



KONGSBERG

**Research & Technology
Centre - Marine**

Visit address Sjøgata 98
N-6067 Ulsteinvik
NORWAY

Telephone +47 815 20 070

Telefax +47 700 14 014

REPORT

Title

Stad Skipstunnel,
Metode for beregning av energiforbruk og
passeringstid for seglas på Stadhavet og
gjennom tunnel.

Report number

RRM-R&T_19-002

Client

Havila Kystruten, Vanylven Utvikling

Author(s) of report

Leif Vartdal, Leif Aarseth

Approved by

Revision No

02

Comprises

Rune Garen

| | | | | | |
|----------|---------------|----------------|--------|--|--|
| Date. | 12 April 2019 | Classification | Open | | |
| Order no | RTP000032 | Page | 1 / 27 | | |

Samandrag.

To rapportar frå 2011 og 2018 dokumenterer endring i fart og framdriftseffekt for skip eksponert for havbølger på Stadhavet i samanlikning med seglas i skipstunnel og bølge-skjerma område nord og sør for Stad.

Bakgrunn for desse rapportane var å skaffe til veie data for å vurdere nytteverdi av at kystnær skipstrafikk kan gå i tunnel. Rapportane viser til konkrete eksempel på passeringstid og drivstoff forbruk ved å nytte skipstunnel i kombinasjon med farleier innanfor kysten av Sunnmøre.

Med basis i drivstoffmengde kan ein berekne utslepp av klimagassar når det spesifikke brennstoff forbruket er kjent.

Fart og motoreffekt er studert for forskjellige fartøy av ulik storleik og lengde der endring i respons på fart og framdriftseffekt mellom Stadhavet og ruter yst på kysten er samanlikna med fjordstrøk nord og sør for Stad som er skjerma for havbølger og lange dønningar.

Basert på resultat frå nemnte dokumentasjon og ekstern forskning om propulsjon i sjøgang, presenterer denne rapporten ein metodikk for å rekne ut energiforbruk og fartsendring for det opne hav og for innaskjers seglas.

Dette er ein formelbasert metode for å rekne ut framdriftsenergi som funksjon av lengde på skroget. Når energibehov og fartstap i sjøgang er kjent, har ein eit grunnlag for å rekne ut samla tidskostnad, forbruk av drivstoff og klimautslepp ved å kombinere metoden med skipstrafikkdata for ulike lengde-grupper til fartøy som kan gå i tunnel.

Dette gjer det mulig å estimere samfunnsøkonomisk nytte og kostnad knytt til drivstoff, CO2/NOx og passeringstid for dagens seglas på Stadhavet og for ruter som passar inn for skipstunnellen.

Keywords

Group 1: Skipstunnel

Group 2: Sjøgang

Group 3: Framdriftseffekt



Innhold

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Bakgrunn | 3 |
| 2 | Statistikk for bølger ved Stad og representativ bølgehøgd | 3 |
| 3 | Energibehov og fart ved skjerma seglas og i sjøgang for ulike skroglengder | 4 |
| 4 | Vurdering av grunnlag for metoden | 9 |
| 4.1 | Statistikk for bølger på Stad og verknad av klimaendring | 9 |
| 4.2 | Om bølger på ope hav og i ein fjord og om fartøyrespons og framdriftseffekt..... | 9 |
| 4.3 | Brennstoff forbruk på grunn av fluktuerande motorlast i bølger | 11 |
| 4.4 | Fartstap for andre retningar enn motsjø. | 12 |
| 5 | Diverse dokumentasjon om skipstunnelen og om klimautslepp frå skip | 13 |
| 6 | Metode for å estimere fart, tids- og effektforbruk | 14 |
| 6.1 | Fartrekneskap..... | 14 |
| 6.1.1 | Referansefart | 14 |
| 6.1.2 | Venting ved tunnelpassering og fart gjennom tunnel..... | 14 |
| 6.1.3 | Fartsreduksjon p.g.a. ytre forhold | 14 |
| 6.2 | Tidsrekneskap | 15 |
| 6.2.1 | Tunneltid..... | 15 |
| 6.2.2 | Ventetid p.g.a. tunneltrafikk | 15 |
| 6.2.3 | Ekstratid p.g.a. fartstap i bølger | 15 |
| 6.3 | Effektrekneskap | 15 |
| 6.3.1 | Passering Stad | 15 |
| 6.3.2 | Passering Stad skipstunnel | 16 |
| 6.3.3 | Estimat av drivstofforbruk og utslepp..... | 17 |
| 6.4 | Eksempel på bruk av metode | 18 |
| 6.4.1 | Passering Stad | 18 |
| 6.4.2 | Passering Stad skipstunnel | 18 |
| | Referansar | 19 |
| | Vedlegg A | 20 |
| | Vedlegg B | 21 |
| | Vedlegg C | 22 |
| | Vedlegg D | 23 |
| | Vedlegg E – Overslagsberekning av skrogmotstand [6] | 24 |
| | Vedlegg F – Eksempel på bruk av metode | 25 |



1 Bakgrunn

Gjennom tidligere rapportar, [1] og [2], har vi dokumentert at Stad skipstunnel har ein potensiell nytteverknad som følgje av at fartøy som må passere Stadhavet i dårlig vêr i staden kan nytte tunnelen og dermed redusere passeringstid og framdriftsenergi for fartøyet. Med andre ord vil tunnelen bety at ein kan unngå seglasen på Stadhavet som vil redusere kostnad i form av mindre fartstap (eller tidstap) på grunn av lågare sjøgangsmotstand og energiforbruk. Derfor vil skipstunnelen føre til mindre forbruk av drivstoff, utslepp av klimagassar og redusert passeringstid langs kysten med dagens trafikkbilde.

Basert på resultat frå nemnte dokumentasjon, beskriv denne rapporten ein metode for å berekne energiforbruk, fartsending og passeringstid for det opne hav og seglas gjennom alternative innaskjers ruter nord for Stad.

I tillegg til sjøtilstanden (spesielt høgd og lengd på bølgiene) viser tidlige forskning og interne studiar at lengda på fartøyet er ein viktig dimensjon når det gjeld endring av framdriftseffekt og fart i samanlikninga mellom smult farvatn og sjøgang. Til dømes vil eit fartøy med lengde på 40 m bli utsett for mykje større fartstap og relativ auke i framdriftseffekt i sjøgang samanlikna med eit skrog med lengde på 100 meter.

Ved å kombinere statistikk for bølgehøgd på Stadhavet med resultat som viser forholdet mellom framdriftseffekt i sjøgang og roleg sjø har vi etablert relasjon mellom effekt og energiforbruk i seglas på ope hav og i bølgeskjerma område for ulike skipslengder.

Rapporten er organisert som følgjer:

Kapittel 2 viser til bølgestatistikk for Stad og forklarar bakgrunn for val av årsmiddel nivå for signifikant bølgehøgd på Stadhavet som blir representativ for sjøtilstanden som blir inngangsverdi til estimat av framdriftseffekt og energibehov.

Kapittel 3 presenterer interne undersøkingar og resultat frå offentleg forskning om framdriftseffekt for skip i sjøgang. Data frå desse kjeldene er kombinert på ein slik måte at forholdet mellom framdriftseffekt i sjøgang og i skjerma farvatn er presentert som funksjon av skipslengde.

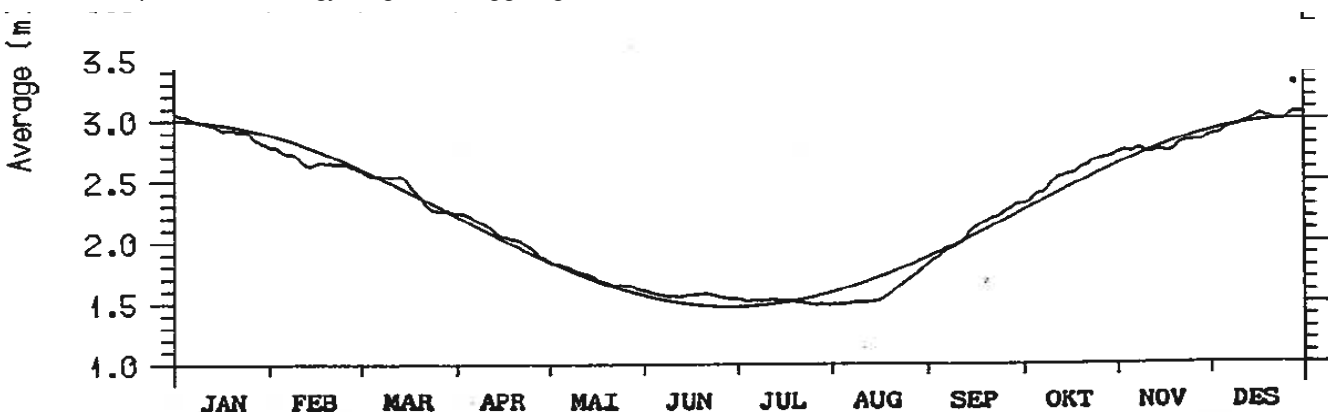
Kapittel 4 drøftar forenklingar og føresetnader i metoden og gir ei kvalitativ vurdering av korleis ulike faktorar påverkar resulterande framdriftseffekt og skipshastigheit.

Kapittel 5 viser til andre rapporter om Stad skipstunnel og generelt om klimautslepp frå skipstransport.

Kapittel 6 forklarar metoden og viser til eksempel i Vedlegg F på korleis den kan nyttast for å berekne energibehovet (kWh-kiloWatt timar) og passeringstid for sjøgang og i skjerma farvatn.

2 Statistikk for bølger ved Stad og representativ bølgehøgd

Data for bølgehøgd på Stadhavet er basert på [3], og figur 1 frå denne referansen viser variasjon av bølgehøgd gjennom eit år. Det er to kurver i figuren; den eine er instrumentelle måledata og den andre er basert på såkalla hindcast data mellom 1955 og 1989. I enkelte vintermånader er signifikant bølgehøgd (H_s) omlag det dobbelte av nivået for sommaren. Gjennomsnittleg nivå for signifikant bølgehøgd over heile året er 2.2m. Vi antar at dette nivået er representativ bølgehøgd som ligg til grunn for den beskrivne metoden.



Figur 1 Middelvei per måned for Signifikant bølgehøgd H_s ved Stad over eit år [3].

3 Energibehov og fart ved skjerma seglas og i sjøgang for ulike skroglengder

Lengda av skroget er ein sær viktig parameter som innverkar på framdriftseffekt, energiforbruket og fartstap i sjøgang.

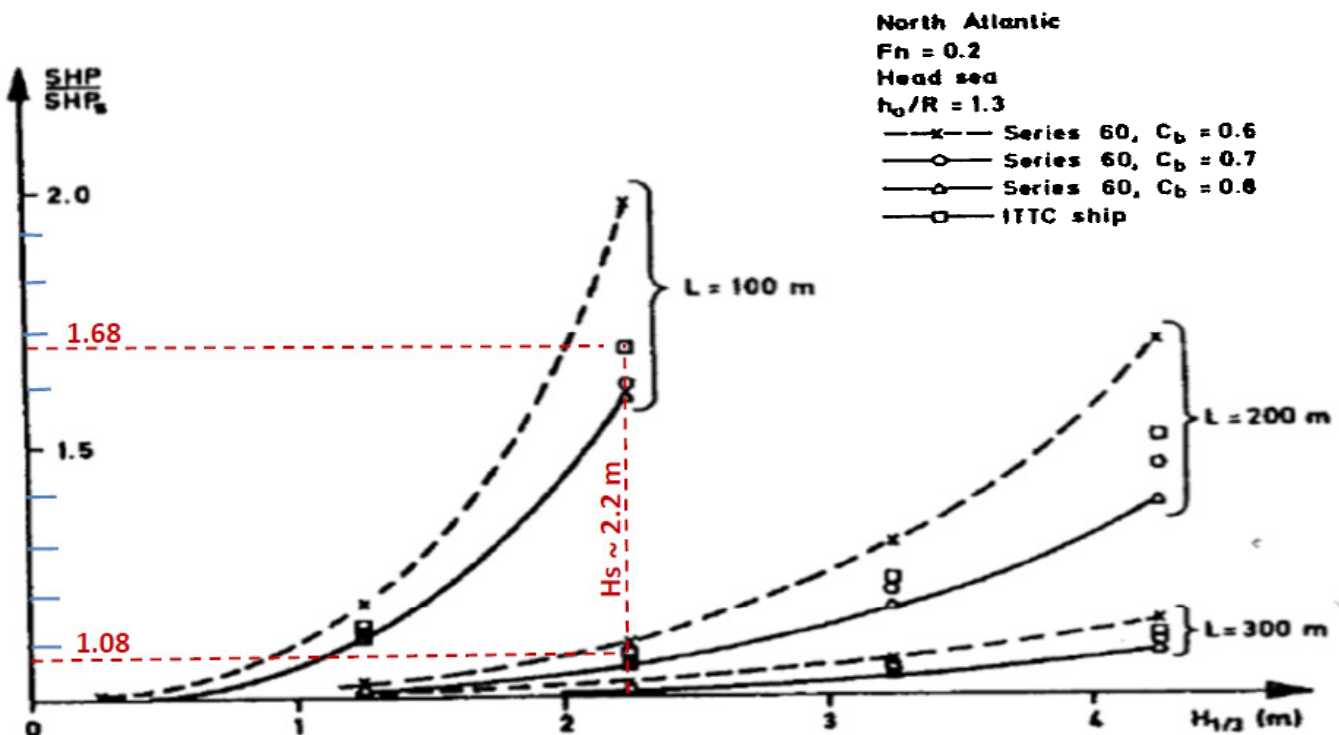
Når ein skal vurdere totalt drivstoff-forbruk og utslepp, er det derfor viktig å ta omsyn til skipslengda.

Figur 2 er resultat av forskning frå samarbeid mellom fire nordiske skipsforskningsinstitutt [4] på midten 1980-talet. Diagrammet viser korleis framdriftseffekten i motsjø endrar seg i forhold til stille sjø for varierende signifikant bølgehøgde for tre ulike skipslengder; $L=100\text{m}$, 200m og 300m . Bølgjedata er basert på statistikk for Nord Atlanteren. For kvar av dei tre skroglengdene som er presentert, er det to kurver som illustrerer betydninga av kor fyldig skroget er. Sistnemte faktor er representert med blokk-koeffisienten (C_b). Stipla linje representerer eit sokalla 'Serie 60' skip som har blokk-koeffisient på 0.6 og den kontinuerlige kurva gjeld for blokk-koeffisient 0.8. Dette viser at framdriftseffekten på eit fyldig skrog er mindre påverka av bølger enn eit slankare skrog.

Den vertikale aksen viser forholdet mellom motoreffekt i bølger og roleg sjø (SHP står for Shaft Horse Power). På vertikal akse startar verdien på 1 og den horisontal akse er signifikant bølgehøgde H_s .

Som det går fram av figuren, så vil redusert lengde for dei tre alternativa føre til ein vesentleg auke i motoreffekt ved stigande signifikant bølgehøgde.

Vi ønskjer å kombinere data frå dette diagrammet med resultat frå våre eigen dokumentasjon frå fullskala data ([1] og [2]) for å kunne presentere forholdstal mellom effektbehov til framdrift i sjøgang relativt skjerma farvatn som funksjon av skipslengda basert på ovanfor nemnte årsmiddelverdi for bølgehøgde på Stadhavet.



Figur 2. Framdriftseffekt i sjøgang i forhold til stille sjø som funksjon av signifikant bølgehøgde. Lengde på skrog og blokk-koeffisient som parametrar [4].

For ITTC skroget ¹⁾ med lengde 100 m og signifikant bølgehøgde H_s lik 2.2 m, blir effektforholdet mellom sjøgang og smult farvatn på 1.68. For tilsvarende ITTC skrog med 200 m lengde blir denne faktoren 1.08.

Tabell 1 viser dette effektforholdet for ITTC skroga med lengde 100m og 200m saman med tilsvarende data basert på fullskala målingar der samtidig fart og effekt er logga kvart sekund. Dette er nærare presentert i [1] og [2]. Dessutan viser tabellen resultat for ein linebåt som er modelltesta i motsjø og stille vatn [5] samt fullskala data for to andre fartøy som ikkje har blitt dokumentert tidlegare for passering av Stad.

¹⁾ **ITTC** står for **I**nternational **T**owing **T**ank **C**ommittee. Dette er ein organisasjon som består av skipmodelltankar og marine forskningsinstitutt som samarbeider om forskning relatert til hydrodynamikk på skip og marine konstruksjonar.



Tabell 1 Energifaktor

| | | | | Lengde | Skjerma farvatn | Sjøgang | Effektforhold |
|-----------------|-----|------------------------------------|------|--------|-----------------|------------|---------------|
| Fartøy | Id. | Kommentar / henvisning | ref. | (m) | (kWh/n.m.) | (kWh/n.m.) | |
| Arbeidsbåt | a) | Vedlegg A | | 47 | 88 | 103 | 1,17 |
| Linebåt | b) | Modellforsøk- NHL rapport 1984 | [5] | 42 | 28 | 61 | 2,18 |
| Offshore fartøy | c) | Vedlegg B | [1] | 81 | 248 | 317 | 1,44 |
| ITTC skrog | d) | Nordic Co-operative Project (1987) | [4] | 100 | | | 1,68 |
| Lastebåt | e) | Vedlegg C | | 120 | 240 | 289 | 1,20 |
| Passasjerskip | f) | Vedlegg D | [2] | 128 | 280 | 331 | 1,18 |
| ITTC skrog | g) | Nordic Co-operative Project (1987) | [4] | 200 | | | 1,08 |

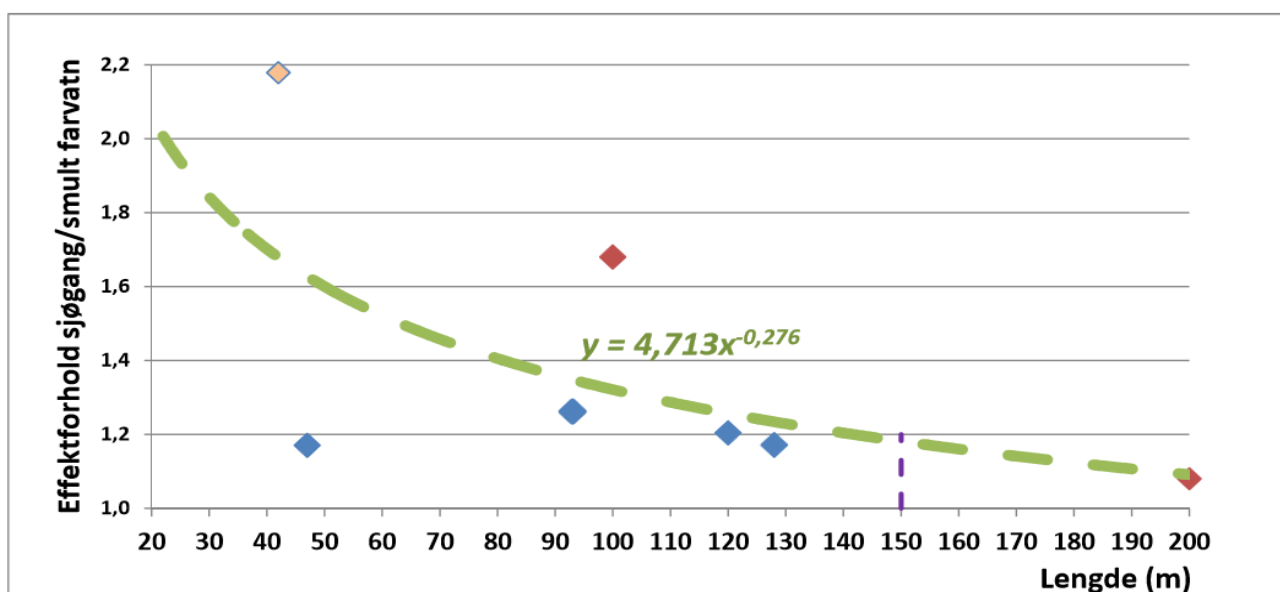
Energifaktoren er framdriftseffekt delt på fart i knop som gir dimensjon kWh per nautisk mil for denne faktoren. Ved å dele energifaktor for sjøgang med tilsvarande for bølgeskjerma seglas får vi effektforholdet som vist i høgre kolonne i Tabell 1.

Med referanse til kolonne 2 i Tabell 1 er det lista opp litt meir info om kvart fartøy nedanfor. Det er også vist til vedlegg i denne rapporten som presenterer tidsplott av båtane av samtidig målt framdriftseffekt og fart i fullskala for seglas forbi Stad og innaskjers før og etter strekninga på kysten som er eksponert for havbølger.

- Vedlikehaldsfartøy av nyare dato. Tidsplott av framdriftseffekt og fart ved passering Stad er vist i Vedlegg A.
- Basert på testar i skipsmodelltanken i Trondheim. Bøljetest gjeld for motsjø med signifikant bølgehøgde $H_s=2.7m$.
- og f) – Analyse av tidshistorier på effekt og fart presentert i [1] og [2] og gjengitt i Vedlegg B og D.
- og g). Omtalt side 4 og presentert i Figur 2.
- Cargo fartøy med moderne maskineri- og framdrifts system. Eksempel på tidsplott som effektforholdet i høgre kolonne i Tabell 1 baserer seg på er presentert i Vedlegg C.

I tillegg til variasjon i skipslengde, representerer dei seks skipa ganske stor spreing i skrogform og propulsjonsarrangement med både eitt og to propellsystem.

Effektforholdet (høgre kolonne i Tabell 2) er presentert som funksjon av skroglengde i Figur 3 med ei trendlinje som viser eit eksponentielt minkande effektforhold med skipslengde.



Figur 3. Effektforhold mellom sjøgang og bølgeskjerma farvatn som funksjon av skroglengde. Sjå Tabell 1 for referansar og fargekoder.



Trass i at trendkurva er konsistent med resultat frå forskingsprosjektet på 1980-talet (Figur 2) med omsyn til betydninga av skipslengde, er det stort sprik mellom denne kurva og enkelte punkt i figuren. Til dømes er det stor forskjell mellom dei to skroga på vel 40 meter. Sjøtilstanden for Stad og kysten av Sunnmøre er generelt ikkje kjent for fartøya for tidspunkt der det eksisterer fullskala data (fire blå punkt). Dette kan vere ein årsak til at det er avvik, og som tidlegare nemnt, er referansen for signifikant bølgehøgde 2.2 m for effektforholdet på ITTC skroget (Figur 1) ei «grov» tilnærming. Energien i ei bølge er proporsjonal med kvadratet av høgda, og dette gjeld generelt også for sjøgangsmotstanden. Dersom bølga er 2.5 meter i staden for 2.2m, kan ein derfor anslå at motstandstillegg og ekstra framdriftseffekt for 2.5 meter signifikant sjø aukar med 29% i forhold til nivået ved 2.2 meter ($[2.5/2.2]^2=1.29$).

Ei anna årsak som kan forklare forskjell mellom effektforhold for ITTC skroget på 100 meter og tre eksempel frå fullskala med lengde litt under og over 100m, er at teoretiske berekningar og modellskala forsøk for å bestemme propulsjonseffekt i sjøgang for aktuelle tilfelle har blitt gjennomført ved påtvungen konstant fart.

Fullskala data derimot viser at den energiøkonomiske ulempa ved seglas i sjøgang blir fordelt på både fartstap og auka framdriftseffekt. Det betyr at ein kan forvente at ITTC skipet på 100 m vil nærme seg trendlinja dersom ein hadde fullskala data tilsvarande det som er vist ved dei blå punkta i figuren.

For linebåtskroget på 42 meter derimot, som ein også har modellforsøksdata for, er testen utført slik at også fartstapet er målt/kalkulert (dette skroget var undersøkt for 2.7 meter bølgehøgde, dvs. 0.5 meter over antatt årsmiddel nivå for Stadhavet).

Vidare vil også forskjell i deplasement og blokk-koeffisient for dei to kortaste skroga (a) og (b) tilseie ein forskjell i framdriftseffekt i sjøgang. Linefartøyet a) har ein blokk-koeffisient på 0.494 og tilsvarande for vedlikehaldsfartøyet b) er 0.71. Sistenemnte skrog er med andre ord fyldigare som er positivt for sjøgangsmotstanden ifølge Figur 2 der blokk-koeffisienten er ein av parametrane som er undersøkt i dette forskingsprosjektet [4].

Dette gir ein indikasjon på at skrog med blokk-koeffisient, som for dei fleste fartøy ligg i området 0.55-0.65, vil ligge nærare trendlinja i Figur 2 enn dei to punkta for fartøy a) og b).

Fart og framdriftseffekt blir også påverka av straum og vind. Vind er tilgjengelig frå enkelte passeringer forbi Stad via målestasjon representativt for dette området. Straumforholda er derimot ikkje kjent for fullskala data som er presentert i denne rapporten.

Gitt alle forhold som påverkar fartstap og framdriftseffekt i sjøgang i tillegg til lengde på skroget og med relativt stor variabilitet for bølgehøgde rundt årsmiddel verdi som metode er basert på, kan ein også forvente at variabiliteten rundt trendlinja i plottet i Figur 2 blir tilsvarande stor.

For å gjere seg nytte av formelen for trendlinja i Figur 3, er det behov for ein formel for energifaktoren i bølgeskjerma område som funksjon av skipslengde.

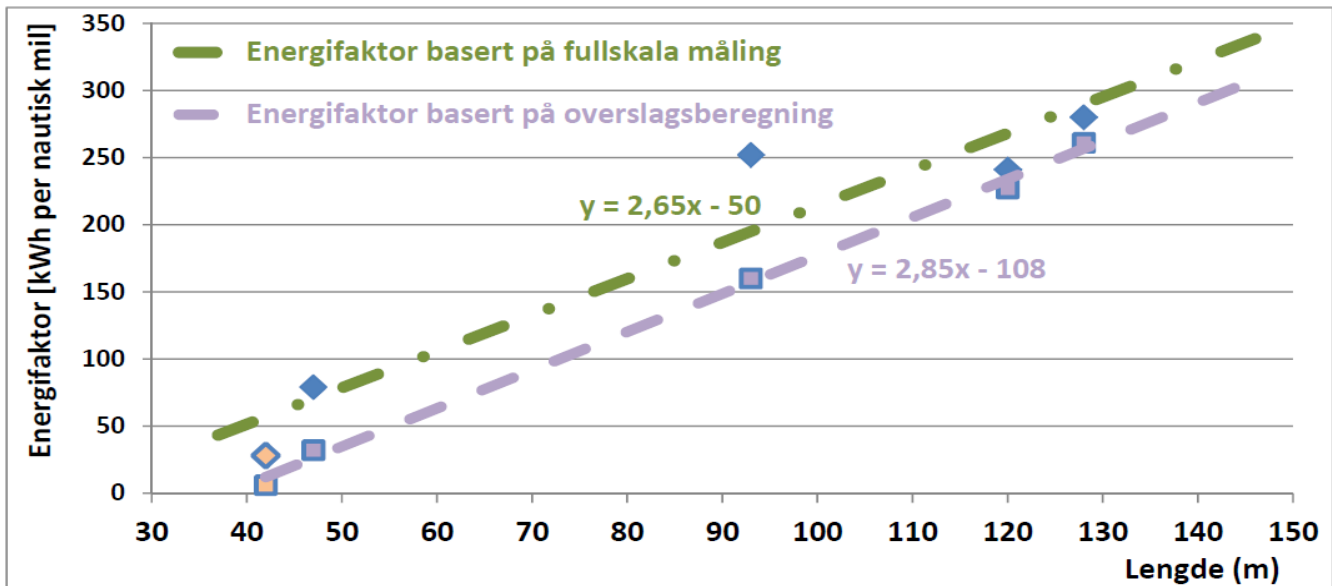
Dette er presentert i Figur 4 som viser ein lineær regresjon for energifaktor som funksjon av lengde i skjerma farvatn for dei fem fartøya der denne faktoren er tilgjengelig frå målingar.

Men skrogmotstand og propulsjonseffekt er avhengig av mange fleire variablar enn berre skipslengda. Våt overflate, deplasement, skrogform med linjeføring i baug og akterskip pluss fart er andre viktige parametarar som bestemmer resulterande framdriftseffekt i stille vatn og skjerma fjordstrøk der bølgjene i liten grad influerer på skrogmotstanden.

Derfor har vi gjort ei overslagsberekning på framdriftseffekt for dei fem fartøya for å sjekke korleis resultat av den metoden samanlikna med regresjonslinja der vi har data på energifaktoren direkte frå modell- og fullskala målingar. Dette er gjort ved først å berekne motstand til skroget basert på ein enkel overslagsmetode og deretter kombinere motstand med propulsjonseffektivitet og antatt verdiar på elektriske og mekaniske transmisjonstap mellom propell og framdriftsmotor. Metoden for å estimere skrogmotstand er basert på [6] og presentert i Vedlegg E. Denne metoden krev inngangsdata som normalt ikkje er lett tilgjengelig for mange skrog - f.eks våt overflateareal. Den mest presise måten for å bestemme motstand på eit skrog krev slepetest i modellskala eller CFD simulering (Computational Fluid Dynamics).

For å berekne propulsjonseffekt basert på kjent skrogmotstand har vi gjort følgjande tilnærmingar:

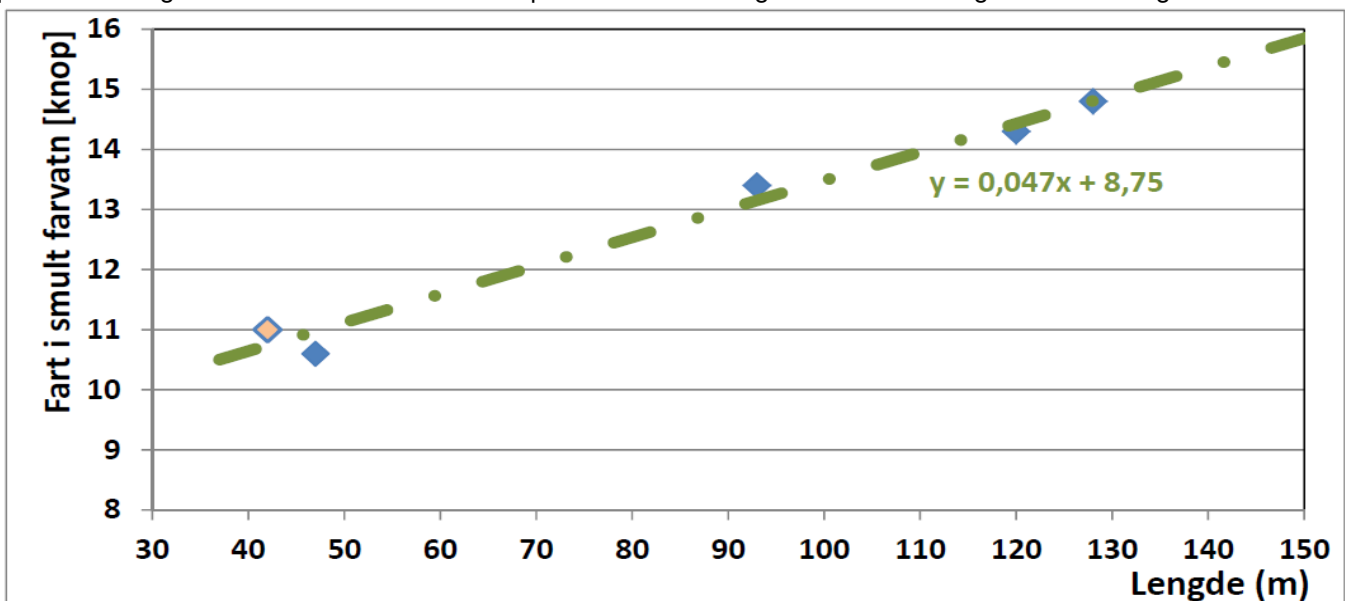
- Propulsjonseffektivitet er satt til 0.6. Normalt varierer denne verdien mellom 0.55 og 0.65. Den er blant anna avhengig av om fartøyet er utstyrt med dysepropell eller open propell, skrogform og om det er ein eller to propellar som driv fartøyet fram.
- Mekanisk og elektriske transmisjonstap er anslått til 6%. Dette tapet vil også variere avhengig av maskinerisystemet. Diesel- og gassmekaniske system har 2-4 % tap medan totale elektriske tap med diesel-elektriske kraftsystem er rapportert til å ligge i området 8-12%.



Figur 4. Estimert på energifaktor i stille sjø og bølgeskjerma farvatn som funksjon av skroglengde.

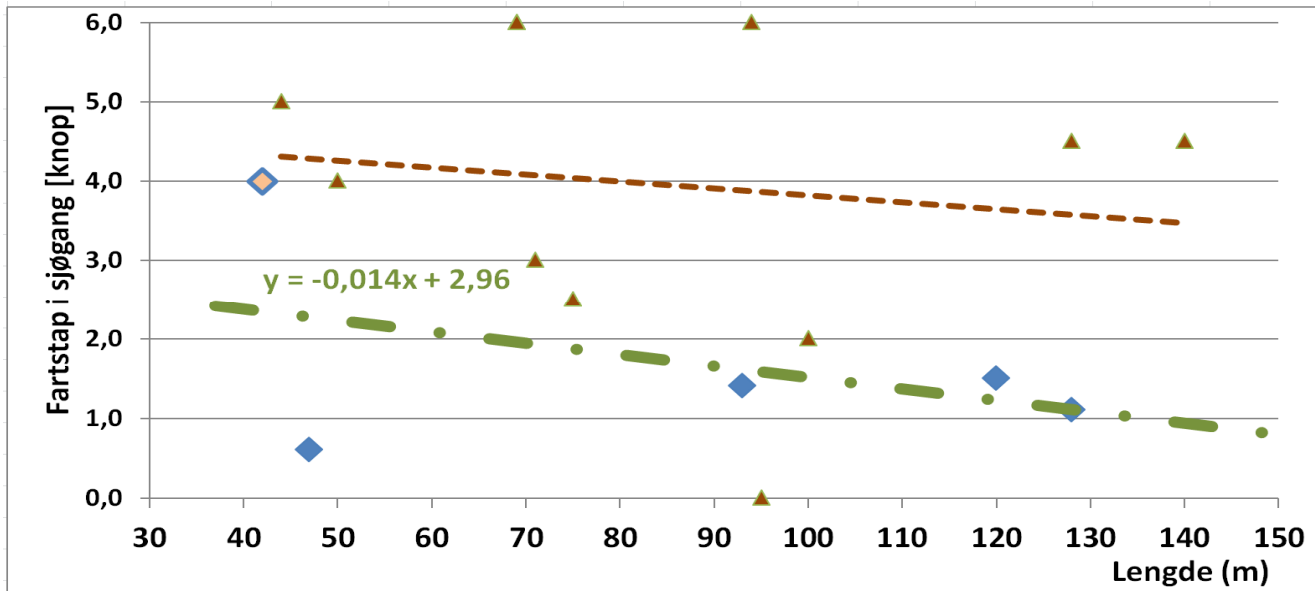
Lineær tilpassing av fullskala data for energifaktor på fartøy som går i smult farvatn før og etter passering av Stadhavet. Lineær tilpassing av energifaktor ved hjelp av overslagsmetode for same fartøy basert på input med kjente skrogdata.

For tidsrekneskapan og berekning av passeringstid for alternative ruter, er det behov for data som viser fart i bølge-skjerma område samt fartstap i sjøgang. Ein slik samanheng mellom fart og lengde for skjerma seglas er presentert i Figur 5 der ein lineær formel er tilpassa dei fem skroga vi har modell- og fullskalamålingar av.



Figur 5. Fart i bølgeskjerma farvatn som funksjon av skroglengde.

Figur 6 viser fartstap i sjøgang som funksjon av lengde på fartøyet med linje og formel tilpassa dei same fem skroga som ligg til grunn for Figur 5. Ein ser at den tilpassa linja viser at fartstapet er omvendt proporsjonal med lengda i same mønster som effektforholdet som presentert i Figur 3. Dessutan er det relativt stor variasjon rundt dei to regresjonslinjene – spesielt for dei to fartøya mellom 40 og 50 meter.



Figur 6. Fartstap i sjøgang som funksjon av skroglengde.

Grøn linje med formel gjeld fem fartøy der samtidig målt fartstap og framdriftseffekt er tilgjengelig.
Brun linje og trekanta punkt viser AIS data rapportert i [2] for ulike fartøy i varierende sjøtilstand.
Ifølgje varsel for Stad var signifikant bølgehøgde mellom 3 og 5 m.

I vår rapport [2], var farts karakteristikken studert (med basis i AIS data) for fleire fartøy ved passering Stadhavet og i vêrutsette farleier på ytre del av kysten og samanlikna med fart ved seglas i fjordane innanfor (som skjermar for havbølgjer og tung dønning).

Fartstap frå desse observasjonane er også inkludert i Figur 6. For desse tilfella var også bølgevvarsel for Stad og kysten av Nordvestlandet notert. Signifikant bølgehøgde var i området 3-5 meter ifølgje dette varselet (yr.no).

Dette er større bølger enn 2.2 meter som vi har antatt å vere ein representativ middelverdi for signifikant bølgehøgde for Stadhavet og dermed kan betraktast som grunnlag for sjøtilstanden relatert til den grønne regresjonslinja i Figur 6. Tatt i betraktning at sjøtilstanden som korresponderer med grøn kurve er moderat i forhold til bølgeførholda på Stadhavet og Sunnmørskysten ved fartøypasseringar rapportert i [2], er det også rimeleg at regresjonslinja for fartstap representativ for 3-5 meter ligg øvst i diagrammet.

Viktigaste forskjell mellom datagrunnlaget for fartstap relatert til øvste og nedste regresjonslinje er at sistnemnte er basert på data for fart og framdriftseffekt samtidig og som er logga på sekund-nivå. For førstnemnte tilfelle har vi ingen info om framdriftseffekt - berre fart og fartsending gjennom observasjon av AIS-data.

I denne samanheng er det på sin plass å minne om berepet 'Frivillig og Ufrivillig fartsreduksjon i bølger'.

Frivillig fartsreduksjon betyr at kapteinen senker farta på grunn av ulike dynamiske og transiente belastningar i skroget som er indusert av bølgedynamikken. Eksempel på slike fenomen er 'slamming' (bølgeslag) og store akselerasjonar (som er negativt for kvalitet på kviletid og arbeidsevne til mannskap samt komfort for passasjerar) forskyving av last og skvulp av flytende tanklagra væsker.

For fullskala data som er grunnlag for den formelbaserte metoden som denne rapporten handlar om (Tabell 1, Vedlegg A til D og grøn regresjonskurver), kjenner vi også pådrag frå motor og propell (turtal og propellstigning). Her kunne vi derfor konstatere at fartstapet var ufrivillig. Dette er derimot generelt ikkje kjent for observasjonar som berre er basert på AIS data.

Som underlag for sjølve tidsrekneskapen er det derimot underordna om fartsreduksjonen er frivillig eller ufrivillig.



4 Vurdering av grunnlag for metoden

Dette kapittelet diskuterer føresetnader som vi har gått ut frå og drøftar korleis dette påverkar resultat av metoden på eit kvalitativt grunnlag. Det blir også gitt nærare forklaringar på bakgrunn for diverse omgrep som er brukt i rapporten.

4.1 Statistikk for bølger på Stad og verknad av klimaendring

Bakgrunn for val av signifikant bølgehøgde som ligg til grunn for denne rapporten/metoden, er årsmiddelverdien for Stadhavet gjennom bølgestatistikk presentert i ein publikasjon frå 1985 [3].

I eit grunnlagsdokument for regjeringa sitt arbeid med Nasjonal transportplan (NTP) 2010-2019 der verknad av klimaendring for transportsektoren er utreda, er det under kapittelet om Sjøfart kommentert at '*sjøtransporten er særleg ømfintlig for klimaendringar*'.

Dokumentet viser også til klimastudier frå Meteorologisk institutt (MET) om meir ekstrem vind om vinteren. Sterkare vind medfører større bølger, og MET reknar med at signifikant bølgehøgde vil auke med om lag 25 cm på Vestlandet.

Sidan kjelda som er nytta i denne rapporten er frå 1985, tyder det på at årsmiddelverdien på 2.2 meter signifikant bølgehøgde er konservativ. Sidan energien i ei bølge er proporsjonal med kvadratet av høgda, indikerer dette også at energi og framdriftseffekt som bølgjene «tappar skroget med» og tilhøyrande fartstap, vil bli underestimert.

I NRK dokumentaren 'Storm ved Stad' frå 2012 (<https://tv.nrk.no/serie/glimt-av-norge/DKSF45000211/24-09-2012>), blir det dessutan nemnt at talet på stormdagar på Stad er meir enn tredobla over dei siste 50 åra.

4.2 Om bølger på ope hav og i ein fjord og om fartøyrespons og framdriftseffekt

Denne rapporten nyttar omgrepa *havbølger*, *bølgeskjerma område* og *smult farvatn*.

For å forklare forskjell mellom bølger på havet og ytst på kysten til samanlikning mot i fjordane som er skjerma for storhavet, må ein betrakte dei viktigaste faktorane som skaper vindgenererte overflatebølger.

Bølgjetilstanden blir i hovudsak skapt av følgjande tre forhold; 1) vindstyrken, 2) kor lenge det blæs og 3) Strøklengda, dvs. lengda over den opne strekninga som vinden blæs. Dessutan vil no-tilstand, straum og djup påverke utviklinga av bølgjene.

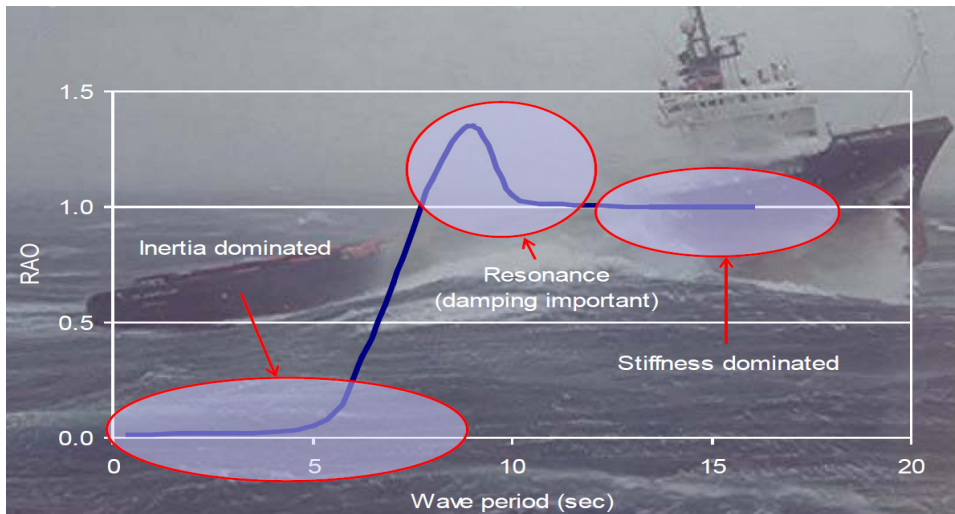
I ein fjord som er avgrensa av terrenget på land, vil både 2) og 3) avgrense både høgde og lengde på bølger som derfor blir mindre i fjordane enn på det opne havet.

Det er også viktig å presisere at bølgeindusert dynamikk i skroget, som også påverkar fartstap og framdriftsenergi, er sterkt avhengig av periode og lengde på bølgjene.

Bølgjelengda er avstanden mellom to bølgetoppar og perioden er tid mellom passering av to bølgetoppar for eit gitt punkt. Samanhengen mellom lengde og periode er gitt av dispersjonsrelasjonen som etter lineær bølgeteori gir følgjande estimert bølgjelengd når perioden er kjent; $\lambda \sim 1.56 \cdot T^2$ (λ er bølgjelengd og T er periode).

Bølgjelengda (perioden) har omlag same betydning for fartstap og framdriftseffekt som bølgehøgde.

Ein kan forklare dette gjennom figur 7 som illustrerer korleis skrogresponsen (i dette tilfelle stamping) endrar seg med bølgeperiode/lengde. Eit slikt diagram er spesifikt for fartøyet og gjeld for ein bestemt respons (til dømes rull, stamp eller hiv), for ei gitt fart og for ei bestemt bølgeretning i forhold til fartøyet sin kurs.

Figur 7 Eksempel på RAO (Response Amplitude Operator) som funksjon av bølgeperiode.

Horisontal akse er bølgeperioden og vertikal akse viser forhold mellom amplitude for eit gitt punkt i skroget og bølgeamplituda (halvparten av bølgehøgda). RAO betyr Response Amplitude Operator. For korte bølger (låg periode) i forhold til lengde og storleik på skroget er kraft frå bølga låg i forhold til massetregheit i skroget.

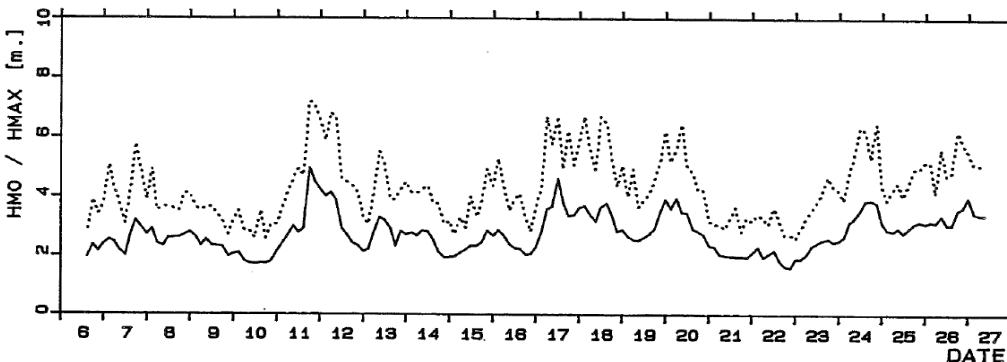
Korte bølger i forhold til skroglengda gir derfor små rørsler. Når perioden aukar

og bølglengda nærmar seg vel halvparten av lengda på skroget, vil stampinga auke markant og maksimalt nivå oppstår ved resonans. Ved lange bølger og periodar, dvs. bølger som har lengde rundt skroglengda, så vil skroget følgje bølga på same vis som ein kork på havoverflata. I dette området går derfor RAO mot 1.

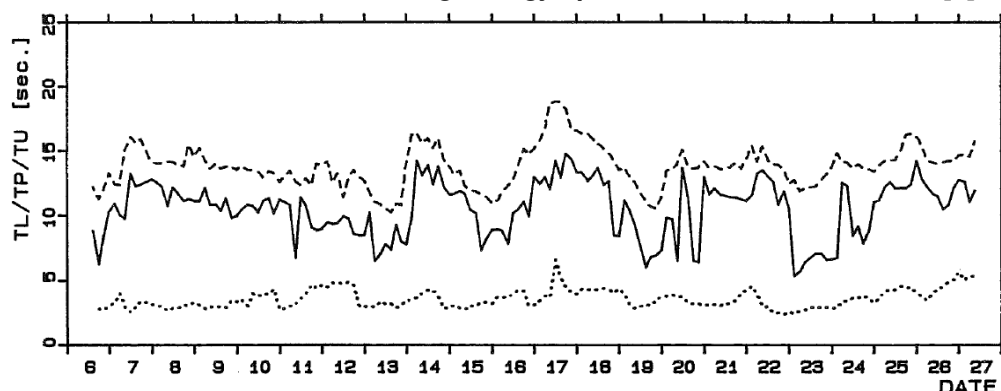
På grunn av at strøklengda og varigheit av vindfeltet for ei gitt retning blir sterkt avgrensa av landskapet, er det sjeldan at signifikant bølgehøgda blir over 1.5 meter og perioden meir enn rundt 4 sekund i ein fjord.

For skrog over ein viss storleik (20-30 m), vil derfor fjordbølger ikkje gi særleg rørsler i fartøyet, og dermed liten påverknad på fartstap og framdriftsenergi.

Utaskjers vil derimot sjøoverflata bli påverka av dønning frå fjerne vindfelt i tillegg til lokal vind. Dønning er karakterisert ved lange bølger som kan forplante seg fleire tusen kilometer utan særlig reduksjon i energi eller amplitude. Den har normalt periodar i området 10-15 sekund, men dette kan variere ein del.

Figur 8 a) Signifikant- (HMO) og maks bølgehøgda (HMAX), Stad 6-27 okt 1985 [7]

Figur 8 a) viser eksempel på tidsplott av bølgehøgda og bølgeperiode basert på målingar frå ei oseanografisk målebøye som var forankra på Stadhavet i oktober 1985 [7].

Figur 8 b) Bølgeperioder – heiltrekt kurve er 'peak-periode' T_p som er tilsvarer maksimal energi i bølgespekteret, Stad 6-27 okt 1985 [7]

Heiltrekt kurve i Figur 8 b) representerer peak-perioda T_p som er relatert til bølgjene med størst bidrag til bølgeenergien. Gjennom dei tre vekene varierte T_p mellom 7 og 14 sekund.

Denne variasjonen i T_p betyr at bølgjene vil eksitere stamperørsle nær resonans når ein relaterer dette til responskarakteristikken for fartøyet som vist i figur 7.

Eit anna særtrekk ved tidsvariasjon i peak-periode (T_p) i figur 8b er at den endrar seg raskare enn signifikant bølgehøgde. Sistnemnte er heiltrekt kurve, HM_0 , i figur 8a) og representerer total energi i bølgespekteret som er samansett av lokale vindgenererte bølger pluss dønning. Den tidvise hurtige variasjonen av T_p kan forklarast ved at dønning og lokal vindsgjø vekslar på å dominere energien i bølgjene. Lokal vindsgjø har normalt lågare T_p enn dønning, dvs. mindre bøljelengd enn dønning. I tidsrom der T_p er 10 sekund og mindre er det lokal vindgenerert sjø som dominerer medan det sannsynligvis er dønning som medverkar mest til bølgeenergien rundt 12-14 sekund.

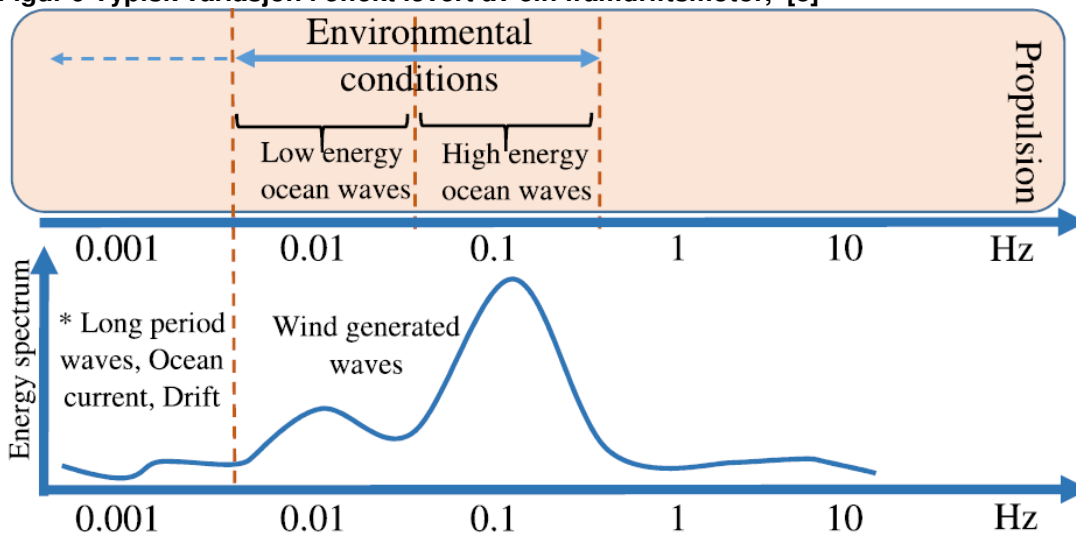
Den sterkt fluktuerande tidsserien av framdriftseffekt og fart som er presentert i Vedlegg B, der det er registrert lokale vindar med moderat styrke, kan tyde på at dønning har forårsaka auken i framdriftsenergi og reduksjon i fart på det vel 90 meter lange skroget.

4.3 Brennstoff forbruk på grunn av fluktuerande motorlast i bølger

Energien frå bølgjene kjem også til syne i belastningsspekteret til skipsmaskineriet og bølgeenergien er derfor vanlegvis også den dominerande dynamiske komponenten for framdriftsmotoren.

Dette er illustrert i figur 9, frå [8], som illustrerer fordeling av energien for eit skipsmaskineri som funksjon av frekvensen i Hertz (Hz). Frekvensen er invers verdi av perioden som betyr at ein bølgeperiode på 10 sekund har ein frekvens på 0.1 Hz.

Figur 9 Typisk variasjon i effekt levert av ein framdriftsmotor, [8]



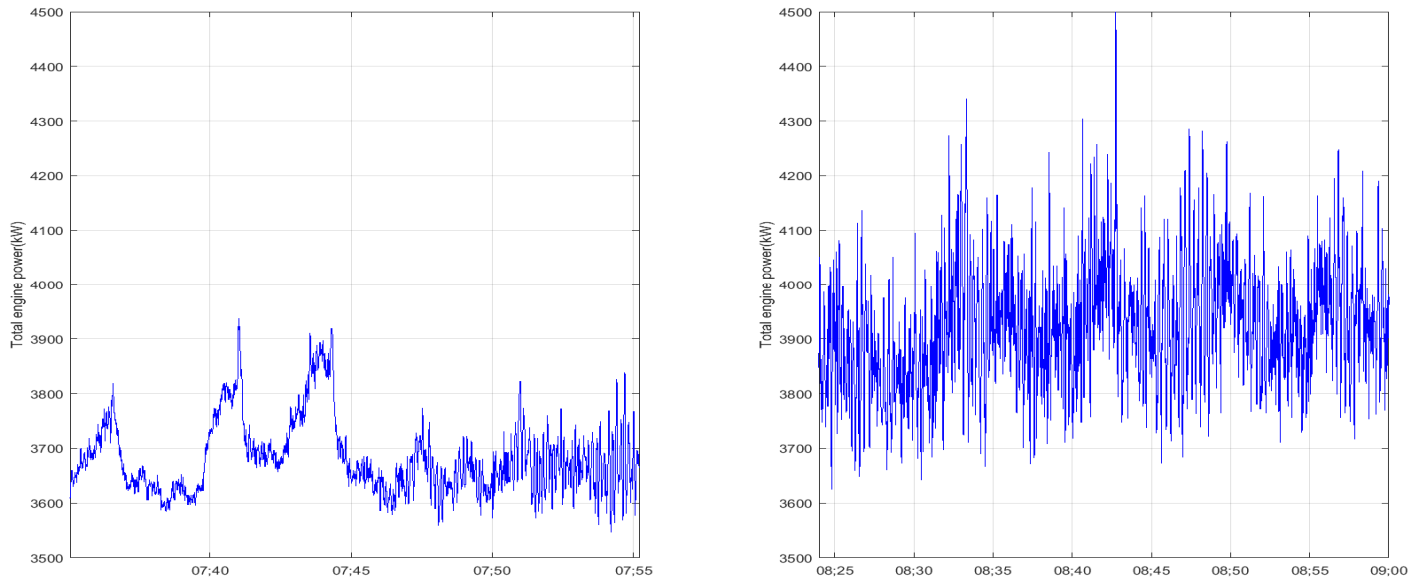
Figur 10 viser utdrag av effektsignalet som knytt til plott av fart og effekt historikk for eit fartøy som passerer Stad og som er presentert i Vedlegg D.

Dei to tidsplotta i figur 10 viser korleis motoreffekten varierer for to ulike delar av ruta. Eit særtrekk ved desse målingane og for dei andre fart og effektsignala i Vedlegg A-C er forskjellen mellom fluktuasjon av motoreffekt mellom den mest bølge-skjerma delen og området som er eksponert for sjø frå storhavet.

I starten er fartøyet i skjerma farvatn, og figuren til venstre viser ca 20 minutt av korleis motoreffekten varierer under desse forholda. Til høgre ser ein ca 35 minutt med tilsvarande effektmålingar, men her rundar fartøyet Stad. I tillegg til at effekten er høgare ser ein at variasjonen i effektmålinga er langt større enn på figuren til venstre.

Effekten svingar opp og ned i langt større grad enn ein ser på målingane på tidsserien til venstre. Dette viser at bølgeenergien påverkar ikkje berre fart og middeleffekt. Dynamikken i sjøen og skroget under påverknad av bølger blir også overført via propell, drivsystem og inn i motoren.

Det gir grunn til å stille spørsmål om spesifikt brennstoff-forbruk (vanlegvis oppgitt som gram per kiloWatt-time (g/kWh) og normalt rundt 200 g/kWh) er gyldig for sjøgang (?). Denne forbruksverdien blir nemleg basert på måledata for ulike turtal og effektnivå ved stasjonært turtal og motoreffekt. Med andre ord; vil forbrenninga i motoren gi same forbruk for konstant og for fluktuerande effekt under sjøgang (?).



Figur 10 Eksempel på variabilitet i motoreffekt i smult farvatn (til venstre) og passering Stad (til høyre).
Utdrag av tidsserie for 128m langt passasjerskip som presentert i Vedlegg D.

4.4 Fartstap for andre retninger enn motsjø.

Dominerande bølgeretning på Stad er vestleg og varierer i retningssektoren sørvest-vest-nordvest. For passering rundt Stadhalvøya betyr det at bølgiene i hovudsak kjem inn mot fartøyet skrått på baugen, tverrskips eller skrått bakfrå.

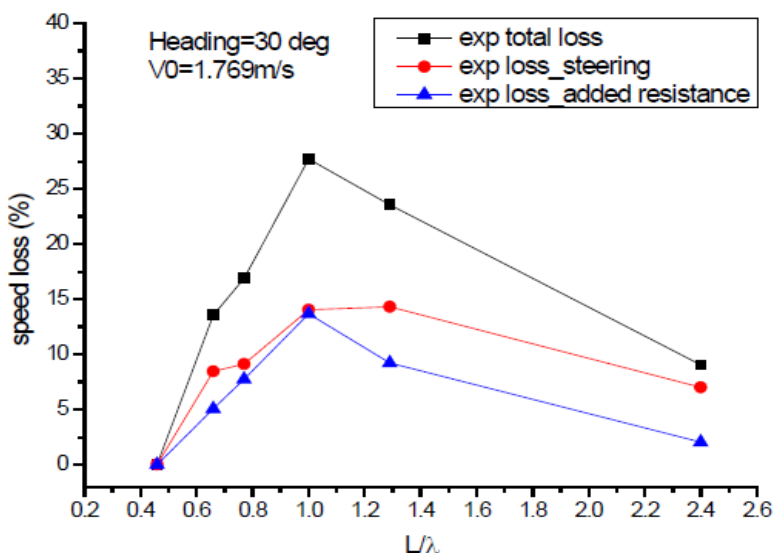
Det er ei vanleg oppfatning at motsjø skaper størst fartstap og framdriftseffekt (eksempel frå tre modellforsøk som er referert til i tabell 1 (ref.[4] og [5]), er også for motsjø).

Ein studie utført gjennom vårt forskingssamarbeid med NTNU og SINTEF Ocean (UTC – University Technology Center) har derimot vist at bølger på skrå inn mot baugen og tverrskips kan gi like stort fartstap som rein motsjø.

Dette var undersøkt i havbassenget til SINTEF Ocean med modellen av eit tankskipsskrog som var drive fram med to azimuth thrusterar. Resultata er publisert i [9].

Figur 11 viser fartstapet i prosent som funksjon av forholdet mellom skipslengda og bøljelengda (L/λ).

Figur 11 a) Fartstap som funksjon av bøljelengde på tankbåt-skrog skrog. Regulære bølger 30 grader mot baug ([9]).



Skrogmodellen var undersøkt i regulære bølger (sinusbølger) tilsvarande 2 meter høgde i full skala (for 11 av totalt 13 testar) og for varierende bølgeperiode og lengde (T og λ).

Dei tre grafane i kvar figur viser fartstap på grunn av tilleggsmotstand (blå) og den raude gjeld reduksjon i fart på grunn av det ein kallar styringstap. Den svarte viser det totale farts-tapet.

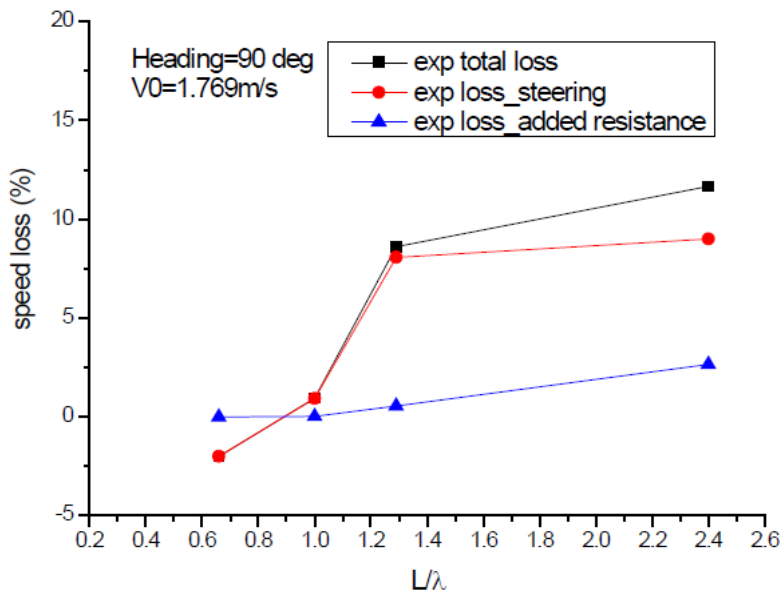
Forklaringa på styringstapet er at ror-aktivitet og større utslag på roret for å holde skipet på 'stø kurs' blir størst ved skråsjø. Når roret dreier, blir

propellstrålen avbøyd og til dels blokkert. Dette reduserer skyvekrafta frå propellen, og energioverføringa frå motor til propell blir mindre effektiv.

Figur 11 a) gjeld for bølgeretning 30 grader skrått mot baugen og 11 b) for bølger som forplantar seg på tvers av skroget si fartsretning. Grafen for 30 grader skrått inn mot baug viser at styringstapet er størst for bølglengder mindre enn skroglengda. For tverrskips

retning, 11 b), er styringstapet større enn bidraget frå tilleggs-motstand.

Figur 11 b) Fartstap som funksjon av bølglengd på tankbåt-skrog. Regulære bølger i tverrskips retning ([9])



Den aktuelle publikasjonen viser også til at somme bølglengder og retningar på skrå bakfrå gir mindre fartstap på grunn av styring eller ror-aktivitet på grunn av kurskorleksjon.

Men sidan skråsjø i ulike retningar vil dominere ved seglasen på Stadhavet og det elles manglar gode haldepunkt og statistiske data for å korrigere for verknaden av bølgeretning på fartstap og energiforbruk for passering av Stadhavet, er dette heller ikkje inkludert i metoden.

For det komplekse bølgeomønsteret på Stadhavet, vil eit fartøy også bli eksponert for bølger i mange retningar samtidig.

I Kystverket sin omtale av denne havstrekninga i KVVU rapporten frå 2010

står det at ...'En kombinasjon av havstrømmer og topografi skaper «rotete sjø» med svært høye bølger som kommer frå ulike kanter samtidig'.

Det er derfor rimelig å anta at bølgeførhølda ved Stad kan medføre større tap av framdriftsenergi og fart enn det som er gitt ved resultat frå uniforme regulære bølger slik det er gjennomført i omtalte modellforsøk.

5 Diverse dokumentasjon om skipstunnelen og om klimautslepp frå skip

Metoden som er forklart i kapittel 6 gir grunnlag for å estimere totale tids-, drivstoffkostnader og utslepp av klimagassar når ein kombinerer data om forventa skipstrafikk i tunnel med denne metoden.

Under følgjer ei oppstilling av rapportar som er relevante i den samanhengen:

- DNV rapport av AIS data som underlag for risikoanalyser av fartøytrafikk og som underlag for berekning av ventetidskostnader. Desember 2010 - [10]
- SINTEF Bedriftsutvikling 'KVVU Stad skipstunnel – en kritisk gjennomgang', Raabe, H. Eilertsen E. Februar 2011. [11]
- IMO rapport frå 2014 om klimautslepp frå skip [12]
- DNVGL rapport om klimateffekt av å flytte transport av gods frå land til sjø med vurdering av potensielle samfunnsverknader. September 2016 [13].
- Kystverket Sørøst – Senter for transportplanlegging, plan og utredning (TPU). Nytte/kost –analyse av Stad skipstunnel. Mai 2017 [14].
- Atkins & Oslo Economics. Kvalitetssikring KS2 av Stad skipstunnel. Mai 2018 [15]

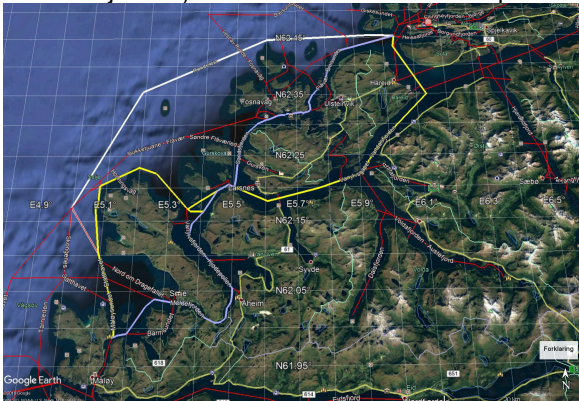
6 Metode for å estimere fart, tids- og effektforbruk

For å gi eit estimat på tids- og effektforbruk som eit fartøy vil bruke langs ei strekning, vil ei slik vurdering vere avhengig av fartøytype, fartøyet sin lastkondisjon, maskineri- og propellsystem, hastigheit samt sjøtilstand og vind. Inngangsparametrane lista over vil med andre ord ikkje vere eintydige, så kompleksiteten av ei slik analyse er høg. I denne rapporten er det presentert ein metodikk som brukar lengda, L , på skipet for å estimere effekt og fart. Tabell 2 viser formlane som er presentert i figur 3 - figur 6 og som vil bli nytta til dette føremålet.

Tabell 2: Formlar for berekning av effekt og fart. Inngangsparameter er fartøyet si lengde, L .

| | | | |
|---|---------------------------|-----------------|-----------|
| Energifaktor basert på fullskala målingar (alternativ 1a) | $2.65 \times L - 50$ | kWh/nautisk mil | Formel 1a |
| Energifaktor basert på overslagsberekning (alternativ 1b) | $2.85 \times L - 108$ | kWh/nautisk mil | Formel 1b |
| Effektforhold i sjøgang/smult farvatn | $4.713 \times L^{-0.276}$ | - | Formel 2 |
| Fart i smult farvatn | $0.047 \times L + 8.75$ | knop | Formel 3 |
| Fartstap i sjøgang | $-0.014 \times L + 2.96$ | knop | Formel 4 |

Dessutan må ein avklare kva distansar som skal vere utgangspunkt for samanlikninga. Dette vil vere avhengig av kva ruteval som skal samanliknast. Som indikert i figur 12 er det fleire alternativ (Rundeleia, Flåværsleia, Vartdalsfjorden) som kan vere om ein ser på området Måløy-Ålesund.



Figur 12 Ulike ruteval mellom Måløy og Ålesund.

6.1 Fartrekneskap

6.1.1 Referansefart

Eit fartøy må ha ein referansefart. Det er rimeleg å bruke farten fartøyet har ved avreisepunkt med eit gitt pådrag under rolege vêrtilhøve som referanse (effektforbruk tilsvarende "stillevannsmotstand"). Ulike fartøy kan naturlegvis operere med ulik fart, men representabel referansehastigheit for eit fartøy av ein viss storleik kan finnast ved å bruke Formel 3 i tabell 2.

6.1.2 Venting ved tunnelpassering og fart gjennom tunnel

For å estimere tida det tek å passere gjennom tunnelen, er det antatt ein fart på 5 knop. Før ein kan passere gjennom tunnelen må ein sannsynlegvis tilpasse farta for anna skipstrafikk. Dette kan gjerast ved at ein får tildelt passeringstid og tilpassar farta deretter. Ein må også redusere farta før ein kan passere.

6.1.3 Fartsreduksjon p.g.a. ytre forhold

Eit fartøy som passerer Stad vil i mange tilfelle bli påverka av tilleggskrefter frå bølger, straum og vind. Dette vil påverke både fart og forbruk til eit fartøy. Å estimere denne fartsreduksjonen er vanskeleg. Den vil vere avhengig



av fartøytype, storleik og sjølvsagt vêrforhold. Dessutan vil ein fartsreduksjon kunne vere ei følgje av at skipperen reduserer pådraget p.g.a. store og ubehaglege skipsrørsler (frivillig fartstap).

I denne analysa er det antatt at fartøyet har same pådrag som under referansekondisjonen og fartstapet er i forhold til denne farta. Denne metoden foreslår at ein nyttar Formel 4 i tabell 2 for å estimere fartstapet når fartøyet er eksponert for bølger, vind og straum. Ved seglas gjennom ruter der tunnelalternativet blir brukt, er fartsreduksjon p.g.a ytre forhold neglisjert sidan fartøyet går i lunare farvatn.

6.2 Tidsrekneskap

Den totale tida det tek å gå dei ulike rutene vil vere avhengig kva fartsprofil ein kan forvente.

6.2.1 Tunneltid

Eit fartøy som skal passere gjennom tunnelen må gå med sakte fart. Med 5 knops fart og tunnallengde på 1700 meter blir passeringstida ca 11 minutt.

6.2.2 Ventetid p.g.a. tunneltrafikk

Det er sannsynleg at eit fartøy som skal passere tunnelen må pårekne ventetid p.g.a. at andre fartøy er i tunnelen. Kor lang tid dette er snakk om, vil m.a. vere avhengig av trafikkbiletet, men dette er ein faktor som bør vere med i rekneskapen. Denne ventinga vil også medføre drivstofforbruk, men med ei lågare motorbelastning enn ein har i transitt.

6.2.3 Ekstratid p.g.a. fartstap i bølger

Som følgje av fartstap p.g.a. ytre forhold ved passering av Stad, vil eit fartøy bruke lengre tid enn om det var stille sjø. Denne tida må også inn i tidsrekneskapen.

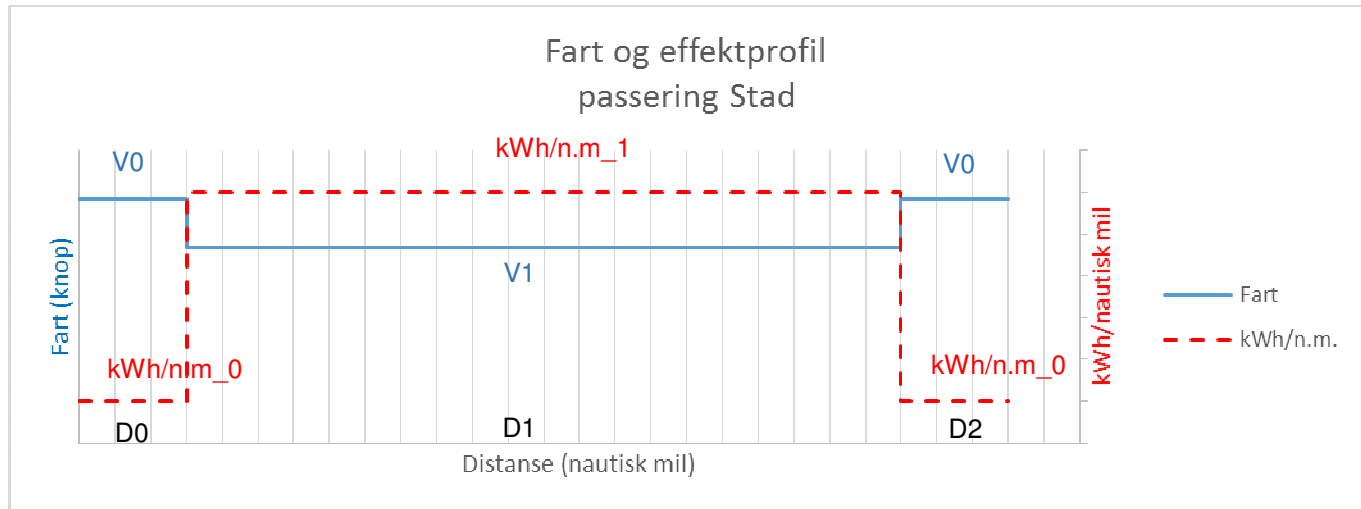
6.3 Effektrekneskap

Ved vurdering av effektforbruk på ulike ruter er det den totale akkumulerte effekten, kWh, som interessant.

I analysa er effektforbruk beregna ut i frå ein faktor $kWh/nautisk\ mil$. Denne faktoren seier noko om kor stort energiforbruket er per tilbakelagt distanse. Denne faktoren vil hovudsakleg vere avhengig av fartøytype, lastkondisjon, fart og vêrtilhøve. Det er antatt ein referanseverdi. Denne er gitt ved Formel 1a eller 1b i tabell 2 (brukaren kan velge om ein vil bruke formelen basert på fullskala data eller overslagsmetoden). Ved passering av Stad vil denne verdien mest sannsynleg auke. Ved tunnelalternativa er det antatt at denne verdien er lik over heile distansen, men at den vil bli redusert noko i tilknytting venting og passering av tunnel. Verdien vil nok gå ned p.g.a. farten er lågare i tunnelen og motoreffekten er lågare ved eventuell venting. Men det må påreknast at det går med tilsvarande effektforbruk til andre forbrukarar ombord som elles. I denne metoden er det foreslått av verdien blir halvert.

6.3.1 Passering Stad

I figur 13 er det presentert ein skjematisk profil av korleis fart- og effektforløpet kan arte seg ved seglas på ei rute rundt Stad. (Sjå vedlegg A-vedlegg D for å gjenkjenne mønsteret i fart og effekt). Avhengig av kva rute ein vel (Rundeleia, Flåværsleia eller Vartdalsfjorden, nordoverseglas eller søroverseglas), vil ein oppleve rolege forhold i starten og slutten av seglasen. Ved runding Stad, og eventuell seglas vidare langs Rundeleia, vil typisk farten droppe og framdriftseffekten auke. Tilleggsauken i effekt kan estimerast ved å bruke Formel 2.



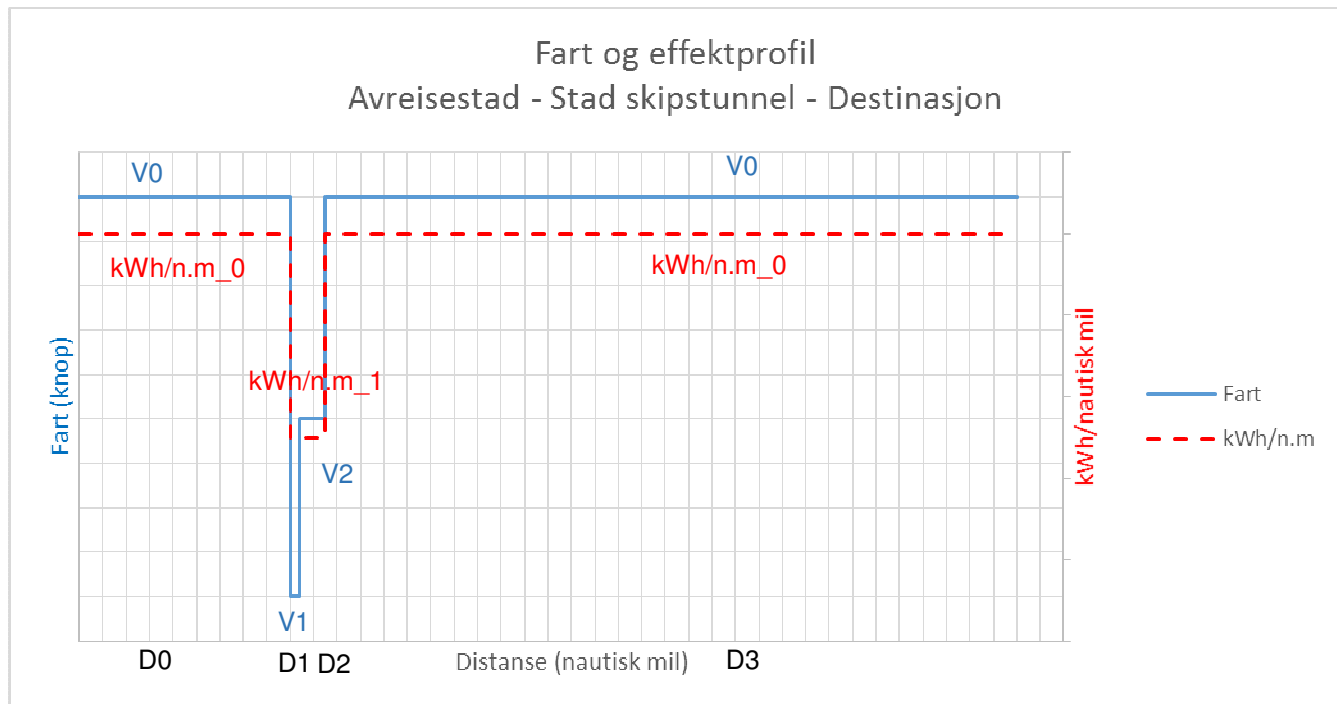
Figur 13: Fart- og effektprofil ved passing Stad

For estimering av effektforbruk er det foreslått at ein delar seglasen inn i tre, der distansane på dei ulike strekningane (D0, D1 og D2) må definerast avhengig av rute. Her bør ein også vurdere ulike distansar ved passing Stad sidan fartøy kan velge å gå ein lengre strekning for å unngå dei verste bølgeforholda.

| | Distanse [Nautisk mil] | Fart [knop] | Forbruksfaktor [kWh/nautisk mil] | Forbruk (akkumulert effekt) [kWh] | Tid [timar] |
|-------------------------|------------------------|-------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Avreisepunkt - Stad | D0 | V0 | kWh/n.m._0 | $P0 = kWh/n.m._0 \times D0$ | $T0 = D0 / V0$ |
| Stadhavet | D1 | V1 | kWh/n.m._1 | $P1 = kWh/n.m._1 \times D1$ | $T1 = D1 / V1$ |
| Stadhavet - Destinasjon | D2 | V0 | kWh/n.m._0 | $P2 = kWh/n.m._0 \times D2$ | $T2 = D2 / V0$ |
| Sum | $\Sigma D0+D1+D2$ | | | $\Sigma P0+P1+P2$ | $\Sigma T0+T1+T2$ |

6.3.2 Passering Stad skipstunnel

I figur 14 er det presentert ein skjematisk profil av korleis fart- og effektforløpet kan arte seg ved seglas på ei rute der Stad skipstunnel vert nytta. Avhengig av kva rute ein vel (Vartdalsfjorden, Flåværsleia), vil ein oppleve relativt rolege forhold under seglasen samanlikna med meir eksponerte område. Det er difor antatt at referansefarten og forbruksfaktoren vil vere tilnærma lik. Ved ankomst tunnel er det antatt at fartøyet må redusere farta samt vente litt før den passerer tunnelen.



Figur 14: Fart- og effektprofil ved passering Stad skipstunnel

For estimering av effektforbruk er det foreslått at ein delar seglasen inn i fire, der distansane på dei ulike strekningane (D0, D1, D2 og D3) må definerast avhengig av rute. Forbruksfaktorane kWh/n.m_0 finn ein ved å bruke formlane presentert tidlegare for aktuelle fartøystorleikar. Ved venting og passering gjennom Stad skiptunnel kan ein anta at denne faktoren blir redusert med 50%.

| | Distanse [Nautisk mil] | Fart [knop] | Forbruksfaktor [kWh/nautisk mil] | Forbruk (akkumulert effekt) [kWh] | Tid [timar] |
|---|------------------------|-------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| Avreisepunkt - punkt for fartsreduksjon/venting | D0 | V0 | kWh/n.m_0 | $P0 = kWh/n.m_0 \times D0$ | $T0 = D0 / V0$ |
| Venteområde | D1 | V1 | kWh/n.m_1 | $P1 = kWh/n.m_1 \times D1$ | $T1 = D1 / V1$ |
| Stad skipstunnel | D2 | V2 | kWh/n.m_1 | $P2 = kWh/n.m_1 \times D2$ | $T2 = D2 / V2$ |
| Stad skipstunnel - Destinasjon | D3 | V0 | kWh/n.m_0 | $P3 = kWh/n.m_0 \times D3$ | $T3 = D3 / V0$ |
| Sum | $\Sigma D0+D1+D2+D3$ | | | $\Sigma P0+P1+P2+P3$ | $\Sigma T0+T1+T2+T3$ |

6.3.3 Estimert av drivstofforbruk og utslepp

Metodikken som er beskrevet gir totalt effektforbruk/akkumulert effekt over ei strekning. Estimert av tilhørende drivstofforbruk og utslepp av for eksempel klimagassar er ikkje inkludert i denne rapporten. Men for å estimere dette, er den akkumulerte effekten, kWh, ein nødvendig input. I [12] og [14] finn ein eksempel på korleis akkumulert effekt saman med data om spesifikt brennstoff-verdiar kan brukast til å estimere drivstofforbruk. I tillegg er det vist korleis ulike utsleppseffektar (t.d. CO₂) kan estimerast ut i frå drivstofforbruket. Dette vil avhenge av kva slags drivstoff som vert nytta av motorane.



6.4 Eksempel på bruk av metode

Metoden og bruk av formlane beskrive over let seg enkelt implementere i eit rekneark. I Vedlegg F er eit reknearkseksempel presentert der eit fartøy med lengde $L=50$ meter er input. Distansane brukt i dette eksempelet tek utgangspunkt i to tenkte seglasar frå Raudeberg til Åramsundet der eine ruta går rundt Stad og den andre går gjennom Stad skipstunnel. Under er det beskrive kva som er input og kva som blir rekna ut av dei ulike formlane ved passering Stad og Stad skipstunnel.

6.4.1 Passering Stad

| | | |
|--|--|-------------------------|
| Lengde på fartøy, L | | Input |
| Distanse, D0 | | Input, avhengig av rute |
| Distanse, D1 | | Input, avhengig av rute |
| Distanse, D2 | | Input, avhengig av rute |
| Referansehastigheit i skjerma farvatn, V0 | | Bruk Formel 3 |
| Fartstap i sjøgang | | Bruk Formel 4 |
| Hastigheit i sjøgang, V1 | | V0 – fartstap i sjøgang |
| Effektbehov til framdrift skjerma farvatn | | Bruk Formel 1a eller 1b |
| Effektbehov til framdrift i sjøgang relativt skjerma farvatn | | Bruk Formel 2 |

6.4.2 Passering Stad skipstunnel

| | | |
|---|--|---|
| Lengde på fartøy, L | | Input |
| Distanse, D0 | | Input, avhengig av rute |
| Distanse, D1 | | Input (vurdering) |
| Distanse, D2 | | 1700 m |
| Distanse, D3 | | Input, avhengig av rute |
| Referansehastigheit i skjerma farvatn, V0 | | Bruk Formel 3 |
| Hastigheit venting, V1 | | 1-2 knop (vurdering) |
| Hastigheit tunnel, V2 | | 5 knop |
| Effektbehov til framdrift skjerma farvatn | | Bruk Formel 1a eller 1b |
| Effektbehov venting og tunnelpassering | | Bruk halvparten av verdien av 'Effektbehov til framdrift skjerma farvatn' |

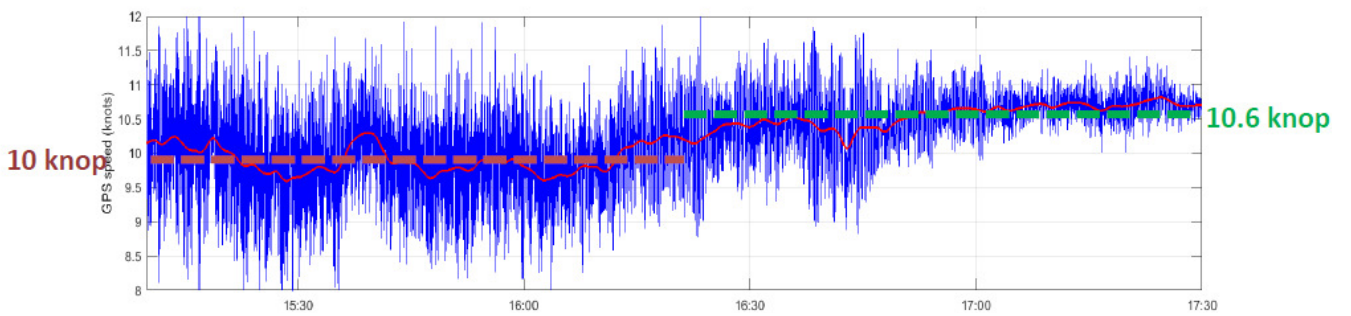
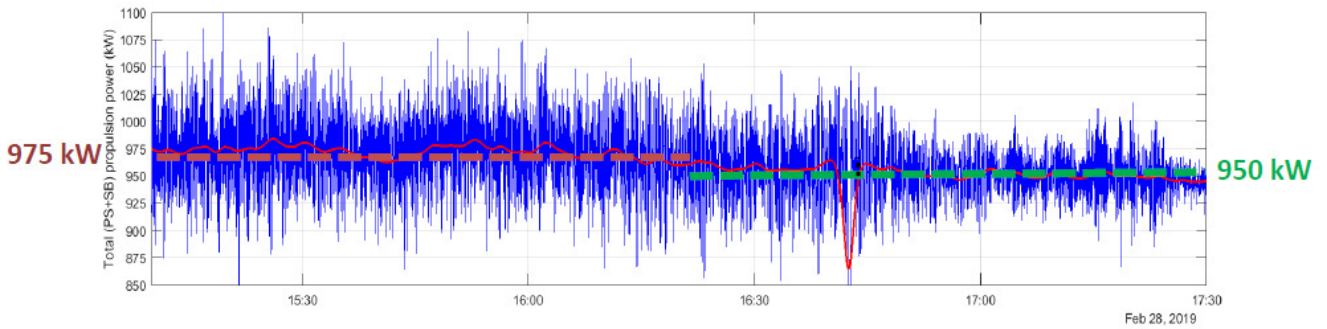
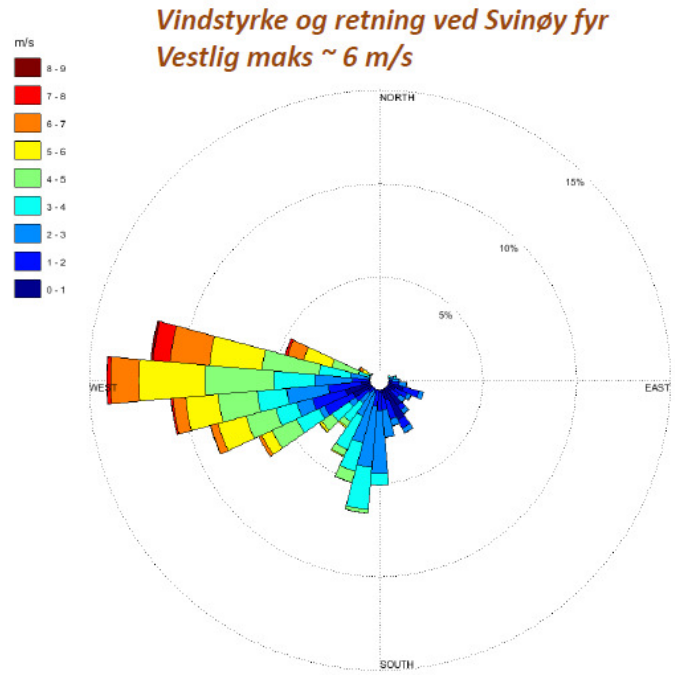
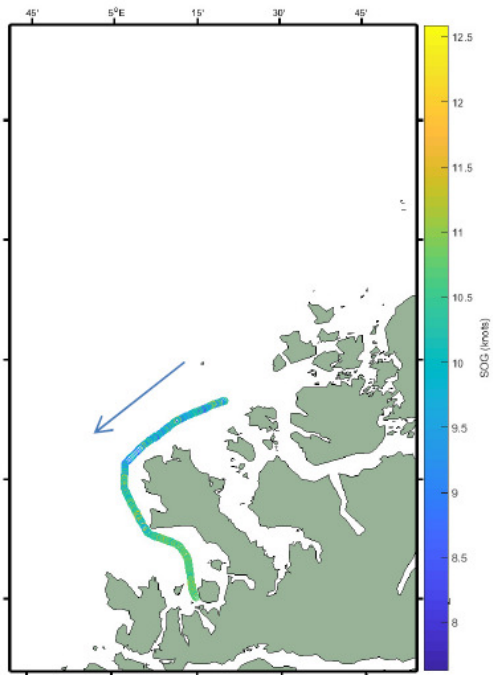


Referansar

- [1] RRM-R&T_11-004.01. Driftsanalyse: Samanlikning av drivstofforbruk ved passering av Stad og gjennom tunnel. L. Aarseth.
- [2] RRM-R&T_18-005.02. Drivstoff- og tidsforbruk ved passering av Stad og gjennom tunnel. L.Vartdal, L.Aarseth
- [3] Seasonal and geographic variations of wave climate along the Norwegian coast. SINTEF publ.Kt-R-609601-12. M. Mathiesen, K.Torsethaugen.
- [4] Assessment of Ship Performance in a Seaway. The Nordic Co-operative project: "Seakeeping Performance of Ships". ISBN 87-982637-1-4
- [5] Resultat fra modellforsøk i stille vann og sjøgang med linebåt, M-1597, NHL rapport, 1984. A. Åkre.
- [6] Havromsteknologi, NTNU 2008. Motstand og Framdrift. H. Holm, S. Steen.
- [7] 'Environmental Data from off Stad, Oct-Nov 1985. Olsen R. , Vartdal L. SINTEF-Oceanographic Center. Rep.no. 59.0028.03/01/86.
- [8] 'Data-Driven Methodology for the Analysis of Operational Profile and the Quantification of Electrical Power Variability on Marine Vessels'. Swider, A. Pedersen E. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SUSTEMS, VOL. 34, NO.2, MARCH 2019
- [9] 'Speed loss of a vessel sailing in oblique waves'. Zhenju, C. , Steen S, Ocean Engineering Volume 64, 15 May 2013, Pg. 88-99
- [10] DNV. 'Analyse av AIS data og beregning av ventetid', Løken, A.M. desember 2010.
- [11] SINTEF Bedriftsutvikling 'KVU Stad skipstunnel – en kritisk gjennomgang', Raabe, H. Eilertsen E. Februar 2011
- [12] Third IMO GHG Study 2014; International Maritime Organization (IMO) London, UK, April 2015; Smith, T. W. P., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A., Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., O'Keefe, E., Parker, S., Johansson, L., Aldous, L., Raucci, C., Traut, M., Ettinger, S., Nelissen, D., Lee, D. S., Ng, S., Agrawal, A., Winebrake, J. J., Hoen, M., Chesworth, S., Pandey, A.
- [13] DNVGL Maritime; 'Klimaeffekter ved overføring av gods fra vei til sjø', rap. 2016-460, Rev. 1, Dale, E. September 2016.
- [14] Nytte-kostnadsanalyse. Prissatte virkninger av farledsprosjektet «*Gjennomseiling Stad skipstunnel*», Øystein Linnestad og Alexander Frostis, Senter for transportplanlegging, plan og utredning (TPU), Kystverket Sørøst, Mai 2017.
- [15] Kvalitetssikring (KS 2) av Stad skipstunnel. Rapport nummer D055b © Oslo Economics /Atkins Norge 2018

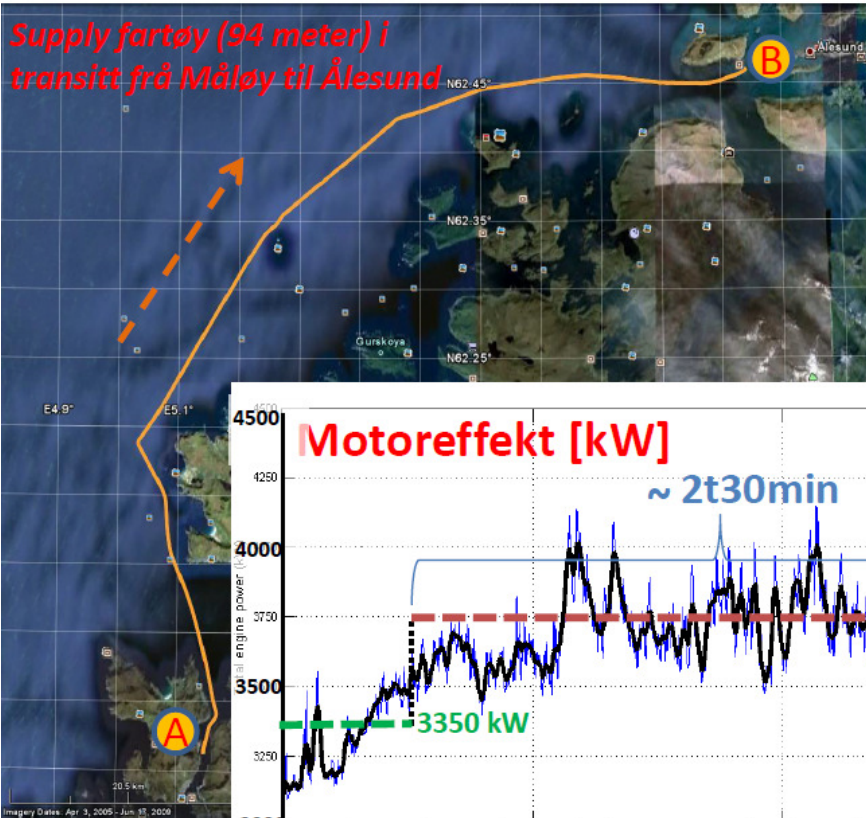


Vedlegg A

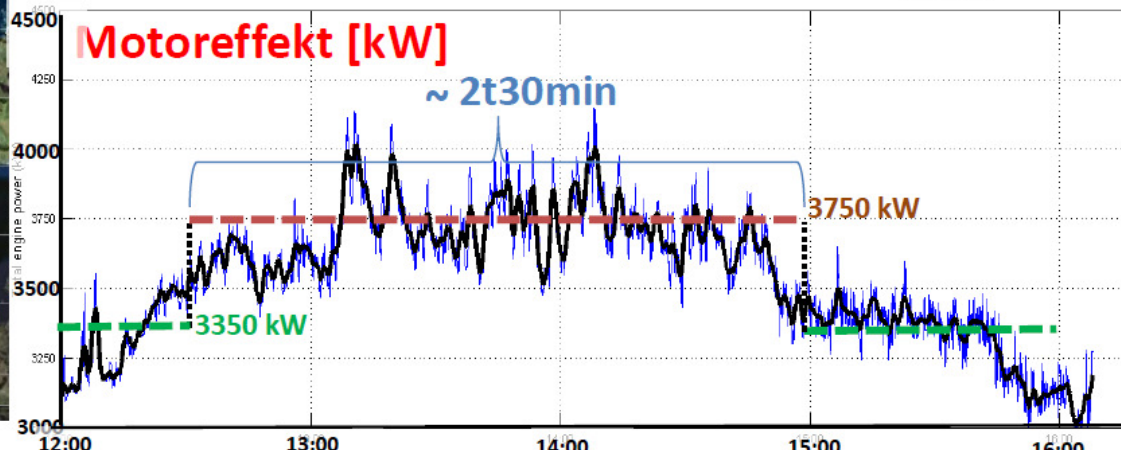
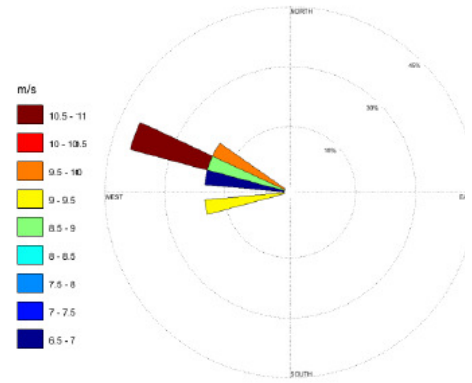




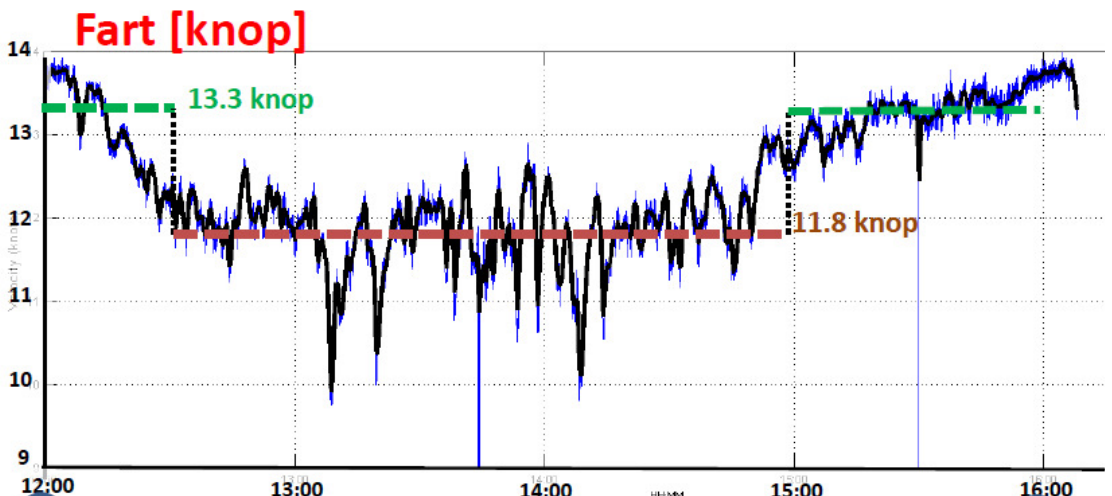
Vedlegg B



Vindstyrke og retning – Svinøy fyr kl.12-16



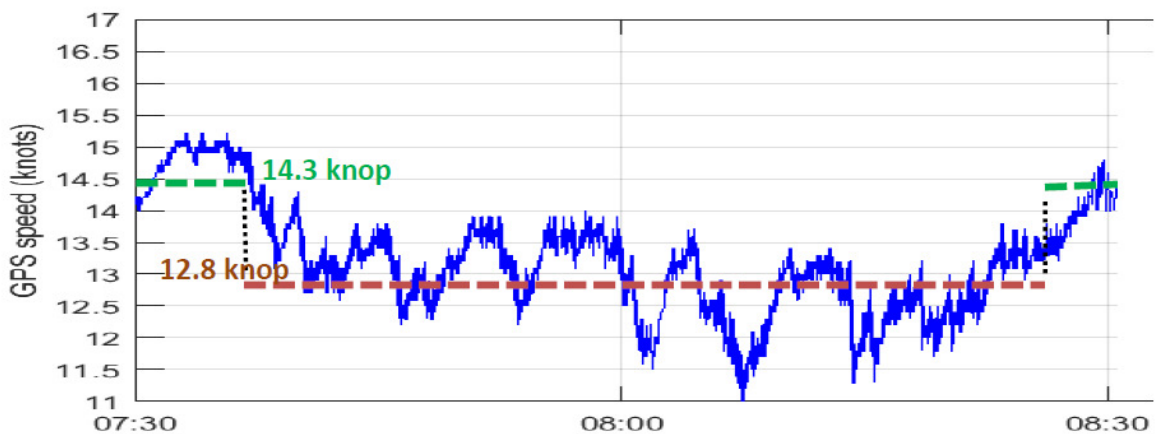
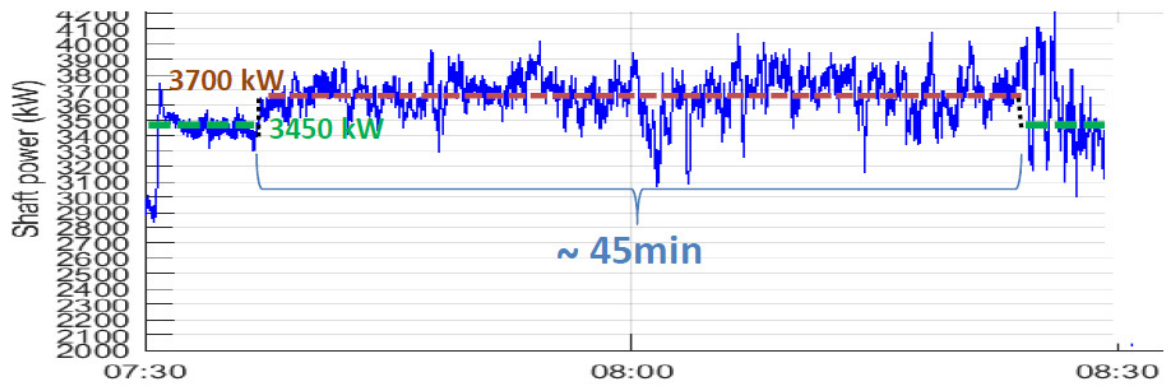
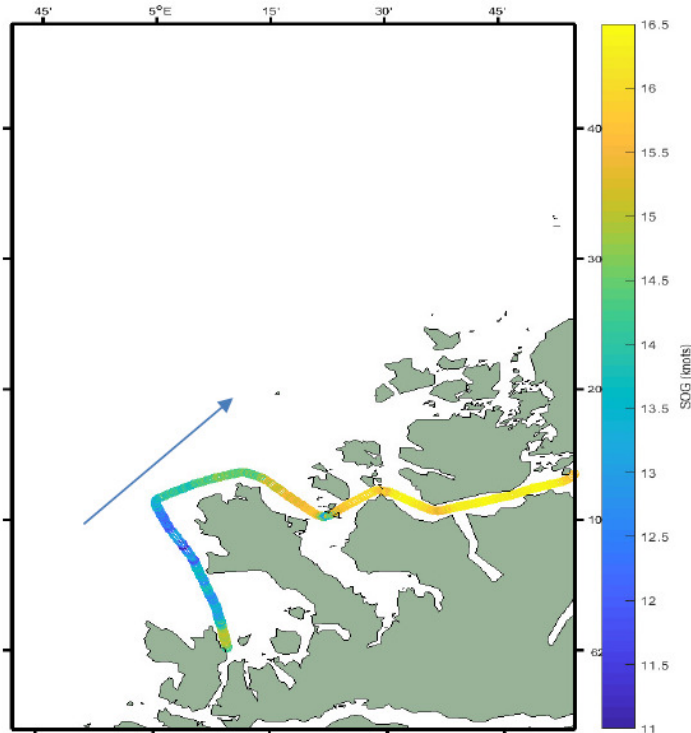
(A) (B)



(A) (B)

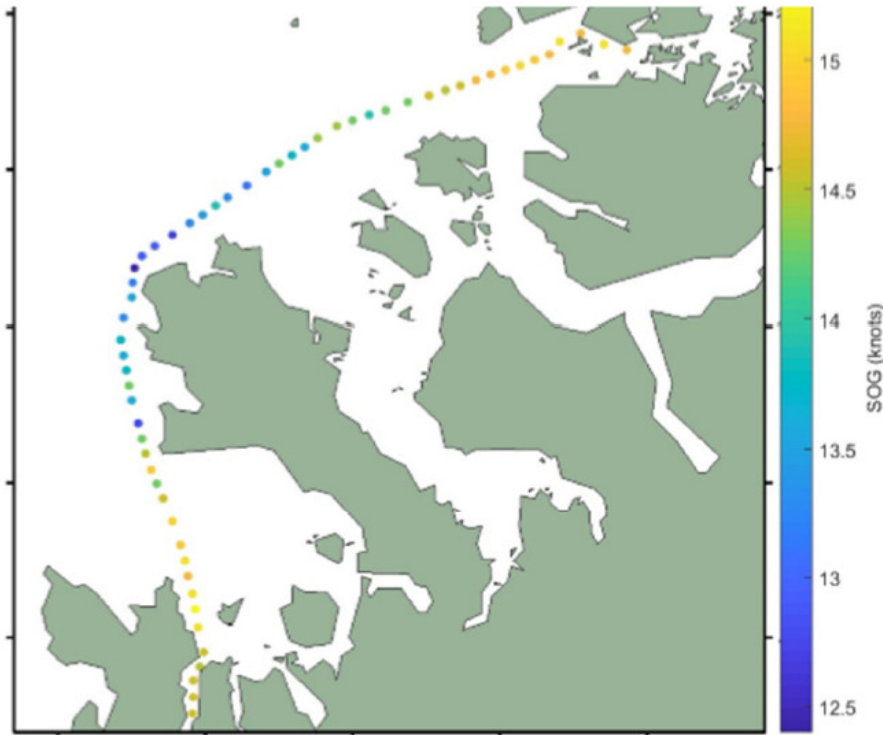


Vedlegg C

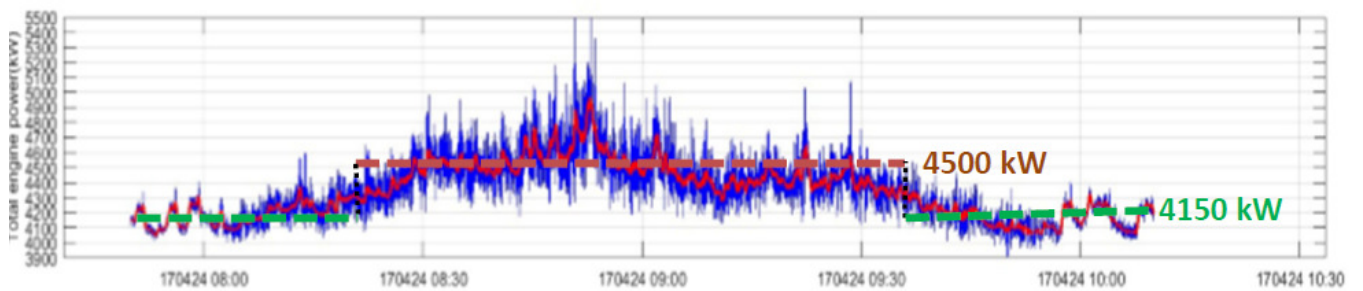
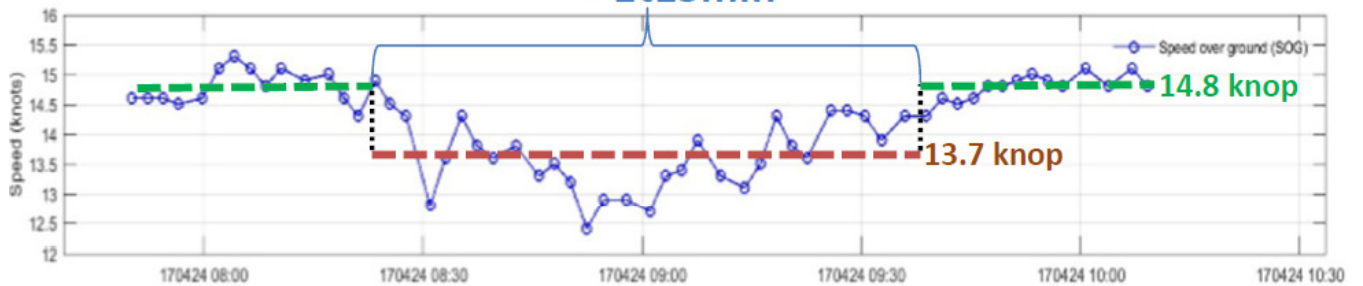




Vedlegg D



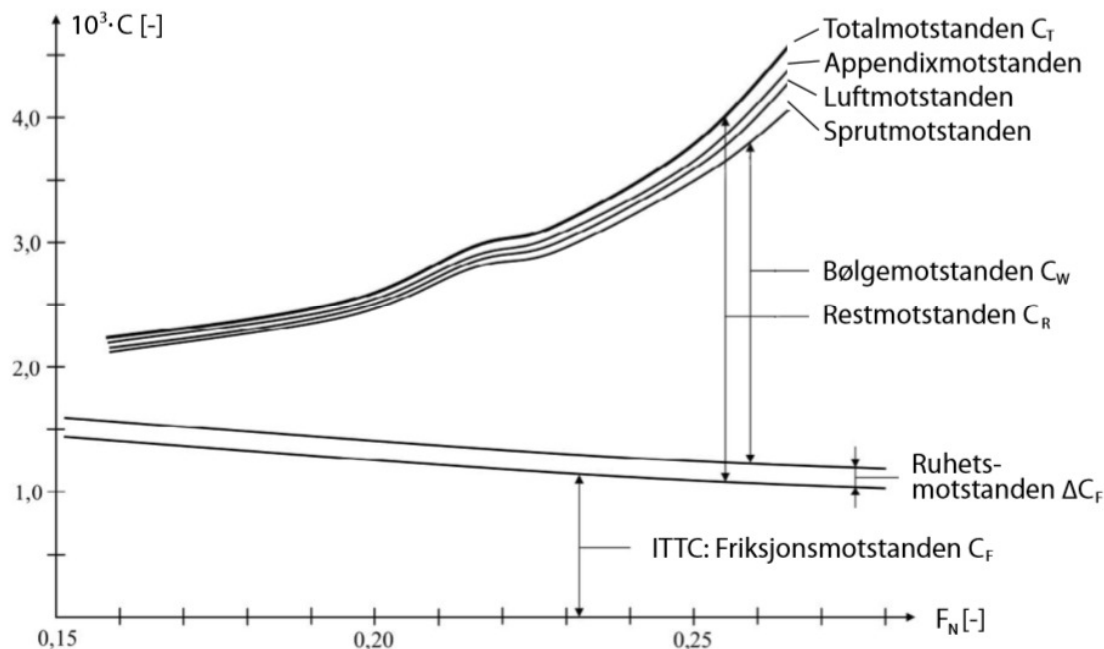
~ 1t15min



Vedlegg E – Overslagsberegning av skrogmotstand [6]

Motstandstall som funksjon av hastighet

Alle motstandstallene er framstilt grafisk i figur nedenfor. Her er Froudes tall brukt som fri variabel. Som vi nå vet, er imidlertid dette tallet proporsjonalt med hastigheten og for et gitt skip kan derfor figuren suppleres med en egen akse med hastigheten som fri variabel.



Grov overslagsberegning av et skips totale motstand

Slike overslagsberegninger kan enkelt gjøres ved å sette inn verdier for totalmotstandstallet (C_{tot}) fra grafen ovenfor i ligningen

$$R_{tot} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_{tot} \text{ (N)}$$



Vedlegg F – Eksempel på bruk av metode

| | | | |
|--|---------------------------|-----------------|-----------|
| Energifaktor basert på fullskala målinger (alternativ 1) | $2.65 \times L - 50$ | kWh/nautisk mil | Formel 1a |
| Energifaktor basert på overslagsberegning (alternativ 2) | $2.85 \times L - 108$ | kWh/nautisk mil | Formel 1b |
| Effektforhold i sjøgang/smult farvatn | $4.713 \times L^{-0.276}$ | - | Formel 2 |
| Fart i smult farvatn | $0.047 \times L + 8.75$ | knop | Formel 3 |
| Fartstap i sjøgang | $-0.014 \times L + 2.96$ | knop | Formel 4 |

| | | |
|---------------------|----|---|
| Input | | |
| Lengde på fartøy, L | 50 | m |

Passering Stad

| | Distanse [Nautisk mil] | Fart [knop] | Forbruksfaktor [kWh/nautisk mil] | Forbruk (akkumulert effekt) [kWh] | Tid [timar] |
|----------------------------|---------------------------|----------------|-------------------------------------|---|-------------------|
| Avreisepunkt - Stad | D0 | V0 | kWh/n.m_0 | $P0 = \text{kWh/n.m}_0 \times D0$ | $T0 = D0 / V0$ |
| Stadhavet | D1 | V1 | kWh/n.m_1 | $P1 = \text{kWh/n.m}_1 \times D1$ | $T1 = D1 / V1$ |
| Stadhavet - Destinasjon | D2 | V0 | kWh/n.m_0 | $P2 = \text{kWh/n.m}_0 \times D2$ | $T2 = D2 / V0$ |
| Sum | $\Sigma D0+D1+D2$ | | | $\Sigma P0+P1+P2$ | $\Sigma T0+T1+T2$ |



| | Distanse [Nautisk mil] | Fart [knop] | Forbruksfaktor [kWh/nautisk mil] | Forbruk (akkumulert effekt) [kWh] | Tid [timar] |
|----------------------------|---------------------------|----------------|-------------------------------------|---|----------------|
| Avreisepunkt - Stad | 3.2 | 11.1 | 82.5 | 264 | 0.288 |
| Stadhavet | 15 | 8.84 | 132.08 | 1981 | 1.697 |
| Stadhavet - Destinasjon | 8 | 11.1 | 82.5 | 660 | 0.721 |
| Sum | 26.2 | | | 2905 | 2.706 |

Passering Stad skipstunnel

| | Distanse [Nautisk mil] | Fart [knop] | Forbruksfaktor [kWh/nautisk mil] | Forbruk (akkumulert effekt) [kWh] | Tid [timar] |
|---|---------------------------|----------------|-------------------------------------|---|----------------------|
| Avreisepunkt - punkt for farts- reduksjon/venting | D0 | V0 | kWh/n.m_0 | $P0 = \text{kWh/n.m}_0 \times D0$ | $T0 = D0 / V0$ |
| Venteområde | D1 | V1 | kWh/n.m_1 | $P1 = \text{kWh/n.m}_1 \times D1$ | $T1 = D1 / V1$ |
| Stad skipstunnel | D2 | V2 | kWh/n.m_1 | $P2 = \text{kWh/n.m}_1 \times D2$ | $T2 = D2 / V2$ |
| Stad skipstunnel - Destinasjon | D3 | V0 | kWh/n.m_0 | $P3 = \text{kWh/n.m}_0 \times D3$ | $T3 = D3 / V0$ |
| Sum | $\Sigma D0+D1+D2+D3$ | | | $\Sigma P0+P1+P2+P3$ | $\Sigma T0+T1+T2+T3$ |



| | Distanse [Nautisk mil] | Fart [knop] | Forbruksfaktor [kWh/nautisk mil] | Forbruk (akkumulert effekt) [kWh] | Tid [timar] |
|---|---------------------------|----------------|-------------------------------------|---|----------------|
| Avreisepunkt - punkt for farts- reduksjon/venting | 9.4 | 11.1 | 82.5 | 776 | 0.847 |
| Venteområde | 0.1 | 1 | 41.25 | 4 | 0.1 |
| Stad skipstunnel | 1 | 5 | 41.25 | 41 | 0.2 |
| Stad skipstunnel - Destinasjon | 14 | 11.1 | 82.5 | 1155 | 1.261 |
| Sum | 24.5 | | | 1976 | 2.408 |