



Høgskulen på Vestlandet

NAB3030 - Bacheloroppgave

NAB3030

Predefinert informasjon

Startdato:	18-04-2024 09:00 CEST	Termin:	2024 VÅR
Sluttdato:	02-05-2024 14:00 CEST	Vurderingsform:	Norsk 6-trinns skala (A-F)
Eksamensform:	Bacheloroppgave		
Flowkode:	203 NAB3030 1 PRO-1 2024 VÅR		
Intern sensor:	(Anonymisert)		

Deltaker

Kandidatnr.:

Informasjon fra deltaker

Antall ord *: 9350

Egenerklæring *: Ja
Jeg bekrefter at jeg har Ja
registrert
oppgavetittelen på
norsk og engelsk i
StudentWeb og vet at
denne vil stå på
vitnemålet mitt *:

Gruppe

Gruppenavn:	(Anonymisert)
Gruppenummer:	1
Andre medlemmer i gruppen:	ID ikke tilgjengelig, ID ikke tilgjengelig

Jeg godkjenner avtalen om publisering av bacheloroppgaven min *

Ja

Er bacheloroppgaven skrevet som del av et større forskningsprosjekt ved HVL? *

Nei

Er bacheloroppgaven skrevet ved bedrift/virksomhet i næringsliv eller offentlig sektor? *

Nei



Høgskulen
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE

Casestudie: Rotorseil – Redusering av drivstofforbruk

Case study: Rotor sails – Reducing fuel consumption

Dennis Haga Andreassen

Kristian Dragsten

Ludvig Egge Drange

Bachelor i nautikk

Institutt for maskin og maritime studier ved HVL

Veileder: Johnny Nordahl Berentzen

Innleveringsdato: 02.05.2024

Vi bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. *Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 12-1.*

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet som en del av utdanningen «Bachelor i nautikk» ved Høgskolen på Vestlandet, avdeling Haugesund. I denne bacheloroppgaven har vi hatt som mål å finne ut om, og eventuelt hvor mye, man kan spare i forbruk på en spesifikk seilingsrute dersom man installerer rotorseil. Grunnen til at vi valgte å skrive om rotorseil, er fordi vi ble fascinert av konseptet, og har lest at skipet SC Connector har hatt stor effekt når det kommer til reduisering av utslipp på sine ruter. Vi ble nysgjerrige på om dette kan gjelde på andre ruter også, samtidig som vi ønsket å gå litt dypere inn i hvordan et rotorseil fungerer. Vi valgte å ta for oss en case-studie, hvor vi plasserte rotorseil på et fartøy. Fartøyet ble utformet med utgangspunkt i et ekte fartøy, slik at vi kunne komme til realistiske konklusjoner om rotorseilets effekt og evne til å spare skipet for drivstofforbruk.

Vi vil rette en stor takk til alle som har bidratt til at vi fikk gjennomført denne oppgaven på en god måte. Takk til vår veileder Johnny Nordahl Berentzen. Takk til Sveinung Erland og Runald Walter Meyer ved institutt for maskin- og maritime studium på HVL for hjelp med forståelse av fysikk og veiledning i utregningsmetoder. Takk til rederi og maskinsjef som har bidratt med data og erfaringer som vi kunne bruke i oppgaven. Takk til produsenten av rotorseil som ga oss tips og data om rotorseil.

Sammendrag

Denne oppgaven er en vitenskapelig case-studie med mål om å finne ut om bruk av rotorseil kan bidra til reduisering av drivstofforbruk om bord på skip. Rotorseil er opprinnelig en oppfinnelse fra 1920-tallet, som ikke har blitt tatt ordentlig i bruk i moderne skipsfart før det siste tiåret. Et rotorseil er utformet som en høyreist sylinder som roterer for å skape løftekraft ved hjelp av vinden. Et eller flere rotorseil kan plasseres på dekket på et skip, for å hjelpe med framdrift. Siden 1920-tallet og frem til det siste tiåret har det vært både billig og mer pålitelig å bruke konvensjonelle forbrenningsmaskiner på skip. Dette gjorde at rotorseilet ble oversett, men i forbindelse med det grønne skiftet har etterspørselen etter løsninger som kan minske utslipp blitt ettertraktet. Blant løsningene som har blitt tatt i bruk, er rotorseil en av disse. Rotorseilet vil bidra til reduisering av forbruk, som igjen vil føre til reduisering av utslipp. Gjennom denne case-studien har vi undersøkt om et rutegående fartøy på fergestrekket Bodø – Moskenes kan spare på sitt forbruk av Marine Diesel Oil (MDO) dersom de installerer en Flettner-rotor.

Resultatet viser at skipet kan spare 11% drivstofforbruk i gjennomsnitt per år. Dette tilsvarer 350,8 tonn MDO. Vi har funnet ut at på de beste dagene kan skipet spare over 30 % av deres daglige forbruk. Vi ser at det også finnes dager hvor det ikke lønner seg å ta i bruk rotorseilet, avhengig av hvilket vær som forekommer. Dersom vi ser på gjennomsnittet per år, vil reduisering av drivstofforbruket tilsvare en reduksjon på 1112 tonn CO₂-utslipp per år.

Summary

This bachelor's thesis is a scientific case study with the aim of finding out if a ship can reduce its fuel consumption by using rotor sails. The rotor sail is originally an invention from the 1920's, which have not been used in modern shipping until the last decade. A rotor sail is designed as a vertical cylinder that rotates to create lift using the wind. One or more rotor sails can be installed on the deck of a ship to help with propulsion. Since the 1920's and until the last decade, the conventional combustion engine has been the cheaper and more reliable option, which has resulted in the rotor sail being mostly ignored until recent years. In connection with the introduction of "the green shift", the demand for solutions that can contribute to reduce emissions has become sought after. Among the solutions that have been put into use, rotor sails are one of them. The rotor sail can contribute to a reduction in fuel

consumption, which in turn will lead to a reduction in emissions. Through this case study, we have investigated whether a scheduled vessel on the ferry line between Bodø and Moskenes can reduce its consumption of Marine Diesel Oil (MDO) if it were to install the Flettner rotor.

The result of the study shows that the ship can reduce 11% of its fuel consumption on average per year. This will amount to 350,8 tons. We have found that on the best days the ship can save over 30% of its daily consumption. The result also shows that there are days when the rotor sail does not give a positive result, depending on the weather. If we look at the average per year, the reduction in fuel consumption will correspond to a reduction of 1112 tons CO₂-emission per year.

Ordforklaringer

Ord/forkortelser	Forklaring
MDO	Marine Diesel Oil
a	Radius
b	Lengde
ω	Vinkelhastighet
U_{∞}	Vindstyrke, sann vind
$U_{\infty AW}$	Vindstyrke, relativ vind
$U_{\infty \theta}$	Sann vindvinkel
F	Kraft produsert av Flettner-rotor
F-fartsretning	Andel av kraft F som går i skipets fartsretning
C_L	Koeffisient brukt for utregning av løft
$C_{L MAX}$	Øvre grense for C_L , 12,57
C_D	Koeffisient brukt for utregning av drag
M	Skipets motstand gjennom vannet
D	Aerodynamisk friksjonskraft (drag)
L	Aerodynamisk skyvekraft (løft)
RPM	Rotasjoner per minutt
ρ	Massetetthet
BHD	Skipets kurs
B_S	Skipets fart
θ_F	Vinkel mellom F og L
$\theta_{F, BHD}$	Vinkel mellom F og skipets heading

Figurliste

Figur 1: Illustrasjon av Magnus-effekten (Kosiorek)	3
Figur 2: Backau 1924, det første skipet med rotorseil (Wikimedia Commons)	4
Figur 3: E-ship 1 (Jamieson, 2015)	5
Figur 4: SC Connector (Sævild, 2020)	6
Figur 5: Skipets forbruk per pådrag, basert på informasjon fra maskinsjef (Personlig Email-korrespondanse, maskinsjef 15. februar 2024)	10
Figur 6: Oversikt over skipets motstand i vannet (Personlig Email-korrespondanse, maskinsjef 15. februar 2024)	10
Figur 7: Utsnitt av datablad fra produsent (Personlig Email-korrespondanse, produsent, 09. februar 2024)	11
Figur 8: Vindrose 10 år (Norsk klimaservicesenter, 2023)	12
Figur 9: Vindrose fremstilt som stolpediagram	13
Figur 10: Vektordiagram, vind i hekken	18
Figur 11: Vektordiagram, vind i baugen	18
Figur 12: Illustrasjon av vektorer på skipet (A. De Marco, 2016, s. 9)	19
Figur 13: Illustrasjon av vinkel mellom F og BHD	22
Figur 14: Speiling av krefter ved motsatte vindretninger	26
Figur 15: Vektordiagram, illustrasjon over vektorer til F-total. Det er viktig å understreke at denne illustrasjonen ikke vil være korrekt, da det ikke tar høyde for hydrostatiske egenskaper	28
Figur 16: Stolpediagram F og F-fartsretning	30
Figur 17: Resultat, eksempel, ideell relativ vind 20 knop	32
Figur 18: Resultat, eksempel, ideell relativ vind 42 knop	33

1 Innholdsfortegnelse

Forord	ii
Sammendrag	iii
<i>Summary</i>	iii
Ordforklaringer	v
Figurliste	vi
1 Innholdsfortegnelse	vii
2 Introduksjon	1
3 Teori	3
3.1 <i>Fakta og historikk om Flettner-rotor</i>	3
3.1.1 Magnus-effekt	3
3.1.2 Flettner-rotorer	4
3.1.3 Flettner-rotor i det 21. århundre	5
4 Metode	7
4.1 <i>Verktøy for utregning</i>	8
4.2 <i>Innsamling av data</i>	8
4.3 <i>Valg av rute</i>	8
4.4 <i>Valg av skip</i>	9
4.5 <i>Innsamling av skipsdata</i>	9
4.6 <i>Valg av konfigurasjon for Flettner-rotor</i>	11
4.7 <i>Innsamling av værdata</i>	12
4.7.1 Analyse av vinddata	13
4.8 <i>Beregning av CO₂-utslipp</i>	14
4.9 <i>Forbehold og avgrensninger</i>	14
4.9.1 Stabilitet og luftmotstand	14

4.9.2 Nedre grense for kraft i fartsretning	15
4.9.3 Grense for løftekoeffisient.....	15
4.9.4 Grense for kraftproduksjon	15
4.9.5 Kritisk turtall	16
5 Utregning	17
5.1 Utregning av kraft fra rotorseil	17
5.2 Bruk av kraft fra rotorseil til besparelse av drivstoff	22
5.3 Begrensning på 35% av total kraft i fartsretning	27
5.4 Kraft i fartsretning	30
5.5 Ideelle vindtreninger med hensyn til θ_F, BHD	31
5.6 Rotorseilets energiforbruk:	34
6 Resultater	35
6.1 Utbroderende om resultater.....	35
7 Drøfting	36
7.1 Vurdering av resultatet	36
7.2 Hensynet til kritisk turtall	36
7.3 Bruk av flere rotorseil	36
7.4 Spare tid istedenfor forbruk	37
7.5 Værruting	37
7.6 Sammenligning med andre studier.....	37
8 Konklusjon	38
9 Tips til videre forskning	39
10 Bibliografi	40
11 Vedlegg	43

2 Introduksjon

International Maritime Organization (IMO) vedtok i 2023 en resolusjon for reduksjon av utslipp av klimagasser i skipsfarten, med mål om å nå såkalt «net zero» innen 2050. Allerede innen 2030 ønsker IMO å redusere CO₂-utslipp fra skipsfartsnæringen med minst 40% sammenlignet med 2008-utslippene (IMO, 2023).

I dag står internasjonal shipping for ca. 3% av det globale klimagassutslippet (King, 2022). Det høres kanskje ikke så mye ut, men i 2021 ble 80% av alle internasjonale handelsvarer fraktet sjøveien (UNCTAD, 2021). Ifølge EU vil skipsfarten stå for 10-13% av globale klimautslipp innen få tiår dersom det ikke blir gjort noen tiltak (IMO, 2023). Å få ned utslippstallene til hele den internasjonale skipsfarten vil kreve store økonomiske investeringer og innovative løsninger. IMO vil dermed være avhengige av at hele den maritime sektoren bidrar frivillig med sin innsats for å nå sine mål på vei mot år 2050. Dette gjør IMO for å støtte oppunder FNs bærekraftsmål nr. 13 (IMO, 2023) med anerkjennelse av Paris-avtalens togradersmål som ble vedtatt av FNs klimakonferanse i 2015 (IMO, 2023, s.1) I forbindelse med dette ønsker vi å se om fremdrift for skip ved hjelp av rotorseil kan være med på å redusere forbruk av drivstoff, og dermed også redusere utslipp.

Vi ønsker å utforske dette ved å gjøre en case-studie med et av Norges lengste fergestrekke som utgangspunkt. Dette fergestrekke går mellom Bodø og Moskenes i Nordland. Moskenes, som ligger i Lofoten, er et av landets mest populære turiststeder, med over 900 000 registrerte gjestedøgn i 2019, ifølge Nordlandsforskning (Antonsen, 2020, s. 3). Arbeidsnotatet fra Nordlandsforskning viser også til at det i snitt ankom 1100 passasjerer til Lofoten daglig ved hjelp av dette fergesambandet i 2018 (Antonsen, 2020, s. 21). Å redusere forbruket på en fergestrekning brukt av så mange mennesker, vil ikke bare bidra til en mer klimavennlig skipsfart, men også en mer klimavennlig turistnæring.

Å redusere drivstofforbruket vil ha stor betydning både miljømessig og økonomisk. Dette har de som driver dette fergesambandet allerede begynt å tenke på, og det er planlagt å sette inn to nye hydrogendrevne ferger i 2025 (Danielsen, Martinsen, & Kristoffersen, 2022). Oppgaven vår blir dermed et hypotetisk alternativ til hydrogenfergene, samt at oppgaven også tar utgangspunkt i sammenligning med skip som bruker fossilt brennstoff. Som Værøy-ordfører Susan Berg Kristiansen nevner til Danielsen i artikkelen fra NRK er Vestfjorden, som fergestrekke går over, kjent for mye vær og vind (Danielsen, Martinsen, & Kristoffersen,

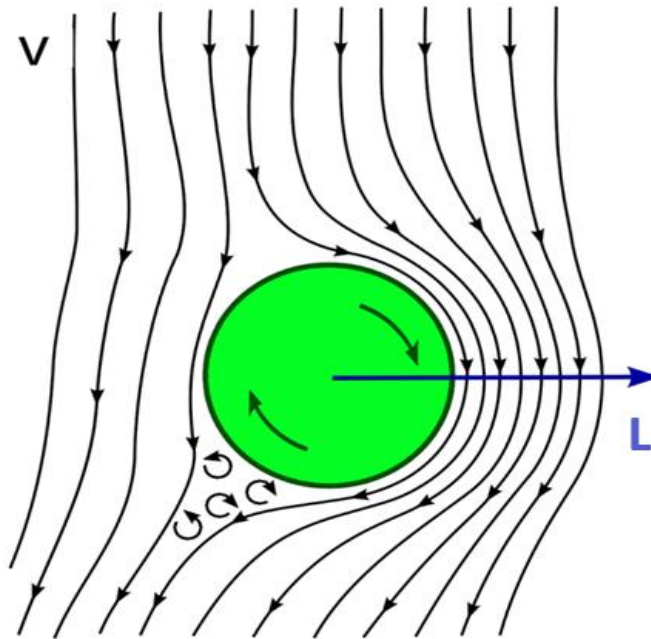
2022). Siden rotorseil bruker vind til å skape framdriftskraft, ønsker vi å utforske om det er mulig å utnytte vinden på denne strekningen til noe positivt, og undersøke om det er mulig å redusere forbruket og utslippet fra fergen.

3 Teori

3.1 Fakta og historikk om Flettner-rotor

3.1.1 Magnus-effekt

For å kunne forklare hva en Flettner-rotor er, må vi først forstå prinsippet bak hva som gjør at Flettner-rotoren fungerer. Magnus-effekten ble først beskrevet av den tyske forskeren Heinrich Gustav Magnus (1802-1870). Han var den første som forsket på løft fra roterende objekt. Magnus-effekten er et fenomen som oppstår når vindstrømning treffer et objekt som roterer, og vinden blir presset til å gå fortere på den siden av objektet som går med rotasjonsretningen. Bernoullis prinsipp sier at når hastigheten på et fluid øker, synker trykket og vice versa. Dette vil si at det oppstår et lavtrykk på denne siden av objektet og et høytrykk på motsatt side. Denne trykkdifferansen skaper en kraft, i form av løft, som er perpendikulær på vindens angrepsretning. Det er denne effekten som gjør at en fotball kan få en buet bane i luften, etter å ha blitt sparket med en skru. (Hofstad & Kristiansen, 2023).

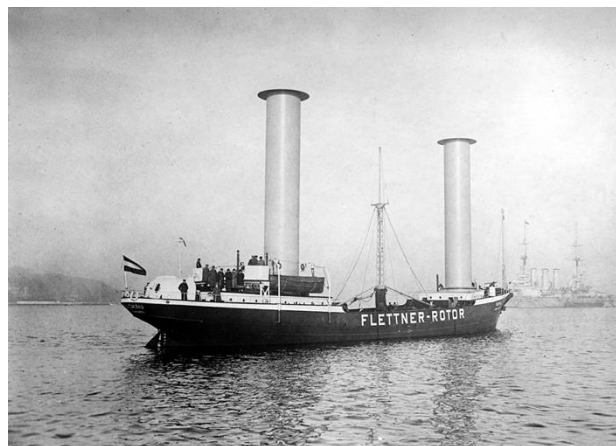


Figur 1: Illustrasjon av Magnus-effekten (Kosiorek)

3.1.2 Flettner-rotorer

Flettner-rotoren ble utviklet av Anton Flettner på 1920-tallet med intensjon å bruke dette til framdrift på skip (Nuttall & Kaitu, 2016, s. 161). En Flettner-rotor består av en sylinder plassert på et fundament med en el-motor på som roterer sylinderen for å skape løft framover, som beskrevet i avsnittet om Magnus-effekten. Når skipet seiler, vil det kunne utnytte vinden til å produsere kraft med rotorseilet, og dermed framdrift. Med denne kraften vil skipet kunne produsere nok framdrift til å kunne avlaste hovedmaskinene, og spare drivstoff. Rotorseilene vil typisk bli dimensjonert i forhold til størrelsen på fartøyet, dekksplass og antall Flettner-rotorer som skal tas i bruk. Man må justere rotasjonsfrekvensen på rotoren i forhold til hvor kraftig vinden er. Jo sterkere vind, jo høyere rotasjonsfrekvens. Rotorseilene kan styres av mannskapet fra et kontrollpanel på bro, men det finnes også kontrollsystemer til rotorseilene som kan implementeres inn i autopiloten. Systemet vil da automatisk måle vindens fart og retning, og justerer hvilken retning rotoren skal rotere, og velger den mest effektive rotasjonshastigheten.

Ifølge Nutall og Kaitu (Nuttall & Kaitu, 2016, s. 168) ble ikke ideen om rotorseil tatt opp igjen før oljekrisen (Leraand, 2022) oppsto i 1973, og det ble etterspørsel etter å effektivisere fremdriften på skip. Ideen ble allikevel lagt vekk igjen i 1986 da «supplysjokket» kom og oljeprisen sank igjen (Taraldsen, 2013).



Figur 2: Backau 1924, det første skipet med rotorseil (Wikimedia Commons)

Flettner rotorer konstrueres i dag med endeplater, såkalte Thom-disker, som har til hensikt å optimalisere den aerodynamiske effekten. Dette ble først introdusert av den tyske fysikeren Ludwig Prandtl på 1920-tallet. Dette gjorde at rotorene produserte en større mengde løft med samme dimensjoner (A. De Marco, 2016, s. 3). Dette skriver vi for å poengtere at vi i denne

studien snakker om en Flettner-rotor med endeplate. Nøyaktig hva som er effekten av endeplaten, er litt for omfattende til å fremstille med enkle formler uten bruk av simuleringsprogrammer, som for eksempel CFD-programmer. Det er allikevel gjort noe forskning på dette konseptet. Blant annet fremstilte Alexander Thom noen resultater ved utregning på rotorseil med flere «skillevegger» allerede i 1934 selv om det også har ført til noe forvirring for videre forskning på dette feltet (Nuttall & Kaitu, 2016, s. 166). Vi vil i denne oppgaven forholde oss til de anerkjente formlene som er godt dokumentert og brukt i forbindelse med utviklingen til dagens Flettner-rotorer.

3.1.3 Flettner-rotor i det 21. århundre

Etter flere tiår hvor Flettner-rotoren ble oversett og ikke vurdert som fremdriftsalternativ, ble det tatt opp igjen av det tyske vindenergiselskapet Enercon i 2008. I 2010 stod det 130 meter lange frakteskipet E-ship 1 klart, utstyrt med fire Flettner-rotorer for å hjelpe med fremdrift i tillegg til dieselmotorene. Etter flere tusen mil med seiling kunne eieren opplyse om at rotorseilene hadde bidratt til å redusere drivstofforbruket med hele 30%. Skipet er fortsatt i daglig bruk og rotorseilene fortsetter å bidra med framdrift og besparelser av drivstoff (Titahelu, Mesak, & Litaloly, 2021). E-ship 1 var forløperen til flere skip som i ettertid har installert rotorseil for å hjelpe med å effektivisere fremdriften.



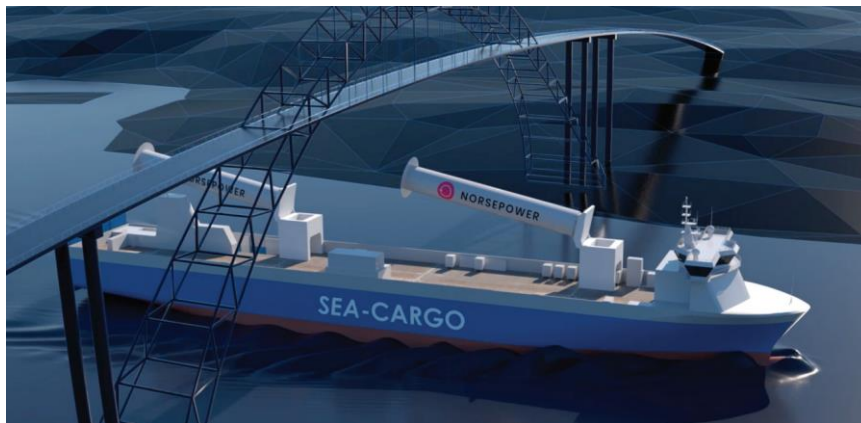
Figur 3: E-ship 1 (Jamieson, 2015)

I nyere tid har også Sea Cargo installert, som de første i verden, nedfellbare rotorseil på et av sine skip (Rabbevåg, 2022). Disse rotorseilene økte fremkommeligheten til skip av denne

typen, og gjorde det mulig å kunne gå under broer og luftspenn innaskjærs, og gjorde at skipene ikke var like begrenset av høyden som de ellers ville vært med vanlige rotorseil.

I en pressemelding fra Sea-Cargo 25. juni 2020 uttalte teknisk direktør i Seatrans, Johan Christian Hvide, at:

“Ved å sette rotorseil på SC Connector tar vi i bruk tilgjengelig fornybar energi. Vindkreftene benyttes direkte til fremdrift, uten omformingstapene som er forbundet med andre energibærere. Som seilende hybrid forventer vi å redusere drivstofforbruk og CO₂ utslipp med 25%.” (Sævild, 2020)



Figur 4: SC Connector (Sævild, 2020)

4 Metode

I denne bacheloroppgaven har vi som mål å finne ut om det er mulig, og eventuelt hvor mye, man kan spare i forbruk om bord på skip dersom man installerer rotorseil som et tilleggs-fremdriftsmiddel. Vi har i dette tilfellet valgt å gjøre en case-studie. Grunnen til dette er fordi vi ønsker en virkelighetsnær studie, og fordi vi ønsker å forstå detaljene i hva som skjer med et skip i flere ledd av endringen fra konvensjonell framdrift, til framdrift ved hjelp av rotorseil. I Engelsk-norsk medisinsk ordbok defineres en case-studie slik:

«Case study: forskningsmetode der man studerer detaljert et "tilfelle" (en viss person, en viss gruppe osv.) for å kunne formulere hypoteser for videre undersøkelser osv»
(Kunnskapsforlaget, 2009, s. 46).

En svakhet ved å forske ved hjelp av case-studie er at man kun vil få svar på som skjer i det detaljerte tilfellet. Det betyr at denne studien ikke vil kunne benyttes som et grunnlag for statistisk generalisering på lik linje med en annen type studie, for eksempel en kvantitativ studie (Jacobsen, 2022, s. 107). Det kan allikevel argumenteres for at denne studien vil kunne ses på som et eksempel på resultater som lignende skip i lignende ruter kan oppleve ved samme type endring av fremdriftssystem. Valg av enhet vil derfor spille en rolle for hvorvidt forskningen er nyttig.

For å kunne svare på problemstillingen har vi begrenset rammene i casestudien til et spesifikt skip på en spesifikk rute. Skipet vi har valgt er et bilfergefartøy som går i rute mellom Bodø og Moskenes. For å forenkle studien, og begrense variablene mer, har vi valgt å kun bruke strekket fra Helligvær til Moskenes tur/retur. På denne måten har vi avgrenset variablene for hvordan skipet er konstruert og hvordan ruta ser ut. Det vil allikevel være rom for variabler fra andre faktorer som påvirker resultatet, som for eksempel konfigurasjonen av rotorseil, men i all hovedsak variasjonen i værforhold og vindretning.

4.1 Verktøy for utregning

I denne studien har vi valgt å bruke Microsoft Excel for å regne ut resultater. Skjermbilder av regneark ligger i vedlegget. Filen ligger tilgjengelig i SafeShare.uio.no frem til 24.05.2024.

URL:

<https://safeshare.uio.no/?810a5809572e1c08#DKUZspPgxfmR3KZ8gitCmbjoAzVuJ3takXbx8PxxwNBe>

4.2 Innsamling av data

Vi har samlet inn informasjon hovedsakelig gjennom mailkorrespondanse og telefonsamtaler. Vi har også samlet inn metoder og annen data ved hjelp av tilgjengelig litteratur og tilgjengelige kilder fra internett. Dette prosjektet er meldepliktig til Sikt. Søknaden har blitt sendt og godkjent. Produsent av rotorseil, rederi, og skip blir ikke navngitt i denne oppgaven.

Vi har vært i kontakt med produsenter av rotorseil og rederi for å hente inn data og spesifikasjoner som er relevante for vår studie. Dataene er forholdsvis begrenset, men vi har likevel brukt dem som utgangspunkt. Produsent av rotorseil har ikke ønsket å dele noen av sine metoder, formler eller kalkulasjoner, da dette kan hjelpe deres konkurrenter. Derfor har vi måttet lage våre egne kalkulasjoner. Vi har laget kalkulasjoner basert på litteratur om fluiddynamikk, veiledning fra fagpersoner ved Høgskulen på Vestlandet, enkel fysikk, og lange diskusjoner om hva som gir realistiske svar.

4.3 Valg av rute

Ruten vi har valgt går mellom Bodø og Moskenes i Nordland fylke. Dette er en populær fergerute som også per i dag er Norges lengste. Her frakter fergene med seg flere tusen passasjerer og et tusentalls biler hvert år til sammen på alle skipene som går denne ruta. Videre har vi valgt å fokusere på det rette strekket mellom Helligvær og Moskenes. Dette gir oss et langt strekk hvor skipet kan holde en fast kurs og kan simulere effekten av vinddata stabilt hele veien. Kursene mellom disse to punktene blir da henholdsvis 312° og 132° tvers over Vestfjorden. Strekket er 35 nautiske mil langt, noe som er langt nok til at det skulle kunne oppdages om det gjorde stort utslag på forbruk av drivstoff dersom Flettner-rotor ble installert. Skipet går med 15 knop og bruker ca. 2 timer og 20 min på dette strekket.

4.4 Valg av skip

Vi har vært i kontakt med et rederi som har gått denne strekningen for å innhente data om forbruket på dette strekket, slik at vi kan finne ut hvor mye man eventuelt vil spare ved å installere rotorseil.

Skipet som blir brukt som eksempel i denne oppgaven er et 80 meter langt skip med et dypgående på 4,5 meter. Skipet har en antatt toppfart på 17-18 knop. Marsjfarten er på 15 knop, som blir oppnådd med 75-80% pådrag når 3 av 4 maskiner er i drift. Pådraget er avhengig av vær og vind. Ved marsjfart ligger forbruket ifølge maskinsjef ombord på omtrent 0,8 til 1m³ per time¹. Motstanden til skipet gjennom vannet ved marsjfart ligger på ca. 240,7 kN. Som en kort oppsummering om skipet uttalte maskinsjefen via Email at:

«Skipet er som gammel ku – spiser mye, lite fart, mye vekt, men går i all slags vær og tåler juling som faen»².

4.5 Innsamling av skipsdata

Vi mottok informasjon fra maskinsjefen om bord på det aktuelle skipet med tall på hvor mye kraft som skal til for å holde skipet gående i marsjfart. Her fikk vi også vite at skipet går som regel alltid med 75-80% pådrag avhengig av vær og vind, og at dette tilsvarer en fart på cirka 15 knop. Ved 15 knop får skipet en mostand i vannet på 240,7kN, $M(15)=240,7\text{kN}$. Det som var viktig for oss, var å få frem hvor mye kraft vi kunne 'overta' ved hjelp av rotorseilet.

Dersom rotorseilet produserer en kraft på 50kN vil maskineriet kun måtte bidra med 190,7kN for å oppnå tilsvarende fart.

I tillegg fikk vi informasjon om hvor mye forbruk motorene hadde per prosent pådrag. Her kunne vi se at dersom skipet gikk med 75% pådrag på motorene tilsvarte dette et forbruk på 206g med SFOC per kWh produsert per motor. Maskinsjefen på fartøyet har oppgitt at opplevd forbruk ved 75-80% pådrag ligger på mellom 0,8 og 1,0 m³ per time.

Vi vet fra dataspesifikasjoner tilsendt til oss at hovedmaskineriet består av 4 stykk MTU 16V 396TE74L, men ifølge maskinsjef ombord er kun 3 av de er i bruk samtidig³. Disse motorene

¹ Personlig Email-korrespondanse, maskinsjef 13. februar 2024

² Personlig Email-korrespondanse, maskinsjef 15. februar 2024

³ Personlig Email-korrespondanse, maskinsjef 13. februar 2024

har en effekt på 2000kW, som totalt gir 6000kW når tre stykk av de er i bruk. Dette gjør også at vi har tilgang til data som viser oss hvor mye dette fartøyet har i fart, bruker i drivstoff og antall kW.

Forbruk (g)	Pådrag (%)	Prosentvis økning i forbruk per kWh ifht. 75	Kg pr time	kW
201	100		402	2000
202	90		363,6	1800
205	80		328	1600
206	75	0,0 %	309	1500
207	70	0,5 %	289,8	1400
208	65	1,0 %	249,6	1300
208	60	1,0 %	249,6	1200
210	55	1,9 %	231	1100
211	50	2,4 %	211	1000
214	45	3,7 %	192,6	900
216	40	4,6 %	172,8	800
225	35	8,4 %	157,5	700
233	30	11,6 %	139,8	600
236	25	12,7 %	118	500

Figur 5: Skipets forbruk per pådrag, basert på informasjon fra maskinsjef (Personlig Email-korrespondanse, maskinsjef 15. februar 2024)

v [kn]	Rt [kN]
15,0	240,7
15,5	272,7
16,0	306,6
16,5	340,7

Figur 6: Oversikt over skipets motstand i vannet (Personlig Email-korrespondanse, maskinsjef 15. februar 2024)

4.6 Valg av konfigurasjon for Flettner-rotor

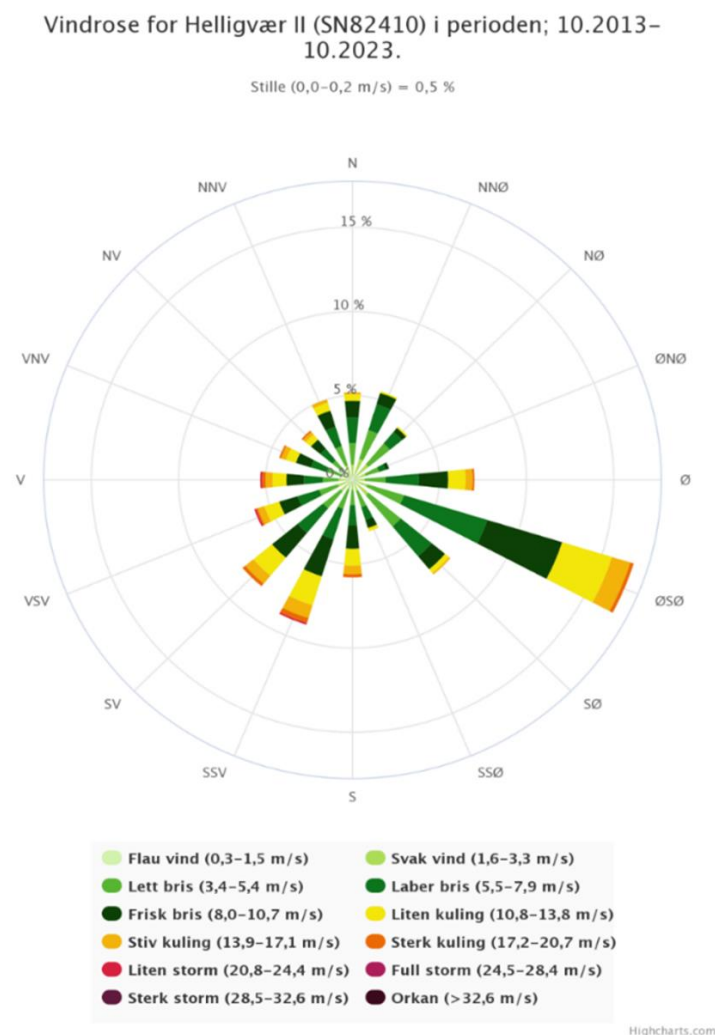
Vi har vært i kontakt med en produsent av rotorseil og fått et spesifikasjonsdatablad for noen av de forskjellige rotorene de leverer. Vi har valgt å benytte oss av rotoren som er 4x24 meter fordi vi ser for oss at den størrelsen passer godt til skipet vi har valgt. I dette databladet er det også oppgitt hvor effektiv rotoren kan være, men vi har også foretatt våre egne beregninger for å verifisere dette. Dette gir oss et bedre bilde på hvor godt det vil passe å installere rotorseil på dette skipet. Elmotoren som brukes for å drive denne rotoren har en effekt på 80kW. Plasseringen av rotorseilet er ikke noe vi har tatt for oss i denne oppgaven, da dette er en oppgave som hovedsakelig fokuserer på om det er mulig å spare drivstoff ved installering av rotorseil, uten hensyn til praktiske utfordringer.

Model	18m X 4m	24m X 4m	28m X 4m	30m X 5m	35m X 5m
Material	Composite	Composite	Composite	Composite	Composite
Rotor speed [rpm]	0-225	0-225	0-225	0-180	0-180
Foundation height (indicative) [m]	2.5	2.5	2.5	3	3
Weight of typical foundation [tons]	12	13	15	17	24
Electric motor nominal power [kW]	60	80	100	115	143
Variable speed drive voltage & input frequency [V/Hz]	380-690V, 50/60 Hz	380-690V, 50/60 Hz	380-690V, 50/60 Hz	380-690V, 50/60 Hz	380-690V, 50/60 Hz
Total weight without foundation [tons]	27	30	37	42	63
Maximum continuous thrust force [kN]	175	175	205	300	350
Ambient conditions					
Operational temperature [C°] (basic version)	-20...+50	-20...+50	-20...+50	-20...+50	-20...+50
Maximum operational wind speed, [m/s]	35	35	35	35	35
Survival wind speed [m/s]	70	70	70	70	70

Figur 7: Utsnitt av datablad fra produsent (Personlig Email-korrespondanse, produsent, 09. februar 2024)

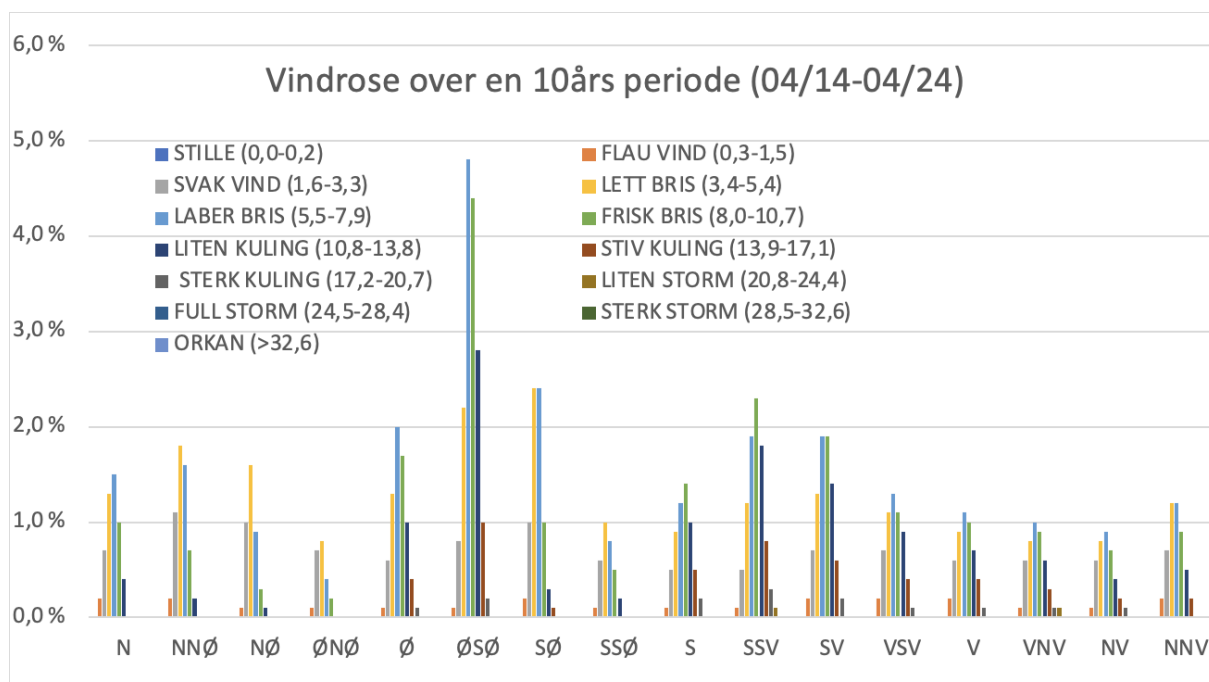
4.7 Innsamling av værdata

Innsamling av værdata har vi gjort ved å bruke Norsk Klimasenter sine nettsider (seklima.met.no). Her har vi hatt muligheten til å hente ut vinddata fra værstasjonen på Helligvær, som ligger på strekningen som vi tar for oss. Dataen fra denne nettsiden kommer fra Meteorologisk institutt og viser blant annet middelvind, høyeste vindkast og høyeste middelvind. Tallene kan sorteres etter timer, dager eller lengre perioder, men for oss er det lengre perioder som er mest interessant. Ved hjelp av disse tallene kan man også lage vindroser som forteller oss om andel av hver styrke vind og fra hvilken retning vinden kommer fra ved disse styrkene. Vi har hentet ut data til vår studie, og laget en vindrose for en tiårsperiode som man kan se i figur 6.



Figur 8: Vindrose 10 år (Norsk klimaservicesenter, 2023)

Vi har også brettet ut denne vindrosen i et stolpediagram (*Figur 7*) for å gjøre det mer oversiktlig å se hvilken andel av vindstyrkene som blåser fra hvilken retning.



Figur 9: Vindrose fremstilt som stolpediagram

4.7.1 Analyse av vinddata

I vindrosen kan vi se at det er tre hovedretninger hvor det blåser mest fra. Dette er Øst-Sørøst, Sør-Sørvest og Sørvest, hvor det blåser fra henholdsvis ca. 17%, 9% og 8% av tiden. De nærliggende vindretningene ØSØ, SØ, og SSV, i tillegg til de sistnevnte, tilsvarer ca. 53,8% av vindretningene som forekommer. Styrken av vinden er representert med farger og størrelsen av hver farge indikerer hvor ofte det blåser med denne styrken. Av all vind som forekommer, så forekommer 57,1% på styrker mellom 5,5m/s – 13,8m/s. Med utgangspunkt i dette har vi valgt å bruke omtrent 10 m/s som vindhastighet for å gjøre utregningene enkle å forholde seg til. I utregningen vil vi bruke 20 knop som standard vindstyrke. Vi har valgt å fokusere på hver 22,5°. Dette er fordi dataene fra seklime.met.no er oppgitt per 22,5°. Dette gir oss 12 vindretninger.

I tillegg til våre 12 vindretninger, ønsker vi å se på noen mer tilfeldige vindretninger, for å undersøke hvor det ville vært optimalt å ha vinden til å komme inn fra for å oppnå størst mulig kraft i fartsretning. Vindstyrkene i denne vindrosen er oppgitt i middelvind. Middelvind

er gjennomsnittsvinden over en gitt tidsperiode, normalt 10 minutter, men det er viktig å merke seg at vindkastene fort kan komme opp i 50% sterkere enn middelvind (Seter, 2020).

Vindrosen fra Seklima.met.no viser kun 98,6% av all vind, det betyr at 1,4% ikke er tatt høyde for. Dette vil i gjengjeld gi mørketall på cirka 47,6 timer i løpet av et helt år. Vi tar utgangspunkt i at skipet seiler dette strekket 4 ganger hver dag, noe som utgjør 9,32 timer per dag. Dette gjør at når vi regner ut hvor mange timer fartøyet opplever hver enkelt vind blir dette resultatet delt på to. Det vil si at den ene halvparten går til den nordlige seilassen, og den andre halvparten til den sørlige seilassen.

4.8 Beregning av CO₂-utslipp

For å beregne CO₂-utslippet har vi tatt utgangspunkt i tall fra Miljødirektoratet. Ifølge Miljødirektoratet vil både diesel og marin gassolje ha en faktor på 3,17 kg CO₂/kg energivare. Det vil si at forbrenning av 1 kg MDO vil ha et CO₂-utslipp på 3,17 kg (Miljødirektoratet, 2022).

4.9 Forbehold og avgrensninger

Vi har måttet sette noen begrensninger for å kunne besvare spørsmålet i oppgaven. Noen av disse begrensningene er for eksempel at vi har sett bort i fra strømforhold i utregningen ved hvilken relativ vind som blir oppnådd, grunnet vår begrensende kunnskap innenfor fysikk og matematikk. Vi har også sett bort i fra vindens generelle påvirkning på skipets heading, og hvor mye ekstra drivstoff man bruker for å styre opp mot vinden. Vinden kan også få fartøyet til å krenge avhengig av vindstyrken. Dette ser vi også bort ifra.

4.9.1 Stabilitet og luftmotstand

Stabiliteten til skipet er et aspekt som vil bli påvirket etter installasjon av rotorseil. Dette er noe vi velger å se bort ifra med tanke på at oppgaven hovedsakelig handler om hvor mye drivstoff som kan spares dersom vi installerer rotorseil. Samtidig ser vi vekk i fra hvor mye ekstra luftmotstand en slik Flettner-rotor vil skape på fartøyet når Flettner-rotoren ikke blir benyttet.

4.9.2 Nedre grense for kraft i fartsretning

Vi har regnet på hvor mye av den totale kraften fra rotorseilet som fungerer i fartsretning, og har valgt å sette en grense for hvilke av scenarioene som skal telles som positive resultater i utregning av besparelser. Grensen er satt til at minimum 35% av den totale kraften produsert av rotorseilet må virke i fartsretning for å telles med i besparelsene. I alle scenarioene som gir under 35% i fartsretning vil besparelsene telles som null. Dette vil forklares grundigere i kapittelet som omhandler utregning. Vi har også regnet alle resultater som gir negativ besparelse som null, da det i disse tilfellene vil være naturlig å skru av rotorseilet.

4.9.3 Grense for løftekoeffisient

Løftekoeffisienten til rotorseilet har vi satt til å ikke overstige 12,57 (4π). Dette er basert på forsøk og studier utført av Prandtl på 1930-tallet, og Smith på 1970-tallet. C_{Lmax} har i senere tid blitt bevist til å kunne overstige 12,57, da ved å øke rotasjonshastigheten på sylindren til luftstrømmen ikke lenger kan motta mer energi fra sylindren (Tokumaru & Dimotakis, 1993). I våre beregninger, basert på de førstnevnte kildene og samtaler med faglærer for fluidmekanikk, Runald Walter Meyer, har vi valgt å bruke begrensningen på 12,57 når vi ser på løftekoeffisienten (Yang & Zha, 2017, ss. 3-4). Vi har justert rotasjonshastigheten på rotoren slik at C_L kommer nærmest mulig 12,57.

4.9.4 Grense for kraftproduksjon

Produsenten av rotorseilet vi benytter oss av, oppgir i databladet at Flettner-rotoren kan produsere en maksimal kontinuerlig kraft på 175 kN. Dersom vi bruker en optimal vindretning som gir høy relativ vindstyrke, kan vi regne ut at vi får krefter med høyere verdi enn 175 kN. Vi antar at denne øvre grensen er gitt for å skåne konstruksjonen. Antakelsen er at når det blir mye vind, justerer det automatiske systemet RPM-en slik at det unngår at det produseres for mye krefter. Vi har ikke fått tilsendt produsentens anbefalte RPM i forhold til vindstyrke, men vi har forsøkt å justere RPM slik at C_L kommer så nært 12,57 som mulig og ikke overstrider 175kN i kraft produsert.

4.9.5 Kritisk turtall

Hvis Flettner-rotoren klarer å produsere nok ekstra kraft kan man eventuelt redusere pådrag eller i beste fall skru en motor helt av. Dersom vi skrur ned pådraget på en av motorene, vil vi på et punkt gå inn i området for kritisk turtall. Dette er ikke noe vi har tatt hensyn til i disse utregningene, ettersom vi ikke har informasjon om hvor området for kritisk turtall ligger på disse motorene. I virkeligheten vil dette være et aspekt som må tas hensyn til.

5 Utregning

5.1 Utregning av kraft fra rotorseil

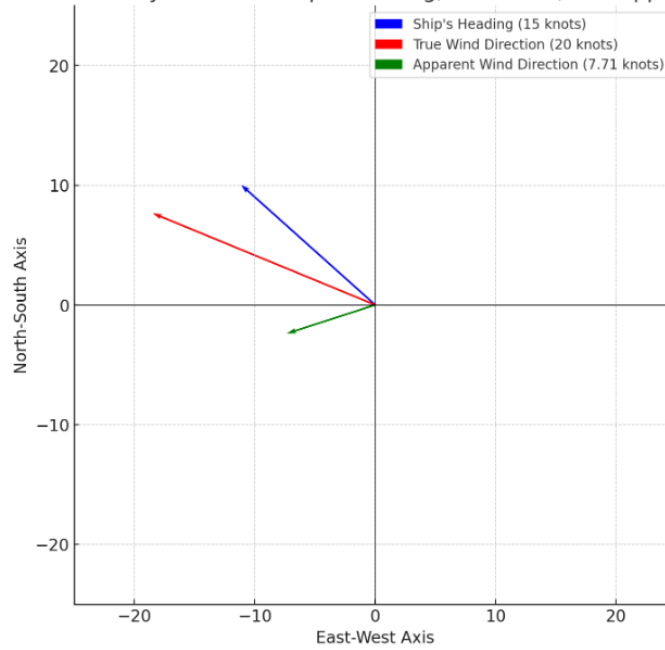
Rotoren vi har plassert på dette fartøyet er 24 meter høy, og har en diameter på 4 meter. Vi har satt at fartøyet går med en konstant fart på 15 knop, da dette er marsjfarten det seiler med i denne ruten. Vi benytter oss av konstant vind på 20 knop, men vi har også sett på ett scenario hvor vi bruker 42 knops vind for å kunne se hva resultatene for de mest optimale vindretningene vil være. Når fartøyet seiler til Moskenes har det en kurs på 312° , og når fartøyet seiler mot Bodø har det en kurs på 132° . Vindretningen i området varierer noe som også påvirker våre kalkulasjoner. For å finne de riktige kreftene som virker på fartøyet må man finne den opplevde vinden på fartøyet, altså relativ vind. Relativ vind er kombinasjonen av den sanne vinden og den vinden som skipet skaper når det beveger seg. Vi har brukt cosinussetningen for å beregne relativ vindstyrke:

$$U_{\infty AW} = \sqrt{B_s^2 + U_\infty^2 - 2 * B_s * U_\infty * \cos(B_s \theta - U_\infty \theta)}$$

Hvor B_s er fartøyets hastighet, U_∞ er den sanne vindhastigheten og $\cos(B_s \theta - U_\infty \theta)$ er cosinus av differansen mellom headingen til fartøyet og den sanne vindretning, altså hvor vinden blåser til. Det vil si at når det er nordavind, vil vinden blåse sørover.

Illustrert i *figur 10 og 11* har vi eksempler på hvordan det ser ut hvis man plotter det inn i en 2D-graf, hvor fartøyet seiler først nordover og så sørover. Vinden blåser konstant fra SSØ.

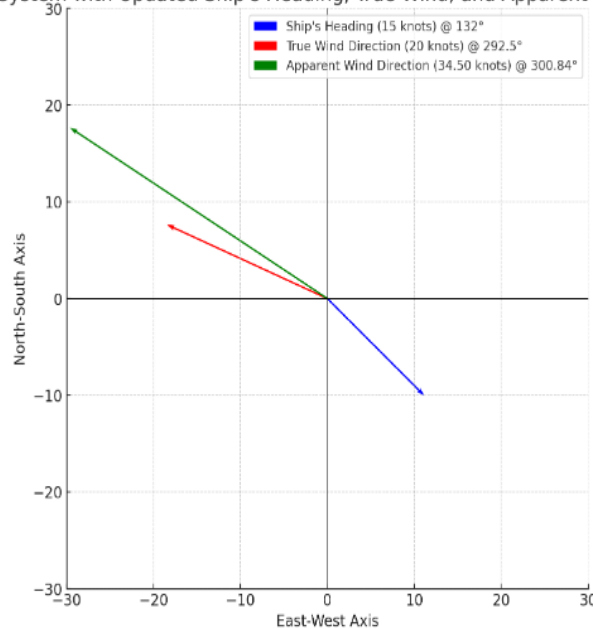
2D-Coordinate System with Ship's Heading, True Wind, and Apparent Wind



Figur 10: Vektordiagram, vind i hekken.

Man kan da se at når man får vinden i hekken når man seiler mot 312° , vil dette gi en lav relativ vindstyrke siden man seiler i den retningen vinden blåser mot, men samtidig så gir det en god relativ vindretning på fartøyet vårt.

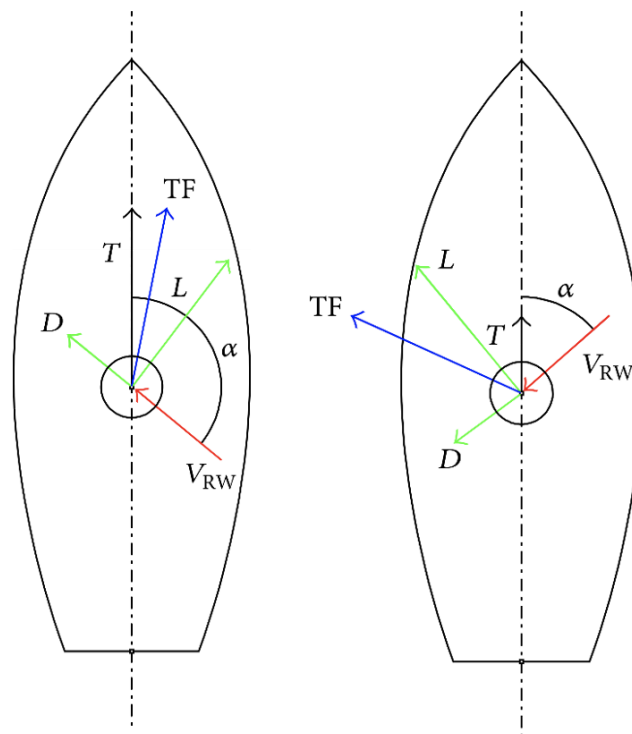
2D-Coordinate System with Updated Ship's Heading, True Wind, and Apparent Wind (Adjusted Scale)



Figur 11: Vektordiagram, vind i baugen.

Ser man på *figur 11*, ser man at dersom man seiler sørover mot 132° , så vil den relative vindstyrken bli veldig høy siden man seiler mot vinden, dette vil da gi oss en mye høyere opplevd vind, men man vil få en dårligere relativ vindretning.

For å finne relativ vindretning med hensyn til skipets fart og kurs bruker vi vektorregning. Da får vi den opplevde vindretningen som treffer rotorseilet. I *Figur 12* er det illustrert hvordan denne vinden vil virke på rotoren for å skape løft, drag og kraft.



Figur 12: Illustrasjon av vektorer på skipet (A. De Marco, 2016, s. 9)

I *Figur 12* kan man se hvor relativ vind (VRW) treffer rotoren, at drag (D) går parallelt med relativ vind (VRW), at løftekraften (L) er perpendikulær på både D og VRW, forholdet mellom resultantkraften (TF) av D og L, og kraft i fartsretning (T). Dette gir en indikasjon på hvor det er mest gunstig å ha den relative vinden inn fra for at resultantkraften (TF) og kraft i fartsretning (T) skal være mest mulig lik i størrelse. Figuren til venstre vil være et nært optimalt tilfelle hvor man får vinden inn fra ca. 120° fra baugen og kraften i fartsretning (T) er omtrent like stor og i samme retning som resultantkraften (TF). Figuren til høyre viser at kraften i fartsretning (T) er betydelig mindre enn resultantkraften (TF) og dette vil gi mindre kraft framover og mer kraft på tvers av fartsretningen, noe som gjør at man må kompensere

med roret for å ikke komme ut av kurs. Disse kallenavnene på vektorene gjelder kun for *figur 12*.

Når vi har funnet relativ vindstyrke og vindretning, så tar vi i bruk formlene for løft, drag og samlet kraft.

Vi må se på ulike parametere som påvirker Flettner-rotoren. Hvor høy RPM rotoren roterer med, vil påvirke hvor mye løft, drag og total kraft som blir produsert. Parametere som påvirker kraften Flettner-rotoren produserer er som følger:

- RPM, hvor fort Flettner-rotoren roterer. I vårt tilfelle vil dette variere ettersom hvor sterk den relative vinden er.
- Hvilken retning Flettner-rotoren roterer, altså med eller mot klokken, påvirker hvilken vei kraften virker.
- Radius av Flettner-rotoren. I vårt tilfelle $a=2\text{m}$.
- Høyden av Flettner-rotoren. I vårt tilfelle $b=24\text{m}$.
- Relativ vindstyrke, $U_{\infty AW}$.
- Vinkelhastigheten (i rad/s) på rotoren, $\omega = \frac{RPM}{60} * 2 * \pi$.
- Lufttettheten. I vårt tilfelle bruker vi $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, som er lufttettheten ved 15°C ved havoverflaten.

Med disse parameterne kan vi finne løft- og drag-koeffisientene, som vi videre bruker for å finne løft og drag verdiene. Disse koeffisientene gjør at de videre utregningene tar hensyn til luftens hastighet, bane rundt objektet og rotasjonshastigheten på rotoren. For C_L bruker vi formelen til Frank M. White (White, 2008, s. 542):

$$\text{Formel for } C_L = 2\pi * a * \frac{\omega}{U_{\infty AW}}$$

For å finne C_D bruker vi en forenklet formel for drag-koeffisienten ut ifra formel fra Meyer og Erland (Meyer & Erland, 2019, s. 10):

$$\text{Formel for } C_D = \frac{C_L^2}{4\pi} * 0,6677 \dots \approx 0,05 * C_L^2$$

Fra White (White, 2008, s. 543) får vi følgende formler for løft og drag:

$$\text{Formel for løft: } L = C_L * \frac{1}{2} * \rho * U_{\infty AW}^2 * 2 * b * a$$

$$\text{Formel for drag: } D = C_D * \frac{1}{2} * \rho * U_{\infty AW}^2 * 2 * b * a$$

Når vi har funnet verdiene på både løft og drag, bruker vi Pytagoras teorem for å finne den totale kraften som blir produsert:

$$F = \sqrt{L^2 + D^2}$$

Når vi har funnet F, altså den totale løftekraften fra rotorseilet, har vi kun funnet F i F-retning, og ikke i fartsretningen til skipet. For å finne kraften i fartsretning, må vi regne ut vinkelen mellom F og skipets kurs. Man må først finne hvor stor θ_F vil være. Vi bruker formelen for sinus for å finne vinkelen:

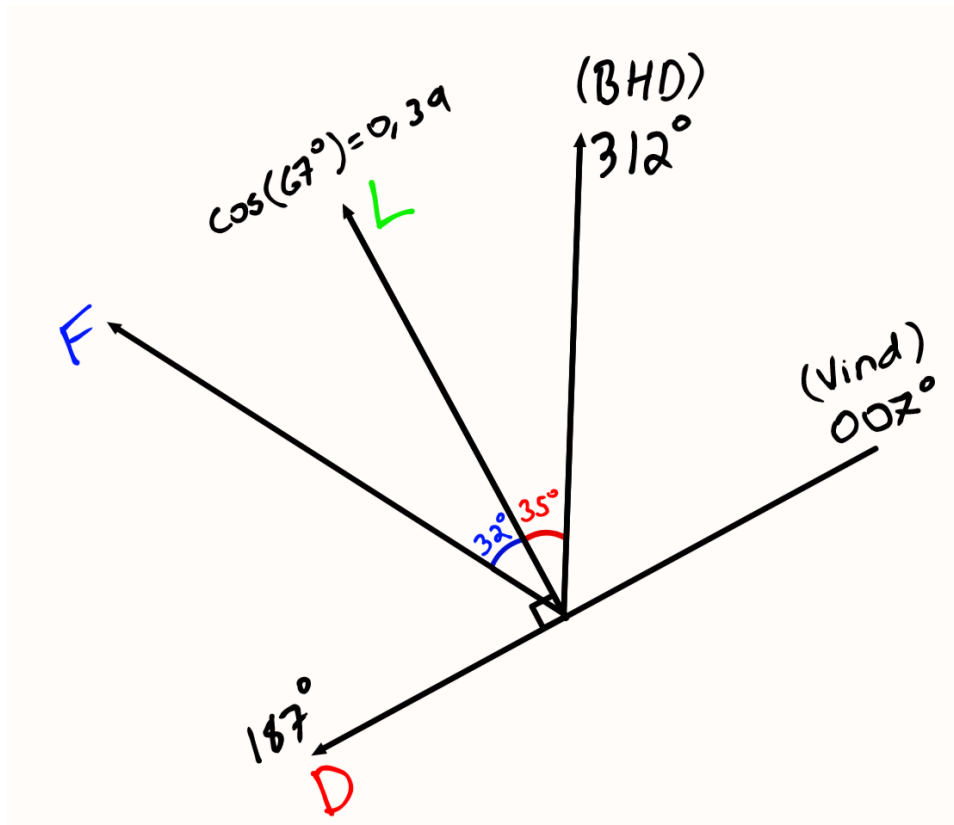
$$\theta_F = \sin^{-1}\left(\frac{D}{F}\right)$$

Vinkelen θ_F vil være fra L. L vil alltid stå vinkelrett på drag-vektoren D. D vil alltid være parallell med den relative vinden. Fremgangsmåten for å finne ut hvor stor vinkelen er vil variere ut fra hvilken retning fartøyet seiler i, og om vinden kommer inn på babord eller styrbord side på fartøyet.

Videre må vi finne vinkelen mellom F og BHD. Jo nærmere denne vinkelen er 0° , jo mer av kraften F vil gå i skipets fartsretning (BHD), da $\cos(0^\circ) = 1$, altså 100% av total kraft produsert. Formel for kraft i fartsretning:

$$F_{\text{Fartsretning}} = F * \cos(\theta_{F,BHD})$$

Dette blir illustrert i *figur 13*, hvor den blå vinkelen vil være den kalkulerte vinkelen $\theta_F = 32^\circ$ fra L. F vil alltid ligge mellom D og L. Den røde $\theta_{L,BHD}$ vil være den gjenstående vinkelen mellom løftet L og skipets kurs som er lik 35° .



Figur 13: Illustrasjon av vinkel mellom F og BHD.

5.2 Bruk av kraft fra rotorseil til besparelse av drivstoff

Den totale kraften som trengs for å forflytte fartøyet med en fart på 15 knop igjennom vannet er 240,7kN. Det vi ønsker å få frem i resultatene våre er hvor mye av disse 240,7kN som kan bli overtatt ved bruk av Flettner-rotoren, som igjen vil gjøre at vi kan ta av på pådraget på hovedmaskineriet. Vi har kommet frem til hvor mye Flettner-rotoren overtar for hovedmaskineriet ved å dele skipets motstand ved 15 knop $M(15) = 240,7\text{kN}$, på antall motorer som er i bruk.

$$M(15) = 240,7\text{kN}$$

$$\text{Kraft hver motor produserer} = \frac{240,7\text{kN}}{3} = 80,23\text{kN}$$

Når én motor til vanlig går på 75% pådrag har den tilsvarende ett forbruk på 309 kg/t med MDO. Dersom Flettner-rotoren produserer mer enn 80,23kN med kraft tilsier det at man kan slå av en motor, og videre redusere på pådraget til en annen motor.

Vi har, for videre forklaring av utregningen, laget en eksempelutregning for vindretningen 225°, hvor vårt fartøy seiler 132°:

Flettner-rotoren vår produserer 53319N med kraft i fartsretningen til fartøyet. Dette er ikke nok til å slå av en motor, men nok til å redusere pådraget på en av motorene betraktelig.

$$\text{Kraft å produsere} = \frac{240700N - 53319N}{80230N} = 2,34 \text{ motorer}$$

Denne kalkulasjonen viser at vi trenger 2,34 motorer som går med 75% pådrag i lag med Flettner-rotoren for å kunne opprettholde 15 knop. Det vil si at to av motorene vil gå som normalt med 75%, mens den tredje vil gå med 0,34 av 75%.

$$\text{Pådrag 3. motor} = 0,34 \times 75\% = 25,5\%$$

Man kan dermed finne forbruket av den tredje motoren ved bruk av tabellen i *figur 8* som viser at forbruket på en motor med 25% pådrag er 118 kg/t. Når vi skal regne ut forbruket for de resterende vindretningene, vil vi ta utgangspunktet i pådraget vi har regnet ut, og runde opp til nærmeste pådrag i tabellen. Et pådrag som blir kalkulert til 62% vil bli rundet opp til 65% i tabellen. Et pådrag som blir kalkulert til 11% vil bli rundet opp til 25% i tabellen, ettersom at vi ikke har tall på pådragene under 25%.

Man kan videre gå inn i tabellen for hvor ofte vind forekommer for å finne ut hvor ofte i løpet av ett år Flettner-rotoren kan produsere denne kraften og henholdsvis ha en motor gående på 25%. Flettner-rotoren produserer denne kraften i fartsretning når vinden blåser fra 225° og fartøyet seiler mot 132°. Denne vinden oppstår 8,1% av året, men vi seiler halvparten av denne tiden mot 312°, og halvparten av denne tiden mot 132°.

I løpet av ett år vil vårt fartøy seile dette strekket på 2,33 timer, fire ganger hver dag.

$$\text{Totale timer på strekket} = 2,33t \times 4 \times 365 = 3401,8t$$

Vårt fartøy vil bruke 3401,8 timer på dette strekket, av den tiden vil det blåse 8,1% av tiden fra 225°.

$$Vind(225^\circ) = \frac{3401,8t * 8,1\%}{2} = 137,77 \text{ timer}$$

Det vil altså blåse fra 225° totalt 275,54 timer i løpet av ett år på dette strekket. Når vi seiler mot 132° vil det blåse halvparten av tiden, altså 137,77 timer.

Vi kan nå regne ut hvor mye forbruk fartøyet vil ha på dette strekket hvis den hadde benyttet seg av Flettner-rotoren, samtidig som vi kan regne ut hvor mye forbruk fartøyet ville hatt hvis vi ikke benyttet oss av Flettner-rotoren.

$$Forbruk \text{ uten } FR = 3 \text{ motorer} \times 309 \frac{kg}{t} \times 137,77 t = 127712,79kg$$

$$\begin{aligned} Forbruk \text{ med } FR &= \left(1 \text{ motor} \times 118 \frac{kg}{t} \times 137,77 t\right) + \left(2 \text{ motorer} \times 309 \frac{kg}{t} \times 137,77 t\right) \\ &= 16256,86 kg + 85141,86kg = 101398,72 kg \end{aligned}$$

Videre kan man regne ut besparelsen for dette seilasen når vinden blåser fra 225°:

$$\begin{aligned} Forbruk \text{ spart} &= Forbruk \text{ uten } FR - Forbruk \text{ med } FR \\ &= 127712,79 kg - 101398,72 kg = 26314,07 kg \end{aligned}$$

Vi har da spart 26314,07 kg ved å bruke Flettner-rotoren slik at vi kan ha en motor gående på 25%.

Vi kan videre finne besparelsen i % slik:

$$\% \text{ spart} = \left(\frac{26314,07 kg}{127712,79 kg} \times 100\%\right) = 20,6\%$$

Vi kan da se at vi har spart 20,6% av det vi egentlig hadde brukt, ved å benytte oss av Flettner-rotoren.

Vi kan også se på hvor mye CO₂-utslipp man unngår ved bruk av en Flettner-rotor i dette eksempelet:

$$CO_2\text{utslipp} = \text{Forbruk spart} \times \frac{kg\ CO_2}{kg\ MDO} = 26314,07kg \times 3,17 = 83415,6\ kg\ CO_2$$

Dette medfølger at Flettner-rotoren har spart miljøet for 83,5 tonn CO₂.

Vi har gjort disse kalkulasjonene for alle vindretningene vi har regnet med. I kalkulasjonene har vi valgt den rotasjonsretningen på rotoren som produserer mest kraft i fartsretning. Av de totalt 32 kalkulasjonene vil det kun være 15 hvor vi endrer pådraget på en eller flere av motorene. De resterende 17 kalkulasjonene vil vi sette pådraget til 75% og hver av motorene vil ha et drivstofforbruk på 309 kg/t. Ved disse kalkulasjonene er de eneste variablene: hvor mye kraft Flettner-rotoren produserer i fartsretning, hvor ofte vinden forekommer og hvilket drivstofforbruk motorene har ved ulikt pådrag.

Når vi har konstant vind med styrke på 20 knop og fartøyet vårt seiler med 15 knop vil man kunne speile vindretningene fra 270° til 90° for å få vindretningene fra 90° til 270°. Dette gjør at vi kun trenger å regne ut halvparten av vindretningene for å kunne få en reell oversikt over hvor mye løft, drag og total kraft Flettner-rotoren produserer. Det man derimot må ta hensyn til, er vinkelen mellom skipets kurs og hvilken retning den totale kraften F vil dra skipet. Denne vinkelen kan ikke bli speilet, og må derimot regnes ut. Man kan eksempelvis se likheten mellom løft, drag og total kraft produsert når vinden blåser fra 90° og henholdsvis 270°, samtidig som man ser hvordan denne vinkelen mellom skipets kurs og den totale kraften påvirker hvor mye kraft som vil gå i skipets fartsretning.

Vindretning:	90°	
BHD (grader)	312	132
BS (knop)	15	15
TWA (grader)	270	270
AWD (grader)	42	-138
TW (knop)	20	20
APP LENGDE (knop)	13,38	32,72
APP RETNING (grader)	41,41	107,86
A (radius) (m)	2	2
B (høyde) (m)	24	24
$U_{\infty A\omega}$ (m/s)	6,88	16,83
RPM	65	121
C_L	12,42	9,46
C_D	7,72	4,47
L (newton)	34628	157620
D (newton)	21510	74540
F (newton)	40765	174357
F-retning (grader)	31,85	25,31
F-cos (grader)	32,4	-40,55
F-kraft i fartsretning (newton)	34406	132481
% av total kraft i fartsretning	84	76

Vindretning:	270°	
BHD (grader)	312	132
BS (knop)	15	15
TWA (grader)	90	90
AWD (grader)	222	42
TW (knop)	20	20
APP LENGDE (knop)	32,72	13,38
APP RETNING (grader)	287,86	221,41
A (radius) (m)	2	2
B (lengde) (m)	24	24
$U_{\infty A\omega}$ (m/s)	16,83	6,88
RPM	121	65
C_L	9,46	12,42
C_D	4,47	7,72
L (newton)	157620	34628
D (newton)	74540	21510
F (newton)	174357	40765
F-retning (grader)	25,31	31,85
F-cos (grader)	-91,17	-31,26
F-kraft i fartsretning (newton)	-3564	34847
% av total kraft i fartsretning	-2 (N/A)	85

Figur 14: Speling av krefter ved motsatte vindretninger

Man kan da se at når alle parameterne er de samme, så vil verdiene man får være speilet frem til et visst punkt, som er frem til F (hvor mye total kraft som blir produsert). Grunnen til at

parameterne etter denne linjen ikke ligner på hverandre har med hvordan vinden treffer rotorseilet vårt og vinkelen mellom fartsretningen og kraften F . Selv om den totale kraften som blir produsert er lik for begge vindretningene, men speilet, så har ikke alltid kraften en retning som går med skipets fartsretning, men mot den eller mer sidelengs.

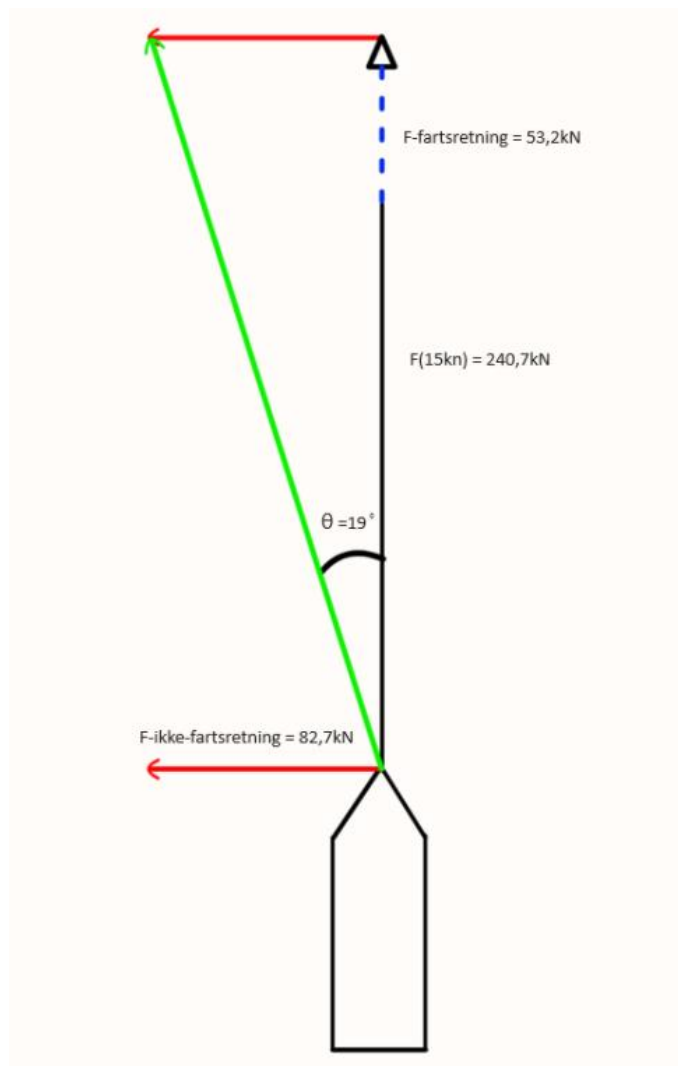
Av de totalt 16 vindretningene vi har regnet ved, hvor hver vindretning har to skipskurser, ser vi fra beregningene våre at av totalt 32 kalkulasjoner, så vil 23 av dem gi positiv kraft i fartøyets fartsretning. For å finne ut hvor mange prosent av den totale kraften produsert F som faktisk går i skipets fartsretning (F -fartsretning) deler vi F -fartsretning på F .

$$\% \text{ ifartsretning} = \left(\frac{F - fartsretning}{F} \right) \times 100\%$$

5.3 Begrensning på 35% av total kraft i fartsretning

Av de totalt 23 kalkulasjonene som er positive, vil 9 kalkulasjoner gi mellom 75-100% av total kraft produsert i skipets fartsretning. To kalkulasjoner vil gi 68% og 62%, mens to kalkulasjoner vil gi 56%. Dette vil være de mest optimale vindretningene. For de sub-optimale vindretningene ser vi fra kalkulasjonene våre at to vindretninger vil gi 39% av total kraft produsert i skipets fartsretning.

Vi anser de resterende 8 kalkulasjonene som gir positiv kraft som ikke-optimal. Vi har satt grensen til 35% da prosenten av kraft som går i skipets fartsretning vil være for lav. Disse 8 kalkulasjonene vil gi to kalkulasjoner på 33%, to kalkulasjoner på 19%, to kalkulasjoner på 15% og to kalkulasjoner på 3% av total kraft produsert i skipets fartsretning. Dette har vi gjort fordi en stor andel av kraften som blir produsert vil virke i en annen retning enn fartsretning. Dette har vi illustrert i *figur 15*.



Figur 15: Vektordiagram, illustrasjon over vektorer til F -total. Det er viktig å understreke at denne illustrasjonen ikke vil være korrekt, da det ikke tar høyde for hydrostatiske egenskaper.

På illustrasjonen kan vi se at rotorseilet produserer en total kraft, hvor 39% virker i fartsretning. 61% av kraften produsert virker ikke i fartsretning. Dette viser at det kan være store krefter som virker i en retning som ikke kommer skipet til gode i form av skyvekraft i ønsket retning.

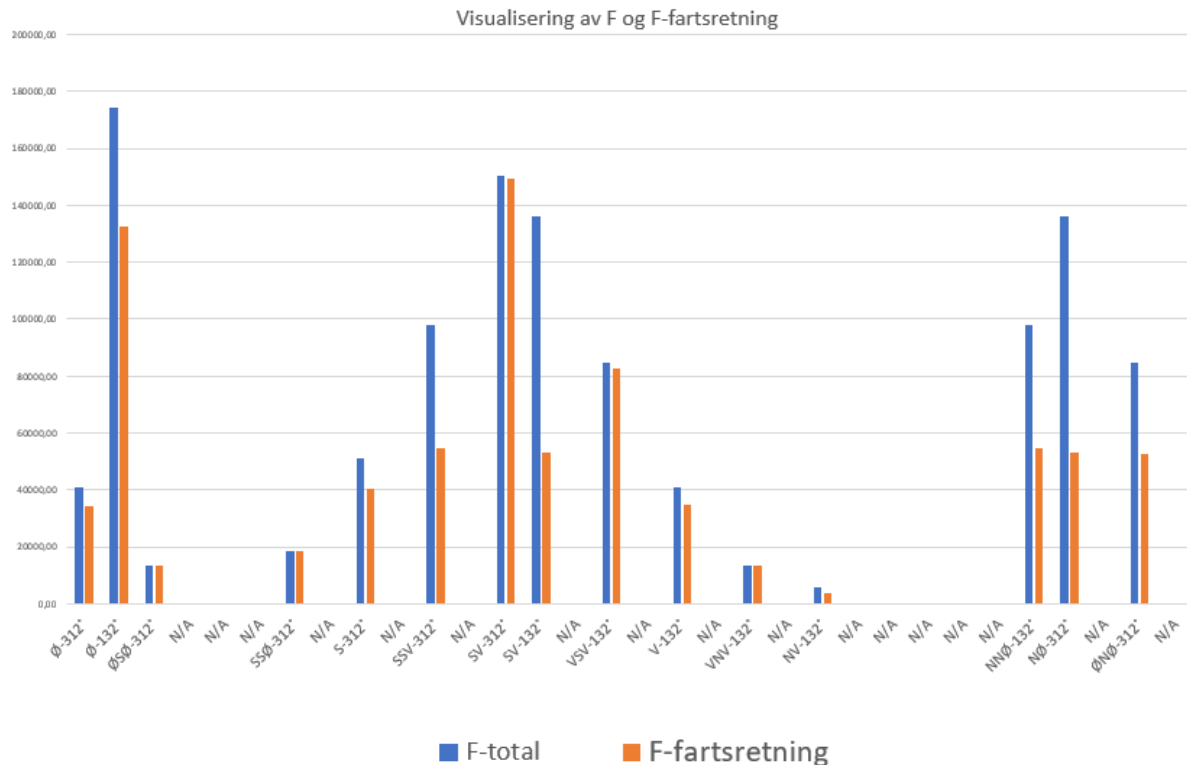
Selv om 61% av den totale kraften som blir produsert ikke vil gå i skipets fartsretning, så vil allikevel de resterende 39% gjøre det. Vi har valgt å sette en grense på at minimum 35% av total kraft må virke i fartøyets fartsretning for å bli ansett som gyldig. Vi har vurdert hvor grensen skal være, og er klare på at dette ikke nødvendigvis er fasiten på hvor denne grensen er.

Vi ser for oss at om F-fartsretning tilsvarer mindre enn 35% av den totale kraften, vil skipet måtte yte mer maskinkraft for å holde ønsket kurs. Motstanden roret skaper, og farten man taper på å ikke forflytte skipet med ønsket heading, vil være kontraproduktivt for effektiv bruk av energi. Vi er usikre på nøyaktig hvor grensen går for når det blir kontraproduktivt å bruke rotorseilet, men vi har valgt å sette en grense på 35% for å gi et godt overslag uten at det gir et potensielt *for* optimistisk resultat.

Man kan da se i *figur 15* at 53,2kN vil gå i fartøyets fartsretning, mens 82,7kN ikke vil virke i fartøyets fartsretning. Ved bruk av vektorregning og trigonometri regner vi oss frem til at vinkelen man må styre opp mot vil være på ca. 19°. Denne beregningen er gjort for å illustrere hvordan kreftene påvirker hverandre, og hvilken retning man må styre opp mot. *Figur 15* tar ikke hensyn til hydrostatiske egenskaper og vil derfor være feil. Kraften som trengs for å motvirke at skipet blir dyttet ut av posisjon, vil skape en motstand i vannet som vil gjøre at kraften for å forflytte fartøyet ved $M(15) = 240,7\text{kN}$ vil øke.

Om man må styre opp 5° til styrbord eller barbord så vil det ikke ha noe særlig utslag på den totale kraften F som blir produsert, noe som også gjør man ikke trenger å ta høyde for hvor mye fartøyet må styre opp mot vinden og hvordan det påvirker den totale kraften produsert F.

5.4 Kraft i fartsretning



Figur 16: Stolpediagram F og F-fartsretning

I dette søylediagrammet får man visualisert hvordan de ulike F-kreftene ser ut når man stiller de opp vedsiden av hverandre. Den blå søylen er den totale kraften F som blir produsert, mens den oransje søylen er hvor mye av den totale kraften F som virker i fartsretningen, altså F-fartsretning. For hver vindretning finnes det to par med søyler, en for hvordan den nordgående seilasen (312°) ser ut og en for hvordan den sørgående seilasen (132°) ser ut. De områdene hvor det står N/A vil det ikke være besparende å benytte seg av Flettner-rotoren. I disse tilfellene vil den kraften som går i F-fartsretning være negativ, noe som betyr at man vil bruke mer MDO ved å seile med Flettner-rotoren i gang. Flettner-rotoren vil da motvirke fremdriften for de enkelte vindretningene. Det er totalt 9 kurser som vil gi negativ fremdriftskraft og hvor det ikke vil være besparing å benytte seg av Flettner-rotoren. For de 8 positive kalkulasjonene som vi ser som ikke-optimal vil det nok ikke være besparende å benytte seg av Flettner-rotoren. Disse blir også oppgitt som N/A. I søylediagrammet er ikke prosentandelen oppgitt, men man kan se sammenhengen mellom F-total og F-fartsretning.

5.5 Ideelle vindretninger med hensyn til $\theta_{F, BHD}$

Vi har kalkulert 4 av de mest ideelle vindretninger, hvor størst andel av kraften produsert går i fartøyets fartsretning, for å se hvor effektivt det kan være i beste tilfelle. Resultatet av disse utregningene kan man se i *figur 17 & 18*.

Når vi ser nærmere på de mest ideelle vindretningene, så vil det være når den relative vinden kommer inn aktenfor tvers av fartøyet, og treffer Flettner-rotoren slik at den totale kraften (F) blir produsert i samme kurs som det fartøyet holder. Grunnen til det er at man får da en vinkel $\theta_{F, BHD}$ mellom skipets kurs (BHD) og Flettner-rotorens totale produsert kraft (F) som gir et svar som blir nærmest mulig 1, eller 100% av total kraft produsert. Ved de kursene som dette fartøyet skal seile 312° og 132° , så vil de mest ideelle relative vindretningene for oss være henholdsvis 72° og 252° . I disse tilfellene vil vinden treffe 120° på Flettner-rotoren vår, fra baugen. Forholdet mellom C_L og C_D gjør at vi også får et forhold mellom løft, drag og total kraft produsert. I våre kalkulasjoner vil det alltid være en vinkel mellom L og den totale kraften F på mellom 22 - 32° . Beregningen for dette kan man finne i kapittel 5.1.

Vi kan da endre på parameterne våre slik at vi klarer å oppnå slik relativ vindretning. I eksempelet i *figur 17* benytter vi oss av en vind som blåser med en styrke på 20knop.

VIND-RETNING	113°	293°
BHD (grader)	312	132
BS (knop)	15	15
TWA (grader)	293	113
AWD (grader)	19	19
TW (knop)	20	20
APP LENGDE (knop)	7,60	7,60
APP RETNING (grader)	72,99	252,99
A (radius) (m)	2	2
B (lengde) (m)	24	24
$U_{\infty AW/w}$ (m/s)	3,91	3,91
RPM	35	35
C_L	11,79	11,79
C_D	6,95	6,95
L (newton)	10582	157620
D (newton)	6236	74540
F (newton)	12283,18	12283,18
F-retning (grader)	30,51	30,51
F-cos (grader)	-47,53	-47,53
F-kraft i fartsretning (newton)	12282,76	12282,76
% av total kraft i fartsretning	99,9999	99,9999

Figur 17: Resultat, eksempel, ideell relativ vind 20 knop.

Selv om mer eller mindre 100% av all total kraft går i fartøyets fartsretning, så er den totale kraften produsert liten. Dette skyldes at vinden blåser med oss, noe som gjør at den relative vinden som virker på fartøyets Flettner-rotor blir lav. Ved lave vindhastigheter vil hensynet til C_L gjøre at vi må justere ned RPM-en. Dette er for å ikke overskride begrensningen for $C_{L\text{ MAX}}$. Hvis man derimot skrur opp styrken på vinden, men beholder ønsket om å ha en relativ

vindretning som treffer Flettner-rotoren vår i enten 72° eller 252° klarer man å oppnå store mengder kraft i fartøyets fartsretning, som vist under i *figur 18*.

VIND-RETNING	90°	270°
BHD (grader)	312	132
BS (knop)	15	15
TWA (grader)	270	90
AWD (grader)	42	42
TW (knop)	42	42
APP LENGDE (knop)	32,44	32,44
APP RETNING (grader)	71,98	251,98
A (radius) (m)	2	2
B (lengde) (m)	24	24
$U_{\infty AW/w}$ (m/s)	16,69	16,69
RPM	122	122
C_L	9,62	9,62
C_D	4,63	4,63
L (newton)	157562	157562
D (newton)	75778	75778
F (newton)	174838	174838
F-retning (grader)	25,68	25,68
F-cos (grader)	-43,71	136,29
F-kraft i fartsretning (newton)	174347,13	174347,13
% av total kraft i fartsretning	99,9999	99,9999

Figur 18: Resultat, eksempel, ideell relativ vind 42 knop.

Grunnen til at man klarer å produsere mer kraft er fordi det blåser sterkere, noe som gjør at selv om man seiler med vinden, så vil den relative vinden likevel være sterk.

5.6 Rotorseilets energiforbruk:

Motoren til rotorseilet har en effekt på 80kW. Dette finner vi fra data-ark i *figur 5*. Dette er ved 225RPM, som er maksimum rotasjonshastighet. 80kW tilsvarer 4% av 2000kW som hver hovedmaskin yter. La oss si at vi må levere 80kW for å kjøre rotorseilet uansett hvilken RPM vi har. Da vil vi minimum ha en nedgang i forbruket på 96% per hele maskin som vi kan skru av. RPM-en kommer svært sjelden til å være på høyeste rotasjonshastighet, og man kan derfor se for seg at energibehovet går ytterligere ned. I tillegg kan kraften til rotorseilet komme fra hjelpemotorene som produserer strøm til resten av skipet. Dette kan gjøre at forbruket blir mindre merkbart i sum. Vi vil for enkelthets skyld ikke ta dette med i utregningen, siden dette tilsvarer så lite i det store bildet.

6 Resultater

I denne studien ønsket vi å undersøke hvorvidt implementering av Flettner-rotor kunne redusere drivstofforbruket til et skip. Resultatet viser at skipet i snitt i løpet av et år vil spare 11% av sitt totale drivstofforbruk på strekningen mellom Helligvær - Moskenes, dersom de hadde benyttet seg av Flettner-rotor. Dette tilsvarer 350,8 tonn med drivstoff spart per år, noe som vil tilsvare en reduksjon i CO₂-utslipp på 1112 tonn.

6.1 Utbroderende om resultater

I resultatene våre ser vi at det er kun to vindretninger som gir positive og gyldige svar for både den nordlige og sørlige seilasen. Disse vindretningene er 90° og 225°.

Vinden vil, i løpet av ett år, blåse fra 7,2% fra 90°. Dette tilsvarer ca. 26 dager. De dagene vinden kun blåser fra 90° vil det være mulig å spare 32,07% av drivstoffet den ellers hadde brukt uten å benytte seg av Flettner-rotor.

Vinden vil, i løpet av ett år, blåse 8,1% fra 225°. Dette tilsvarer ca. 29,5 dager. De dagene det kun blåser fra 225° vil det være mulig å spare 37,27% av drivstoffet den ellers hadde brukt uten å benytte seg av Flettner-rotor.

For de vindretningene som forekommer oftest får vi resultater som ikke er like bra, dette er fordi det vil kun være en av de to seilasene som både gir positive og gyldige svar.

Vinden vil blåse hyppigst fra 112,5° med hele 16,5% av året. Dette tilsvarer ca. 60 dager i løpet av ett år. De dagene det kun blåser fra 112,5° vil det være mulig å spare 2,1% av drivstoffet den ellers hadde brukt uten å benytte seg av Flettner-rotoren.

Vinden vil blåse nest hyppigst fra 202,5° med 8,9% i løpet av ett år. Dette tilsvarer ca. 32,5 dager i løpet av ett år. De dagene det kun blåser fra 202,5° vil det være mulig å spare 10,3% av drivstoffet den ellers hadde brukt uten å benytte seg av Flettner-rotoren.

7 Drøfting

7.1 Vurdering av resultatet

Målet med studien var å finne ut om rotorseil kunne bidra til å redusere forbruket av marine diesel oil. Basert på de parameterne og avgrensningene vi har valgt, viser resultatene en gjennomsnittlig drivstoffbesparelse på 11%. Det høres kanskje ikke så mye ut, men siden forbruket allerede er forholdsvis høyt på dette skipet vil besparelsen utgjøre en større sum i tonn enn på et annet skip med mindre totalt forbruk.

Resultatet viser en reduksjon av utslipp på 1112 tonn CO₂ i året. Til sammenligning er dette det samlede årlige CO₂-utslippet til 241 personbiler (EPA, 2024). I det store bildet er ikke dette et stort bidrag, men skulle flere rederi gjøre den samme innsatsen, og får ned utslippene tilsvarende, kan man si at bidraget fra skipsnæringen til det grønne skiftet blir relativt stort. Store deler av skipsnæringen har allerede begynt eller gjennomført tiltak for å oppnå like eller bedre resultater på dette området, spesielt hvis man ser på norsk sokkel. Vi kan derfor si at bidraget fra rotorseilet er til stede, men vi kan ikke konstatere ut ifra vår studie at dette er det beste tiltaket hvis man kun ser på CO₂-utslipp.

7.2 Hensynet til kritisk turtall

I noen av scenarioene viser resultatene at vi kan skru en motor helt av. I flere av scenarioene viser resultatene at vi kan skru en motor delvis av. I vår studie har vi basert resultatene på at vi kan gjøre dette. I virkeligheten ville nok dette vært vanskeligere, da man måtte tatt hensyn til det som kalles «kritisk turtall». Kritisk turtall for en motor er det turtallsområdet hvor frekvensen på motoren skaper en resonans som gir skadelige vibrasjoner for flere deler av motoren og nærliggende strukturer. Hvis vi hadde tatt hensyn til dette i vår studie, kunne resultatene blitt annerledes. Da måtte vi ha tatt flere hensyn, og beregnet ekstra kraft fra resterende maskiner.

7.3 Bruk av flere rotorseil

Dersom vi hadde benyttet oss av mer enn ett rotorseil, hadde det vært mulig å oppnå bedre resultater og høyere besparelser. Dette er noe som vil være begrenset til størrelsen på skip, tilgjengelig areal på dekk og interaksjon mellom rotorseilene. Å installere flere rotorer ville naturligvis også kostet mer, men fordelene kunne potensielt vært enda større. Dersom man skulle sett på et scenario hvor man har mer enn én rotor, så vil det komme flere aspekter inn i bildet. Dette kan for eksempel være: positiv og negativ interaksjon mellom rotorene, stabilitet,

større ror-utslag for å kompensere for større krefter. Som vist i resultatdelen, hadde det til tider vært mulig å gå uten hjelp fra maskineriet i det hele tatt, dersom vi hadde hatt en rotor til med samme effekt.

7.4 Tidsbesparelse kan redusere forbruk

Fokuset ved bruk av rotorseilet kunne også handlet om å spare tid, istedenfor forbruk. Da hadde man kunnet undersøkt om man hadde redusert antall timer fartøyet hadde brukt over det samme strekket. Med tre maskiner med 75% pådrag i tillegg til kraft fra rotorseilet vil skipet få høyere fart, og dermed spare tid. Samtidig kan det jo tenkes at drivstofforbruket også ville blitt redusert siden tiden i marsjfart vil bli redusert.

7.5 Værruting

Flere av scenarioene i studien kunne gitt bedre resultater, med tanke på produksjon av kraft fra rotorseilet, dersom skipet hadde justert headingen (BHD) med noen grader. I oppgaven har vi valgt å holde rett kurs for å måle effekten på en fast rute. Hvis rederiet vil utnytte rotorseilet bedre kan de vurdere å benytte seg av såkalt værruting, eller «weather routing». Det finnes værrutings-programmer som tar høyde for været som er meldt den dagen skipet skal gå, og kan regne ut den mest effektive ruta med tanke på tid og/eller drivstofforbruk. Vi har i vår studie benyttet oss av en værstasjon som lå heldig plassert ved vår rute. Norge er et land med ganske god dekning av værstasjoner, og norskekysten vil være et ideelt område for bruk av værruting.

7.6 Sammenligning med andre studier

Sammenlignet med andre studier innenfor samme fagområde, kan vi se at resultatene i stor grad kan være like. Selv om vi har resultater som er lignende, så er likevel vår studie særegen grunnet valg av metode og de parameterne dette innebærer. Vår studie gjelder for et spesifikt fartsområde, med et spesifikt skip. Resultatet vi har fått kan derfor etterlignes, men med andre parametere vil man mest sannsynlig få et annet resultat.

8 Konklusjon

I denne studien ønsket vi å undersøke hvorvidt det var mulig å redusere drivstofforbruk ved å installere rotorseil på et rutegående fartøy. Våre kalkulasjoner viser en snittbesparelse på 11%, basert på en case-studie. Til tross for at denne studien har forsøkt å være så realistisk som mulig, vil det i virkeligheten være flere ukontrollerbare variabler, som vindstyrke og hydrostatiske faktorer, som kan påvirke resultatene. Dette betyr at besparelsen kan være bedre eller dårligere i et reelt scenario.

I denne oppgaven har vi vist at det på dager med gunstig vær kan spares ganske mye på forbruket MDO, men at resultatet er helt avhengig av hvilken vind og hvilke vindretninger man har. Vi har, ved stegvis utregning, vist hvordan man kan regne ut kreftene til et rotorseil, og videre hvordan disse kreftene kan bidra med fremdrift og reduksjon av drivstofforbruk. Vi har beskrevet klare avgrensinger og forbehold, og har benyttet oss av reelle data for å gjøre case-studien så etterrettelig og så virkelighetsnær som mulig. Vi har i vår studie funnet at rotorseil kan bidra til reduksjon av drivstofforbruk og utslipp.

9 Videre forskning

I gjennomføringen av studien har vi underveis blitt nysgjerrige på flere spørsmål som omhandler rotorseil, og som kan være interessante å forske videre på. Noen interessante emner som videre forskning kunne tatt for seg er som følger:

- Hvor mange rotorseil må man ha for å ta over hele fremdriften til en ULCC?
- Hvor godt fungerer rotorseil på en kabelferge?
- Helhetlig studie om installering av rotorseil og eventuell inntjeningstid på investeringen.
- Studie om værruting og utvikling av brukersystemer.
- Kan rotorseil bidra til redusering av seilingstid?

10 Bibliografi

- A. De Marco, S. M. (2016, juli 20). *Flettner Rotor Concept for Marine Applications: A Systematic Study*. Hentet April 16, 2024 fra International Journal of Rotating Machinery: <https://doi.org/10.1155/2016/3458750>
- Antonsen, K. M. (2020, mai 5). *Overnattings-, passasjer- og trafikk tall for Lofoten 2019*. (Nordlandsforskning, Produsent) Hentet november 18, 2023 fra https://nforsk.brage.unit.no/nforsk-xmlui/bitstream/handle/11250/2725904/NF-notat+1003_2020+Gjested%C3%B8gn+og+trafikktall+Lofoten+.pdf?sequence=1
- Danielsen, D. J., Martinsen, M. W., & Kristoffersen, K. J. (2022, januar 25). *NRK Nordland*. Hentet mars 24, 2024 fra https://www.nrk.no/nordland/hydrogenferge_-torghatten-og-vegvesenet-skriver-kontrakt-pa-5-milliarder-1.15826581
- EPA, Environmental Protection Agency. (u.d.). *Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle*. EPA. Hentet april 29, 2024 fra <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>
- Hofstad, K., & Kristiansen, J. R. (2023, april 13). *Store Norske Leksikon*. Hentet november 18, 2023 fra [magnuseffekten](https://snl.no/magnuseffekten): <https://snl.no/magnuseffekten>
- IMO. (2023, 7). *Annex 1, RESOLUTION MEPC.377(80)*. Hentet desember 6, 2023 fra <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/PressBriefings/Documents/Clean%20version%20of%20Annex%201.pdf>
- IMO. (2023). *IMO's work to cut GHG emissions from ships*. Hentet mars 24, 2024 fra <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx>
- Jacobsen, D. I. (2022). *Hvordan gjennomføre undersøkelser?: Innføring i samfunnsvitenskapelig metode* (4. utg.). Cappelen Damm Akademisk.
- Jamieson, A. (2015). *Wikimedia Commons*. Hentet november 20, 2023 fra [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:E-Ship_1_\(20037221244\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:E-Ship_1_(20037221244).jpg)
- King, A. (2022, September 06). *Horizon, The EU Research and Innovation magazine*. Hentet april 23, 2024, fra <https://projects.research-and-innovation.ec.europa.eu/en/horizon-magazine/emissions-free-sailing-full-steam-ahead-ocean-going-shipping>

- Kosiorek, B. (u.d.). *SNL*. Hentet mars 16, 2024 fra <https://snl.no/magnuseffekten>
- Kunnskapsforlaget. (2009). *Engelsk medisinsk ordbok*. Oslo: Kunnskapsforlaget.
- Leraand, D. (2022, januar 16). *Oljekrisen 1973–1974 i Store norske leksikon*. Hentet mars 12, 2024 fra SNL: https://snl.no/oljekrisen_1973%E2%80%931974
- Meyer, R. W., & Erland, S. (2019, november 6). *Induced drag in two dimensions in ideal fluids*. Hentet fra Doi.org/10.1088/2399-6528/ab5022
- Miljødirektoratet. (2022, juni 20). *Utslippsfaktorer i klimagassregnskap for Norge*. Hentet april 22, 2024 fra Miljødirektoratet: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/klimagasser-utslippstall-regnskap/utslippsfaktorer-klimagassregnskap/>
- Norsk klimaservicesenter. (2023). Hentet oktober 23, 2023 fra https://seklima.met.no/windrose/?timeresolution=last_10_years&locationid=SN82410
- Nuttall, P., & Kaitu, J. (2016) The Magnus Effect and the Flettner Rotor: Potential Application for Future Oceanic Shipping. Hentet mars 24, 2024 fra [doi.org/10.33318/jpacs.2016.36\(2\)-](https://doi.org/10.33318/jpacs.2016.36(2)-)
- Rabbevåg, F. (2022). *Rotorskip*. Hentet mars 20, 2024 fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/rotorskip>
- Seter, K. (2020, august 16). *Store Norske Leksikon*. Hentet mars 20, 2024 fra <https://snl.no/vindkast>
- Sævild, O. (2020, juni 25). *Sea-cargo.no*. Hentet mars 20, 2024 fra <https://sea-cargo.no/wp-content/uploads/2020/06/Sea-Cargo-pressemelding-rotorseil.pdf>
- Taraldsen, L. (2013, mars 14). *Teknisk ukeblad*. Hentet mars 12, 2024 fra <https://www.tu.no/artikler/i-1986-ble-oljeprisen-halvert-etter-supplysjokk-na-skjerdet-igjen/232157>
- Titahelu, N., Mesak, F. N., & Litoloy, S. J. (2021). CFD Assessment of Utilizing Flettner on 6500 DWT Container Ship. *International Journal of Engineering Research & Technology*, ss. 37-41.

Tokumar, P., & Dimotakis, P. (1993). *The lift of a cylinder executing rotary motions in a uniform flow*. Hentet april 5, 2024 fra <https://doi.org/10.1017/S0022112093002368>

UNCTAD. (2021). *Review of Maritime Transport 2021*. Hentet desember 6, 2023 fra <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2021>

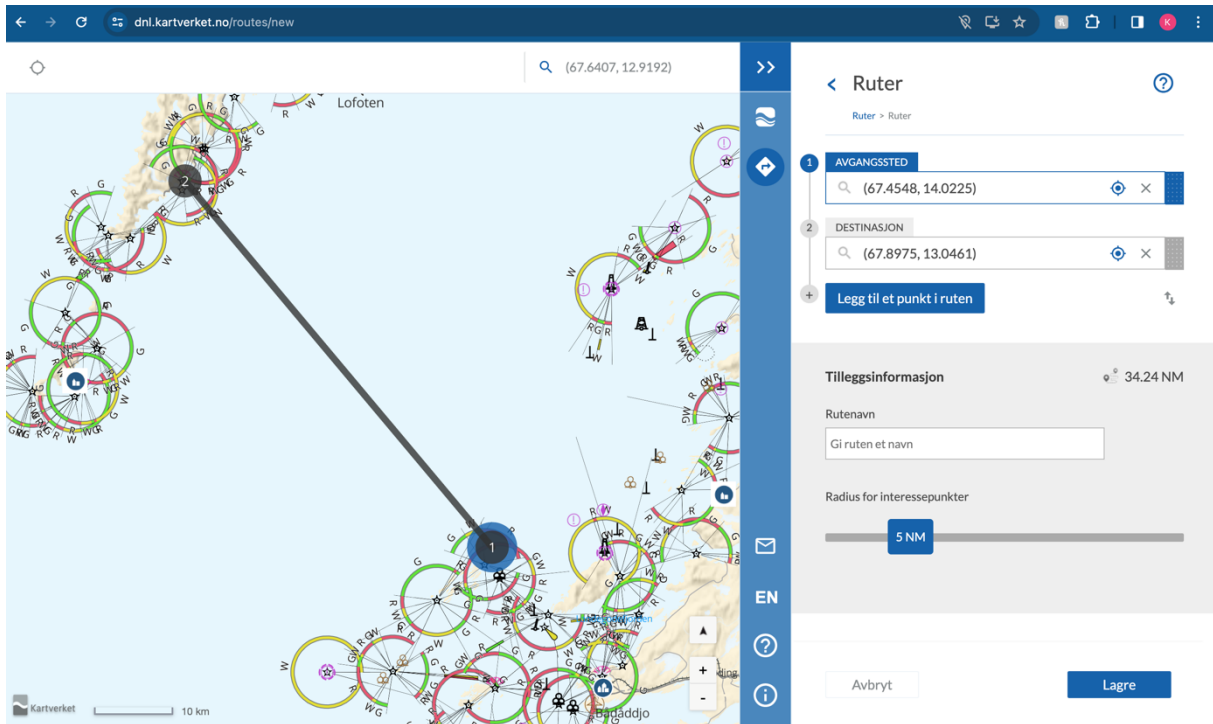
White, F. M. (2008). *Fluid Mechanics* (6. utg.). New York, New York, USA: McGraw-Hill.

Wikimedia Commons. (u.d.). *Buckau Flettner Rotor Ship LOC 37764u*. Hentet april 13, 2024 fra https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buckau_Flettner_Rotor_Ship_LOC_37764u.jpg

Yang, Y., & Zha, G. (2017). Super-Lift Coefficient of Active Flow Control Airfoil: What is the Limit? Hentet april 5, 2024 fra <https://acfdlab.miami.edu/publications/AIAA-Paper-2017-1693.pdf>

11 Vedlegg

Oversikt over strekningen Helligvær – Moskenes, utklipp fra Den Norske Los (dnl.kartverket.no):



Utklipp fra excelarket vi har benyttet til å utføre kalkulasjoner:

	A	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG
1	Vindretning		360,00		22,50		45,00		67,50
2									
3		NW	SØ	NW	SØ	NW	SØ	NW	SØ
4	BHD (grader)	312,00	132,00	312,00	132,00	312,00	132,00	312,00	132,00
5	BS (knop)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
6	TwA (grader)	180,00	180,00	202,50	202,50	225,00	225,00	247,50	247,50
7	AWD (grader)	132,00	-48,00	109,50	-70,50	87,00	-93,00	64,50	-115,50
8	Tw (knop)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
9									
10	AP (knop)	32,04	14,95	28,73	20,61	24,36	25,62	19,15	29,72
11									
12	Vektorregning:								
13	BH-rad	5,45	2,30	5,45	2,30	5,45	2,30	5,45	2,30
14	Tw-rad	6,28	6,28	0,39	0,39	0,79	0,79	1,18	1,18
15									
16	X-ship	-10,04	10,04	-10,04	10,04	-10,04	10,04	-10,04	10,04
17	Y-ship	11,15	-11,15	11,15	-11,15	11,15	-11,15	11,15	-11,15
18	X-wind	20,00	20,00	18,48	18,48	14,14	14,14	7,65	7,65
19	Y-wind	0,00	0,00	7,65	7,65	14,14	14,14	18,48	18,48
20									
21	X-app	30,04	9,96	28,51	8,44	24,18	4,11	17,69	-2,38
22	Y-app	-11,15	11,15	-3,43	16,80	2,99	25,29	7,33	29,62
23									
24	App-lengde (knop)	32,04	14,95	28,73	20,61	24,36	25,62	19,15	29,72
25	App-retning (fra) (grader)	339,64	48,21	353,02	65,82	7,06	80,78	22,51	94,60
26									
27									
28	a (radius)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
29	b (høyde)	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
30	vin/w (m/s)	16,48	7,69	14,78	10,60	12,53	13,18	9,85	15,29
31	rot.freku (rpm)	123,00	73,00	131,00	101,00	119,00	125,00	94,00	129,00
32	rot.freku (rps)	2,05	1,22	2,18	1,68	1,98	2,08	1,57	2,15
33	omega (rad/s)	12,88	7,64	13,72	10,58	12,46	13,09	9,84	13,51
34	rho (p) (kg/m ³)	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
35	BS (m/s)	7,72	7,72	7,72	7,72	7,72	7,72	7,72	7,72
36	C_L	9,82	12,49	11,66	12,54	12,49	12,48	12,56	11,10
37	C_D	4,82	7,80	6,80	7,86	7,80	7,79	7,88	6,16
38									
39	L (newton)	156867,98	43444,71	149805,35	82856,18	115411,11	127462,07	71652,88	152615,89
40									
41	D (newton)	77025,50	27131,26	87370,92	51935,83	72097,17	79550,76	44966,27	84723,47
42									
43	F (newton)	174758,38	51220,59	173422,38	97787,92	136079,85	150266,43	84604,37	174555,65
44									
45	F-magnus (egr ikke relevant)	156788,45	43422,69	149729,41	82814,18	115352,60	127417,44	71616,56	152538,52
46									
47	F-retning (grader)	26,15	31,98	30,25	32,08	31,99	31,96	32,12	29,04
48	F-mellomregning	223,49	-9,80	232,76	187,90	-114,93	202,74	-99,61	213,64
49	F-coosvinkel (grader)	88,51	141,80	79,24	-55,90	426,93	-70,74	411,61	-81,64
50		1,54	2,47	1,98	-0,98	7,45	-1,23	7,18	-1,42
51	F-fartsretning (newton)	4536,00	-40254,63	32386,48	54820,07	53319,38	49555,11	52534,96	25391,16
52	Prosent av totalt kraft	0,03	-0,79	0,19	0,56	0,39	0,33	0,62	0,15
53									
54	PÅDRAG (p)	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
55	FART (knop)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
56	FORBRUK (kg/h) for 1 motor	309,00	309,00	309,00	309,00	309,00	309,00	309,00	309,00
57	FORCE (newton)	240700,00	240700,00	240700,00	240700,00	240700,00	240700,00	240700,00	240700,00
58	FORCE FLETTNER (newton)	4536,00	-40254,63	32386,48	54820,07	53319,38	49555,11	52534,96	25391,16
59	TOTAL FORCE Å PRODUISERE (newton)	236164,00	280954,63	208313,52	185879,93	187380,62	191144,89	188165,04	215308,84
60									
61	ANTALL MOTORER								
62	Hvor ofte % vind forekommer	3,00	3,00	3,00	2,32	2,34	3,00	2,35	3,00
63	Antall timer vinden forekommer	0,052	0,052	0,057	0,057	0,041	0,041	0,024	0,024
64									
65	Divstofforbruk	88,4468	88,4468	96,9513	96,9513	69,7369	69,7369	40,8216	40,8216
66									
67	Antall motorer som kjøres som norm	0,00		1562,37		1093,05		630,42	
68	Hvor mange % optimalisert motor as	81990,1836	81990,1836	89873,8551	69404,84799	50325,83197	64646,1063	29582,34719	37841,6232
69	Pådrag på optimalisert motor								
70	Forbruk for optimalisert motor	3	3	3	2	2	3	2	3
71	Forbruk for optimalisert motor + ant				0,32	0,34		0,35	
72					24%	25%		26%	
73	Antall timer vinden forekommer (to og				11440,2534	8228,9542		5706,85968	
74	Forbruk for optimalisert motor								
75	Forbruk for optimalisert motor + ant	81990,1836	81990,1836	89873,8551	71356,1568	51326,3584	64646,1063	30934,60848	37841,6232

	A	AK	AL	AM	AN
1 Vindretning	90,00	270,00		113,00	293,00
2					
3	NW	SØ		NW	SØ
4 BHD (grader)	312,00	132,00		312,00	132,00
5 BS (knop)	15,00	15,00		15,00	15,00
6 TwA (grader)	270,00	90,00		293,00	113,00
7 AWD (grader)	42,00	42,00		19,00	19,00
8 Tw (knop)	42,00	42,00		20,00	20,00
9					
10 AP (knop)	32,44	32,44		7,60	7,60
11					
12 Vektorregning					
13 BH-rad	5,45	2,30		5,45	2,30
14 Tw-rad	1,57	4,71		1,97	5,11
15					
16 X-ship	-10,04	10,04		-10,04	10,04
17 Y-ship	11,15	-11,15		11,15	-11,15
18 X-wind	0,00	0,00		-7,81	7,81
19 Y-wind	42,00	-42,00		18,41	-18,41
20					
21 X-app	10,04	-10,04		2,22	-2,22
22 Y-app	30,85	-30,85		7,26	-7,26
23					
24 App-lengde (knop)	32,44	32,44		7,60	7,60
25 App-retning (fra) (grader)	71,98	251,98		72,99	252,99
26					
27					
28 a (radius)	2,00	2,00		2,00	2,00
29 b (høyde)	24,00	24,00		24,00	24,00
30 uin/fw (m/s)	16,69	16,69		3,91	3,91
31 rot.frekv (rpm)	122,00	122,00		35,00	35,00
32 rot.frekv (rps)	2,03	2,03		0,58	0,58
33 omega (rad/s)	12,78	12,78		3,67	3,67
34 rho (p) (kg/m ³)	1,23	1,23		1,23	1,23
35 BS (m/s)	7,72	7,72		7,72	7,72
36 C_L	9,62	9,62		11,79	11,79
37 C_D	4,63	4,63		6,95	6,95
38					
39 L (newton)	157562,75	157562,75		10582,01	10582,01
40					
41 D (newton)	75778,14	75778,14		6236,78	6236,78
42					
43 F (newton)	174838,06	174838,06		12283,18	12283,18
44					
45 F-magnus (egt ikke relevant)	157482,87	157482,87		10576,65	10576,65
46					
47 F-retning (grader)	25,68	25,68		30,51	30,51
48 F-mellomregning	-43,71	136,29		-47,53	132,47
49 F-oosvinkel (grader)	355,71	-4,29		359,53	-0,47
50	6,21	-0,07		6,27	-0,01
51 F-fartsretning (newton)	174347,13	174347,13		12282,76	12282,76
52 Prosent av totalt kraft	1,00	1,00		1,00	1,00
53					
54 PÅDRAG (%)	0,80	0,80		0,80	0,80
55 FART (knop)	15,00	15,00		15,00	15,00
56 FORBRUK (kg/h) for 1 motor	309,00	309,00		309,00	309,00
57 FORCE (newton)	240000,00	240000,00		240000	240000,00
58 FORCE FLETTNER (newton)	174347,13	174347,13		12282,76	12282,76
59 TOTAL FORCE Å PRODUSERE (newton)	65652,87	65652,87		227717,24	227717,24
60					
61 ANTALL MOTORER	0,82	0,82		2,85	2,85

Oversiktsbilde over kalkulasjonene gjort for å finne total forbruk med og uten Flettner-rotor i tillegg til hvor mye man sparer i drivstoff, CO₂ og % bespart:

79	Besparelseskalkulasjoner	Totalt alle beregninger	Nog S seilas for 225	Nog S seilas for 90	Nog S seilas for 112,5	Nog S seilas for 202,5
80	Hvor ofte vind forekommer %	99 %	100 %	100 %	100 %	100 %
81	Antall timer vind forekommer	3354,1748	3401,8	3401,8	3401,8	3401,8
82	Total forbruk uten FR	3153468,6	3153468,6	3153468,6	3153468,6	3153468,6
83	Total forbruk med FR	2802639,27	2142113,46	1978146,7	3087813,66	2828596,7
84	Totalt forbruk bespart	350829,33	1011355,14	1175321,90	65654,74	324871,90
85	Totalt forbruk bespart i %	11,13 %	32,07 %	37,27 %	2,08 %	10,30 %
86	Totalt CO ₂ spart	1112128,99	3205995,794	3725770,42	208125,5258	1029843,923

En mer navigerbar og oversiktlig versjon, med fullstendige navn på cellene, kan finnes her:

<https://safeshare.uio.no/?810a5809572e1c08#DKUZspGxvfmR3KZ8gitCmbjoAzVuJ3takXbx8PxwNB>