787	0,8	828,15%
Vingsegel, depl. 8 000 ton DWT 4 000	600 000	1 150 969	4,0	191,83%
Flettnerrotorer, 2 st. 18*3 m, RoRo, depl. 18 207 ton DWT 9 700	912 000	1 284 790	5,1	140,88%
Flettnerrotor, 1 st 24*4m, passagerarfartyg, 57 565 GT	900 000	1 098 322	5,7	122,04%
Kite 160 m2, Växellastare 9 747 DWT	600 000	1 235 709	3,7	205,95%
kite 320-400 m2, 50 000 DWT	2 550 000	4 356 979	4,4	170,86%

Vid en fördubbling av drivmedelspriserna blir samtliga kalkyler mycket bra investeringar som synes i tabell 10. Nuvärdenas höga tal indikerar tydligt detta. Internräntenivån är i enlighet med grundscenariots 10 procent. Traditionella segel kommer oerhört bra ut i denna analys då bränslebesparingen uppgår till 80 procent och inga kostnadsökningar uppstår. Den estimerade investeringen i segel på exempelfartyget ger ett nuvärde på 7,8 miljoner USD, över 1600 procent räntabilitet och betalas i pay back-metoden av på 0,4 år.

Tabell 10

Nyckeltal för segellösningar med 100 procent förhöjt drivmedelspris, internränta 10 %

	Investering (USD)	Nuvärde (USD)	Pay back-tid (År)	Räntabilitet (%)
Traditionella segel, depl. 8 000 ton DWT 4 000	486 000	7 838 864	0,4	1612,93%
Vingsegel, depl. 8 000 ton DWT 4 000	600 000	1 710 114	2,8	285,02%
Flettnerrotorer, 2 st. 18*3 m, RoRo, depl. 18 207 ton DWT 9 700	912 000	1 883 943	3,7	206,57%
Flettnerrotor, 1 st 24*4m, passagerarfartyg, 57 565 GT	900 000	1 606 636	4,2	178,52%
Kite 160 m2, Växellastare 9 747 DWT	600 000	1 792 845	2,7	298,81%
kite 320-400 m2, 50 000 DWT	2 550 000	6 426 544	3,1	252,02%

5. DISKUSSION

Moderna segellösningar för kommersiella fartyg är under utveckling. Den intressanta frågan är om, och i så fall när, vinden kan komma att bli en framdrivningskraft att verkligen räkna med igen? Detta är inte en fråga som denna studie har haft som ansats att svara på men studien ger förhoppningsvis underlag för att hålla frågan aktuell. Det är sannolikt inte så att segellösningar kommer att återta dominansen i likhet med forna tider och bli den allena rådande framdrivningsformen för kommersiell sjöfart. Däremot skulle segellösningar som delframdrivning i kombination med effektivare fartygskonstruktioner, bränslesnålare maskiner med mindre effektförlust, förnybara bränslen, renare bränslen, avgasrening och friktionsminskande åtgärder kunna skapa möjligheter för sjöfartens att märkbart minska miljöbelastningen samt också skapa mer ekonomiska sjötransporter.

En intressant iakttagelse från studien är att skillnaderna mellan de olika segellösningarna inte är så stora sett ur ett ekonomiskt perspektiv. Pay back-tiderna varierar mellan sex och nio år och räntabiliteten (nuvärdet i förhållande till investeringsbeloppet) vid tio procent internränta ligger på mellan 43 och 113 procent. Traditionella segel på fartyg med stor besättning ger det lägsta värdet (exempelfartyget Pommern). Undantags fall och även den enskilda Flettnerrotorn på Viking Grace, ligger räntabiliteten på mellan 75 och 113 procent. Viking Graces Flettnerrotor ger förvisso bränslebesparingar men då ruten är ganska kort och går genom skärgård ger den sämre utfall än på fartyg med längre och öppnare rutter.

Det skulle med andra ord kunna vara så att det inte spelar så stor roll vilken segellösning ett rederi väljer för att agera mer miljövänligt och för att spara drivmedel och därigenom kostnader. Olika lösningar kan emellertid lämpa sig olika bra beroende på vindförhållanden på de aktuella rutter fartygen är avsedda för. Se nedan under respektive segellösning för vidare utveckling. Det blir således viktigt att studera vindförhållanden på aktuella rutter redan vid val av segellösning i investeringsprocessen för rederinäringen och att använda "weather routing", anpassning av färdväg efter prognosticerad väderlek, under resorna. Kitelösningen har som framgår i teorikapitlet bäst prestanda vid akterliga vindar, Flettnerrotorerna vid skenbar vind tvärs och vingsegel vid vind snett akterlig till snett förlig vinkel. Traditionella segel och vingsegel är de som är mest allround även om snett akterlig vind, slör, ger den högsta framdrivningskraften.

Vindkraften ökar i betydelse vad gäller energiproduktion i världen och det kanske inte är orimligt att tro att den kan komma att öka i betydelse för att generera framdrift inom sjöfarten. Vinden är förvisso varierande i riktning och olika stark beroende på världshav, latitud, årstid och rutt men det borde kanske vara möjligt att anpassa fartygsrutter i viss mån och kanske i en framtid acceptera längre ledtider för sjötransporter och genom det möjligen få en mer ekonomisk transportlösning och framförallt en mer miljövänlig sådan.

Med undantag för Flettnerrotorer har segellösningar på moderna kommersiella fartyg varit i drift kort tid eller inte alls varför underhållskostnader och hanteringskostnader är svåra att skapa säkerhet kring. Framtiden kommer med största sannolikhet ge branschen betydligt mer data kring eventuellt dolda kostnader, livslängd för segellösningar och installationskostnader för desamma.

Då seglens effektivitetsuppgifter i studien baseras på relativt lite praktiskt framtagna data och kompletteras med data från tidigare gjorda simuleringar är det av vikt att vara försiktig med alltför vidgående slutsatser av resultaten. Studien visar emellertid att flera segellösningar

sannolikt skulle kunna vara ekonomiskt gångbara som delframdrivning för en stor del av världens fartygstrafik och detta redan vid de förhållandevis låga drivmedelspriser som råder i dagsläget (årsskiftet 2020/2021). Samtliga investeringar i studien är som sagt lönsamma då de skapar positiva nuvärden i investeringskalkylerna.

Den klimatnytta som en investering i segellösning ger är en viktig aspekt. Studien sätter inte något värde på klimataspekten på annat sätt än den direkt ekonomiska. Det kan mycket väl finnas indirekta positiva effekter av en investering i klimatåtgärder. Ett rederi som satsar på miljöfrämjande åtgärder kan betraktas som en aktör som tar sitt sociala ansvar. Begreppet CSR, "Corporate Social Responsibility" används ofta i dessa sammanhang. Som lastägare eller befraktare kan det ofta ge ett mervärde att anlita aktörer som tar sitt sociala ansvar, sitt CSR.

Vidare kan också minskade utsläpp av såväl växthusgaser som andra föroreningar åsättas ett värde. Detta värde blir inte företagsekonomiskt utan nationalekonomiskt eller t.o.m. världsekonomiskt. Vid hänsyn taget till detta värde kommer sannolikt segellösningar premieras. Metoden för att införa dessa "världsnaturkostnader" torde vara genom att någon form av internationella utsläppskostnader eller pålagor på fossila bränslen införs. Det skulle kunna vara genom något liknande utsläppsrätter, genom straffavgifter för utsläpp eller genom någon form av skatter. EEXI, "Energy Efficiency Existing Ship Index", är ett tillägg till MARPOL Annex VI som planeras antas i juni 2021 vilket kan ge miljömässiga fördelar för segellösningar (Lloyd's Register, 2021).

5.1. Traditionella segel - diskussion

Traditionella segel är, eller var åtminstone i historien, mycket arbetskrävande. I kalkylen för traditionella segel räknas med i princip dubblad besättning vid segling jämfört med motsvarande fartyg i motorgång. Detta kanske inte behöver vara fallet. Marina Läroverkets T/S Älva kräver inte större besättning vid gång under segel jämfört med vid motorgång då segelföringen är av enklare modell än historiska seglande fraktfartyg. Sättning, eventuell revning (minskande av segelytan) och nedtagning av seglen är förvisso arbetskrävande men behöver inte ske alltför ofta och kan lösas av ordinarie besättning (Marina Läroverket, 2021). Dessa uppgifter skulle kunna indikera att även traditionella segel skulle kunna ha en plats som delframdrivning för kommersiell sjöfart. Förutsättningen är sannolikt automatiserad hantering av seglen och riggen.

Traditionella segelfartyg hade behov av att maximera möjlig segelyta för att få tillräcklig framdrivningskraft även vid relativt lätta vindar. Dessa segelsättningar ställer krav på hantering och anpassning vid vindskiften både i riktning och i styrka. Vid användning av traditionella segel som delframdrivning ställs inte detta krav. En mindre segelyta är möjlig och därigenom en mer lätthanterad sådan.

Traditionella segelfartyg med segel som huvudframdrivning har nackdelen att längre resor i såväl distans och tid behöver företas. Dessa förefaller inte ha möjlighet att konkurrera på sjöfartsmarknaden, åtminstone inte med dagens synsätt. Förväntningar på förutsägbarhet avseende leveranser i det moderna samhället ger troligtvis inte utrymme för denna typ av transport om inte människans synsätt kan förändras.

Det är mycket intressant att studera effekterna av högre drivmedelspris på traditionella segellösningar. För exempelfartyget Pommern skulle nuvärdet nästan 20-dubblas vid 50

procent högre drivmedelspris och investeringen betalas av på mindre än ett år vid användande av rak pay back. Vid fördubblade drivmedelspriser blir förändringen ännu mer anmärkningsvärd, pay back på 0,4 år och nuvärde på 7,8 miljoner SEK för en investering på omkring en halv miljon. Vind är en synnerligen billig ”råvara” och 100 procent förnybar. Traditionella segel utmärker sig i studien genom att de ger så stora bränslebesparingar. Vid användning av traditionella segel som kompletterande framdrivning ges inte dessa höga procenttal.

Vid användandet av traditionella segellösningar kommer som sagt sannolikt automatisering av segelhanteringen behöva utvecklas. Investeringskostnaderna då detta görs kommer sannolikt att hamna på klart högre nivåer än de som investeringskalkylen för traditionell segeldrift i denna studie använt. Å andra sidan behöver besättningarna inte utökas i likhet med forna tiders segling, t.ex. på exempelfartyget Pommern, vilket skulle ha positiv effekt på investeringens nuvärde.

En fördel för traditionella segel jämfört med i första hand Flettnerrotorer och kites är möjligheten att utnyttja seglen vid mer varierande relativ vindriktning. Seglen kan ställas om mellan att vara hårt skotade i förliga vindar till att enbart använda vindens påskjutande kraft vid segling med vinden akterifrån.

5.2. Vingsegel - diskussion

Vingsegel hamnar i studien på en andraplats efter den mindre kiten vad gäller såväl nuvärde i förhållande till investering (räntabilitet) som pay back-tid. Vingsegel är den enda av de studerade framdrivningsformerna som ännu inte praktiskt har använts i kommersiell fraktsjöfart varför resultatet i studien är teoretiskt. Walleniusprojektet Oceanbird kan komma att ge mycket intressanta resultat i frågan kring om vingsegel kan komma att bli en praktiskt användbar form för att utvinna framdriftsenergi ur vinden.

Ghosh & Shukla (2009) redovisar i slutsatserna av simuleringen av eftermonterade vingsegel på rutten Mumbai-Durban tor. att 8,3-procentiga besparingar av bränsle kan göras. Ytterligare ett exempel på simuleringsstudier av vingsegel visar att vingsegel ger lika mycket kraft som propellern kopplad till huvudmaskineriet vid 14,3 knops fart då vindstyrkan är minst 15 meter per sekund och vindriktningen mellan 50 och 80 grader från fören räknat (Ikeda, Li, Nakashima, & Nihei, 2015). Följaktligen torde vingsegel, trots att praktisk användning ännu inte kommit till stånd, vara en segelframdrivning att räkna med i framtiden.

Vingsegel har i likhet med traditionella segel fördelen att det kan riktas om beroende på den skenbara vindens vinkel. Varierande skenbar vind inom ett stort spann kan således utnyttjas. Vid förliga vindar används lyftkraften i seglen, vid akterliga vindar den påskjutande kraften och vid snett akterlig vind en kombination av de båda.

5.3. Flettnerrotorer och kites - diskussion

Lönsamhetskriterier för de två ”moderna” och praktiskt testade lösningarna; Flettnerrotorer och kites är ganska lika i studien. Som tidigare nämnts så får den mindre kiten högst värde avseende räntabilitet och kortast pay back-tid men den större kiten och Flettnerrotorerna hamnar med närliggande värden.

Flettnerrotorer är den enda av segellösningarna som idag används kommersiellt och därmed har ett bevisat drivmedelsbesparande utfall som skapar bättre ekonomi för rederiet. Övriga segellösningar har mer teoretiskt framtagna ekonomiska nytta vilka inte skall förringas men kanske inte bör ges samma dignitet som praktiska verifierade fakta för Flettnerrotorer.

Flettnerrotorer skapar i likhet med kites mer framdrift per kvadratmeter än ordinära segel. Rotorerna har livslängd i likhet med fartyget de monteras på (i vissa fall t.o.m. längre) och har låga underhållskostnader. Driftskostnader och underhållskostnader för Flettnerrotorer är väl grundade i studien och tillförlitliga. Underhållskostnaderna baseras på serviceavtal som Norsepower Oy erbjuder (Norsepower, 2020).

Flettnerrotorer verkar bäst då skenbar vind kommer tvärs, rakt från sidan. De har funktion och ger viss framdrivning redan vid ganska förliga vindar men vid rakt akterliga vindar ger de svag effekt. Då agerar endast vindens påskjutande kraft på den lilla yta som exponeras. Rotorerna sätts då inte i rotation.

Drakar/kites är den lösning som i studien ger bäst ekonomi för kompletterande framdrift vilket har en logisk förklaring i det faktum att detta "lösa" segel kan färdas snabbare än fast monterade segel och därför skapa en högre hastighet på skenbar vind och således mer kraft. Draken har nackdelen att verklig vind mindre än 60 grader från förstäven inte kan utvinnas kraft för framdrivning ur. En hypotetisk tanke är att med långa draglinor skulle draken kunna agera i luftskikt högre upp i atmosfären där ekmanspiralen ger vindriktningar åt annat håll än vid ytan. Detta skulle kunna öka effekten man kan få ut av en drake och potentiellt påverka vinkeln mot vinden.

Resultaten i studien avseende kites måste tolkas med försiktighet. Livslängden på själva kiten är ungefär ett år och därmed renderar lösningen höga driftskostnader som uppskattats i studien med stöd i mail från leverantören Skysails. Dessa uppskattningar kan vara på för låg nivå då de endast uppgår till fyra procent av investeringskostnaden i kalkylen. Vidare är bränslebesparingen för kites satt till 12 procent beroende på att litteraturstudien gav detta genomsnitt. Med avseende på att kiten lämpar sig bäst på långsamtgående fartyg och inte är verksam förrän vid 60 graders vinkel på inkommande verklig vind så skulle dessa tal kunna vara i överkant.

Kiten är lämpligast vid akterliga vindar och som sagt på relativt långsamtgående fartyg. Fördelen med kiten är att den kan skapa hög kraft vid förhållandevis lätta vindar då den är fritt flygande och kommer upp på hög höjd.

5.4. Diskussion kring pay back-tid och räntabilitet

Pay back-tiderna för de olika segellösningarna varierar men ligger med rådande drivmedelspris kring åtta år med undantag för de traditionella seglen som får betraktas lite speciellt beroende på de fördyringar som de renderar genom förlängda restider. En investering med relativt låga nuvärden och sju till nio års återbetalningstid utan att hänsyn tagits till ränta kanske inte är så attraktiv för rederier att genomföra. Redan vid en mindre osäkerhet kan investeringen komma att bli olönsam eller åtminstone inte rendera något nuvärde. Investeringar i segellösningar kan säkerligen också komma att konkurrera om investeringsmedel med andra investeringar för rederier. Det skulle dels kunna röra sig om investeringar i fler fartyg för att öka kapacitet och

dels andra investeringar som skapar mer lönsam drift eller miljöbesparingar. Det finns nog en uppenbar risk att andra investeringar än segellösningar kan hamna högre i prioritet beroende på bättre nuvärde och lönsamhet med dagens nivå på drivmedelspris.

Då ett högre drivmedelspris appliceras blir kalkylen för segellösningar betydligt mer attraktiv för investerande rederi. Vid ett högre drivmedelspris, som är en logisk följd av stigande oljepris, skapas alltså ett mer gynnsamt klimat för investeringar i segellösningar. En motsvarande situation skulle tänkas kunna uppstå om regelverk skapas som antingen gör det dyrare att införskaffa fossila drivmedel eller som skapar kostnader för utsläpp av växthusgaser och andra föroreningar. Andra miljöfrämjande eller bränslebesparande investeringar kan naturligtvis också komma att gynnas vid högre drivmedelskostnader och pålagor.

Det är inte orimligt att tro att såväl högre nivåer avseende pris på drivmedel såväl som internationella åtgärder för att minska sjöfartens miljöbelastning kommer att göra kalkylerna för segellösningar bättre och därigenom främja investeringsviljan.

En aspekt att värdera vad gäller drivmedelspriser är den möjlighet som fartyg och rederier har i att uppfylla IMO 2020, svaveldirektivet, genom att installera skrubbers för att rena avgaserna från svavel istället för att använda lågsvavligt bränsle (International Maritime Organization, 2020). I dessa fall tillåts man fortsätta använda högsvavlig tjockolja som är billigare och man har således mindre ekonomisk nytta av att ta investeringar i t.ex. segellösningar.

5.5. Metoddiskussion

Metoden för att få fram ekonomiska data har bestått i litteraturstudier i kombination med intervjuer och annan datainsamling från aktörer på marknaden; leverantörer och användare av segellösningar. Då spelplanen för moderna segellösningar inte kan sägas vara en mogen marknad har det varit svårt att få fram objektiv data. En del av datan bygger på antaganden och mycket på datasimuleringar. Med avseende på rådande situation är frågan om någon annan metod skulle kunnat användas som gett bättre resultat på studiens frågeställningar? En annan fråga är naturligtvis om frågeställningarna och syftet överhuvudtaget är möjliga att besvara när underlaget inte är större än vad det är? En annan metod skulle kunna tänkas vara djupgående beräkningar avseende material som behövs samt arbetstimmar. Detta skulle emellertid vara ett väldigt omfattande arbete.

Avseende kalkylmodellen som använts som huvudmetod i studien, nuvärdeskalkyl, så kan detta val naturligtvis diskuteras. I dagsläget är det många företag som använder sig av endast pay back-metoden, d.v.s. hänsyn tas inte till någon internränta utan endast vilken tid det tar att få tillbaks investerade medel beaktas. Pay back-metoden främjar således investeringsviljan. Det kan definitivt anses relevant att använda pay back-metoden då ränteläget i dagsläget är mycket gynnsamt för investeringar. Det är helt enkelt billigt att låna pengar. Pay back-metoden har också använts i studien parallellt med nuvärdesmetoden. Å andra sidan bör en investering ställas mot andra investeringar. Alternativkostnad bör studeras, d.v.s. vilken avkastning skulle investerade medel ge i en annan investering. Endast accepterandet av det faktum att räntan är låg bör inte göras ur ett företagsekonomiskt perspektiv. Om en annan användning av pengarna skulle ge en avkastning på tio procent så är det rimligt att man använder sig av den procentsatsen som internränta. Känslighetsanalysen använder fem procent kalkylränta som ett alternativ varför investeringarna i studien kan betraktas från tre perspektiv; nollränta i pay back-metoden, en kanske relevant företagsmässig internränta på tio procent och mellanläget fem procents

internränta vilket skulle kunna vara relevant i den lågräntesituation vi i dagsläget befinner oss i.

Validiteten på resultatet från studien med avsedd metod bör utifrån ovanstående resonemang vara på en klart relevant nivå. Det som i syftet och frågeställningarna studien hade som avsikt att mäta och analysera har blivit gjort. Investeringskalkylering i genomförda former är vedertagna modeller som utmynnar i tydliga nyckeltal.

Reliabiliteten avseende fenomen på en så pass omogen marknad som marknaden för moderna segellösningar är kan nog inte sägas vara helt tillfredställande. Tidigare studier och litteratur har med få undantag gjort djupdykningar i ekonomiska aspekter. Antalet leverantörer av lösningar för kommersiella fartyg är mycket få och en del av resultaten baseras på simuleringar gjorda i tidigare undersökningar. Kvaliteten på införskaffad data är således inte av absolut högsta kvalitet varför reliabiliteten kan sägas ha vissa brister. Dessa beror dock inte på metod utan på det faktum att marknaden för moderna segellösningar är omogen. Vidare finns det anledning till att applicera en viss källkritik på de rapporter från simuleringar som studerats.

Denscombe (2018) tar upp frågan kring intervjupersoners korrekthet i lämnad information och skiljer på experter med mycket hög trovärdighet och intervjupersoner valda utifrån andra grunder som potentiellt inte är lika trovärdiga. Denna studie har använt experter som intervjuobjekt och därför borde inte reliabiliteten bli lidande baserat på bristande korrekthet i dessas lämnade uppgifter.

Triangulering mellan intervjudata och data erhållen via mail har gjorts med litteraturstudier i vilka simuleringar redovisas. Denna metod har därmed åtminstone i viss utsträckning verifierat uppgifter från intervjupersoner (Denscombe, 2018).

Det visade sig vid kontakter med potentiella intervjukandidater att önskad information avseende vingsegel inte gick att uppbåda då utvecklingen fortfarande är i tidigt skede. Vad gäller kites är informationen lite osäker och vad gäller traditionella segel är kostnaderna baserade delvis på antaganden. Vid fortsatt studerande av segellösningar och framförallt vid praktisk användning eller praktiska tester kan i viss utsträckning annorlunda resultat framkomma.

6. SLUTSATSER

I denna studie har indikationer på att investeringar i segellösningar på dagens- och framtidens fraktfartyg kan vara lönsamma tagits fram.

Kostnaderna för de olika segellösningarna avseende inköp, installation, drift och underhåll varierar relativt mycket men resultaten av lönsamhetsstudierna varierar mindre. Samtliga fyra studerade lösningar ger positiva nuvärden och god räntabilitet vid användande av tio procent internränta med dagens (årsskiftet 2020/2021) prisnivå på drivmedel. Slutsatsen är således att investeringar i moderna segellösningar är lönsamma. Investeringarna får emellertid avsevärt bättre nyckeltal vid högre drivmedelspriser. Vilken eller vilka segellösningar som lämpar sig bäst beror på vindförhållanden på aktuell rutt och fartygstyp.

Traditionella segel har det lägsta nuvärdet med rådande prisnivå på drivmedel men väldigt höga nuvärden då högre drivmedelspriser appliceras. Att använda traditionella segel som huvudframdrivning i likhet med de sista seglande fraktfartygen på 1930-talet är personalkrävande men ger stora bränslebesparingar. För att det skall vara realistiska att implementera segel som huvudframdrivning krävs sannolikt en hög grad av automatisering och ett accepterande av längre restider. Traditionella segel kan dock i likhet med övriga segellösningar, de mer moderna, fungera bra för extra framdrivningskraft. Då blir nuvärdesökningarna med högre drivmedelspris inte de kraftiga som vid huvudframdrivningsspåret.

Vingsegel kan sannolikt komma att bli en framtida form för framdrivning av kommersiella fartyg. Studien har emellertid inte kunnat insamla tillräckligt material för att utveckla detta resonemang då vingsegel på kommersiella fartyg inte börjat användas och reell erfarenhet således inte finns att tillgå. Investeringskalkylen som enbart bygger på uppgifter från litteraturstudien pekar på anständiga nuvärden, acceptabel räntabilitet och pay back-tid på 6,7 år med användandet av rådande drivmedelspris och internränta 10 procent.

De någorlunda utprovade lösningarna Flettnerrotorer och kites/drakar är de praktiskt använda lösningar som applicerats på kommersiell sjöfart. De ger båda möjlighet att skapa bränslebesparingar på kring tio procent i genomsnitt, (beroende på vindstyrkor, riktning etc. på aktuell rutt). Pay back-tiderna vid nuvarande bränslepris ligger runt åtta år vilket kanske inte är strålande för en företagsinvestering men inte heller att betrakta som ointressant. Nuvärdena för investeringarna i de två lösningarna med tio procent internränta är tydligt positiva med undantag för den enstaka rotorn på Viking Grace. En ensam rotor på ett fartyg till stor del färdas i skärgårdstrafik förefaller inte vara den mest lönsamma lösningen men ger dock en viss bränslebesparing.

Känslighetsanalysen ger väldigt tydliga förbättringar av kalkylerna vid 50 procentigt högre drivmedelspris. Oljepriserna och därmed produktpriserna har pressats ner av den lägre efterfrågan i samband med Coronakrisen. Det är inte orealistiskt att drivmedelspriserna kan ligga på signifikant högre nivåer inom något år. Vid 50 procentigt högre drivmedelspris hamnar pay back-tiderna på runt fem år och nuvärdena med tio procent internränta på i flera fall över initialinvesteringen, d.v.s. räntabilitet på över 100 procent vilket ger en klart god företagsekonomi i investeringen. Nuvärden på investeringar på den nivån som skapas vid 50 procent högre drivmedelspris än dagens samt pay back-tider på kring fem år gör sannolikt

investeringar i segellösningar betydligt intressantare för rederier än vid scenariot med dagens lägre drivmedelspriser.

Vid 100 procent högre drivmedelspris än grundscenariots blir investeringarna som redovisats i kapitel 4.6. mycket lönsamma. Sannolikheten för att investeringar i segellösningar görs ökar ytterligare vid dessa nivåer på drivmedelspris.

6.1. Rekommendationer till fortsatt arbete

Segellösningar kan mycket väl komma att bli en vanligare syn på världshaven. Denna studie har försökt skapa en någorlunda enkel modell för att bedöma de ekonomiska effekterna av investeringar i segellösningar för kommersiella fartyg. Vidare studier och analyser avseende mer detaljerade ekonomiska aspekter torde vara intressanta. Den ekonomiska modellen kan säkerligen förfinas och anpassas för specifik sjöfart med annan vikt för de olika parametrarna och annorlunda värden.

Studier av vilka fördelar segellösningar kan skapa i relation till framtida regelverk avseende energieffektivitet och miljöbelastning är potentiellt en intressant utveckling av ämnet.

En djupare studie av på vilka rutter och världshav de olika segellösningarna bäst lämpar sig baserat på vinddata skulle kunna vägleda investerande rederier ytterligare avseende val av segellösning på fartygen.

En fördjupning i de lastnings- och lossningsrelaterade aspekterna som denna studie avgränsat sig ifrån kan vara behjälplig för rederier.

Det är tänkbart att segellösningar kan komma att påverka sikten för bryggjtjänstgörande befäl. Vid utvidgning av användandet av segel kan studier avseende vilken påverkan dessa har på fri sikt vara relevanta.

Användning av segellösningar i trånga farleder, vältrafikerade farvatten och trafiksepareringar skulle kunna innebära begränsningar i fartygets förmåga till kursändringar. Hur Colreg, ”Collision regulations” påverkas av detta kan likaså vara föremål för intressanta studier.

KÄLLFÖRTECKNING

- Ahdour, S., Faber, J., Köhler, M. W., Jonathan, Nelissen, D., & Traut, M. (2016). *Study on the analysis of market potentials and market barriers for wind propulsion technologies for ships*. Delft: CE Delft, Publication code: 16.7G92.114.
- Ahrens, U., Moritz, D., & Schmel, R. (2013). *Airborne Wind Energy*. Heidelberg: Springer verlag, ISBN 978-3-642-39965-7 (eBook).
- Allenström, B., Jansson, C.-E., & Ran, H. (2013). Auxiliary Kite Propulsion Contribution to Ship Thrust. *OMAE 2013-11458* (ss. 1-9). Nantes: ASME, <https://doi.org/10.1115/OMAE2013-11458>.
- Allwright, G, International Windship Association. (2017). Win Win Wind Situation: Commercial Case for Commercial Wind Propulsion. *Power and Propulsion Alternatives for Ships* (ss. 1-10). Rotterdam: The Royal Institute of Naval Architects, ISBN: 978-190902471-7.
- Andersson, J.-O., Ekström, C., & Gabrielsson, A. (2011). *Finansiering och kalkylering*. Malmö: Liber AB, ISBN 978-91-47-10063-7.
- Andersson, K., Brynolf, S., Lindgren, J. F., & Wilewska-Bien, M. (2016). *Shipping and the Environment*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, DOI 10.1007/978-3-662-49045-7.
- Anemoui Marine Technolgies Ltd. (november 2020). *Zero Emission Technology - Wind assisted propulsion*. Hämtat från anemoimarine.com.
- Atkinson, G. M., & Binns, J. (2018). Power profile for segment rigid sail. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 17:2, 99-105, <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1319997>.
- Azzam, A., Arief, I. S., & Santoso, A. (2018). Design of Flettner Rotor in Container Carrier 4000 DWT with CFD. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 133-139, DOI:10.12962/j25481479.v2i2.2736.
- Behrel, M., Bles, G., Jochum, C., Leloup, R., Leroux, J.-B., Parlier, Y., & Roncin, K. (2016). A continous and analytical modeling for kites as auxiliary propulsion devoted to merchant ships, including fuel saving estimation. *Renewable Energy*, 483-496, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.036>.
- Buckingham, J., & Knott, J. (2011). Exploring options to reduce fuel consumption. *Design and operation of tankers* (ss. 213-224). Athen: The Royal Institution of Naval Architects, ISBN: 978-162276120-3.
- Creative commons Wikipedia. (den 26 Juni 2020). <https://sv.wikipedia.org/wiki/Magnuseffekten>. Hämtat från sv.wikipedia.org.
- Denscombe, M. (2018). *Forskningshandboken för småskaliga forskningsprojekt inom samhällsvetenskapen*. Lund: Studentlitteratur, ISBN: 9789144122885.
- Ek, A., & Wung, W. S. (2019). *Could ships use sails again? - Implementation of wind power in shipping*. Göteborg, <https://hdl.handle.net/20.500.12380/301882>: Chalmers Univeristy of Technology.
- Ghosh, K., & Shukla, P. C. (2009). Revival of the Modern Wing Sail for the Propulsion of Commercial Ships. *International Journal of Physical and Mathematical Science, Vol 3, No 3*, 207-212, ISNI:0000000091950263.
- Giuliano, E., Nalianda, G., & Talluri, L. (2018). Techno economic and environmental assessment of Flettner rotors for marine propulsion. *Ocean Engineering* 154, 1-15, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.02.020>.
- Global maritime energy efficiency partnerships. (den 27 November 2020). <https://glomeep.imo.org/technology/fixed-sails-or-wings/>. Hämtat från glomeep.imo.org.

- Global maritime energy efficiency partnerships. (den 27 November 2020).
<https://glomeep.imo.org/technology/flettner-rotors/>. Hämtat från glomeep.imo.org.
- Ikeda, Y., Li, Q., Nakashima, T., & Nihei, Y. (2015). A study on the performance of cascade hard sails and sail-equipped vessels. *Ocean Engineering* 98, 23-31,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.02.005>.
- International Maritime Organization. (2018). *IMO Action to reduce greenhouse gas emissions from International shipping*. Hämtat från imo.org: <http://imo.org> den 6 november 2020
- International Maritime Organization. (2020). *Sulphur 2020 - cutting sulphur oxide emissions*. Hämtat från imo.org. den 6 november 2020
- ITF Seafarers. (januari 2021). *ILO Minimum wage - consolidated interpretation 2021*. Hämtat från itfseafarers.org.
- Koster, V., & Naaijen, P. (2010). *Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite*. Delft: Delft University of Technology.
- Li, C., Wang, H., & Sun, P. (2020). Numerical Investigation of a Two-Element Wingsail for Ship Auxiliary Propulsion. *JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND ENGINEERING*, Vol 8 Issue 5 Art. no 333, DOI 10.3390/jmse8050333.
- Lloyd's Register. (2021). *lr.org*. Hämtat från Lloyd's Register.
- Marina Läroverket. (den 04 Februari 2021). Föreläsare. (M. Bendz, Intervjuare)
- Milic-Kralj, D., & Klarin, B. (2016). Wing Sails for Hybrid Propulsion of Ships. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 1-13,
<http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.2016.04.0001>.
- Misra-Godwin, D. (den 4 November 2016). <https://digital.hbs.edu/platform-rctom/submission/lets-go-fly-a-kite-skysails-and-climate-change/>. Hämtat från digital.hbs.edu.
- Norsepower. (den 14 Dec 2020). Föreläsare. (M. Bendz, Intervjuare)
- Norsepower oy. (2020). *norsepower.com*.
- Parker, S., Rehmatulla, N., Smith, T., & Stulgis, V. (2015). Wind technologies: Opportunities and barriers to a low carbon shipping industry. *Marine Policy* 75, 217–226,
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.
- Powerlinks. (den 03 juli 2020). <https://powerlinks.news/rolls-royce/news/ms-beluga-skysail-cargo-ship>. Hämtat från powerlinks.news.
- Ringsberg, J. W., & Tillig, F. (den 23 Juni 2020). *Design, operation and Analysis of wind-assisted cargo ships*.
- Schenzle, P., Weiss, F., & Weselmann, G. (1985). *The Indosail Projekt*. Hamburg.
- Searcy, T. (2017). Harnessing the wind: A case study of applying Flettner rotor technology to achieve fuel and cost savings for Fiji's domestic shipping industry. *Marine Policy* 86, 164-172, <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2017.09.020>.
- Skogsjö, H., & Öljans, J. (2002). *Boken om Pommern*. Mariehamn: Mariehamns stad, ISBN 951-98141-2-4.
- Skysail GmbH. (den 24 november 2020). *SkySailsMarineBrouchure*. Hämtat från skysails-marine.com.
- Stopford, M. (2008). *Maritime Economics 3e*. London: Routledge ISBN: 9780203891742.
- Tuvstedt, J. (den 12 mars 2009). *Granboken*. Hämtat från gransegel.se.
- Wallenius. (2020). *oceanbirdwallenius.com*.
- Yrkeskollen. (2020). yrkeskollen.se/lonestatistik/matros. Hämtat från yrkeskollen.se.

BILAGOR

Bilaga 1 – Intervjufrågor

Frågeformulär Moderna segellösningar

1. Hur många fartyg i kommersiell fart har aktuell segellösning för del av framdrivningen?
2. Hur många system har ni levererat?
3. Vilka olika system säljer och marknadsför ni (eller använder)?
4. Har ni några direkta konkurrenter? / Vilka? Indirekta konkurrenter?
5. Är era lösningar patenterade?
6. Ekonomi: (olika storlekar/olika produkter)
 - a. Inköpspris?
 - b. Installationskostnader?
 - c. Underhållskostnader per år?
 - d. Driftskostnader per år?
 - e. Extra besättning?
 - f. Livslängd?
7. Kraft eller effekt från de olika lösningarna
 - a.
 - b.
8. Effekt per kvadratmeter? Om möjligt att uttrycka
9. Kalkylerad/estimerad bränslekonsumtionsminskning max/min
10. Uppmätt bränslekonsumtionsminskning max/min
11. Framtida produkter
12. Övrigt

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se



CHALMERS