

OSKAR

**Optimering av Sjöburen Kollektivtrafik och
Annan Regelbunden trafik**

Sjöfartsverket i samarbete med

© Sjöfartsverket
AO Sjögeografi

Rapporten finns tillgänglig på Sjöfartsverkets webbplats www.sjofartsverket.se

Dnr/Beteckning 20-00965
Författare Linda Blied
Månad År Maj 2024

Eftertryck tillåts med angivande av källa.

Sammanfattning

Sjöfartsverket initierade projektet OSKAR (Optimering av Sjöburen Kollektivtrafik och Annan Regelbunden trafik) och fann projektpartners i VTI och LiU samt finansiering i Trafikverkets forsknings- och innovationsverksamhets portfölj 5, Sjöfartsportföljen. Projektet kan anses vara en fortsättning på projektet ADAPT som genomfördes 2015 till 2019 och som syftade till att förbättra sjösäkerheten och effektivisera den sjöburna kollektivtrafiken, då med Stockholms och Ålands skärgårdar som studieområde.

Det huvudsakliga syftet med OSKAR har varit att utföra moderna sjömätningar i Göteborgs södra skärgård och därigenom förbättra sjösäkerheten, reducera kollektivtrafikens kostnader och ge bättre verktyg för att kunna planera den vattenburna kollektivtrafiken med större effektivitet.

En yta på omkring 20 kvadratkilometer har sjömätts med moderna metoder och på denna yta har fem platser identifierats där säkerhetsrisken har ansetts vara påtaglig och mätresultatet har publicerats omedelbart i en så kallad Ufs-notis (Underrättelse för sjöfarande). Vidare har det inom studieområdet påvisats såväl större som mindre djup än vad som tidigare har varit känt. Framförallt den nya kunskapen om sundet mellan Asperö och Köpstadsö bedöms kunna påverka planering av kollektivtrafikens rutter framöver.

Vidare så har projektet kunnat föreslå en metod för att, i de områden där modern sjömätning saknas, modellera en djupmodell utifrån befintliga data i kombination med AIS-data. Denna metod kan vara ett alternativ där sjömätning inte är möjlig eller inte kan anses vara samhällsekonomiskt lönsam. I ett nästa steg har projektet föreslagit en modell för att optimera rutter och avgångar för den vattenburna kollektivtrafiken.

Den samhällsekonomiska analysen har påvisat att moderna sjömätningar av detta slag kan anses vara samhällsekonomiskt lönsamma om det medför att två årliga grundstötningar kan förhindras. Bristen på detaljerade data om kollektivtrafiken har dock medfört att specifika nyttoberäkningar inte har kunnat genomföras som planerat.

Norrköping maj 2024



Linda Blied

Projektledare



Chatrin Karlsson

Projektägare

Innehåll

1	OM OSKAR-PROJEKTET	7
1.1	Syfte och mål	7
1.2	Studieområde.....	7
1.3	Bakgrund.....	7
1.4	Arbetspaket.....	8
1.5	Rapportens upplägg	9
2	STUDIEOMRÅDE	9
2.1	Geografisk avgränsning	9
2.2	Befolkning	11
2.3	Trafik i området.....	11
2.3.1	Kollektivtrafik	11
2.3.2	Allmän trafik.....	14
3	ALLMÄNT OM SJÖMÄTNING OCH EFTERBEARBETNING	16
3.1	Sjömätning	16
3.2	Från sjömätning till sjökortsprodukt	18
3.3	ENC	20
3.4	Ufs-notiser.....	20
3.5	Tryckta sjökortsprodukter	20
4	FÄLT- OCH EFTERARBETE INOM OSKAR	21
4.1	Använda enheter inom OSKAR-projektet.....	21
4.1.1	R/V Anders Bure.....	21
4.1.2	Petter Gedda	22
4.1.3	Skräddaren	22
4.2	Mätområde.....	23
4.2.1	Planerat mätområde	23
4.2.2	Faktiskt mätområde	25
4.3	Pilotprojekt: Skräddaren	28
4.3.1	Studieområde	28
4.3.2	Svårigheter	29
4.3.3	Utvärdering av metoden	30
4.4	Kostnad för sjömätning	32
4.4.1	Budgeterad kostnad	32
4.4.2	Utfall kostnad.....	32
5	RESULTAT	35
5.1	AP 2 Datainsamling och analys	35
5.1.1	Nya kunskaper om botten	35
5.1.2	Ufs-notiser	42
5.1.3	Autonom sjömätning på grunda vatten.....	47

5.2	AP 3.1/AP 3.3 Modellutveckling och AP 4 Modellutveckling av beslutsstödsystemet	48
5.3	AP 3.2 Samhällsekonomisk analys.....	50
5.4	Övergripande resultat och måluppfyllnad	51
6	REFERENSER.....	54

Bilaga A – Estimation of near-coastal bathymetry using AIS ship movements (Michael Sederlin och Gunnar Flötteröd, Linköpings universitet och VTI)

Bilaga B – A multiple trip vehicle routing approach to ferry serviced network design (Michael Sederlin och Tomas Lidén, Linköpings universitet)

Bilaga C – Samhällsekonomiska analyser för sjömätningar (Inge Vierth, VTI)

1 Om OSKAR-projektet

Projektet OSKAR (Optimering av Sjöburen Kollektivtrafik och Annan Regelbunden trafik) är ett samarbetsprojekt mellan Sjöfartsverket (SjöV), Statens Väg- och transportforskningsinstitut (VTI) och Linköpings Universitet (LiU). Projektet genomförs med medel från Trafikverkets forsknings- och innovationsverksamhets portfölj 5, Sjöfartsportföljen.

Projektet har pågått från juni 2020 till maj 2024 med en total budget på 10,7 miljoner kronor.

1.1 Syfte och mål

Projektet OSKAR syftar till att optimera sjötransporternas rutter utifrån ekonomi, miljö och säkerhet. Projektet syftar vidare till att utveckla autonom sjömätning på grunda vatten och att utveckla metoder för optimering inom sjöfartsområdet.

Projektet har följande uppsatta mål:

1. Presentera 1 förslag till beslutsstödsystem för ruttdragning.
2. Analysera resväg för minst 15 resor från A till B och jämföra restid och resesträcka före och efter projektet.
3. Verifiera (eller avskryva) möjligheten för alternativa passager längs 5 linjesträckningar som inte är officiella rutter idag.
4. Projektets resultat ska kommuniceras i en projektgemensam rapport, resultatpresentation på Transportforum, VTI-rapporter och genom att resultat av vetenskapligt värde dokumenteras i akademiska tidskrifter och konferensbidrag.

1.2 Studieområde

Studieområdet utgörs av Göteborgs södra skärgård. Området visar exempel på en befolkad skärgårdsmiljö med en befintlig nyttotrafik och som saknar större genomkorsande farleder. Studieområdet beskrivs närmare i kapitel 2.

1.3 Bakgrund

Idéen till OSKAR väcktes delvis i genomförandet av projektet ADAPT (Assuring Depth of fairways for Archipelago Public Transportation) som var ett samarbetsprojekt mellan Sjöfartsverket, Stockholms Läns Landsting (numera Region Stockholm) och Ålands Landskapsregering. ADAPT beviljades EU-finansiering genom EU:s regionala utvecklingsfond Interreg Central Baltic och pågick 2015 till 2019.

Målet med ADAPT var att utveckla och implementera säkra, tidseffektiva och bränsleeffektiva rutter för transport av människor och gods i Stockholms och Ålands skärgårdar. I ADAPT genomfördes sjömätningar i Stockholms skärgård (176 km²) och Ålands skärgård (104 km²) och utöver detta genomfördes också gemensamma workshops kring frågor som rörde upphandling och drift av kollektiv skärgårdstrafik. Resultatet från såväl sjömätningar som workshops sammanvägdes och analyserades med syfte att hitta möjligheter till besparing av bränsle och tid.

Resultatet av ADAPT blev att över hundra potentiella säkerhetsrisker identifierades längs transportkorridorerna i Stockholms skärgård och över femtio av dessa var så pass akuta att de genererade Ufs-notiser (Underrättelser för Sjöfarande). I den Åländska skärgården fanns en större möjlighet att dra om farleder och tack vare undersökningarna visade sig de alternativa rutterna kunna ge betydligt kortare restider och lägre utsläpp.

I ADAPT genomfördes sjömätningen längs befintliga farleder eller där man såg goda möjligheter för en alternativ ruttdragning. Tanken med OSKAR-projektet var att ta fram kraftigare modeller som i förväg kan användas för att se var behoven är som störst och få en uppfattning om förutsättningarna innan sjömätning sätts in. Detta för att kunna göra insatser i ett mer samhällsekonomiskt perspektiv.

1.4 Arbetspaket

Arbetet inom OSKAR delas in i följande arbetspaket

- AP 1 Projektledning. Omfattar samordningsfunktioner, rapportering och kommunikation.
- AP 2 Datainsamling och analys. Omfattar sjömätning (traditionell samt pilotprojekt med autonom), data från andra källor som AIS, incidentdata, kartmaterial.
- AP 3 Modellutveckling.
 - AP 3.1 Strukturell modellutveckling. Beskrivning av kollektivtrafiksystemets struktur med noder och länkar.
 - AP 3.2 Samhällsekonomisk modellering och kalkyl. Olika scenarier med studier av t ex restidsvinster, kostnadsbesparingar, vinster avseende klimat och miljö, säkerhetsvinster etc.
 - AP 3.3 Utveckling av detaljmodeller. Modeller för att uppskatta okända eller osäkra element.

- AP 4 Utveckling av beslutsstödsystemet. Framtagande av ett system som ska kunna fungera som en hjälp kring beslut om sjömätning av nya länkar och/eller utformning av en farled.
- AP 5 Demonstration av modellbaserat beslutsstödsystem. Slutredovisning av ett iterativt beslutsstödsystem enligt AP 4.

1.5 Rapportens upplägg

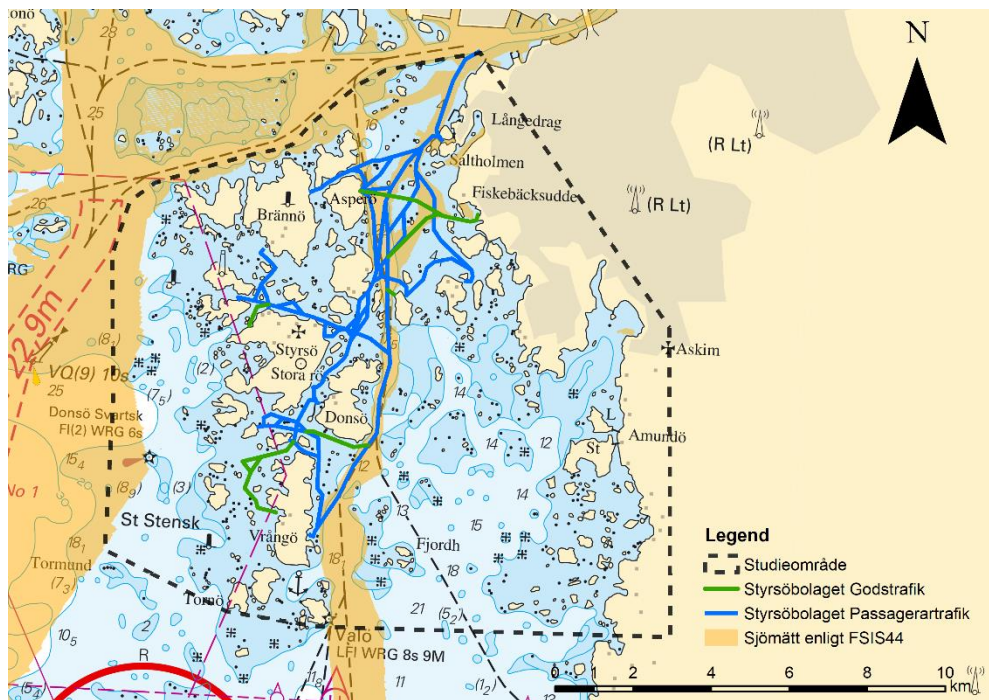
Denna rapport utgör huvudrapport för projektet. Rapporten beskriver sammanfattande de tankar som har föranlett projektet, ramarna för detsamma samt en beskrivning av den sjömätning som har legat till grund för de vidare analyser som har utförts inom projektet. Sammanfattande resultat och diskussioner kring projektets delar ges i denna rapport medan djupare resultat för AP 3 till AP 5 ges som separata rapporter (återfinns som bilagor).

2 Studieområde

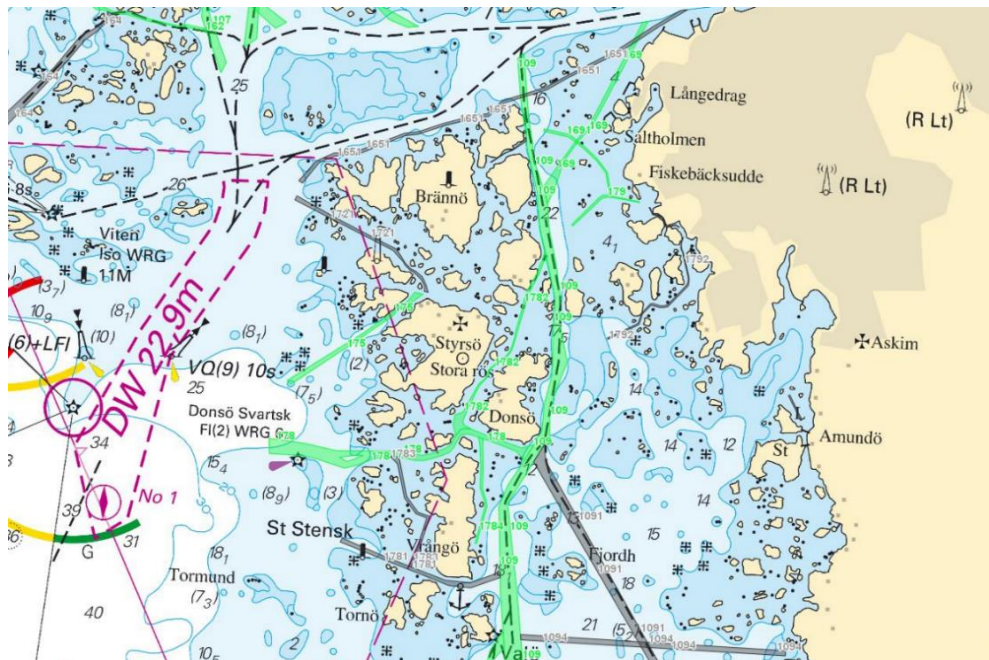
2.1 Geografisk avgränsning

Projektets studieområde utgörs av en del av Göteborgs södra skärgård som ligger direkt söder om inloppet till Göteborg och Göta älv (se Figur 2-1). De större öarna ligger huvudsakligen i en nord-sydlig riktning med Brännö längst i norr, följt av Köpstadsö, Styrso, Donsö och Vrångö i områdets södra del. De större öarna och fastlandet åtskiljs av ett mer öppet område med en bredd av omkring tre kilometer. Detta område innehåller rikligt med kobbar, skär och mindre öar.

Genom området finns inga farleder som trafikeras av de riktigt stora fartygen (huvudstråket in till Göteborg går väster därom) men flertalet mindre farleder genomkorsar området (se Figur 2-2). Det mest trafikerade stråket är farled 109 som genomkorsar området i nord-sydlig riktning.



Figur 2-1. Begränsning av studieområdet i Göteborgs södra skärgård. Figuren visar också Styröbolagets linjekarta (2020) samt det område som 2020 var modernt sjömått. Notera att kollektivtrafiken till stor del rör sig över områden som ej är modernt sjömåttade.



Figur 2-2. Farleder farledsklass 3 (grönt) samt farledsklass 4 (grått) som genomkorsar studieområdet.

2.2 Befolkning

Öarna i området har omkring 5000 fastboende invånare. Majoriteten av invånarna bor på Donsö (1500 personer), Styrso (1300 personer) och Brännö (900 personer) men även Asperö, Vrångö, Köpstadsö och Källö har en fastboende befolkning (Göteborgs Stad, 2023). Styrso utgör centralort i området och ön har också en broförbindelse med Donsö.

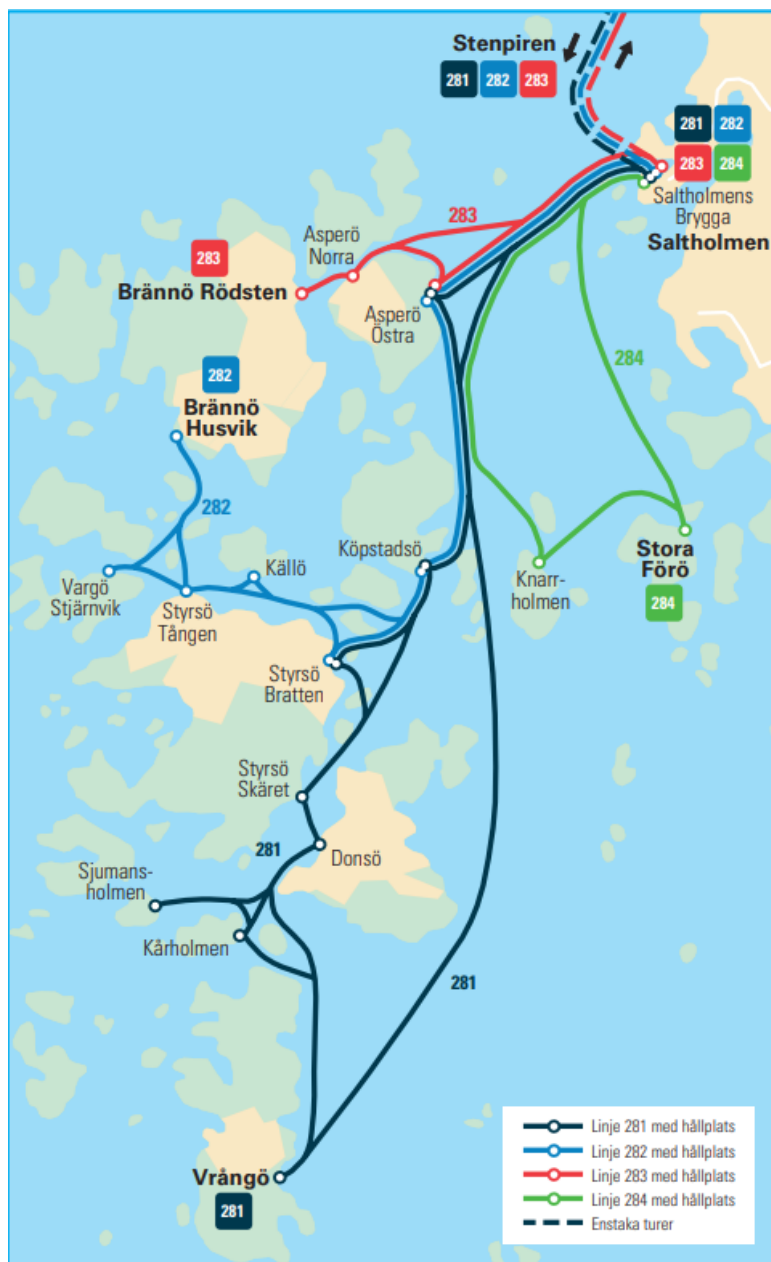
Området utgör också en populär destination för turism, framförallt sommartid, och öarnas befolkning ökar sannolikt markant under denna period, även om inga officiella siffror finns tillgängliga.

2.3 Trafik i området

2.3.1 Kollektivtrafik

Göteborgs södra skärgård trafikeras frekvent av vattenburen kollektivtrafik och nyttotrafik som sköter t ex godstransporter och avfallshantering. Under främst sommarmånaderna förekommer rikligt med fritidsbåtar.

I Västra Götalandsregionen är det Västtrafik som upphandlar operatören av den vattenburna kollektivtrafiken. Det är för närvarande Styrsobolaget som bedriver kollektivtrafiken i området genom fyra olika linjer som trafikeras från Saltholmen: linje 281 mot Donsö och Vrångö, linje 282 mot Styrso och Brännö Husvik, linje 283 mot Asperö och Brännö Rödsten samt sommartid också linje 284 mot Knarrholmen och Stora Förö (se Figur 2-3). Vissa turer är förlängda till Lindholmospiren och Stenpiren i centrala Göteborg. En resa från Saltholmen till Styrso tar ca 20-25 minuter.



Figur 2-3. Styrösöbolagets linjekarta. Med utgångspunkt från Saltholms brygga går de fyra linjerna mot Donsö och Vrångö, Styrösö och Brännö, Asperö och Brännö samt Knarrholmen och Stora Förö (Styrösöbolaget, 2023).

Styrösöbolaget använder en handfull fartyg för passagerartrafiken i Göteborgs södra skärgård, se Tabell 2-1. Djupgåendet varierar mellan 1,7 m för de tämligen nyttillverkade katamaranerna M/S Valö (se Figur 2-4) och M/S Rivö samt 3,1 m för M/S Fröja som är ett mer klassiskt skärgårdsfartyg (se Figur 2-5).

Tabell 2-1. De fartyg som vintersäsongen 2023-2024 trafikerar studieområdet (Styrsöbolaget, 2024a).

Fartyg	Längd [m]	Djupgående [m]	Byggår	Passagerare (max)
M/S Fröja	29,19	3,1	1980	382
M/S Rivö	27,09	1,7	2010	163
M/S Silvertärnan	30,22	2,2	1986	389
M/S Valö	27,09	1,7	2010	163
M/S Vesta	34,42	2,8	1998	447
Ylva	34,15	2,9	1989	447



Figur 2-4. Passagerarfartyget M/S Valö, en snabbåt av katamarantyp (Styrsöbolaget, 2024b)

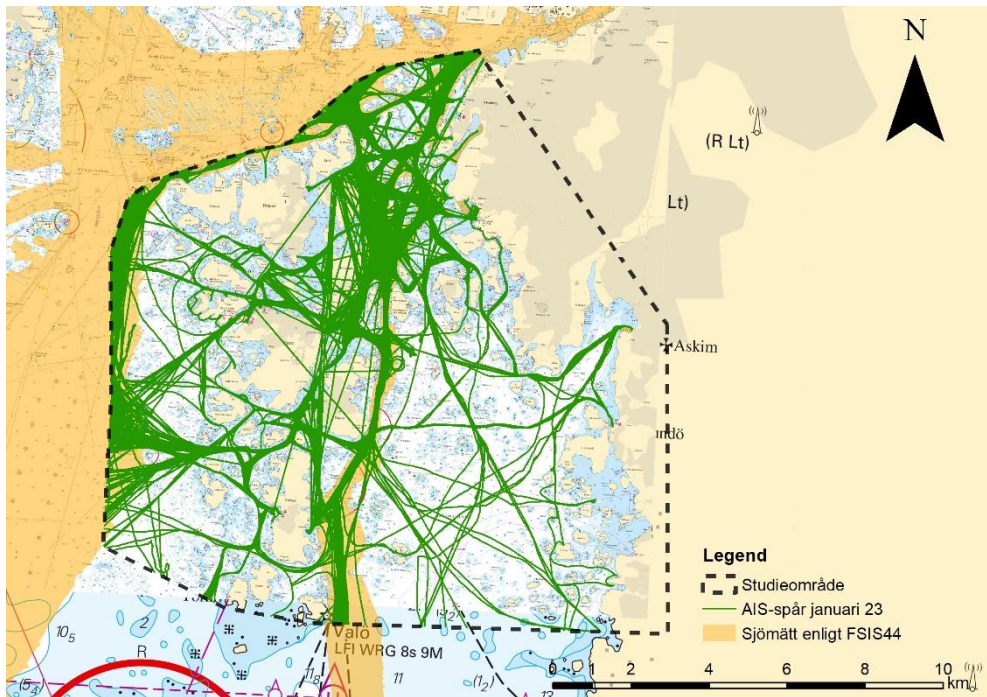


Figur 2-5. Passagerarfartyget M/S Fröja - det av Styröbolagets passagerarfartyg inom området som har störst djupgående (Styröbolaget, 2024b).

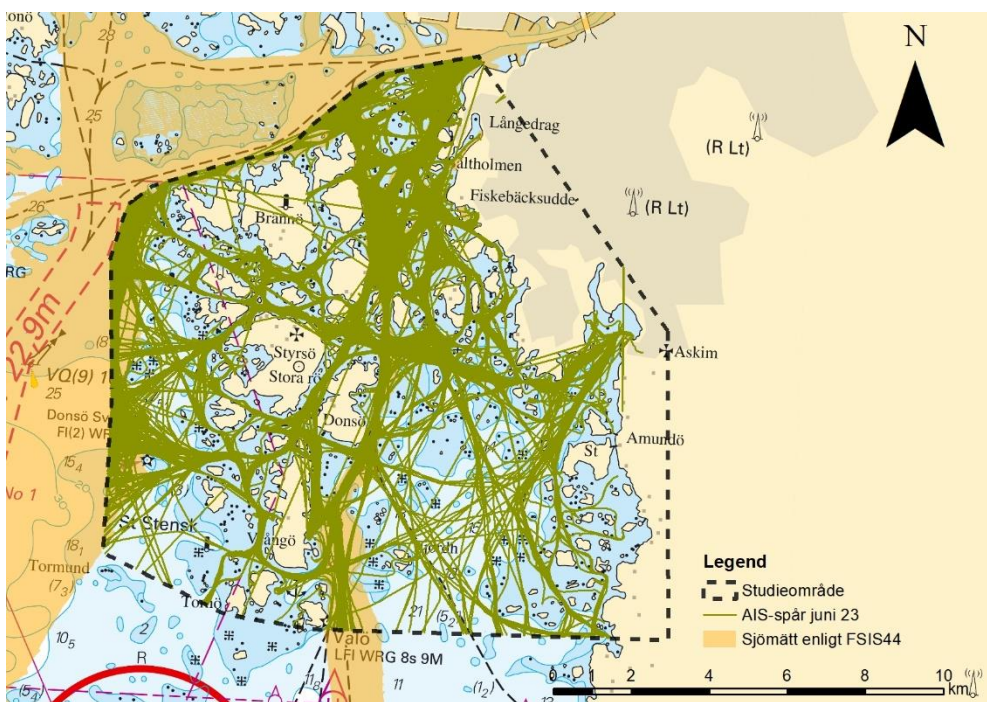
2.3.2 Allmän trafik

Göteborgs södra skärgård trafikeras frekvent av nyttotrafik och fritidsbåtar som rör sig såväl mellan öarna som mellan öarna och fastlandet. I Figur 2-6 och Figur 2-7 visas AIS-spår från nyttotrafiken i området under lågsäsong respektive högsäsong. Framförallt sommartid är trafiken utanför de farledsklassade stråken relativt riklig.

AIS (Automatic Identification System) är ett VHF-baserat system som möjliggör att identifiera och följa ett fartygs rörelse utan radar. Efter ett beslut av FN-organet IMO (International Maritime Organization) 2001 ska alla fartyg som följer SOLAS-konventionen och som är större än 300 ton vara utrustade med AIS. Genom ett EU-direktiv ska också alla fiskefartyg med en längd över 15 m sedan 2014 vara utrustade med AIS. På senare år har det också skett en omfattande frivillig installation av AIS-utrustning på mindre fartyg och fritidsbåtar (Sjöfartsverket, 2023).



Figur 2-6. AIS-spår från samtlig nyttotrafik (kollektivtrafik samt övrig yrkestrafik) inom området i januari 2023. Resmönstret är typiskt för denna typ av trafik i området i lågsäsong.



Figur 2-7. AIS-spår från samtlig nyttotrafik (kollektivtrafik samt övrig yrkestrafik) inom området i juni 2023. Resmönstret är typiskt för denna typ av trafik i området i högsäsong.

Värt att nämna är också att biltrafik är kraftigt begränsad på öarna i området och det finns inte heller någon kollektivtrafik på land.

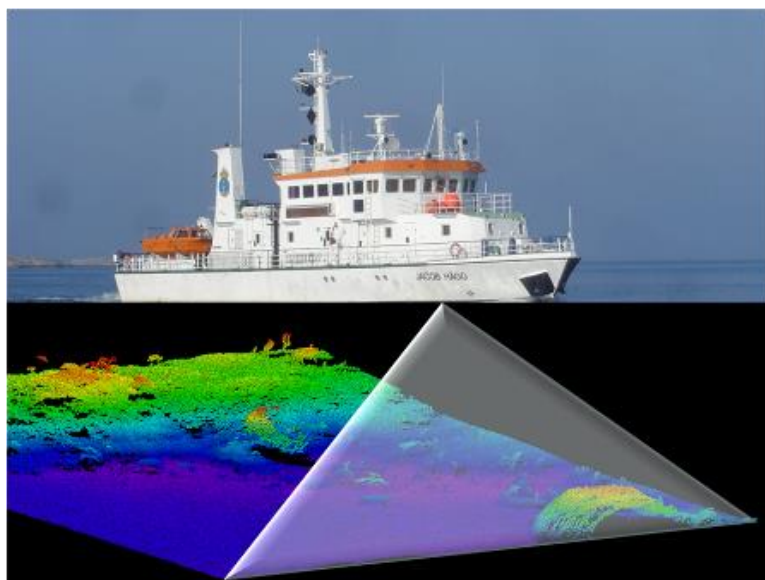
3 Allmänt om sjömätning och efterbearbetning

Sjömätning och produktionen av sjögeografiska produkter är en viktig process för att bibehålla och öka säkerheten för sjöfarande. Nedan ges en generell beskrivning av sjömätning samt processen ”Leverera sjögeografisk information” som på Sjöfartsverket inkluderar såväl sjömätningen som hela vägen fram till färdiga sjökortsprodukter.

3.1 Sjömätning

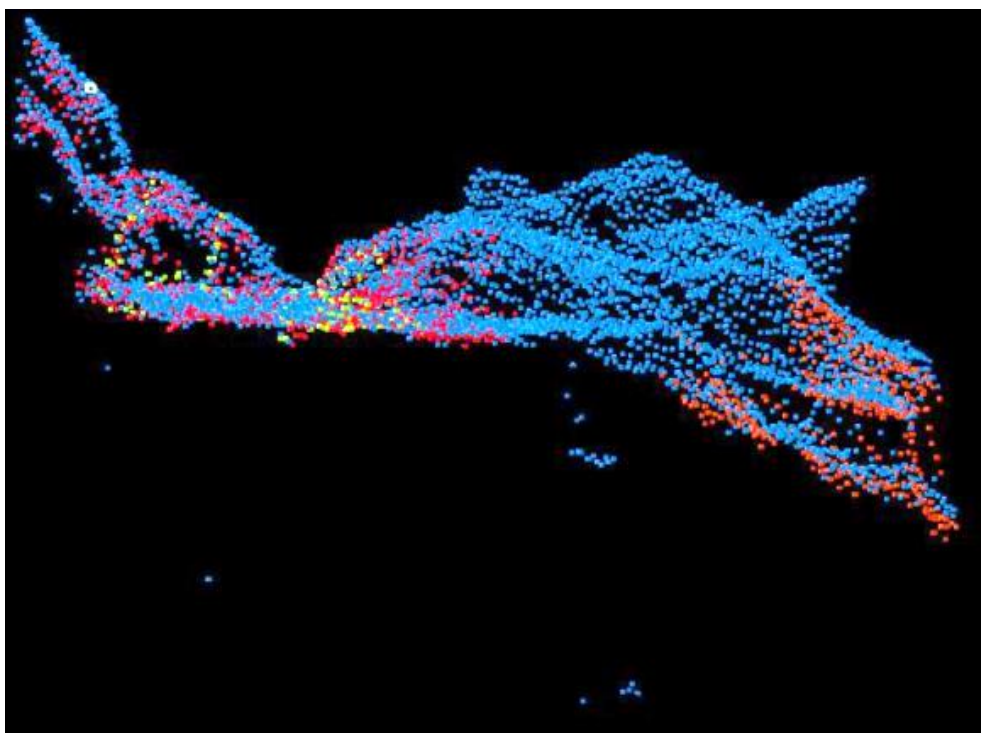
Sjömätning har bedrivits i svenska vatten sedan 1600-talet och var till en början väldigt lokal och baserad på primitiva metoder. Innan ekolodet började användas på 1930-talet skedde all sjömätning med handlod som gav ett slumpmässigt resultat beroende på var lodet släpptes ner. Likaså var möjligheten till en korrekt positionering begränsad men kom att förfinas genom århundradena.

Sedan mitten av 1990-talet utförs sjömätning med multibeam-ekolod som ger en heltäckande bild av botten. Ekolodet monteras på fartygets skrov och skickar ut akustiska signaler i ett solfjäderlikt mönster, se Figur 3-1. Strålarna reflekteras mot botten och registreras åter av mottagaren varpå djupet kan mätas baserat på tidsåtgången. Bredden på mätområdet blir ungefär 3-5 gånger djupet vilket innebär att det går betydligt fortare att skanna ett område med stort djup än ett grunt område.



Figur 3-1. Illustration av sjömätning med multibeam-ekolod.

I Figur 3-2 visas exempel på det resultat som ges vid en multibeamskanning, i form av ett stort antal mätpunkter som var och en representerar ett djup och som tillsammans skapar en heltäckande yta. I bilden syns också störningar som ter sig som djup under botten och som rensas bort i den påföljande processen med att kvalitetssäkra mätdata.



Figur 3-2. Utsnitt från mätdata där felaktiga punkter syns under botten. Dessa punkter rensas bort vid cleaningen.

Den sjömätning som Sjöfartsverket bedriver uppfyller standarden FSIS-44 vilket är den svensk-finska realiseringen av den internationella standarden S-44. Uppfyllandet av FSIS-44 ställer krav på att sjömätt data är granskat, bearbetat och har en fullständig bottentäckning.

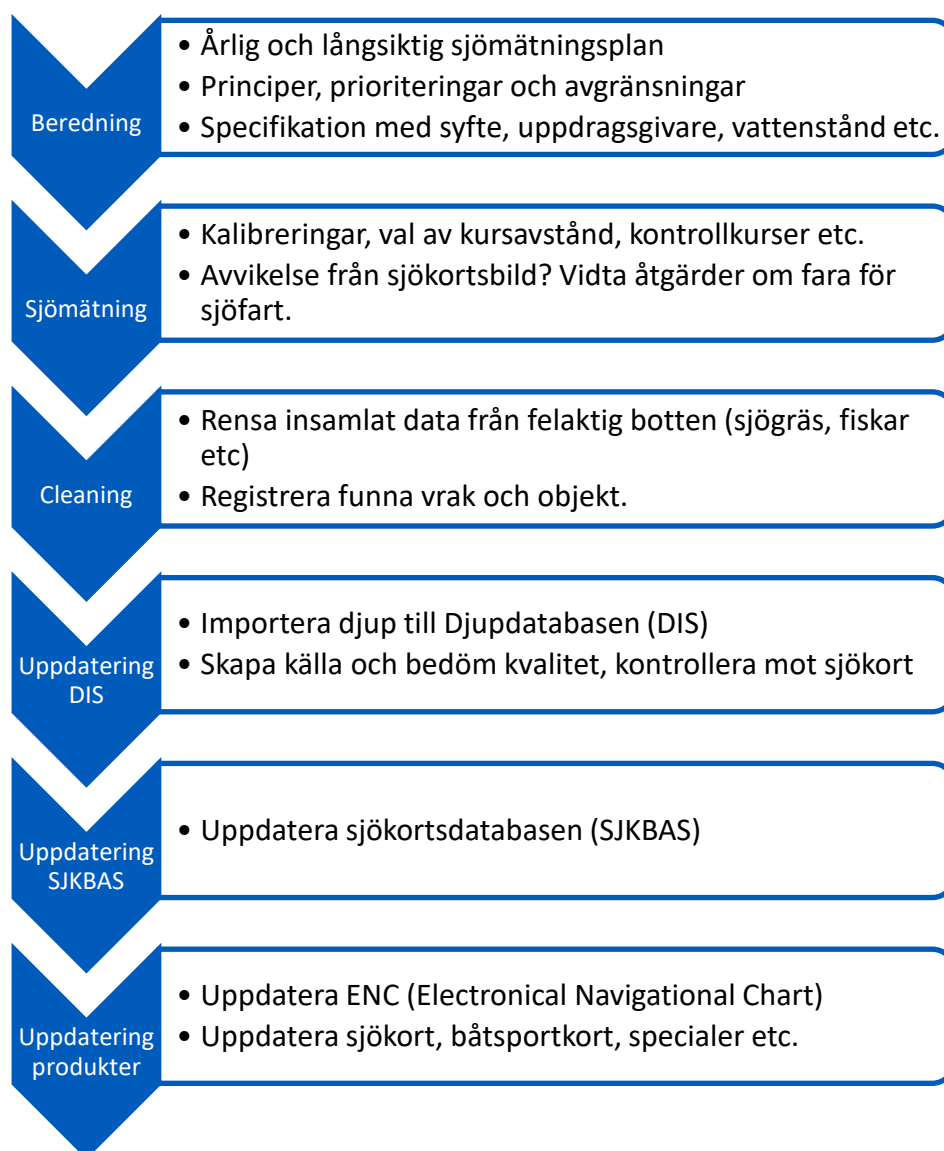
Sveriges omkring 900 farleder sjömäts regelbundet och sjömätningen finansieras huvudsakligen av farledsavgifter. Medan farlederna är nogt karterade är kvalitén på befintligt djupdata utanför dem varierad. Endast cirka fyra procent av Sveriges grunda vatten är sjömätta med moderna metoder medan mätdata för övriga ytor härrör från äldre 1900-talsmätningar eller till och med handlodningar från slutet av 1800-talet.

Sjöfartsverket äger och driver fem fartyg för sjömätning av vilka fyra är utrustade med multibeam-ekolod och ett är ett så kallat ramningsfartyg. Valet av sjömätningfartyg är beroende av mätområdets karaktär (vissa lämpar sig bättre på djupa vatten medan andra är bättre på grundare

områden). Därutöver krävs en viss samordning mellan parallellt pågående mätprojekt så att de kan genomföras med de fartyg som finns tillgängliga och gärna också utan alltför stora transportsträckor längs Sveriges långa kust.

3.2 Från sjömätning till sjökortsprodukt

Sjömätningen är endast en del av processen ”Leverera sjögeografisk information”. I Figur 3-3 visas en mycket förenklad bild över den process på Sjöfartsverket som resulterar i en färdig sjökortsprodukt.



Figur 3-3. En kortfattad beskrivning av processen från förberedelse av sjömätning till en färdig sjökortsprodukt.

Beredningen inför en sjömätning påbörjas i god tid innan en sjömätning ska genomföras. Fältarbetet planeras vanligtvis in under kommande sjömätningssäsong, som sträcker sig från mars till december. Hur lång tid sjömätningen tar beror av flera variabler. Generellt kan sägas att en sjömätning på öppet hav går snabbare än en sjömätning inomskärs, se Tabell 3-1, och skillnaderna kan vara ganska stora.

Tabell 3-1. Exempel på faktorer som påverkar tidsåtgången för sjömätning.

Faktor	Konsekvens
Grundare område (jämfört med större djup)	I ett grunt område tar multibeam-mätningen inte lika brett, dvs det krävs fler överfarter för att täcka ett område
Kuperad botten (jämfört med jämn botten)	En kuperad (eller stenig) botten gör att fler partier hamnar i skugga för ekolodet varpå fler överfarter krävs från olika riktningar.
Trånga sund och vikar (jämfört med stor och öppen yta)	Ett trångt område blir mer svårmanövrerat och kräver fler tidskrävande vändningar för mätfartyget.
Beväxt botten (jämfört med botten fri från växtlighet)	Vid tät växtlighet har multibeam-strålarna svårt att nå ända ner till botten vilket ger ett mer svårtolkat resultat. Detta kan förlänga efterprocesseringen av mätdata avsevärt.

Sjömätningen efterföljs av kvalitetssäkring av mätärendet och data lyfts därefter in i djupdatabasen (DIS) som våren 2023 passerade ett innehåll på 300 miljarder djup. Delmomentet omfattar också att det nya datasetet ersätter det som eventuellt har legat där tidigare och kontroll måste göras i gränsområdet mellan det nya och det gamla. Detta moment tar vanligtvis ca 1-3 månader beroende på ärendets prioritet.

Informationen i Sveriges officiella sjökort och ENC (Electronical Navigational Chart) kommer från Sjöfartsverkets sjökortsdatabas. Även sjökortsinformationen i de flesta plottrar och appar som används i fritidsbåtar kommer från sjökortsdatabasen. Denna hålls fortlöpande uppdaterad med de förändringar som Sjöfartsverket får kännedom om eller samlar in genom t ex sjömätning.

Processen från sjömätning till färdig sjökortsprodukt uppskattas generellt ta ungefär två år men variationen är stor och för närvarande dras processen med förseningar. Denna eftersläpning har flera orsaker av vilka ett systembyte samt ett pågående projekt med referensnivåbyte är de största, vilka har tagit mycket resurser i anspråk. När OSKAR-projektet avslutas våren 2024 har mätdata från hösten 2020 ännu inte bearbetats färdigt inom delprocessen ”Uppdatering SJKBAS”. Detta har förstås medfört ett hinder för utvärderingen av projektresultatet men beror av yttre faktorer som ej har varit möjliga att påverka.

3.3 ENC

ENC (Electrical Navigational Chart) är officiella sjökortsprodukter i ett elektroniskt standardiserat format som, om de används i typgodkända navigationssystem, kan användas istället för tryckta sjökort. ENC kan även användas i navigationssystem som inte är typgodkända men får då bara utgöra ett komplement till tryckta sjökort. Majoriteten av alla större handelsfartyg använder idag ENC som sitt primära sjökort för navigering.

När en förändring gjorts i Sjökortsdatabasen görs ändringen snabbt tillgänglig för sjöfarten som en uppdatering av ENC samt som en notis i Underrättelser för sjöfarande (Ufs). När en ENC är uppdaterad finns den tillgänglig för nedladdning till kundens navigationssystem. Enligt den statistik som finns tillgänglig är tiden från dess att en uppdaterad ENC publiceras till att den når slutkunden cirka 6 dagar. Hur snabbt ändringar görs tillgängliga i plottrar och appar för båtsporten varierar mellan olika tillverkare och leverantörer.

3.4 Ufs-notiser

Ibland upptäcks hinder som saknas i befintliga sjögeografiska produkter men som bedöms så pass allvarliga att de bör komma till sjöfarandes kännedom utan dröjsmål. I den aktuella processen identifieras dessa ofta i samband med sjömätning eller efterprocesseringen av data men informationen kan också komma in från andra håll, t ex från allmänheten. Dessa brådskande ärenden går ut som en Ufs-notis (Underrättelse för sjöfarande) och ska läsas som ett komplement till aktuellt sjökort till dess att detta kommer i nytryck.

Notiser kan antingen sökas direkt i Sjöfartsverkets Ufs-databas som uppdateras dagligen (<https://ufs.sjofartsverket.se/>) eller läsas i de pdf-filer som publiceras varje vecka.

3.5 Tryckta sjökortsprodukter

De ordinarie papperssjökorten utkommer i nytryckt version när det finns behov av att redovisa viktiga och omfattande förändringar som inte har

kunnat beskrivas i Ufs på ett tydligt sätt. Om inga sådana förändringar skett inom det berörda området går det flera år mellan tryckningarna. Varje ny tryckning av ett sjökort innehåller samtliga rättelser som publicerats i Ufs (se 3.7) sedan föregående tryckning. Dessutom innehåller det nytryckta sjökortet ytterligare förändringar som inte påverkar sjösäkerheten och som därför inte har publicerats i Ufs. Det kan t ex handla om andra ändringar av djupinformation efter en sjömätning, korrigeringar av strandlinje och ändringar av informationen på land.

4 Fält- och efterarbete inom OSKAR

4.1 Använda enheter inom OSKAR-projektet

Nedan följer en beskrivning av de mätfartyg som har använts inom OSKAR.

4.1.1 R/V Anders Bure

Anders Bure (se Figur 4-1) är ett fartyg med en längd på 20 m och en bredd på knappt 5 m. Djupgåendet är 1,35 m och hon klarar att mäta från ett djup av ungefär 3 m. Anders Bure har vanligtvis en besättning på tre personer och det finns möjligt för dem att övernatta ombord vilket medför färre transporter och på så sätt mer tid för sjömätning (sjömätningen sker dock alltid dagtid). En av de ombordvarande personerna brukar också vanligtvis arbeta med efterprocessering av data under färd vilket möjliggör upptäckt av glipor eller felaktigheter i mätdata vilket då blir möjligt att korrigera omedelbart. Anders Bure används primärt för mätningar inomskärs.



Figur 4-1. Mätfartyget Anders Bure.

4.1.2 R/V Petter Gedda

Petter Gedda är ett fartyg med en längd på 8 m och en bredd på 3 m, se Figur 4-2. Djupgåendet är 0,5 m och hon kan mäta på ett djup från ungefär 1,5 m. Petter Gedda har en besättning på två personer och används vid sjömätning inomskärs. Jämfört med Anders Bure är Petter Gedda mer lättmanövrerad i trånga och grunda områden men erbjuder ingen övernattningsmöjlighet varför transportsträckorna ofta blir längre.



Figur 4-2. Mätfartyget Petter Gedda.

4.1.3 Skräddaren

I OSKAR-projektet har Sjöfartsverket testat en autonom mätenhet tillverkad av Linköpingsföretaget DeepVision, se Figur 4-3. Enheten döptes till Skräddaren och var vid mätning inom projekt OSKAR utrustad med ett single beam-ekolod (med möjliga frekvenser på 200 kHz eller 700 kHz) samt en sidescansonar (med frekvens 670 kHz). Skräddaren har en längd på 120 cm, en bredd på 75 cm samt ett ungefärligt djupgående på 19 cm (utan fart).

Tanken med Skräddaren är att den främst ska användas på djup om 0-3 meter och den arbetar på egen hand enligt en förprogrammerad rutt.

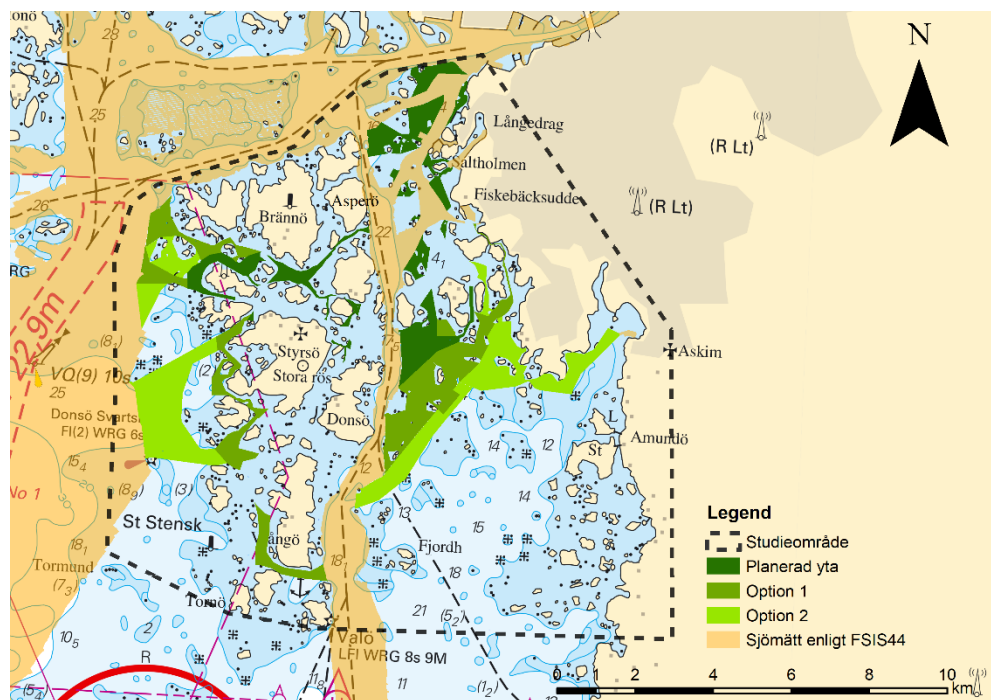


Figur 4-3. Den autonoma mätenheten Skräddaren (DeepVision).

4.2 Mätområde

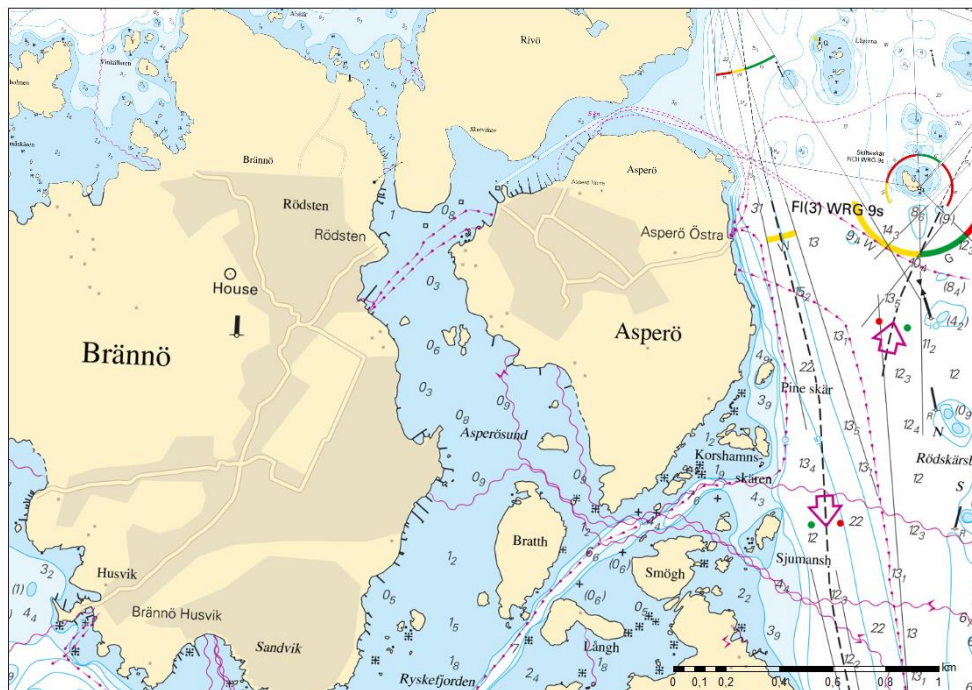
4.2.1 Planerat mätområde

Inom studieområdet i Göteborgs södra skärgård är sjökorten till största del baserade på äldre sjömätning och detaljkännedomen är begränsad. Det finns dock stråk inom området som redan tidigare har sjömätts med moderna metoder, se Figur 4-4. Inför sjömätningen var anvisningarna att där det var möjligt ”mäta in till tremeterskurvan”. Det innebär att mätenheten går så pass nära grundare partier att de fastställer den djupkurva som anger ett djup av 3 meter. Inom det utpekade studieområdet valdes ett aktuellt mätområde om ca 32 km² ut för sjömätning inom OSKAR-projektet. Området delades in i områden med tre olika prioritetsordningar, se Figur 4-4.



Figur 4-4. Planerad sjömätning inom OSKAR.

Det är sedan tidigare känt att det förmodat grunda Asperösundet mellan Brännö och Asperö (se Figur 4-5) nyttjas av sjöfarande med god lokalkännedom. Eftersom det inte har varit möjligt att mäta denna passage med de mätfartyg som Sjöfartsverket förfogar över valdes denna sträcka på 1600 m ut som testområde för den autonoma farkosten Skraddaren. Beroende på testets utfall var tanken att framöver nyttja Skraddaren inom liknande områden.



Figur 4-5. Det grunda sundet mellan Brännö och Asperö i mätområdets nordvästra del. Befintligt sjökort påvisar djup betydligt grundare än en meter.

4.2.2 Faktiskt mätområde

Sjömätningen inom det utpekade området genomfördes av R/V Anders Bure med start i slutet av juli 2020 och avetablering i mitten av september. I samband med fältarbetet kom mätområdet att utvidgas något norr om Fiskebäck, utanför Hinsholmskilen, då befintligt djupdata visade på att det var grundare än det faktiskt var. I syfte att försöka få till en bredare insegling till Hinsholmskilen mättes därför en större yta här. I tillägg till ursprungligt mätområde bestämdes också att "Eskils kanal" söder om Fiskebäck skulle sjömåtas.

Förseningar i fältarbetet till följd av väderförhållanden och mindre grundstötningar (framförallt vid mätning på grunda vatten) är inte ovanligt. Sjömätningen inom projekt OSKAR kom dock att drabbas av ovanligt många incidenter. I fältmätningens slutrapport står att läsa:

Oskar-projektet drabbades av ovanligt många haverier på dels sjömätutrustning och dels på fartyget. Vid inledningen råkade vi ut för att SVP70 inte gav oss några mätvärden från sensorn i svängar-recessen, vilket medförde tre dagars fördröjning innan lodningen kunde komma igång. Den 1/8 började SB Huvudmaskin att stoppa (men kunde komma igång efter luftning av bränslesystem), vi blev från den 2/8 liggande i 4 dagar innan felet åtgärdats. Under mätning i intilliggande område Knarrholmen uppstod i samband med bottenkänning ett behov av propellerbyte och vid varvsbesök

upptäcktes ett havererat hjärtstockslager så Anders Bure blev 6 dagar på varv (propellerbytet tog 2 av dessa dagar). Efter detta varvsbesök upptäcktes ett fel på SVP70 som plötsligt gav felaktiga värden den 19/8, denna byttes tidigt morgonen den 20 och därefter ingen ytterligare haveritid. Utöver ovanstående kan en regelbunden störning på GPS-signalen 2020-08-27 nämnas – denna störning medförde drygt två timmars avbrott i datainsamlingen.

I början på september behövdes en pump på maskin bytas och gav upphov till mer stillaliggande. Dessutom gick manöverboxen till backslaget sönder, och det blev ytterligare haveritid.

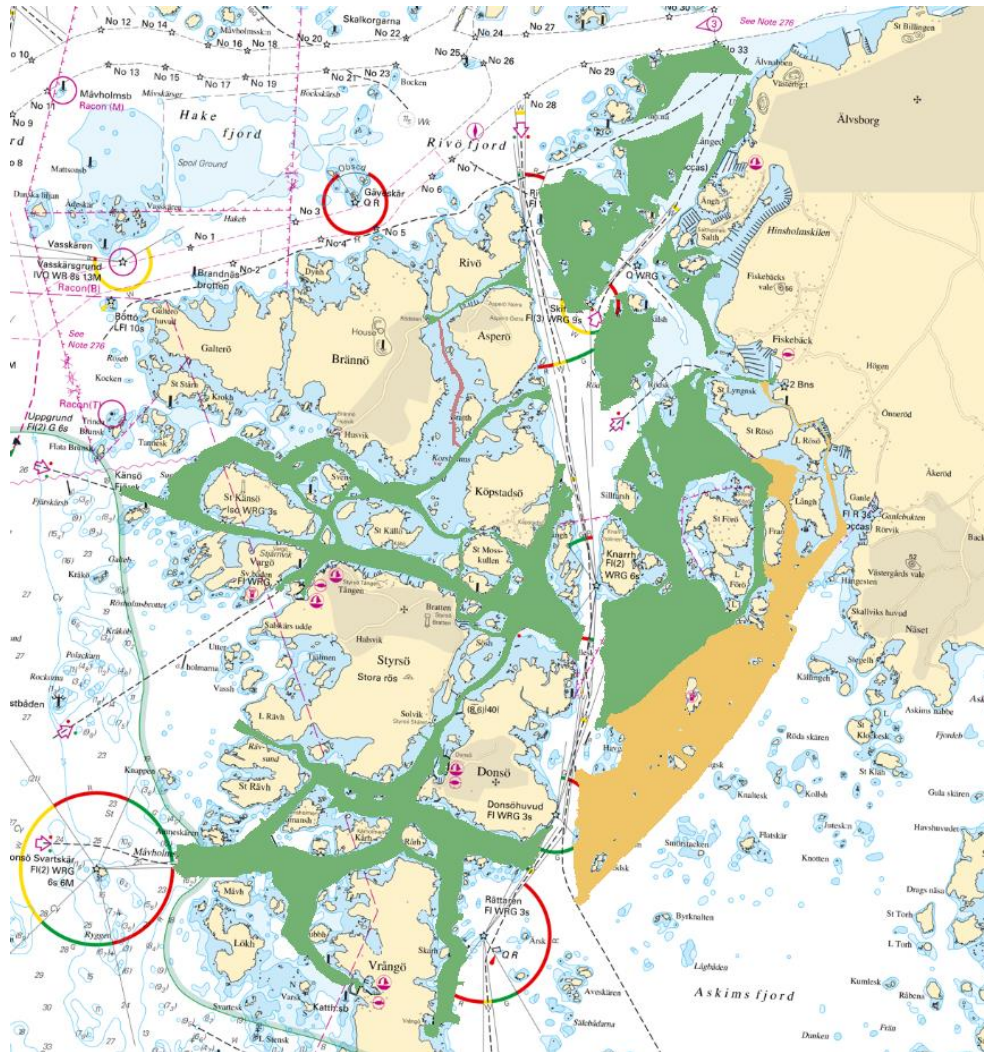
På kvällen den 13/9 upptäcktes att ljudhastighetsmätaren (SVP15 S/N 73085) gav felaktiga värden. Det upptäcktes då att sonden hade fått en skada, vilket gjorde att den gav felaktiga värden. Den trasiga mätaren skickades på reparation och byttes ut mot en annan mätare.

Då Anders Bure drabbats av så stora förseningar valde man att göra viss kompletteringsmätning med R/V Petter Gedda i november 2020. Det var dock inte möjligt att mäta hela det område som initialt varit planerat. De områden som slutligen blev sjömätta inom projektet OSKAR redovisas i Figur 4-6.

Totalt så har en yta om drygt 20 kvadratkilometer sjömätts inom studieområdet (se Tabell 4-1). Den största andelen (16 km²) har mätts med Anders Bure och ca 4,5 km² med Petter Gedda. Eftersom Skräddaren endast mäter en linje och inte en yta blir redovisningen missvisande, vilket också kommer att ses senare i rapporten.

Tabell 4-1. Den sjömätta ytan fördelad på mätenhet.

Enhet	Yta [km ²]
Anders Bure	15,97
Petter Gedda	4,54
Skräddaren	0,08
SUMMA	20,6



Figur 4-6. Mätområde. Områden mätta med Anders Bure är markerade med grönt, områden mätta med Petter Gedda markerade med gult och område mätt med Skräddaren är markerat med rött (se det smala området mellan Brännö och Asperö).

Sjömätningen i området kom att sammanfalla med den tid på året då förekomsten av tång är som störst vilket kom att påverka resultatet inom detta område som visade sig över stora ytor ha en mycket tät tångvegetation. I fältmätningens slutrapport kan läsas:

”Även en kontrollflyta vid Donsö sjömäts för att ha som jämförelseunderlag till tidigare sjömätningar med Anders Bure i projekt Oskar då de hade problem med att detektera botten pga kraftig tångförekomst. I ett försök att se om tångutbredningen varierar över säsongen samlas data in i ett kontrollområde för att kunna jämföra och se när det är lämpligast att sjömäta i vissa områden med kraftig tångutbredning.”

Det visade sig under lodningens gång att ett antal områden på djup grundare än ca 5 till 6 meter hade så tät bottenvegetation att sjömätning till eftersträvad FSIS-44 standard ej var möjlig inom utsatta tidsramar. Vidare konstateras i slutrapporterna att den största delen av botten är ”väldigt kuperad och ganska grund” samt att det på flera ställen är ”väldigt tät bottenvegetation, vilket hindrat en tydlig bottentäckning enligt FSIS-44”.

4.3 Pilotprojekt: Skräddaren

Fältförsök med Skräddaren gjordes inom ramarna för OSKAR-projektet. Tanken med Skräddaren var att den i och med sin ringa storlek och djupgående ska kunna manövreras i områden som är alltför grunda eller trånga för övriga sjömätningseenheter.

4.3.1 Studieområde

Som testområde utsågs Asperösundet mellan Brännö och Asperö, se Figur 4-7. Trots att sundet i förväg bedömdes vara väldigt grunt förekommer sjöburen trafik med grunt gående farkoster. I ett ortofoto över området kan en djupare ränna anas under vattenytan och på plats i området kunde lokal sjömärkning observeras samt fritidsbåtar som tog sig igenom sundet.



Figur 4-7. Det av Skräddaren uppmätta området i Asperösundet (bakgrundsbild Lantmäteriet, 2022)

Sjömätningen i Asperösundet genomfördes i augusti 2020. Två personer fjärrstyrde Skräddaren från land och från medföljande båt, se Figur 4-8, och hade den hela tiden under uppsikt. Det område som mättes blev betydligt mindre än vad som först hade varit planerat. Den yta som valdes att lodas

baserades på den lokala sjötrafiken samt observationer av fritidsbåtar i mitten av sundet.



Figur 4-8. Två personer fjärrstyr skräddaren ute i fält.

Sjömätningen utfördes med ett kursavstånd på en meter och i syfte att kontrollera att det uppmätta djupe var korrekt fördelades ett antal korskurser över området. Skräddaren mätte autonomt utifrån en i förväg planerad kurs. När kollisionsrisk ansågs uppkomma övergick styrningen till handkontroll och insamling av djupdata kunde fortgå.

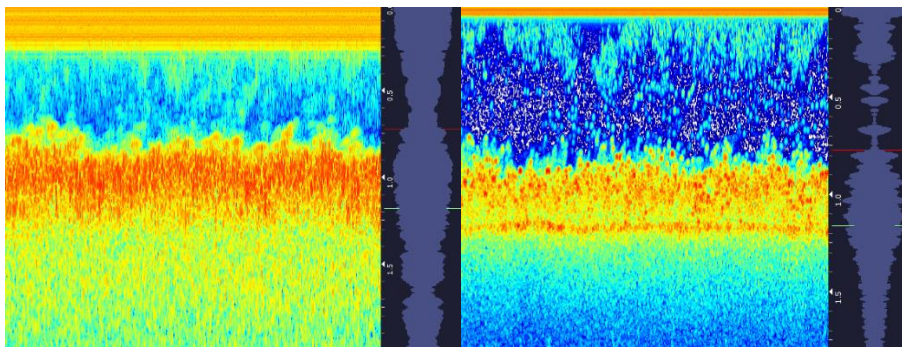
Det med Skräddaren lodade området visade sig vara mycket grunt med djup i intervallet 0,3 – 4,4 m. Botten bedömdes vara ganska platt och innehålla rikliga mängder ålgräs.

4.3.2 Svårigheter

I fältförsöket observerades ett antal svårigheter med Skräddaren:

- Överhettade motordrivare. Då fältmätningen genomfördes var det stundvis en temperatur närmare 30°C vilket medförde att det blev väldigt varmt i propellarnas motorstyrning. Leverantören hade tidigare inte varit med om detta men hjälpte till att lösa problemet.

- Ålgräs i vattenytan som fastnade i propellrarna och förhindrade framfart.
- Frodig växtlighet under vattenytan har gjort det besvärligt för ekolodet att hitta botten. Fältpersonalen har fått laborera mellan de två möjliga frekvensvalen (200 kHz respektive 700 kHz) vilket i sin tur innebär skillnad i strålens öppningsvinkel på 19° respektive 3,5°. I vissa sammanhang har frekvensvalet 200 kHz med en öppningsvinkel på 19° inneburit att den breda strålen bara lyckats få ekosvar från vegetationen. Frekvensvalet 700 kHz med en öppningsvinkel på 3,5° har däremot inneburit att den smala strålen lyckats tränga igenom del av vegetationen och ge en svag indikation av själva botten. En högre frekvens är dock mer känslig för vegetation samt partiklar i vattenkolumnen. För en jämförelse mellan de båda frekvenserna, se Figur 4-9.
- Kommunikationsproblem mellan ljudhastighetsmätaren och fältdatorn.
- Problem med gyro-beräkningen från ”GNSS-burken”.
- Utrustningen för att utföra ljudhastighetsmätning krånglade mycket under försöket. När värden har saknats har ett defaultvärde på 1500 m/s använts, att jämföra med att de angivna värdena (då utrustningen har fungerat) har varit 1474 – 1486 m/s. Detta kan teoretiskt ha inneburit ett fel på ca 25 m/s vilket i sin tur kan ha inneburit att exporterade djup blivit 3 cm för stora vid ett djup av 2 m.



Figur 4-9. Två ekogrambilder med 200 kHz till vänster och 700 kHz till höger. Färgerna representerar nivå på inkommande ljusintensitet där lila/blått är låg och orange/röd är hög. Det röda strecket som syns på den högre bilden är ekot på botten som i detta fall är mer distinkt vid den högre frekvensen.

4.3.3 Utvärdering av metoden

Beräkningar på mätdata påvisar att sjömätningssystemet är inom toleransnivåerna för aktuellt område enligt FSIS-44. FSIS-44 uppfylldes dock inte inom denna mätning på grund av brister i täckningen. Mätdata anses hålla en god kvalitet och ge en bra bild över botten i sundet.

Vid utvärdering av djupdata har det inte påvisats några särskilda tekniska problem som påverkat djupdata-resultatet. De djupskillnader på ca 10-15 cm som har upptäckts vid kontroll genom korskurser tycks ha att göra med problemet med den rikliga vegetationen i området. Mer erfarenhet hos personalen i att tolka data insamlat via Skräddaren kan troligen avhjälpa delar av detta problem.

Jämfört med sjömättingsfartygen tar Skräddaren betydligt längre tid på sig att mäta, dels för att farten bara är 2-4 knop och dels för att Skräddaren bara är utrustad med ett enda ekolod på skrovet. Den anses dock vara användbar som ett komplement till andra enheter då den når platser som övriga mätfartyg inte kan nå.

I arbetet med Skräddaren inom OSKAR har utvecklingsarbete och metodupplärning för fältpersonalen skett löpande under projektets gång. Interna instruktioner har upprättats för hanteringen av Skräddaren. Instruktionerna följer i stort samma principer som för övrig sjömätning men värt att belysa kan vara följande riskbedömning inför varje projekt där Skräddaren ska användas:

- Hur trafikerat är området?
- Finns det risk att Skräddaren fastnar eller behöver hämtas på extremt grunt vatten? Behov av liten gummibåt?
- Behövs extra varningsutmärkning? Navigationsvarning?

Vidare har man utifrån den nyss funna erfarenheten landat i följande principer för säker navigering:

- Upprätthåll ögonkontakt med farkost, var beredd att ta över med handkontroll för att styra undan från fara eller kollision (även för obemannade farkoster finns det ett "befälhavaransvar").
- Områden som anses för grunda kan ringas in genom att på förhand skapa polygoner eller att ute i fält köra med Skräddaren för att ringa in "no-go-areas".
- För att få viss uppfattning om ett område kan vara för grunt är att köra med side-scan vid sidan om och analysera bilden.

Säker hantering:

- Arbete med Skräddaren och dess kringutrustning kan innebära riskfyllda moment.
- Hantera LiPo-batterier på säkert sätt, ladda endast under uppsikt.

4.4 Kostnad för sjömätning

Mätområdet inom OSKAR kännetecknades till stor del av grunda och tångbevuxna områden med kuperade bottenar – faktorer som bidrar till en långsammare sjömätning och högre kostnad.

Inom projekt OSKAR var den ursprungliga planen att mäta nära 1 km² per dygn medan resultatet istället blev mindre än halva ytan (0,4 km² per dygn), se tabell Tabell 4-2 och Tabell 4-3.

4.4.1 Budgeterad kostnad

I detta avsnitt redovisas budgeterade kostnader för sjömätningen (inklusive efterprocesseringen) för de tre olika enheterna, se Tabell 4-2 och Tabell 4-3. Siffrorna redovisas exklusive projektspecifika indirekta kostnader och overhead. Posten för lodning inkluderar kostnader för personal, fartyg, bunker etc. Posten för efterprocessering inkluderar cleaning, kvalitetskontroll samt skrivning av slutrapport för sjömätningen.

Tabell 4-2. Budgeterad kostnad för de tre mätenheterna. Petter Gedda var inte med i budgeten men behövdes senare för kompletteringslodning.

	Dygn	Lodning [SEK]	Efterprocessering [SEK]	Totalkostnad [SEK]
Anders Bure	34	1 110 950	373 800	1 484 750
Petter Gedda	0	0	0	0
Skräddaren	20	329 192	134 400	463 592

Tabell 4-3. Budgeterad dygnskostnad för de tre mätenheterna. Petter Gedda var inte med i budgeten men behövdes senare för kompletteringslodning.

Mätenhet	Dygn	Dygnskostnad (sjömätning) [SEK]	Dygnskostnad (sjömätning samt efterprocessering) [SEK]
Anders Bure	34	32 675	43 669
Petter Gedda	0	0	0
Skräddaren	20	16 460	23 180

4.4.2 Utfall kostnad

Utfallet för sjömätningen inom OSKAR-projektet redovisas i Tabell 4-4 och Tabell 4-5. Kostnaden blev betydligt högre än budgeterat på grund av

fler dygn, kompletteringslodning samt svår bottenbevaxning vilket medförde utökad efterprocessering.

Totalkostnaden för Skräddaren blev högre än budgeterat (det tog längre tid än förväntat) medan dygnskostnaden blev lägre.

Tabell 4-4. Utfall för de tre mätenheterna. Eftersom efterprocesseringen för Anders Bure och Petter Gedda delvis sitter ihop så går det inte att särskilja de posterna.

Mätenhet	Dygn	Lodning [SEK]	Efterprocessering [SEK]	Totalkostnad [SEK]
Anders Bure	41,73	1 435 275	929 843	2 615 822
Petter Gedda	9	250 704		
Skräddaren	24	394 831	121 972	516 803

Tabell 4-5. Utfall dygnskostnad för de tre mätenheterna. Eftersom efterprocesseringen för Anders Bure och Petter Gedda delvis sitter ihop så går det inte att särskilja de posterna.

Mätenhet	Dygn	Dygnskostnad sjömätning [SEK]	Dygnskostnad (sjömätning samt efterprocessering) [SEK]
Anders Bure	41,73	34 394	51 564
Petter Gedda	9	27 856	
Skräddaren	24	16 451	21 533

För att i tabellen nedan kunna beräkna kostnader för Anders Bure respektive Petter Gedda har kostnaden för efterprocessering (som i Tabell 4-4 var gemensam för de båda enheterna) fördelats jämnt mellan dem utifrån andelen uppmätt yta. Denna uppskattning bör ge ett någorlunda rättvisande värde och ger en kostnad på 45 336 SEK/ km² för efterprocesseringen.

Tabell 4-6. Beräkning av kostnad per kvadratkilometer för de olika mätenheterna.

Enhet	Yta [km ²]	Kostnad [SEK]	Kostnad per km ² [SEK]
Anders Bure	15,97	2 159 292	135 209
Petter Gedda	4,54	456 530	100 557
Skräddaren	(0,08)	394 831	(4 935 388)

Notera att kostnaden för Skräddaren är avsevärt mycket högre än för de båda andra enheterna. Detta beror, som tidigare har förklarats, inte enbart på den tidskrävande efterprocesseringen utan också på att enheten mäter en linje och inte en yta. Siffran är därför inte jämförbar.

5 Resultat

5.1 AP 2 Datainsamling och analys

De nu sjömätta ytorna har medfört en större kunskap om djupförhållandena inom detta relativt hårt trafikerade område i skärgårdsmiljö och när resultatet presenteras i officiella sjökortsprodukter kommer de att medföra en större säkerhet för de som färdas inom området. Till följd av förseningar inom Sjöfartsverkets process ”Leverera sjögeografisk information” har informationen tyvärr inte kunnat offentliggöras inom projekttiden, annat än det som har framkommit genom Ufs-notiser. Detta, i kombination med att sjömättningsdata är sekretesskyddat, har varit ett hinder för projektets genomförande och det har medfört svårigheter att använda resultatet i projektet på det sätt som initialt var tänkt. De aktörer som ansvarar för upphandling och organisation av kollektivtrafiken inom studieområdet har inte varit partners i projektet och mätdata har därför inte kommit dem till del under projekttiden. Detta kom att utgöra en stor skillnad gentemot det föreliggande ADAPT-projektet.

Den information om djupförhållandena som har tillkommit genom OSKAR-projektet har använts i modellutvecklingen inom AP3 och inom projektets genomförandetid har endast preliminära resultat kunnat tas fram. Exempel på dessa visas i avsnitt 5.1.1. De upptäckter som har ansetts vara mest akuta för sjöfarande presenteras i kapitel 0 om Ufs-notiser.

I Tabell 5-1 visas max-, medel- och minidjup för de fyra olika delområdena som mätområdet har delats in i.

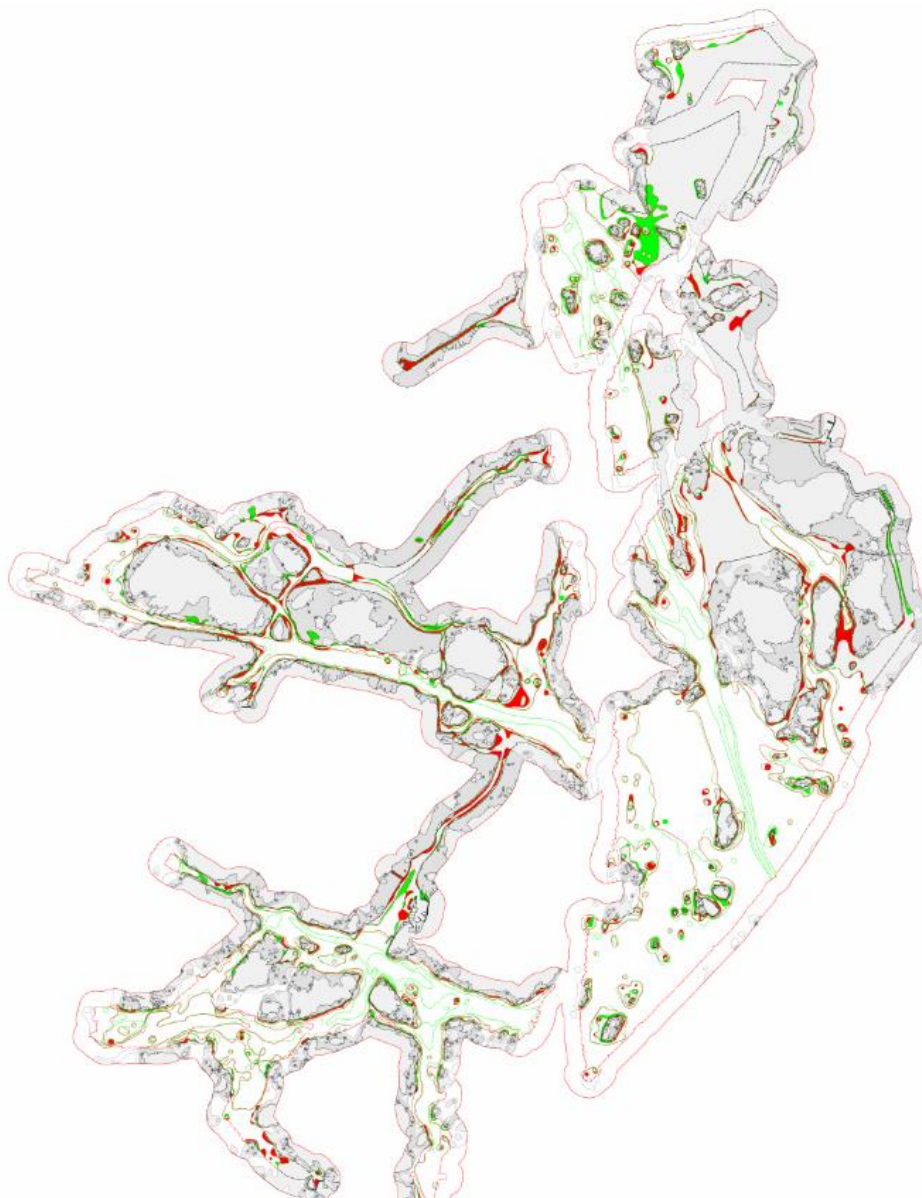
Tabell 5-1. Max-, medel- och minidjup för de olika områdena och med de olika mätenheterna.

SjöV-ärende	Enhet	Max [m]	Med [m]	Min [m]
Styrsö	Anders Bure	-1,09	-10,89	-33,02
Knarrholmen	Anders Bure	-2,24	-9,42	-27,62
Klävern	Petter Gedda	-0,81	-9,8	-23,64
Asperösund	Skräddaren	-0,55	-1,56	-4,4

5.1.1 Nya kunskaper om botten

I Figur 5-1 visas en preliminär skillnadskarta som visar hur batymetrilinjerna i området sannolikt kommer att ändras i kommande sjökortsprodukter. De röda ytorna är de som har visat sig vara djupare än

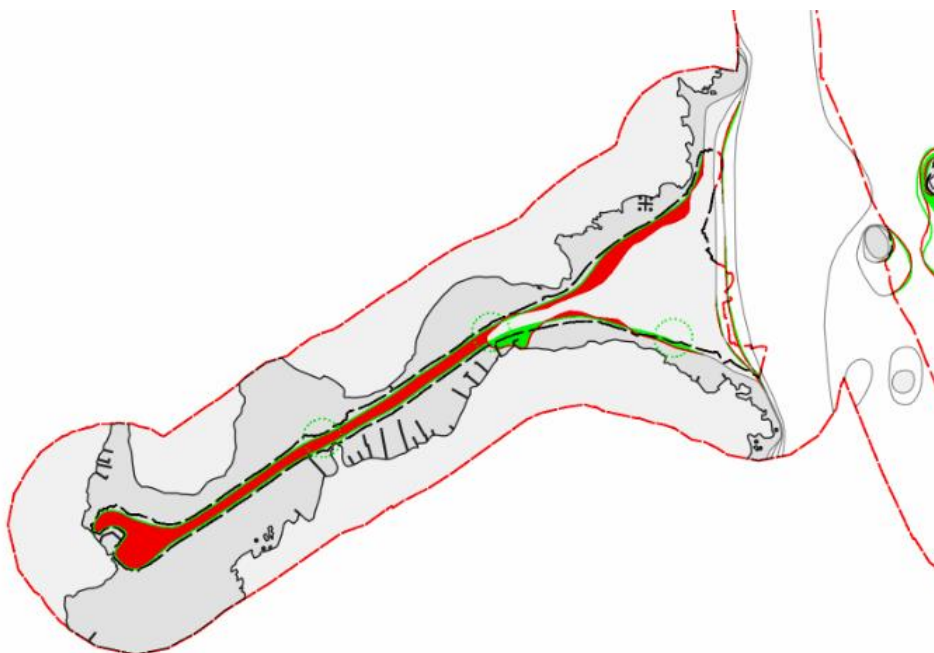
vad aktuellt sjökort indikerar och gröna ytor är de som tvärtom har visat sig vara grundare. Vidare är de röda linjerna gamla batymetrilinjer medan gröna är nytillkomna.



Figur 5-1. Preliminär skillnadskarta som visar hur de nya sjömätningarna bedöms påverka batymetrilinjerna i området: röda ytor är de som har visat sig vara djupare än vad aktuellt sjökort visar och gröna ytor är de som tvärtom har visat sig vara grundare. Vidare är de röda linjerna gamla batymetrilinjer medan gröna är nytillkomna. Mer detaljerade utsnitt ges i kommande figurer. Notera att den enskilt största gröna ytan i figurens övre del till stor del sammanfaller med det område där flest grundstötningar har anmälts.

Asperösundet

Rutten in mot Brännö Rödsten (mellan Asperö och Rivö) har visat sig vara djupare än vad befintligt sjökort visar, se Figur 5-2. Data från Skräddaren (vidare söderut i sundet) redovisas inte här men förhoppningen om att längs det 1600 m långa mätområdet i Asperösund hitta djupare områden som skulle kunna motivera att muddra en ny led kunde inte infrias: sundet var grunt nästan överallt.

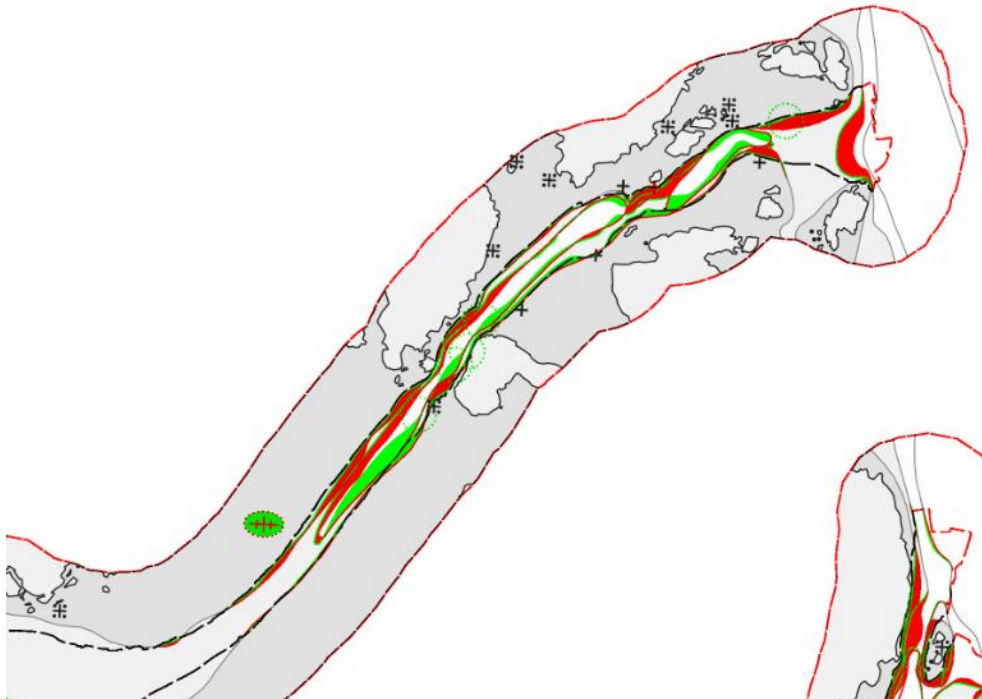


Figur 5-2. Detalj av Asperösundet (mellan Asperö och Rivö) som till stora delar har visat sig vara djupare än sjökorten tidigare har angivit. Röda ytor indikerar större djup än vad som tidigare är känt, gröna ytor indikerar mindre djup. Data från Skräddaren i den södra delen av sundet redovisas ej här.

Sundet mellan Köpstadsö och Asperö

Sundet mellan Köpstadsö och Asperö är farbart och nyttjas såväl av fritidsbåtar som av kollektivtrafiken, om än i begränsad omfattning. Sundet är trångt och grundare partier förekommer.

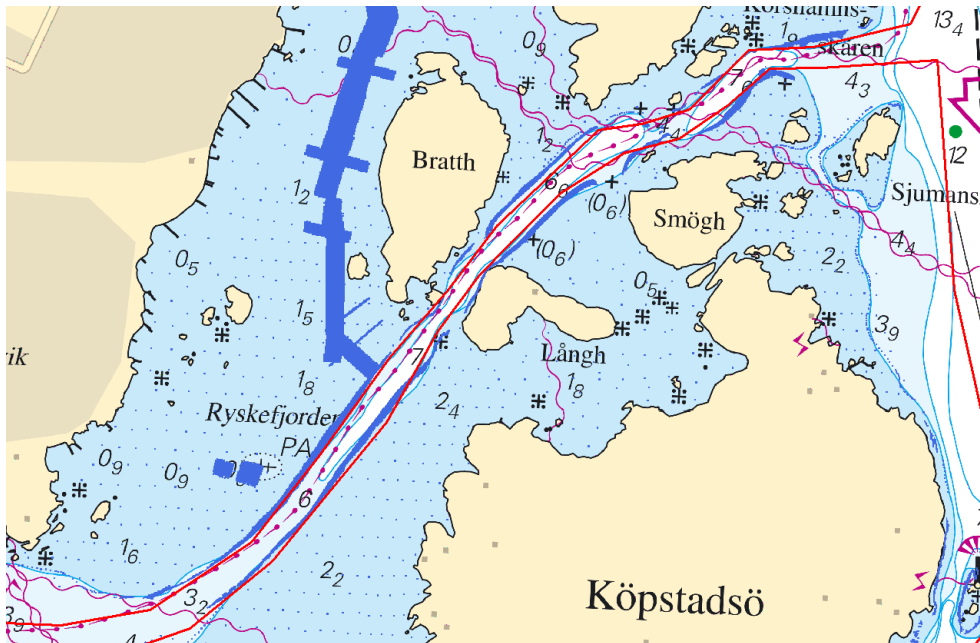
Den preliminära skillnadskartan (se Figur 5-3) visar att den norra sidan av sundet är djupare än vad som tidigare har varit känt medan den södra sidan tvärtom är något grundare.



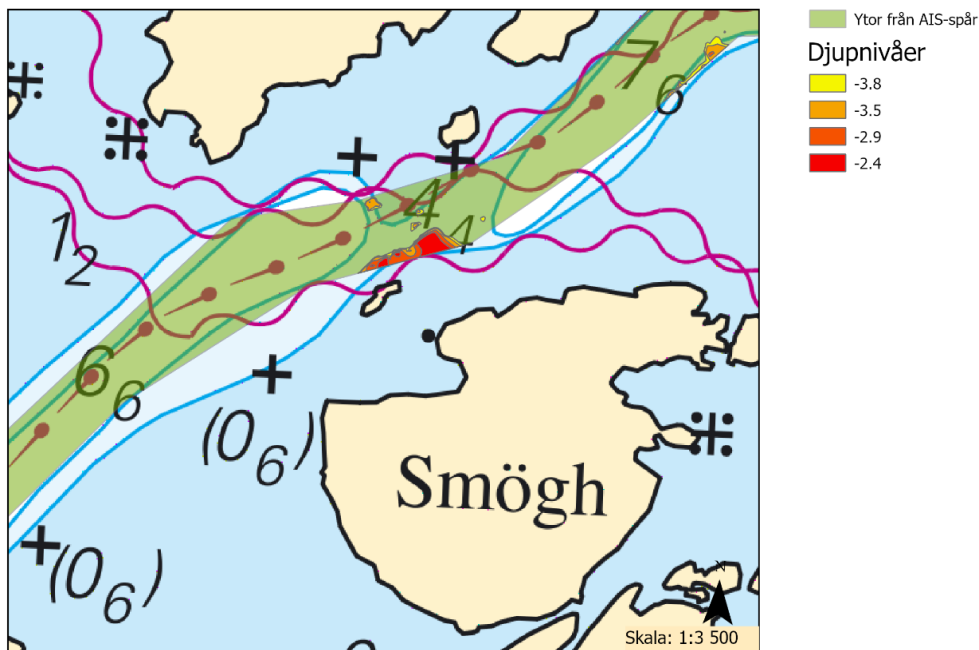
Figur 5-3. Detalj av sundet mellan Köpstadsö och Asperö. Röda ytor indikerar större djup än vad som tidigare är känt, gröna ytor indikerar mindre djup.

En analys av de ytor som trafikeras av kollektivtrafiken i området har gjorts med avseende på uppmätt djup. Som djup valdes 3,8 m vilket är djupet för Styröbolagets mest djupgående fartyg M/S Fröja samt en säkerhetsmarginal på 0,7 m. I Figur 5-4 visas sundet där sjömätta ytor grundare än 3,8 m är markerade med en blå färg.

Sjömätningen visar att ett fartyg med M/S Fröjas djupgående inte kan passera sundet utan risk för grundstötning norr om Smögholmen (se Figur 5-5). Det preliminära mätresultatet indikerar dock att fartyg med mindre djupgående bör kunna nyttja sundet.



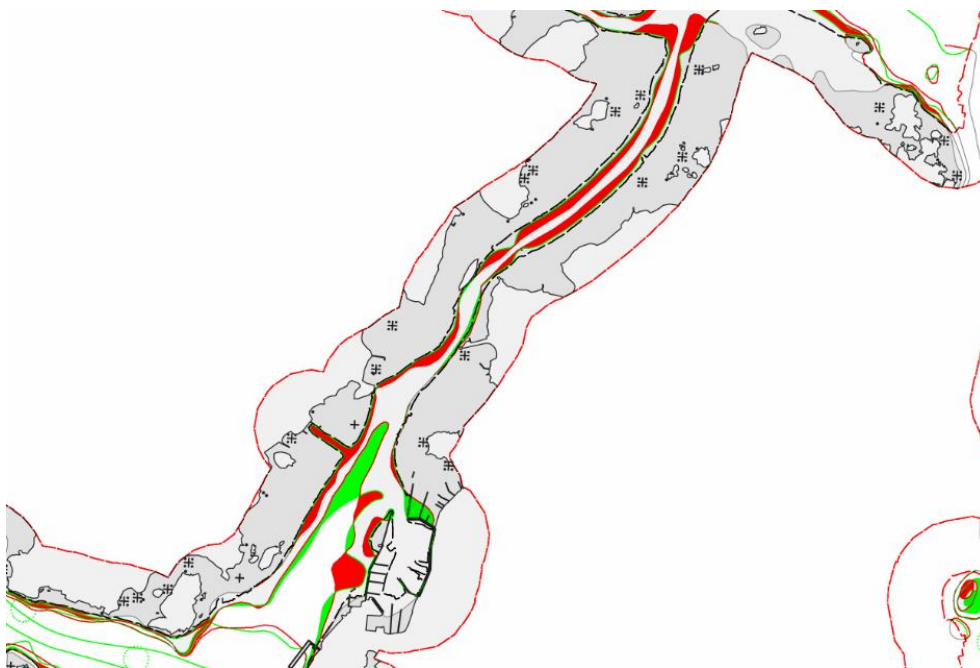
Figur 5-4. Sundet mellan Köpstadsö och Asperö där sjömätta ytor grundare än 3,8 m visas med en blå färg. Den röda begränsningslinjen indikerar ungefärligt ytan som brukar nyttjas av Styröbolagets fartyg.



Figur 5-5. Detalj av sundet, direkt norr om Smögholmen. De valda djupen korrelerar med djupgåendet på Styröbolagets fartyg med en säkerhetsmarginal på 0,8 m. Det gröna området indikerar ungefärligt ytan som brukar nyttjas av fartygen.

Sundet mellan Styrösö och Donsö

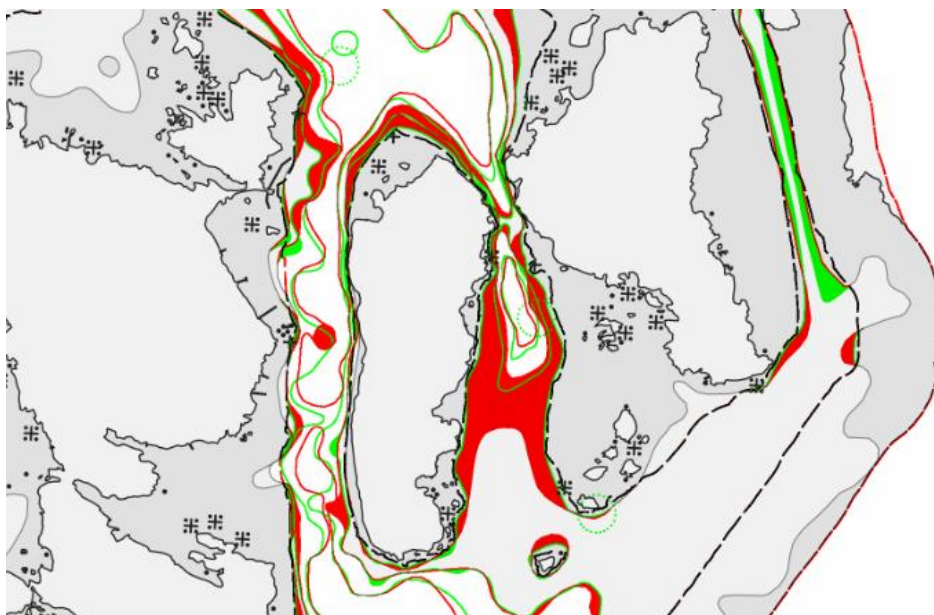
Sundet mellan Styrösö och Donsö är flitigt trafikerad av kollektivtrafiken i området. Den nya sjömätningen (se Figur 5-6) visar att djuprännan i mitten är bredare än vad som tidigare har redovisats. Strax sydost om Styröskäret kommer 6-meterskurvan kortas av: där är det istället något grundare än vad som tidigare har varit känt men detta bedöms inte påverka kollektivtrafiken.



Figur 5-6. Detalj av sundet mellan Styrösö och Donsö. Röda ytor indikerar större djup än vad som tidigare är känt, gröna ytor indikerar mindre djup.

Franholmen

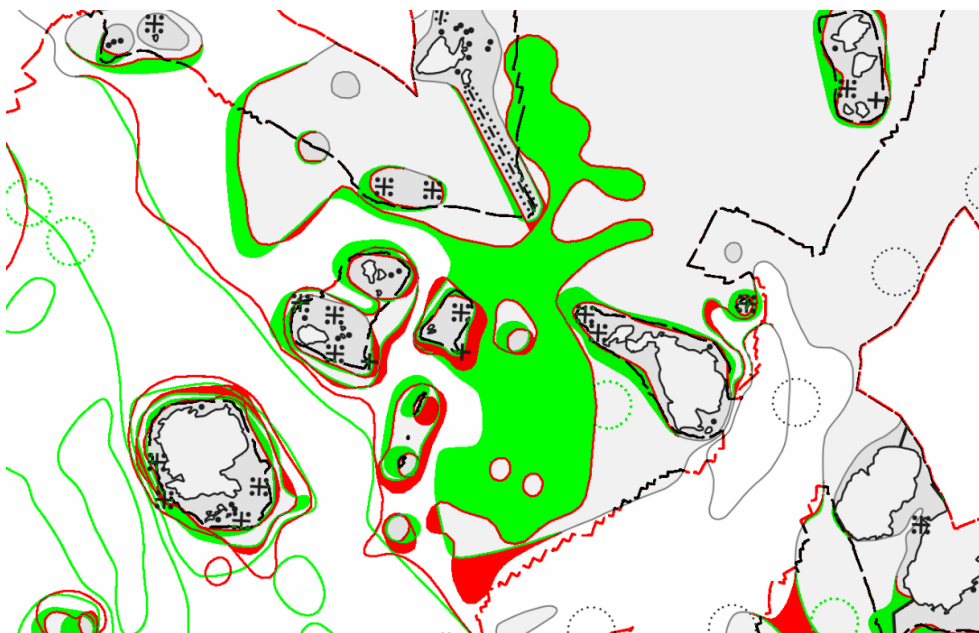
Sunden på varsin sida om Franholmen trafikeras sparsamt av kollektivtrafiken i området (ej i offentliga turer). Den nya sjömätningen har kunnat påvisa större djup än vad som tidigare har varit känt.



Figur 5-7. Detalj av sunden väster och öster om Franholmen. Röda ytor indikerar större djup än vad som tidigare är känt, gröna ytor indikerar mindre djup.

Stångerholmen – Rövarna – Lerholmen

Området som ungefärligt begränsas av öarna Stångerholmen, Rövarna och Lerholmen, i den norra delen av studieområdet, har i den nya sjömätningen visat sig vara grundare än vad som tidigare har varit känt, se Figur 5-8.

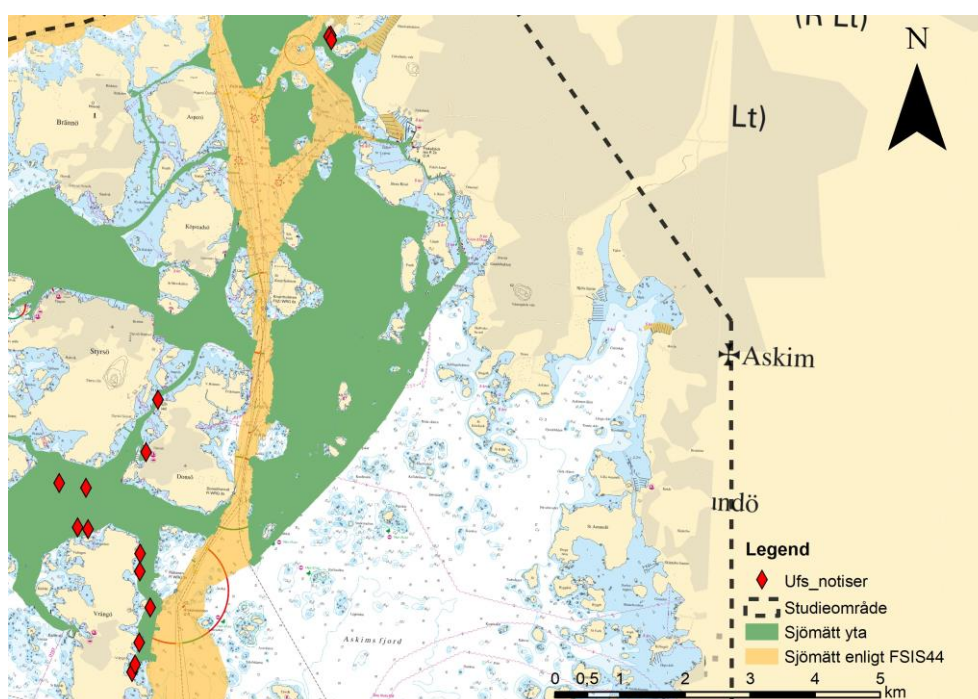


Figur 5-8. Detalj av området kring Franholmen, Rövarna och Lerholmen. Röda ytor indikerar större djup än vad som tidigare är känt, gröna ytor indikerar mindre djup.

5.1.2 Ufs-notiser

Vid sjömätningen inom projektet OSKAR uppkom ett mindre antal Ufs-notiser. Dessa finns främst i Donsösund, runt Kårholmen samt längs Vrångös ostsida, se Figur 5-9. Samtliga områden är rikligt trafikerade av såväl kollektivtrafik som annan trafik och det är av denna anledning man har tagit beslutet att dessa avvikelser gentemot sjökortet bör föranleda Ufs-notiser.

Varje Ufs-notis beskrivs mer detaljerat nedan med de bilder och text som ingår i notiserna.



Figur 5-9. Detalj av studieområdets nordöstra del och som visar de Ufs-notiser som har publicerats i samband med sjömätningarna inom OSKAR-projektet.

15145/ Sverige. Kattegatt. Styrso. Donsöbron. Ändrade djupuppgifter.

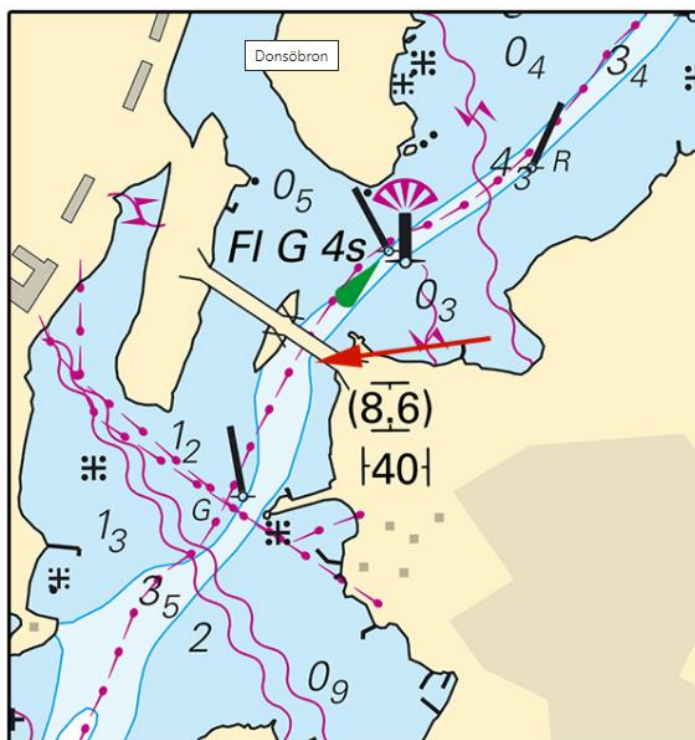
Berör Sjökort 931, 9313

En sjömätning i sundet mellan Styrso och Donsö har påvisat andra djup än vad som redovisas i sjökortet. Den viktigaste förändringen redovisas nedan, samt i sin helhet i nästa tryck av berört sjökort.

Ändra 3m djupkurva så att den innesluter position a).

Publicerad i Ufs-häfte 2020:819, situationstid 2020-08-05 tills vidare.

Bilden som publicerades i samband med Ufs-notisen visas i Figur 5-10.



Figur 5-10. Bild bifogad till Ufs-notis 15145.

15185/ Sverige. Kattegatt. Göteborgs södra skärgård. Vrångö. Djupuppgifter. Undervattenstenar. Utmärkning.

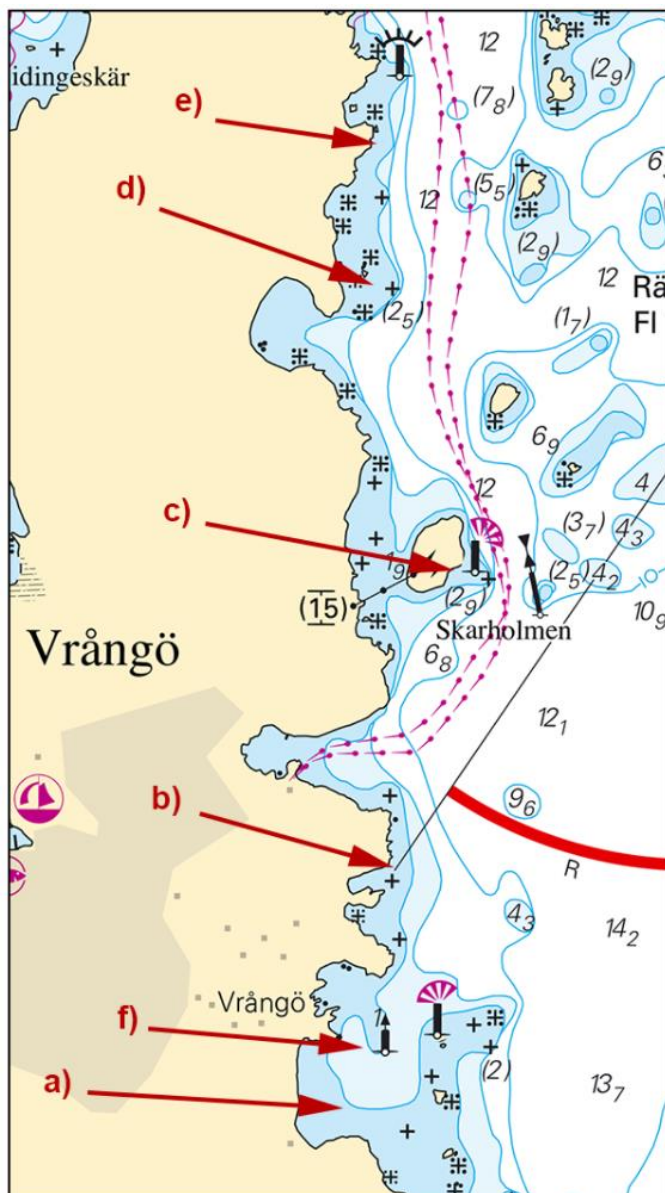
Berör Sjökort 931, 9313.

En sjömätning vid Vrångö har påvisat andra djup än vad som redovisas i sjökortet. Den viktigaste förändringen redovisas nedan, samt i sin helhet i nästa tryck av berört sjökort.

Ändra 3m djupkurva så att a) innesluts. Ändra 3m djupkurva så att b) innesluts. Inför undervattensten position c) samt ändra 3m djupkurva så att c) innesluts. Inför undervattensten position d) samt ändra 3m djupkurva så att d) innesluts. Ändra 3m djupkurva så att e) innesluts. Ersätt flytande utmärkning med fast styrbordsmärke med topptecken.

Publicerad i Ufs-häfte 2020:821, situationstid 2020-08-18 tills vidare.

Bilden som publicerades i samband med Ufs-notisen visas i Figur 5-11.



Undervattensstenar och ändrade djupkurvor. Vrångö.

Figur 5-11. Bild bifogad till Ufs-notis 15185

15218/ Göteborgs södra skärgård

Notisen avbruten. Orsak: Mindre uppdateringar av djupkurvor. Ingen notis anses nödvändig.

15250/ Sverige. Kattegatt. Göteborgs skärgård. Aspholmarna. Djup.

Berör Sjökort 9312

Ändra 3m djupkurva enligt sjökortsbild mellan a) – c), koordinater angivna i notisen.

Publicerad i Ufs-häfte 2020:829, situationstid 2020-09-03 tills vidare.

Bilden som publicerades i samband med Ufs-notisen visas i Figur 5-12.



Ändrad djupkurva vid Aspholmarna

Figur 5-12. Bild bifogad till Ufs-notis 15250.

15281

Notisen avbruten. Orsak: Ingen notis nödvändig för sjömätningssuppdateringarna.

15426

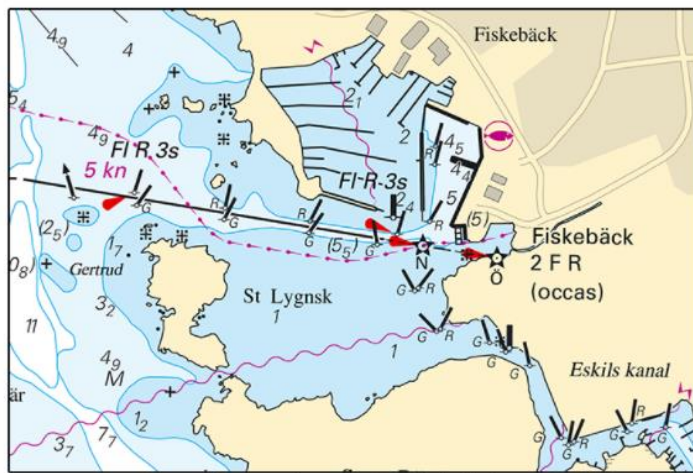
Berör Sjökort 9313

Prickarna som märker ut farleden in till Fiskebäck har fått korrigerade positioner.

Flytta styrbordsprick ca 35 m väst till a). Flytta styrbordsprick ca 20 m sydväst till b). Flytta babordsprick ca 20 m sydväst till c). Flytta styrbordsprick ca 20 m sydväst till d). Stryk styrbordsprick e). Koordinater angivna.

Publicerad i Ufs-häfte 2020:835, situationstid 2020-11-10 tills vidare.

Bilden som publicerades i samband med Ufs-notisen visas i Figur 5-13.



Figur 5-13. Bild bifogad till Ufs-notis 15426.

16567/ Göteborg. Donsö. Styrso. Vrångö. Djup.

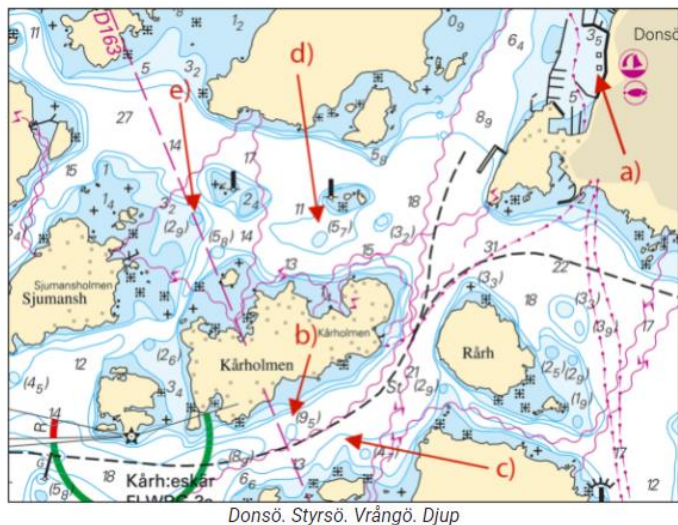
Berör Sjökort 9313.

En sjömätning i Göteborgs skärgård har påvisat andra djup än vad som redovisas i sjökortet. De viktigaste förändringarna redovisas nedan i tabellform, samt i sin helhet i nästa tryck av berört sjökort.

Inför dykdalber enligt sjökortsbild a). Ändra djup 9,9 till 9,5 och justera djupkurva b). Ändra 10 m djupkurva enligt bild c). Ändra djup 6,3 till 5,7 med omslutande 6 m djupkurva d). Ändra djup 3,9 till 2,9 med omslutande 3 m djupkurva e). Koordinater är angivna.

Publicerad i Ufs-häfte 2022:905, situationstid 2020-02-14 tills vidare.

Bilden som publicerades i samband med Ufs-notisen visas i Figur 5-14.



Figur 5-14. Bild bifogad till Ufs-notis 16567.

5.1.3 Autonom sjömätning på grunda vatten

Mätningarna med Skräddaren visade på en potential för att kunna komplettera ordinarie mätenheter inom grunda områden. Detta kan vara värdefullt inom projekt som rör kustzonsmiljö som t ex utsläppsspridning eller stranderosion.

Testkörningarna inom OSKAR påvisade vissa utmaningar och efter att mätningarna genomfördes har vissa förbättringar av enheten utförts. Den största uppdateringen är att Skräddaren har utrustats med en så kallad Ekoram (se Figur 5-15). Ekoramen gör att Skräddaren kan mäta med upp till fyra lod med ett inbördes avstånd på 0,5 m. Detta innebär att en bredare korridor med fyra parallella profiler kan samlas in samtidigt och att ytan kan sjömätas mer effektivt. Det går fortfarande att mäta med sidescan efter omkoppling av sensorer.

Den programvara som används för utvärdering av rådata utvecklats och blivit något mer automatiserat, samt att algoritmer bättre hanterar data med svagt ekosvar av botten i områden med tät vegetation. I samband med uppgraderingen försvann möjligheten att mäta med två olika frekvenser och Skräddaren mäter nu enbart med 700 kHz vilket är den frekvens som har visat sig vara mest användbar.



Figur 5-15. Skräddaren visad bakifrån uppdaterad med totalt fyra ekolod.

5.2 AP 3.1/AP 3.3 Modellutveckling och AP 4 Modellutveckling av beslutsstödsystemet

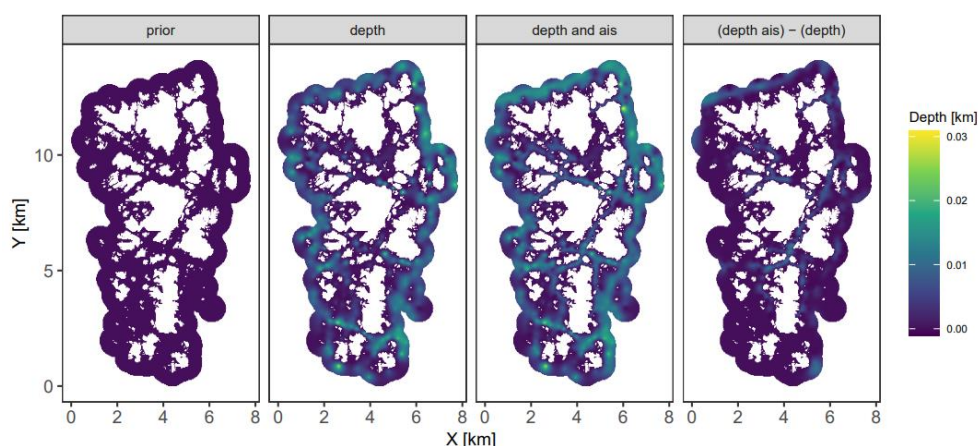
En stor del av arbetet inom AP3 Modellutveckling och AP4 Utveckling av beslutsstödsystemet har genomförts som ett licentiatprojekt med en doktorand. Doktoranden Michael Sederlin har delat sin arbetstid mellan VTI och LiU och har varit handledd av Gunnar Flötteröd och Tomas Lidén, båda vid VTI och LiU. Den framtagna avhandlingen fokuserar på arbetspaketen AP3.1 Strukturell modellutveckling, AP3.3: Utveckling av detaljmodeller samt AP4: Utveckling av beslutsstödsystemet. De båda förra resulterade i en vetenskaplig artikel med fokus på djupmodellering och de båda senare resulterade tillsammans i en vetenskaplig artikel med fokus på optimal linjedragning. Resultatet av dessa båda arbetspaket redovisas i separata bilagor (se bilaga A och B), men delges i en sammanfattning inom detta avsnitt.

Skärgårdar är landsbygdsområden där vattnet utgör en fysisk begränsning som separerar samhällen och påverkar tillgången till samhällstjänster. Det gör ett väl fungerande vattenburet kollektivtrafiksystem till det enda realistiska sättet att möjliggöra god tillgänglighet, såväl mellan de olika öarna som mellan öarna och fastlandet. Marina miljöer erbjuder en stor flexibilitet i ruttplaneringen men kan begränsas av föråldrade eller oprecisa sjökort, vilka också kan medföra risker för den vattenburna kollektivtrafiken.

Den genomförda avhandlingen utvecklar metoder för att förbättra den strategiska planeringen av transportsystem inomskärs och möjliggör

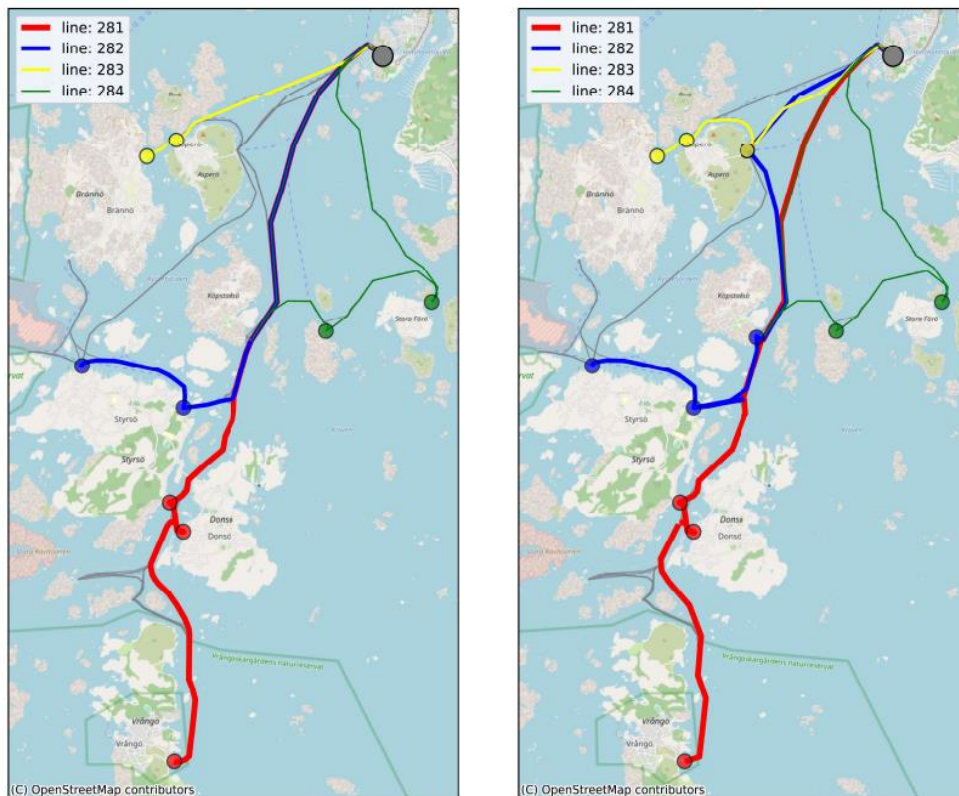
värderingen av nya farleder. Bidrag ges inom tillämpad forskning inom optimering och rumslig statistisk modellering som tar hänsyn till de särskilda egenskaperna skärgårdsmiljöer besitter.

För att förbättra skattningen av hur farleder används har en datamodell utvecklats som kombinerar traditionella djupdata med registrerade AIS-spår. Med hjälp av så kallad probabilistisk modellering och överlevnadsanalys har en rumslig interpolering gjorts av de två kvalitativt olika informationskällorna. För att hantera de stora datamängderna i AIS-data samt icke-stationäriteten i studieområdet (där förekomsten av öar orsakar hål) har en diskretiserad modelleringsansats använts.



Figur 5-16. Exempel på olika djupmodeller framtagna inom detta arbetspaket utifrån djupdata och AIS-spår. Figuren visas i sitt sammanhang och beskrivs närmare i bilaga A.

I det andra steget utvecklas en optimeringsmodell för kombinerad nätverksdesign och schemaläggning av färjetrafiken. Modellen, som baseras på en modifierad ruttplaneringsmodell med flera resor, inkluderar många av de karakteristiska drag för skärgårdstrafik som identifierats och erbjuder möjlighet att utvärdera för närvarande otillgängliga korridorer med fasta öppningskostnader. Resultaten visar att faktorer såsom trafikeringskrav, driftskostnader och fordonsflottans sammansättning bör tas i beaktande vid värdering av nya farleder.



Figur 5-17. Exempel på analyser av möjliga linjer för kollektivtrafiken i området. Figuren visas i sitt sammanhang och beskrivs närmare i bilaga B.

Sammanfattningsvis pekar modellen på hur förbättrad djupinformation kan hjälpa till att härleda möjliga transportkorridorer som inte finns med i sjökorten. Den presenterar vidare en metod för inferens av sådana farleder baserad på faktiska fartygstrajektorier och utvecklar i nästa steg en optimeringsmodell som i ett helhetsgrepp bedömer deras värde i kollektivtrafiksystemet.

5.3 AP 3.2 Samhällsekonomisk analys

Resultatet från den samhällsekonomiska analysen redovisas i en separat rapport, se bilaga C. Nedan ges en sammanfattning av dess innehåll.

Utgångspunkten för projekt OSKAR är att moderna sjömätningar förbättrar informationen om sjöbotten och sjökorten, något som potentiellt kan användas för att 1) förbättra sjösäkerheten, 2) reducera kostnaderna för kollektivtrafiken, vilket i sin tur innebär lägre behov av offentliga medel och/eller lägre biljettpriser och/eller kortare restider, 3) minska fartygens bränsleförbrukning och utsläpp och 4) förbättra underlagen som används för att planera det framtida kollektivtrafikutbudet.

För att mätningarna i det 20 km² stora området studerat inom OSKAR ska vara samhällsekonomiskt lönsamma måste de årliga nyttorna överstiga Sjöfartsverkets årliga kostnader på cirka 174 000 kr. Överslagsmässigt är detta givet om två grundstötningar (som leder till fartygsskador på sammanlagt ca 200 000 kr per år) kan undvikas. Säkerhetsnyttor kopplade till personalen och trafikanterna på dessa två fartyg och säkerhetsnyttor relaterade till andra fartyg, miljön med mera kan tillkomma.

De samhällsekonomiska nyttorna är potentiellt stora för kollektivtrafikens fartyg som genomför 65 % av trafikarbetet i "OSKAR-området". Nyttoberäkningarna kräver dock tillgång till detaljerade kollektivtrafikdata, något som OSKAR-projektet inte har. Nyttor kan även uppkomma genom att bränsleförbrukningen och utsläppen av de andra fartygen reduceras.

Myndigheterna kan använda informationen om sjöbotten för att utnyttja den befintliga maritima infrastrukturen på ett effektivare sätt och att identifiera lönsamma infrastrukturprojekt. En övergripande fråga är i vilken utsträckning en bättre samordning av sjömätningarna kan bidra till att minska kostnader för de olika sektorerna och samhället i stort.

Projektet visar att det finns ett behov av att utveckla effektsambanden och de monetära värderingarna av materiella skador och miljöskador till följd av sjöolyckor. Avseende data är en fråga hur potentialen för öppna, användbara och tillgängliga data över hav och kustområden förhåller sig till Försvarmaktens behov att begränsa möjligheten att dela data om sjöbotten. Ytterligare en fråga rör finansieringen av sjömätningarna, det vill säga i vilken grad sjömätningar ska finansieras via skatter, sålda sjökort, respektive avgifter för skraddarsydda tjänster.

5.4 Övergripande resultat och måluppfyllnad

När projektet inleddes fanns en tro på att detaljerad information om kollektivtrafiken inom området skulle vara mer tillgänglig än vad den visade sig vara. Detta gäller t ex information om antal resenärer mellan olika bryggor, bränsleförbrukning, eventuella grundstötningar och kostnader för dessa. Då detta inte har funnits tillgängligt för projektet har det medfört att resultaten har blivit av mer teoretisk karaktär än vad som först var tänkt. Vidare har det också varit ett hinder att processen med att tillgängliggöra djupdata har varit försenad inom Sjöfartsverket. Därför har mätresultaten inte kommit de aktörer som bedriver kollektivtrafiken till del och de nyttiga diskussioner som kunde ha framkommit ur detta har uteblivit.

Vid sidan av detta bedömer vi att projektet trots allt har lyckats relativt väl med sin måluppfyllnad och kan presentera ett bra underlag för fortsatt arbete när och om nödvändig information finns att tillgå.

Mål 1 – ett förslag på beslutsstödsystem för ruttdragning

Projektet har lyckats presentera ett förslag på ett beslutsstödsystem genom en modell som i ett första steg skapar en batymetri genom interpolation av befintligt djupdata och som vidare föreslår ruttdragning utifrån givna randvillkor.

Mål 2 - analysera resväg för minst 15 resor från A till B och jämföra restid

Detta mål har inte gått att uppfylla till följd av brister i tillgängligt indata. De framtagna modellerna bedöms dock kunna användas för detta ändamål om mer detaljerat indata tillgängliggörs.

Mål 3 - Verifiera (eller avskrivna) möjligheten för alternativa passager längs 5 linjesträckningar som inte är officiella rutter idag.

Detta mål har inte till fullo kunnat uppfyllas till följd av brister i indata. Preliminära indata antyder dock att alternativa rutter kan avskrivas eller delvis verifieras enligt Tabell 5-2.

Tabell 5-2. Lista över de passager som inom projektet har avskrivits eller (delvist) verifierats.

Rutt	Status	Kommentar
Asperösundet (södra)	Avskrivs	För grunt
Sund mellan Asperö och Köpstadsö	Delvis verifierad	Tillräckligt djupt för vissa fartyg.
Sund väster om Franholmen	Delvis verifierad	Djupare än tidigare känt. Oklart hur det kommer att påverka.
Sund öster om Franholmen	Delvis verifierad	Djupare än tidigare känt. Oklart hur det kommer att påverka.

Mål 4 – kommunikation av projektet

Ett urval av den kommunikation som har gjorts av detta projekt, utöver denna projektgemensamma projekt, ges enligt nedan.

- Identification of Feasible Routes for Waterborne Public Transport, 28 oktober 2021, Norrköping, PhD-konferens organiserad av Linköpings universitet.

- Projektpresentation med intressenter, 20 september 2022, Göteborg, Workshop inom projekt OSKAR
- Estimation of spatial sea depth field for waterborne public transport planning, 18 oktober 2022, Lund, Svenska Transportforskningskonferensen.
- An approach for combining ship movement data with bathymetric knowledge in near-coastal transportation planning, 27 oktober 2023, Söderköping, PhD-konferens ordnad av Linköping University
- A Bayesian sea depth model for waterborne public transport planning, 15-17 maj 2023, Lissabon, The Young Researcher Seminar 2023 av ECTRI.
- Estimation of near coastal bathymetry using AIS ship movements, 20 juli 2023, Montreal, The World Conference for Transportation Research (WCTR) 2023
- A Multiple Trip Vehicle Routing Approach to Ferry Service Network Design, 24-28 september 2023, Bilbao, The 26th IEEE International Conference on Intelligent Transport Systems
- A Multiple Trip Vehicle Routing Approach to Ferry Service Network Design With Unused Corridors, 16-17 oktober 2023, Stockholm, Svenska Transportforskningskonferensen
- A Multiple Trip Vehicle Routing Approach to Ferry Service Network Design with Unused Corridors, 27 oktober 2023, Norrköping, PhD-konferens anordnad av Linköpings universitet.
- Methods for Bathymetry Informed Planning of Archipelago Transport Systems, 3 juni 2024, Norrköping, Licentiatseminarium

6 Referenser

Göteborgs stad (2023), e-post från Jessica Engström, Stadsledningskontoret
Göteborg, 2023-09-28

Lantmäteriet (2022), ortofoto

Sjöfartsverket (2023), Frågor och svar om AIS-data,
<https://www.sjofartsverket.se/sv/tjanster/transporter-och-farleder2/bygg-och-teknik/fragor-och-svar-om-ais-data/>

Styrsöbolaget (2023),
<https://styrsobolaget.se/upload/styrsobolaget/pdf%20kartor/Linjekarta%20281-284.pdf>

Styrsöbolaget (2024a), e-post från Christian Hallberg, Styrsöbolaget 2024-05-24

Styrsöbolaget (2024b), <https://www.styrsobolaget.se/om-oss/fartyg>

Bilaga A

Estimation of near-coastal bathymetry using AIS ship movements



World Conference on Transport Research - WCTR 2023 Montreal 17-21 July 2023

Estimation of near-coastal bathymetry using AIS ship movements

Michael Sederlin^{a,b}, Gunnar Flötteröd^{a,b}

^aLinköping University, Bredgatan 33, Norrköping 60 221, Sweden

^bThe Swedish National Road and Transport Research Institute, Malvinas Väg 6, Stockholm 114 28, Sweden

Abstract

In near coastal environments, nautical charts provide crucial information for navigation and routing both in real-time operations and during planning stages. Cost of data collection as well as capacity constraints in the processing pipeline make reliable bathymetric information in such areas sparse. Prioritization rules can help guide the efforts to where information is the most valuable. AIS data provide accounts of real ship movements, indicating both desirable paths and minimum depths. We propose a statistical model for combining sparse bathymetric soundings with AIS observations for improved prediction of depths for generation of feasible transportation corridors. The method relies on viewing AIS draughts as censored observations of the true depth. A case-study is performed for the southern archipelago of Gothenburg using the program R-INLA. The non-stationarity caused by having boundaries with known (zero) depth and holes (land) in the domain is handled through discretization. Varying amounts of AIS data, ranging from none to 1824 observations, are used in the experiments. Results show predicted depths within the range of data values, and that inclusion of AIS data serve to push the field down to ensure that traverseable areas are predicted as such revealing corridors in narrow passages where bathymetric soundings are lacking.

© 2023 The Authors. Published by Elsevier B.V.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the World Conference on Transport Research - WCTR 2023.

Keywords: Maritime; AIS; bathymetry; Bayesian; INLA; Kriging

1. Introduction

1.1. Outline and Context

In this work, we include ship movement data from the Automatic Identification System (AIS) in bathymetric modeling and nautical chart refinement. AIS data provides a reliable account of where and how ships with a certain draft travel. AIS data hence contains point-wise information about *minimal* sea depths. It is automatically collected and broadly available for vessels beyond a certain size. We present a method to calibrate AIS data into a bathymetric model, which demonstrates that AIS data can be used to refine/update coarse/outdated nautical charts. This is especially useful

* Corresponding author. Tel.: +46 8 555 365 11.

E-mail address: michael.sederlin@vti.se

in near-coastal environments where AIS data reveals local knowledge of the true extent of transportation corridors and useable alternative waterways which may not appear in available naval charts.

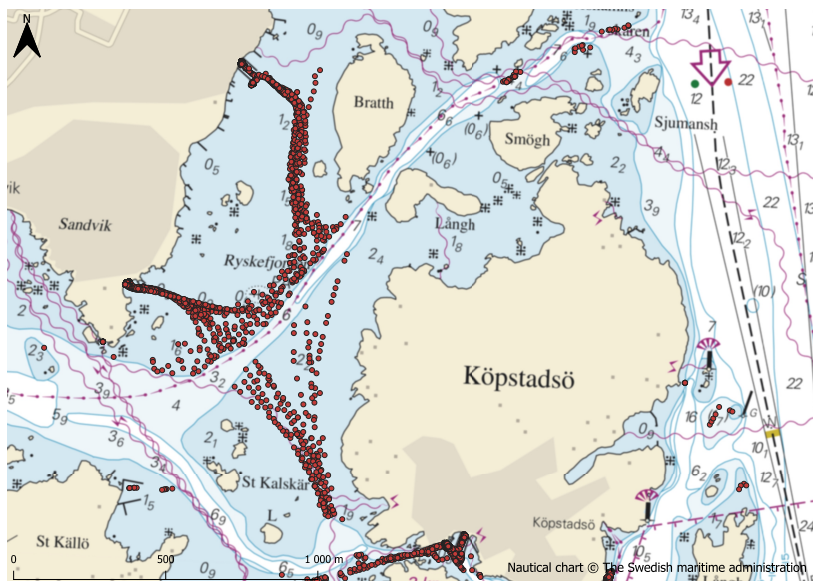


Fig. 1: Instances of ship movements conflicting with chart depth in AIS.

Figure 1 shows instances where ships disregard the depth information in the nautical chart and move through shallow waters without grounding incident severe enough for a (centrally registered) rescue operation. Such deviations can result in shorter routes but also improve maneuverability (e.g., allow for overtaking) in narrow channels. As this can reduce travel time and fuel consumption, it is important information to planners and operators of regular near-coastal ferry networks.

1.2. Background and Literature Review

Bathymetry and AIS data

Naval traffic operates on a continuous surface rather than a fixed network and relies on nautical chart information that may be constructed from old data of unknown quality. Measurements are sometimes as old as from the 19th century, collected with manual methods and imprecise positioning technologies (Sjöfartsverket, 2021). Additional factors such as sea level rise and erosion cause changes in the conditions over time, further calling into question the reliability and trustworthiness in the information provided from older nautical charts. Modern methods for nautical surveying rely on single- or multi-beam sonar to create high resolution point clouds and paint an accurate and detailed view of the ocean floor. Reliable depth information has obvious added value in transport operations such as avoiding groundings and informing more efficient routing. It can also benefit non transportation related actors such as environmental organizations, land owners, municipalities and local businesses (Wiberg et al., 2018). In near-coastal shallow areas with depths less than 10 meters, roughly 4 % were measured with modern methods in 2018 (Wiberg et al., 2018). Efforts to improve near-coastal naval charts have hence been taken by the Swedish Maritime Administration in cooperation with other actors (Wiberg et al., 2018). However, data collection campaigns are subject to capacity and funding constraints, measurement personnel availability, measurement time windows, measurement equipment as well as data processing facilities. In addition to multi-beam surveying, research in near-coastal bathymetry seek to use remote sensing technologies such as satellite imagery and data collected using airborne observers (Vahtmäe and Kutser, 2016). Mishra et al. (2014) study how the correlation between observed wavelengths and seabed topography can be used to infer bathymetry. Such methods require access to or collection of high quality imagery. In this work, we rely on readily available passive data on ship movements for inference of near-coastal bathymetry and inference of traversable corridors. Such an approach could be beneficial even in combination with remote imagery methods for detecting observably false estimates.

Systems for prioritization of survey efforts has been developed previously on a national scale. The Canadian Hydrographic Service created national priority planning tool using a multi-criteria evaluation (Eastman, 1999) for bathymetric survey prioritization (Chénier et al., 2018). It takes into account factors such as the nature of the transportation corridor, water depth, quality of existing surveys, known complexity of the sea floor, anchorage areas, historic wind speed, tidal windows, ice formation patterns, major planned projects in the area and the risk of grounding and collisions. The model aims at large scale national planning of major fairways and accounts for traffic and congestion by considering transportation corridors and the impacts on grounding and collision risks through the ship traffic density. The authors argue that a survey planning approach which uses naval corridors rather than more geographically contained areas as planning units may result in more efficient use of surveying resource. To identify and classify such corridors, ship trajectory data from the AIS data was used in combination with nautical charts in (Chénier et al., 2017). As classification principle, the relative importance of a corridor is determined with the amount and type of traffic it serves. The connection between AIS traffic data and bathymetric information in the nautical charts is used to improve positional information in the AIS data and trajectory inference where sampling is sparse.

Since 2004, the International Maritime Organization (IMO) requires all passenger ships, in addition to ships greater than 300 GT on international journeys and all ships greater than 500 GT irrespective of journey type, to transmit data in accordance with AIS regulations (Comission, 2018). AIS message contents can vary based on ship type, but generally contain a ship call sign, position, time of position and other ship characteristics such as size, draught and ship type. Details of message content and formatting requirements are provided by the International Telecommunications Union (Union, 2014). The wider use of AIS data in research is explored in Svanberg et al. (2019), most identified research falls within what could be considered consequences of maritime activities such as emissions, collisions, noise, oil spills and marine environmental impacts.

Statistical Sea Depth Modeling

Kriging is arguably the most prominent geo-statistical approach. It models the data as a random process with a continuous spatial index. Values at unobserved locations are predicted as a weighted sum of known data points. The weights which produce a best linear unbiased predictor are calculated using a covariance model parametrized by the distance between prediction location to the known locations (Cressie, 1993). Assuming a monotonically decreasing covariance function such as the Matérn function, the covariance model encodes Tobler's first law of geography, which states that similarity of data points increases with their spatial proximity (Cressie and Moores, 2021). Kriging suffers from a series of drawbacks for use with (i) large data sets in (ii) topologically complex regions.

(i) Predictions in Kriging require the inversion of a $N \times N$ covariance matrix where N is the amount of input data. This can be computationally prohibitive, in particular in settings with limited a-priori information that require a large number of data points for reliable prediction. (Banerjee et al., 2004).

(ii) The predominantly used covariance models rely on the assumption that the covariance properties are invariant to rotation and translation. This does not hold for non-continuous regions and where other distance metrics than Euclidean distances are used (Curriero, 2006) and can result in invalid covariance matrices if used naively. Such problems arise in coastal regions where the sea surface to be modeled may be ragged and surround islands. Strategies for handling both of these restrictions in Kriging are enumerated in Table 1.

Lindgren et al. (2011) tackle these problems by noting that a continuous Gaussian field with a Matérn covariance function solves a linear partial stochastic differential equation (SPDE) driven by white noise. They approximate the solution of this SPDE with a finite element method on a triangular mesh with linear basis functions. The continuous Gaussian field is exchanged for a Gaussian Markov random field (GMRF) defined on the mesh vertices. The resulting SPDE-GMRF model exploits matrix sparsity and is compatible with boundary conditions along complex (coastal) geometries. Spatial relations are modeled as interaction between mesh vertices rather than through distances between all points in space. The method is implemented in the R package R-INLA (Martins et al., 2013), which allows for fast approximate inference.

A relevant extension to the SPDE-GMRF method, called the *barrier model*, was developed by Bakka (2016). It models barrier effects in the study region through weakened correlation across boundaries to limit the information flow between locations at either side. The method of Bakka is, however, not necessary in situations where exact boundary conditions (here: zero water depth along the coast-line) are given; Bakka's original application was to estimate the spatial distribution of different species of fish, where no value which propagates from the coastal boundary can be given.

Table 1: Strategies for Kriging in cases with large data or non-Euclidean distance metrics

Methods for managing large data		
Method name	Principle	Described in
Subsampling	Reduction of data size through appropriate sampling scheme	Banerjee et al. (2004); Pardo-Igúzquiza and Dowd (1997)
Spectral methods	Transfer problem to spectral domain thus removing need for covariance matrix inversion	Stein (1999)
Dimensionality reduction	Reduction of data dimensionality through, for example, clustering	Banerjee et al. (2004)
Lattice methods	Discretization of spatial field using GMRF on regular lattices	Rue and Tjelmeland (2002); Hartman and Hössjer (2008)
Methods for managing non-Euclidean distance metrics		
Multi-dimensional scaling	Approximation of data relationships in higher dimensional space	Murphy et al. (2015); Løland and Høst (2003)
Covariance matrix approximations	Approximation of the covariance matrix through, for example, Eigenvalue tapering.	Davis and Curriero (2019)

1.3. Contribution of This Work

This article makes a threefold contribution. (1) In terms of practical application, it creates the ability to include AIS data in naval charting and navigation, taking explicitly into account uncertainties in either data source. (2) Contribution (1) is enabled by the development of a new measurement equation for the inclusion of AIS data in statistical sea depth modeling. (3) Factors relevant for application of the method are identified through a large case study using real data.

The remainder of this document is organized as follows. We provide an introduction to the geostatistical models used for combining AIS data with bathymetric observations in Section 2; this comprises a review of relevant existing modeling techniques as well as own developments. Section 3 presents results from a case study in the Gothenburg archipelago. Finally, Section 4 concludes the article by discussing the broader applicability of the method and possible directions of further development.

2. Method

This section presents a method for inferring spatially correlated depth distributions by conditioning on observed (AIS and bathymetric) data. For this, Section 2.1 recalls a tractable finite-dimensional parametrization of a spatial random field that represents the joint uncertainty at all possible depth coordinates. Section 2.2 then conditions this field (i.e. this spatial distribution) on observed (depth) data in a Bayesian framework.

2.1. Kriging and Gaussian Markov Random Fields

In a machine learning context, Kriging is also known as Gaussian Process regression (Rasmussen and Williams, 2006), which can be formulated in several distinct ways. In a probabilistic framework, as the following multivariate normal model:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 \\ \mathbf{Y}_2 \end{bmatrix} \sim \mathcal{N} \left(\begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{bmatrix} \right) \quad (1)$$

where \mathbf{Y}_1 is a vector of values at observed locations and \mathbf{Y}_2 is a vector of values at unobserved locations, which is to be predicted. μ_1 and μ_2 are the corresponding mean values. The covariance matrix Σ is a block matrix where Σ_{11} contains the covariance between the observed data points, Σ_{12} and Σ_{21} the covariance matrices between data points at observed and unobserved locations, and Σ_{22} the covariances between the unobserved and to-be-predicted data points.

Predictions are made through evaluating the conditional distribution $P(\mathbf{Y}_2 | \mathbf{Y}_1)$ which under a Multivariate Normal distributional assumption is fully determined by the following conditional mean vector and covariance matrix:

$$E[\mathbf{Y}_2 | \mathbf{Y}_1] = \mu_1 + \Sigma_{21} \Sigma_{11}^{-1} (\mathbf{Y}_1 - \mu_1) \quad (2)$$

$$\text{Cov}(\mathbf{Y}_2 | \mathbf{Y}_1) = \Sigma_{22} - \Sigma_{21} \Sigma_{11}^{-1} \Sigma_{12}. \quad (3)$$

Since Σ_{11} grow with the size of the data, calculating its inverse has a computational complexity of $O(n^3)$ which restricts Gaussian Processes and Kriging for large data sets (Rasmussen and Williams, 2006).

A commonly used model for the covariance structure is the Matérn function which models the real-valued covariance between data points at any two locations \mathbf{u}, \mathbf{v} through

$$\text{Cov}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \frac{\sigma^2}{2^{\nu-1} \Gamma(\nu)} (\kappa \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|)^{\nu} K_{\nu}(\kappa \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|), \quad (4)$$

where $K_{\nu}()$ is the Bessel function of the second order (Stein, 1999). The parameters ν and κ jointly determine how the shape of the distribution and the correlation between locations. A benefit of the Matérn covariance function is the ability to represent fields of varying degrees of smoothness, as shown in Figure 2 which shows the shape of the correlation function for different values of κ and ν and two sampled fields. The Matérn covariance function takes the Euclidean distance $\|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|$ between the considered locations into account, and is therefore invariant to translation and rotation of the underlying field.

When the considered fields are restricted to those with a Matérn covariance structure, a connection between continuous Gaussian fields and discrete GMRF with the desired correlation structure is possible (Lindgren et al., 2011). This allows the continuous fields to be approximated with the finite element method using linear basis functions. The spatially continuous field at coordinate \mathbf{u} is approximated by a weighted sum of piece-wise linear basis functions $\psi_i(\mathbf{u}), i = 1, \dots, n$. values at location \mathbf{u} are scaled by Gaussian distributed weights w_k .

$$x(\mathbf{u}) = \sum_{k=1}^n \psi_k(\mathbf{u}) w_k. \quad (5)$$

At mesh node i the value of the field is w_i , and all basis functions except ψ_i are zero.

Given a triangular mesh and the corresponding basis functions, the problem of modeling a field over continuous coordinates is hence reduced to that of modeling the joint distribution of a finite number of weights w_k . This makes an operational finite-dimensional representation of a spatial field over continuous variables available. It allows the field to be approximated by a mesh of arbitrary shape, and enable modeling of topologically complex, and non-stationary regions within a single framework. This is central to approximating sea depth fields in highly irregularly shaped and non-convex coastal regions.

Given this finite-dimensional representation of an arbitrary spatial field, the following section elaborates on how such a formulation can be adopted to (i) represent uncertain depth information and (ii) condition this information on real data.

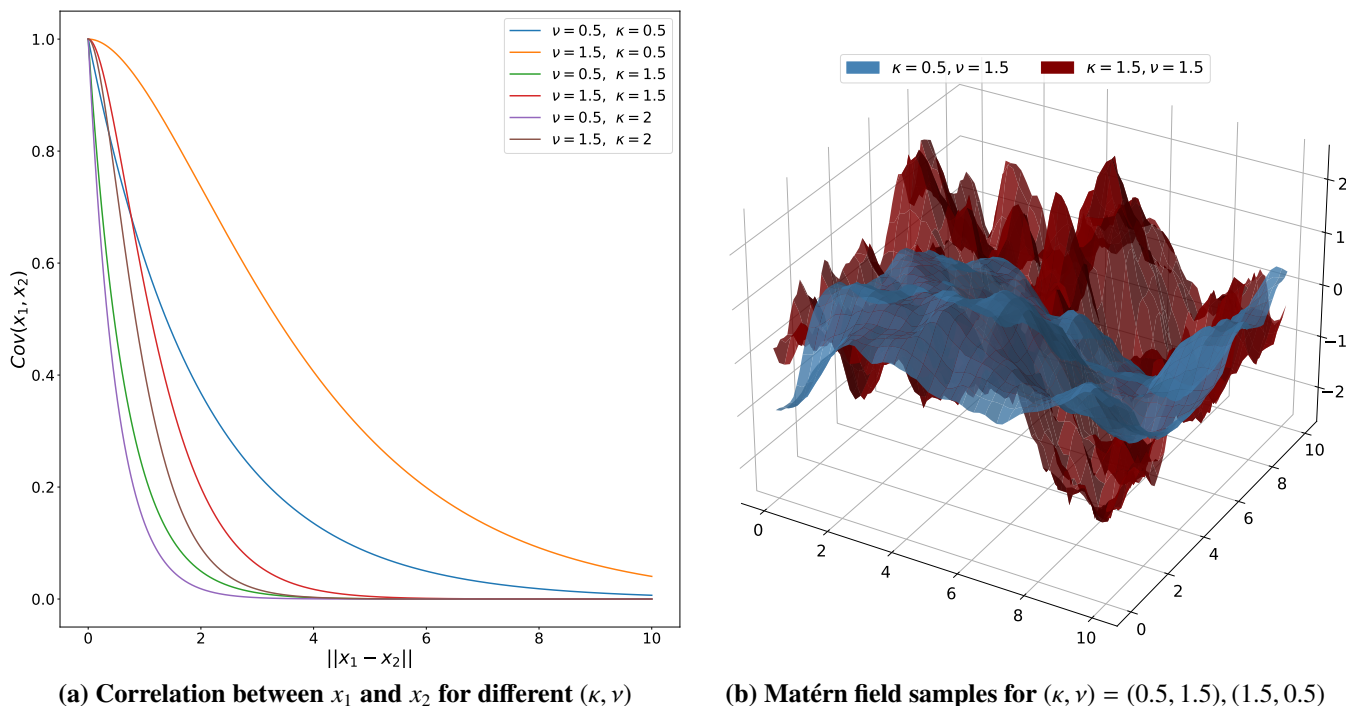


Fig. 2: The Matérn field

2.2. Bayesian Sea Depth Modeling and Inclusion of AIS Data

A Bayesian model can be defined by letting $\mathbf{Y} = (y_i)$ be a vector of observations at locations \mathbf{s}_i with $i = 1, \dots, N$. The likelihood of observing \mathbf{Y} given the endogenous model parameters $\boldsymbol{\eta} = (\eta_i)$ is written as

$$P(\mathbf{Y} | \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\theta}) = \prod_i P(y_i | \eta_i, \boldsymbol{\theta}), \tag{6}$$

where each observation y_i is conditionally independent from each observation $y_j, j \neq i$ given the model parameters η_i and $\boldsymbol{\theta}$. $\boldsymbol{\eta}$ is in turn connected through a *link function* $g(\eta_i)$ to the following latent linear predictor:

$$g(\eta_i) = \beta_0 + \sum_k \beta_k x_{ik} + u(\mathbf{s}_i) + \varepsilon(\mathbf{s}_i). \tag{7}$$

where x_{ik} is the k th covariate at location \mathbf{s}_i with corresponding coefficient β_k . Spatially correlated noise at location \mathbf{s}_i is captured in the zero-mean Gaussian random variable $u(\mathbf{s}_i)$. In the SPDE-GMRF modeling framework, $u(\mathbf{s}_i)$ is a discrete Markov Gaussian field with a sparse inverse covariance matrix \mathbf{Q} defined to approximate the continuous Matérn field described in (4). It's prior can be parametrized through the correlation range ρ and marginal standard deviation σ (Simpson et al., 2017). Spatially uncorrelated noise, not associated with measurement imperfections, is modelled with $\varepsilon(\mathbf{s}_i)$, which is called the “nugget” in geo-statistics (Cressie, 1993). The hierarchical structure of the models in equations (6) and (7), with their respective parameters, can be described through the graphical model in Figure 3. Latent variables are denoted by white circles and observed variables are colored grey. The hyperparameters of each component are not enclosed, and the arrows describe the conditional dependence of the different distributions which compose the model.

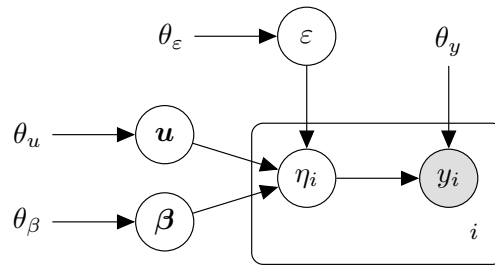


Fig. 3: Graphical formulation of hierarchical Bayesian model

The SPDE-GMRF framework where \mathbf{u} is a discrete Gaussian allow for spatial Bayesian hierarchical models over complex domains with large data through the sparse approximations. In this work, the R package R-INLA (Martins et al., 2013) that allows encoding of a wide range of likelihood functions (through suitable linking functions g) and provides all necessary functionality for estimating posterior distributions over model parameters in (7) from given datasets.

While many covariates can be constructed that may help predicting sea depth, we have favored a simple model formulation and only consider the Euclidean distance to land x_{dist} . The link function g is the identity function, which yields the following concrete instance of (7):

$$\eta_i = \beta_{\text{dist}} x_{\text{dist}}(\mathbf{s}_i) + u(\mathbf{s}_i). \tag{8}$$

We further assume a Gaussian likelihood for the regular (non-AIS) depth observations. Then, the relationship between the latent field η_i at location \mathbf{s}_i and the depth observation y_i is

$$p(y_i | \eta_i, \sigma^2) = \mathcal{N}(\eta_i, \sigma_i^2),$$

where σ^2 represents the measurement uncertainty of y_i .

While the above model may be deemed a “standard” estimation setup, the handling of the coastline depth value and inclusion of the AIS data are less straightforward. The SPDE-GMRF framework allows for explicit modeling of boundary conditions in the study domain. By imposing a Dirichlet boundary condition we can include the known (zero) sea depth at the coastline. Technically, this is achieved by constraining the field values at boundary mesh vertices to zero.

AIS data is incorporated through the draught value associated with each observed ship location, which indicates the depth of the lowest point of the ship in the water. This in turn is representative for the *minimal* depth at a given location. This is qualitatively different from bathymetric depth observations, which are considered unbiased samples of actual water depths.

To explicitly model this relationship, the AIS draught values are treated as censored observations of the true depth in a survival modeling framework. In survival modeling, each observation y_i carries with it a censoring indicator $\delta_i \in \{0, 1\}$ which is 1 for a uncensored observation and 0 otherwise. Let x_i be an outcome i of the associated random variable X . Then the survival analysis observation model for x_i is:

$$P(x_i | \theta) = f(x_i)^{\delta_i} S(x_i)^{1-\delta_i}, \tag{9}$$

where either the probability density function (PDF) $f(x)$ or the survival function $S(x)$ is active depending on δ_i . the survival function models the case where an event has not occurred during an observation period through

$$P(X \geq x_i) = 1 - P(X \leq x_i) = 1 - F(x_i), \quad (10)$$

where $F(x_i)$ is the associated cumulative density function (CDF) of the observation likelihood density function $f(x_i)$. We observe that if $x_i = \exp(y_i) \sim \mathcal{N}(\eta_i, \sigma^2)$, then $x_i \sim \mathcal{LN}(\eta_i, \sigma^2)$, with \mathcal{LN} referring to the log-normal distribution, and $F(x_i | \eta_i, \sigma) = \Phi\left(\frac{\ln x_i - \eta_i}{\sigma}\right)$, where Φ is the standard normal CDF. We can use this to model the case with Gaussian observations y_i where each AIS draught value provides an observed upper bound. The complete likelihood model for all observations $y_i; i = 1, \dots, N$ with the transformation $x_i = \exp(y_i)$ is

$$P(\mathbf{x} | \eta_i, \sigma) = \prod_i \mathcal{LN}(x_i | \eta_i, \sigma^2)^{\delta_i} \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln(x_i) - \eta_i}{\sigma}\right)\right)^{1-\delta_i}, \quad (11)$$

where $x_i = \exp(y_i)$ and δ_i is the censoring variable differentiating bathymetric depth observations from AIS observations. In this formulation, including AIS data as censored observations serve to push the field down at locations where ships are observed that have more draught than what the model predicts. However, it should not pull the field up at locations where ships are observed that have less draught than what the model predicts given other available data. Practically speaking, this increasing the chance that areas where AIS data indicates traversability are predicted as such.

3. Computational Experiments

3.1. Experiment Setup

The model is implemented in a study area in the southern part of the Swedish archipelago outside of the city of Gothenburg shown in Figure 4. The area comprises several larger populated islands. A system of local public transport ferries connects the islands to each other and to Gothenburg city in the north east. Since privacy restrictions limit publication of data and high resolution model results using ground-truth comparisons, openly available electronic nautical chart (ENC) data has been used for bathymetric observations in this work. ENC data contains selected, sparse sounding points and depth contour lines. The AIS data used in this research was provided by The Baltic Marine Environment Protection Commission (HELCOM) (Commission, 2018). Figure 4b show the locations of bathymetric soundings extracted from ENC data, while Figure 4c show the location of the two considered AIS data sets.

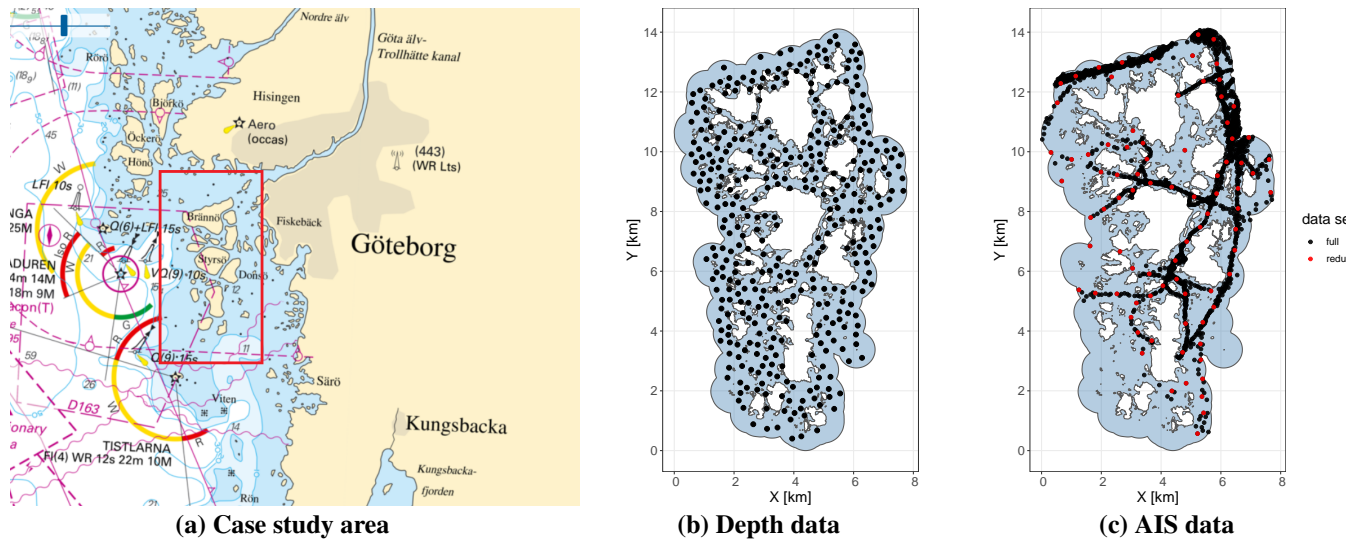


Fig. 4: Case study area

Figure 5 displays the mesh in which the study region is discretized for numerical computations. Mesh construction requires to balance sufficient representation of the topology and computational cost of creating an exceedingly dense mesh. In order to alleviate unwanted effects from the outer boundary of the study area, it is given an extra buffer with lower resolution, as recommended by Lindgren et al. (2011).

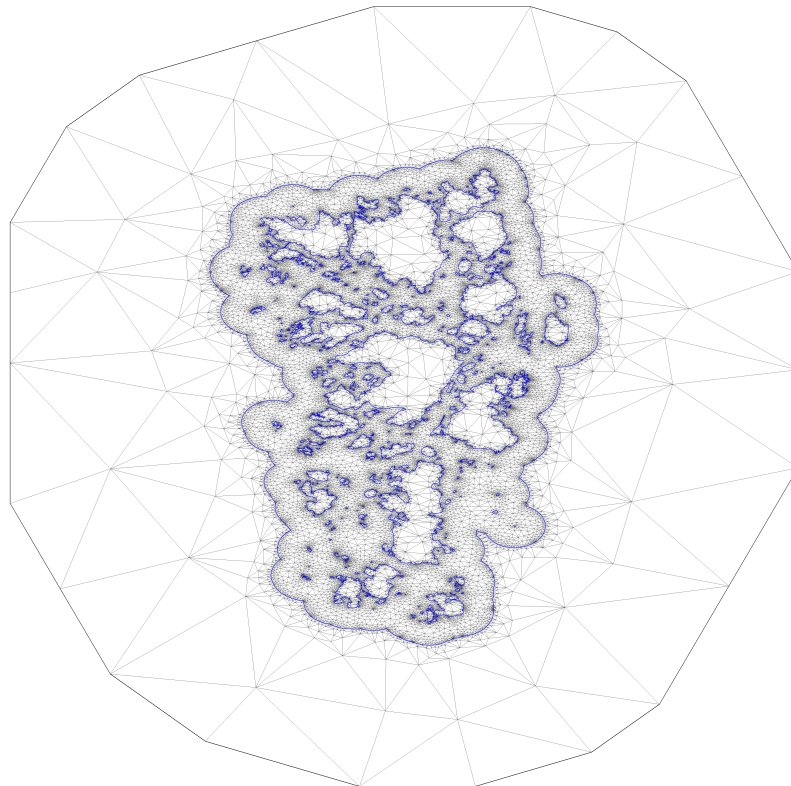


Fig. 5: Constrained Delaunay triangulation of study area

The experimental setup is as follows. The first set of experiments considers the addition sequence prior → bathymetric → bathymetric + AIS. The second set of experiments includes the distance-to-land covariate in each step. Starting from the prior depth field, data is incrementally added to the model and its effect on the predicted field is

analyzed. (i) Using the reduced AIS data set shown in Figure 4c constructed so that no observations are closer than 500 meters. (ii) Following this, results are generated using the full AIS data set containing 1824 points. (iii) And lastly, the effect on the posterior field of reducing the input values was studied.

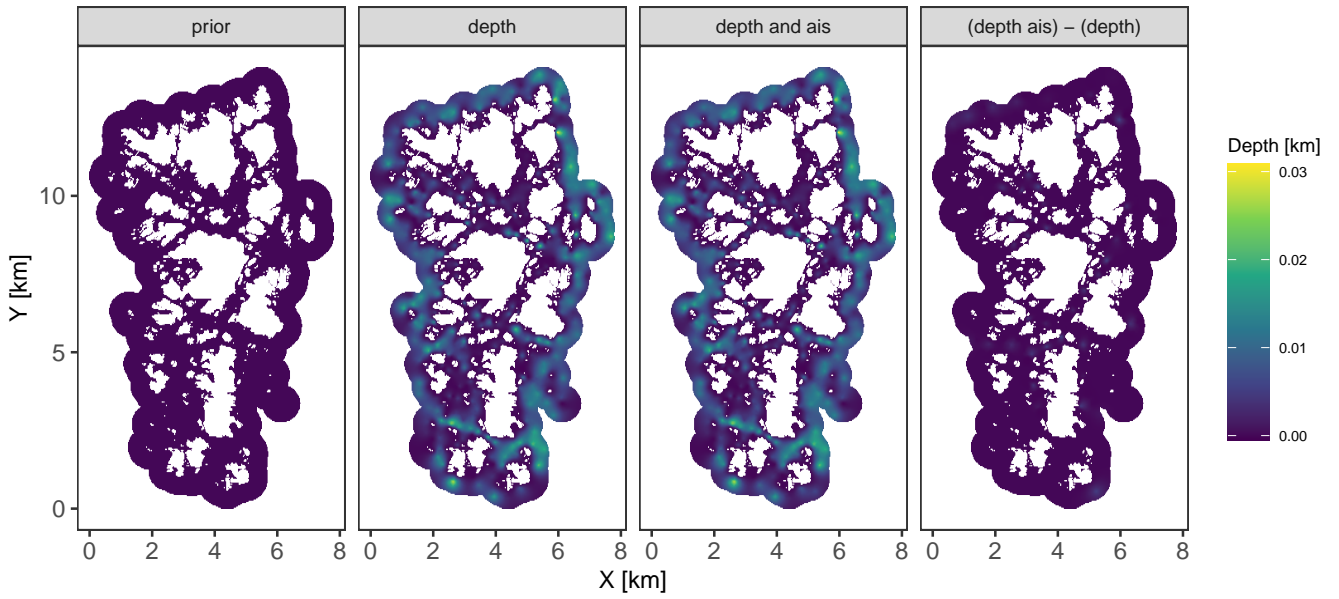
The following general settings were used in all experiments performed:

- The correlation range parameter ρ can be interpreted as the distance at which the correlation between two locations has fallen to approximately 0.1 (Stein, 1999), and is fixed at 500 meters in this study. For a non-stationary field, for example with Dirichlet boundary conditions, such interpretations may not hold.
- The prior depth field is a zero-mean Gaussian distribution with a set standard deviation of 50 meters indicating a prior belief that depths over 100 meters are considered unlikely. With the boundary conditions acting as observations with a large precision, the actual location-specific standard deviation will vary across the field.
- With the observation model described in Equation (11), both bathymetric soundings and AIS draught values are given a standard deviation of 1m. This accounts for data errors caused by factors such as incorrectly reported draught values in the AIS observations.
- Where the covariate x_{dist} is applied, its coefficient β_{dist} is given a Gaussian prior with mean 0.2 and standard deviation 0.1.

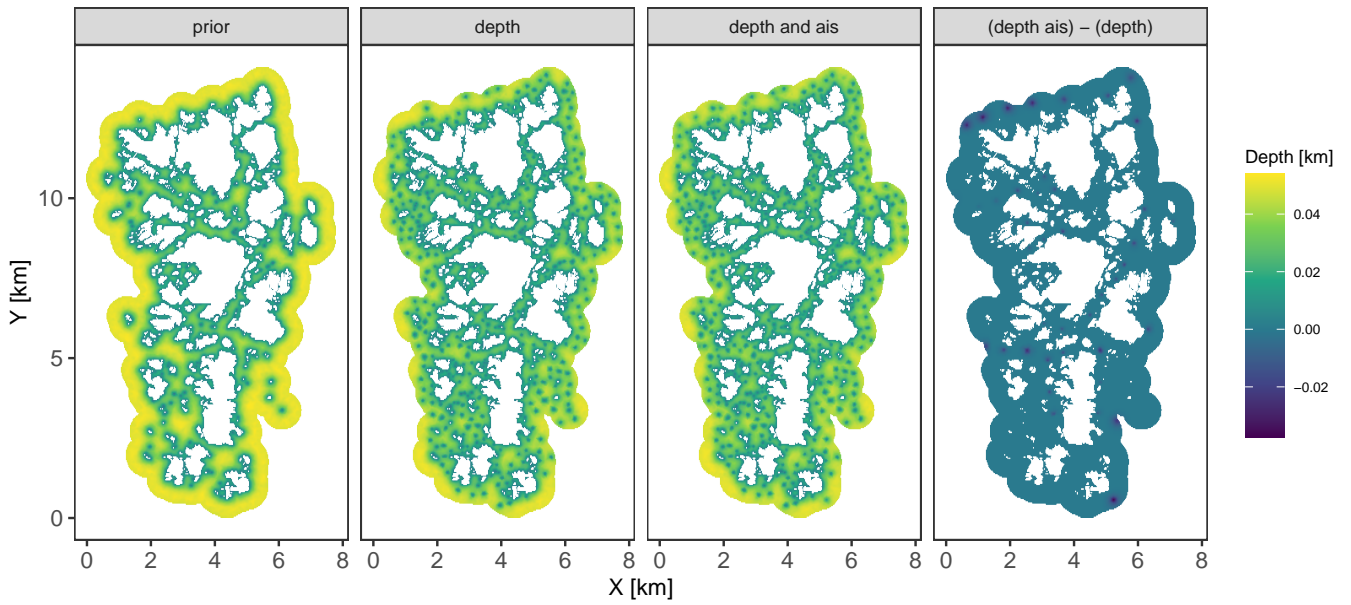
3.2. Results

Figure 6a show the posterior mean fields for the case without distance-to-land covariate. Figure 6b show the corresponding standard deviations. As expected, the prior field is mean centered with a standard deviation bounded by 0.05 kilometers or 50 meters. The effect of the Dirichlet boundary condition can be seen in the field uncertainty which is small near land and increasing with distance. Adding bathymetric depth observations serve to both increase predicted depths, and reduce uncertainty in proximity to data locations. This is further seen when the small sample of AIS data is added although the overall impact on the field is small. The rightmost field of Figure 6a show the difference between the posterior mean taking only depth soundings into account and when AIS data is also included. The decrease in field uncertainty corresponds to the size of the effect on the mean with visibly decreased uncertainty where the posterior mean difference is the largest.

The different manner in which the two data types affect the posterior mean can be seen in Figure 7. Each point represents a single observation, with the posterior mean at that location on the y-axis and the observed value on the x-axis. If the point is below the main diagonal, the mean predicted depth is smaller than the observation and conversely if the point is above the diagonal. For depth observations, the model predictions fit the observations following the relatively small observation uncertainty of 1 meter. This can be contrasted with the spread seen in the AIS observations. In the left graph showing results when AIS data has not been included, several instances of predicted mean depths violating observed ship draughts at that location can be seen. As AIS is included this does not happen. Instead we get mean depth predictions which are consistently higher than the observed draught values as desired.



(a) Mean of posterior fields without distance covariate



(b) Standard deviation of posterior fields without distance covariate

Fig. 6: Model without distance covariate

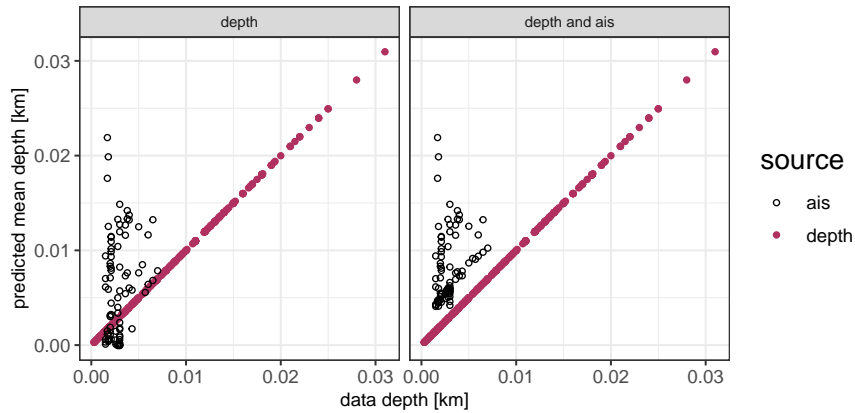


Fig. 7: Effect on posterior mean of bathymetric soundings and AIS draughts without distance covariate

Figure 9a and Figure 9b show the mean and standard deviation fields using the distance-to-land covariate as described in (8) during the estimation. In the left-most graph, the effect of the compounding uncertainty from the field prior and β_{dist} prior is shown. As data is added, the predicted depths decrease in a more global way than seen in Figure 6a where no distance covariate was included. This effect appear to be dominated by the estimation of the covariate β_{dist} shown in Table 2. Including the bathymetric soundings lead to a smaller coefficient and decreased standard deviation. However, further addition of data in the form of AIS draughts has a negligible effect on the posterior distribution of β_{dist} . Figure 8 show the same scatter plot as before indicating depth violations when AIS is included or not. We see that there are fewer instances of AIS draught violations without specific AIS data inclusion when the distance to land is included in the model making the likelihood contribution of these observations small.

Table 2: Posterior for β_{dist}

	mean	sd	0.025quant	0.975quant
prior	0.20	0.10	0.004	0.396
depth	0.045	0.011	0.023	0.068
depth and ais	0.0466	0.011	0.024	0.069

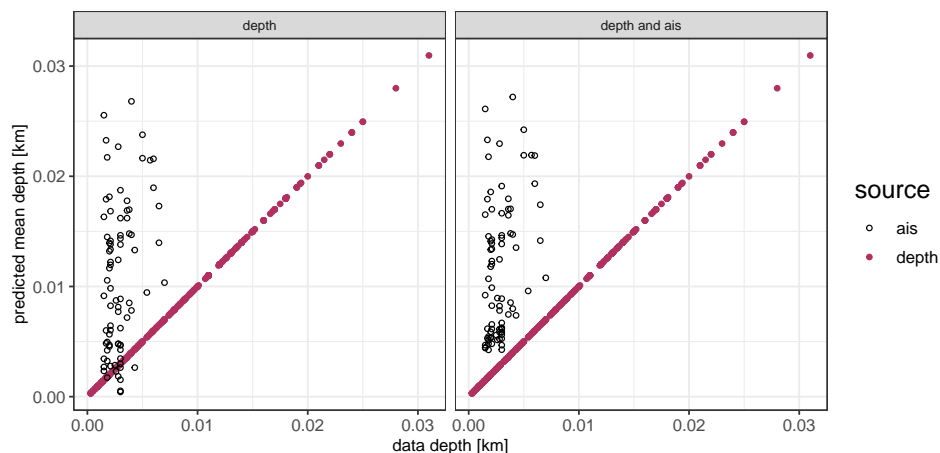
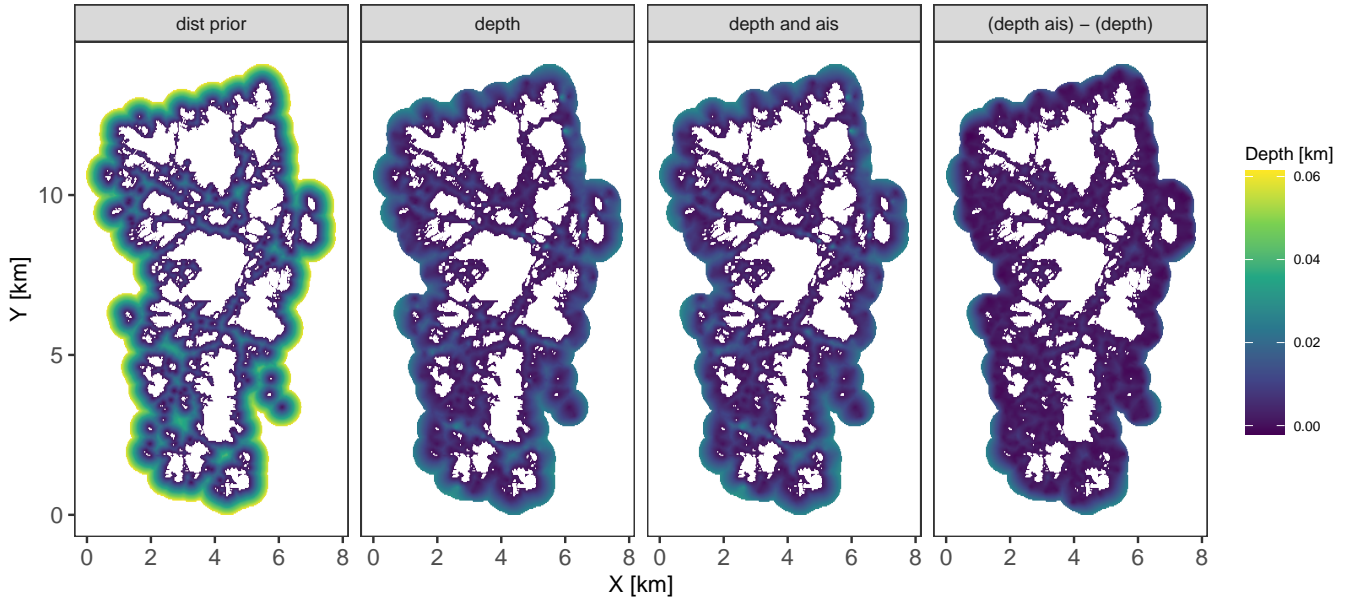
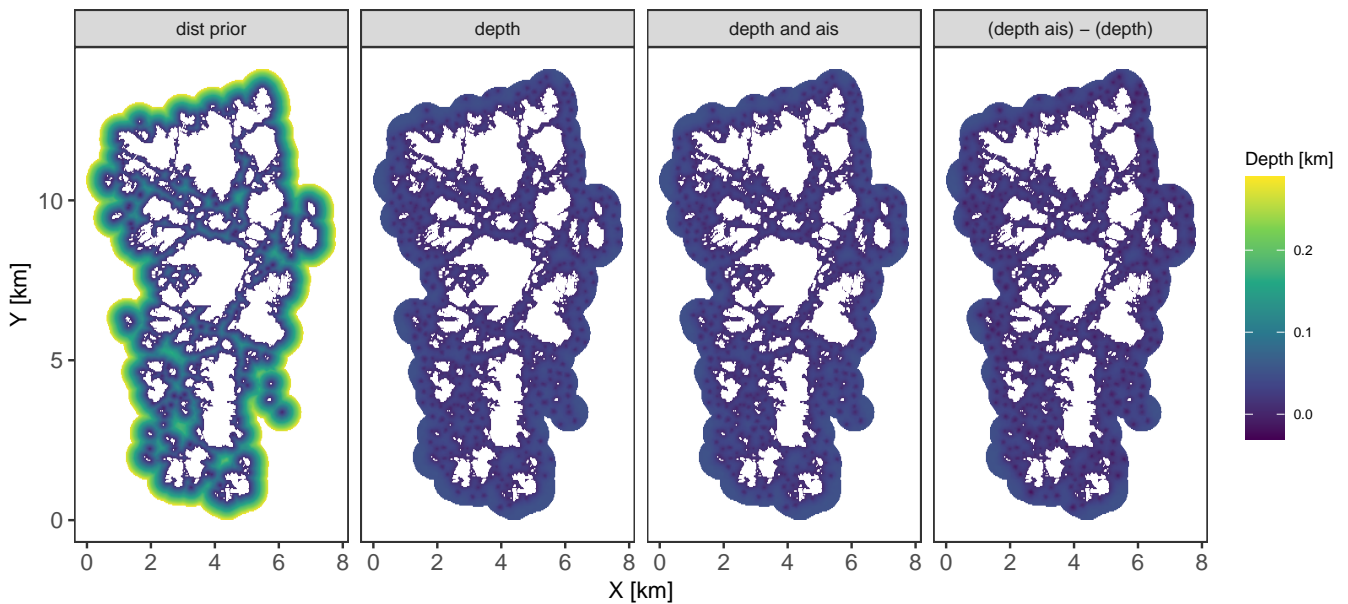


Fig. 8: Effect on posterior mean of bathymetric soundings and AIS draughts with distance covariate



(a) Mean of posterior fields with distance covariate

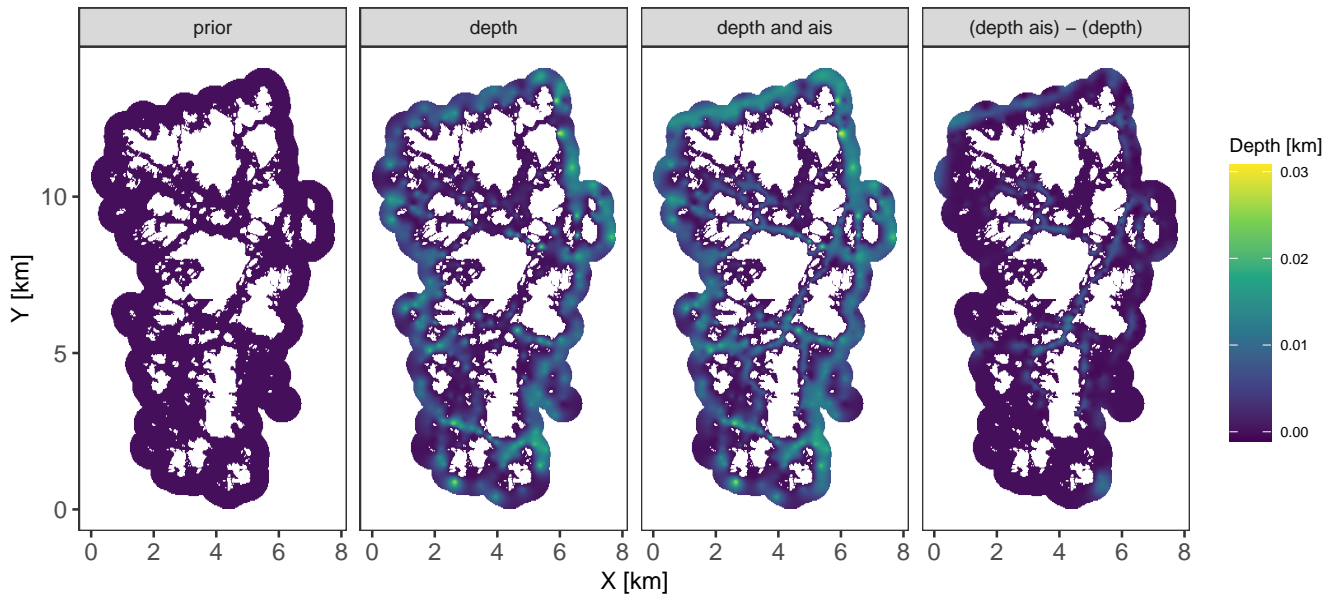


(b) Standard deviation of posterior fields with distance covariate

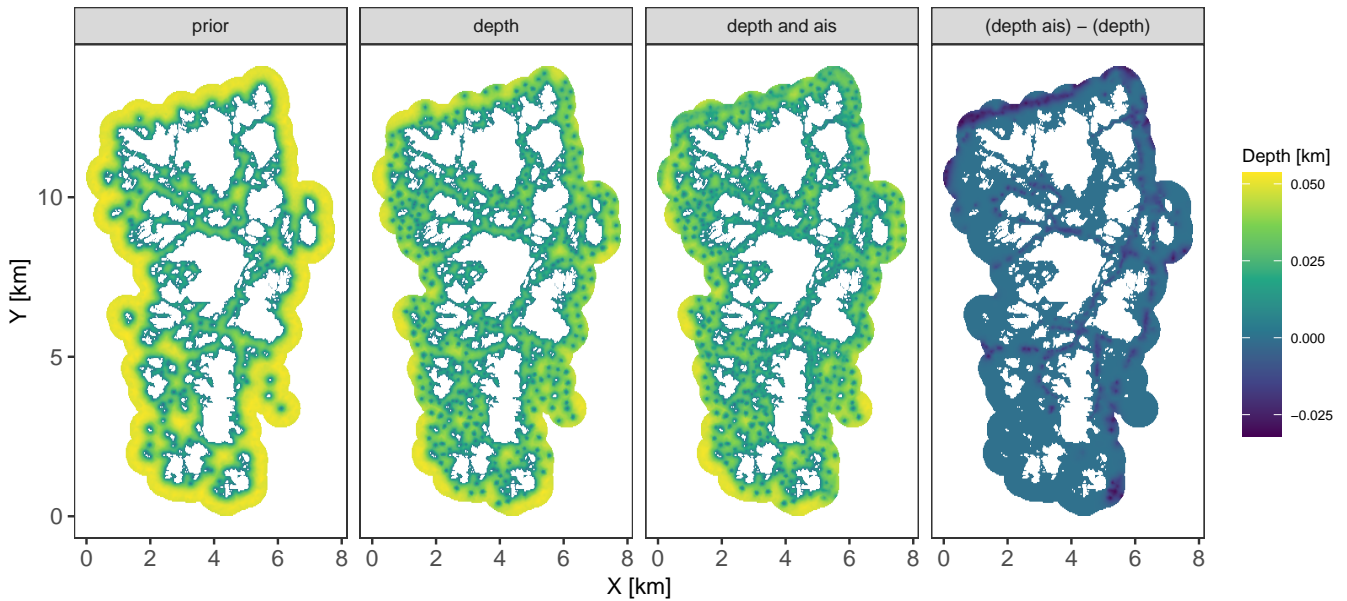
Fig. 9: Model with distance covariate

In the previous results, a subset of AIS data points selected with a proximity threshold of 500 meters was used to identify the impact of individual data points. The following experiments use the full set of AIS data points as shown in Figure 4c. Figure 10a show the same constellation of fields as before for the larger data set. Ship movements can be seen clearly, however unlike what was seen with fewer AIS observations, predicted depths are increased below depth soundings in close proximity. A plausible explanation is that the, albeit small, likelihood effect from the survival function compounds with a larger number of closely located observations. The desired model behaviour is a prediction which is *slightly* below the ship keel, but not excessively so, since we only view the AIS observations as an upper bound on the depth. AIS locations indicate this, as before, that their effect is most visible where the otherwise

predicted depth is low. In upper right corner of the depth and AIS data field we see a narrow channel between islands where depth observations are sparse being predicted as deeper with the inclusion of AIS data.



(a) Mean of posterior fields using full AIS data without distance covariate



(b) Standard deviation of posterior fields using full AIS data without distance covariate

Fig. 10: Model without distance covariate

The influence of each AIS observation should decrease as it is moved upwards. We study this effect by shifting each draught value by the constants $\delta = .003, .005, .007, .009$ and study the effects on the posterior field. Figure 11 show each field value with the depth field subtracted to highlight the impact of adding AIS. For $\delta = 0.009$, which translates to decreasing each draught by 9 meters, a very small effect remain from the AIS data.

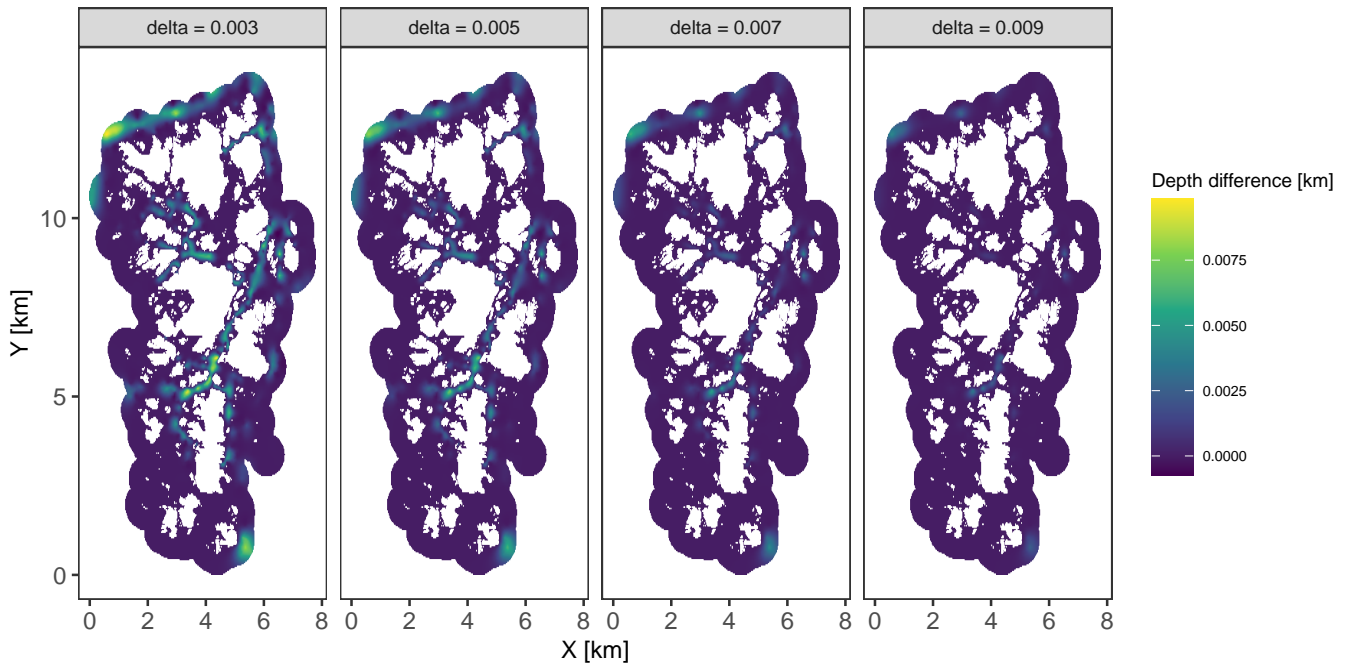


Fig. 11: Effects of shifting AIS draughts by $\delta = .003, .005, .007, .009$

4. Summary

Nautical charts constitute an important resource in maritime navigation and route planning. As such, potential errors can result in longer or less safe routes than desired. In near coastal environments, charts are often based on old outdated measurements owing to financial and time constraints related to the data collection and processing. While modern multi-beam measurements deliver highly accurate and dense information about the bathymetry, prioritization strategies are necessary for surveying efforts. Previous research such as that by [Chénier et al. \(2018\)](#) has combined AIS data with nautical charts to improve the positional inference in remote areas. We propose a method to do the opposite, namely to use AIS data in order to improve the capacity of the nautical charts to show any possible transportation corridors available. With this view, AIS data is seen as a container of the local knowledge.

We have proposed a hierarchical Bayesian model for combining the qualitatively different bathymetric soundings and AIS draught information with other regression covariates such as the distance to the closest shore. The method employs a discretized approximation of the underlying continuous Gaussian field, through which boundary effects such as the known depth at the coast line can be included without added computational complexity. The model provides estimated depths which are reasonable in magnitude.

The Dirichlet boundary effect proposes other challenges in the estimation since it, in practice, acts as perfect observations which seemingly overshadows other effects if too many parameters are allowed to be free. In this work, we have opted to constraining some model parameters such as the correlation range and observation uncertainty to plausible values.

As the amount of AIS data increase, the effect on estimation compounds. This sometimes leads to unreasonably deep predictions as the survival likelihood is increasing towards larger values. While a differentiation between the bathymetric and AIS observation model parameters is favorable, INLA proposes challenges in working with likelihood formulations not implemented in the core library. We show how translating each AIS observation by some value can decrease its influence on the estimation. For such a strategy to be appropriate, it is necessary to develop a valid strategy for determining this value.

The amount by which the predicted depth should be larger than the observed draught also relate to the minimum required under keel clearance. As we do not have any knowledge of this value, a conservative approach would be reasonable as overestimated depths has obvious safety implications. The under keel clearance could be taken into

account in the model through transposing observations by some expected value and increasing the measurement uncertainty.

Future work. Three future directions of this work are evident. (1) To construct navigable corridors using this data-driven approach it will be necessary to include large amounts of AIS data. This will necessitate strategies for containing the overestimation shown in this paper. Feasible approaches are either in developing the INLA tool for combining necessary observation models, or through methodologically robust sampling of the AIS data. (2) In this study we have limited bathymetric data to the soundings found in openly available ENC data. While the predicted fields are reasonable, validation against real data is crucial for the further model development. Such data is available, and the work is currently underway. (3) A potential application of such a model is in network construction for planning of waterborne transit services. Implementing an appropriate scheduling model with the derived network may reveal new opportunities for line planning and quantify potential benefits of surveying uncertain corridors in a systematic manner.

References

- Bakka, H., 2016. Modeling Spatial Dependencies Using Barriers and Different Terrains. Ph.D. thesis. Norwegian University of Science and Technology - Department of Mathematics. Trondheim.
- Banerjee, S., Carlin, B.P., Gelfand, A.E., 2004. Hierarchical Modeling and Analysis for Spatial Data. Number 101 in Monographs on Statistics and Applied Probability, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Fla.
- Chénier, R., Abado, L., Martin, H., 2018. CHS Priority Planning Tool (CPPT)—A GIS Model for Defining Hydrographic Survey and Charting Priorities. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7, 240. doi:10.3390/ijgi7070240.
- Chénier, R., Abado, L., Sabourin, O., Tardif, L., 2017. Northern marine transportation corridors: Creation and analysis of northern marine traffic routes in Canadian waters. *Transactions in GIS* 21, 1085–1097. doi:10.1111/tgis.12295.
- Comission, H., 2018. HELCOM Assessment on Maritime Activities in the Baltic Sea 2018. *Baltic Sea Environment Proceedings* 152. Helsinki.
- Cressie, N., Moores, M.T., 2021. Spatial Statistics. [arXiv:2105.07216](https://arxiv.org/abs/2105.07216).
- Cressie, N.A.C., 1993. *Statistics for Spatial Data*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. rev. ed ed., Wiley, New York.
- Curriero, F.C., 2006. On the Use of Non-Euclidean Distance Measures in Geostatistics. *Mathematical Geology* 38, 907–926. doi:10.1007/s11004-006-9055-7.
- Davis, B.J.K., Curriero, F.C., 2019. Development and Evaluation of Geostatistical Methods for Non-Euclidean-Based Spatial Covariance Matrices. *Mathematical Geosciences* 51, 767–791. doi:10.1007/s11004-019-09791-y.
- Eastman, J.R., 1999. Multi-criteria evaluation and GIS. *Geographic Information Systems*, 493–502.
- Hartman, L., Hössjer, O., 2008. Fast kriging of large data sets with Gaussian Markov random fields. *Computational Statistics & Data Analysis* 52, 2331–2349. doi:10.1016/j.csda.2007.09.018.
- Lindgren, F., Rue, H., Lindström, J., 2011. An explicit link between Gaussian fields and Gaussian Markov random fields: The stochastic partial differential equation approach: Link between Gaussian Fields and Gaussian Markov Random Fields. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 73, 423–498. doi:10.1111/j.1467-9868.2011.00777.x.
- Løland, A., Høst, G., 2003. Spatial covariance modelling in a complex coastal domain by multidimensional scaling: SPATIAL COVARIANCE MODELLING IN A COMPLEX COASTAL DOMAIN. *Environmetrics* 14, 307–321. doi:10.1002/env.588.
- Martins, T.G., Simpson, D., Lindgren, F., Rue, H., 2013. Bayesian computing with INLA: New features. *Computational Statistics & Data Analysis* 67, 68–83. doi:10.1016/j.csda.2013.04.014.
- Mishra, M.K., Ganguly, D., Chauhan, P., Ajai, 2014. Estimation of Coastal Bathymetry Using RISAT-1 C-Band Microwave SAR Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 11, 671–675. doi:10.1109/LGRS.2013.2274475.
- Murphy, R.R., Perlman, E., Ball, W.P., Curriero, F.C., 2015. Water-Distance-Based Kriging in Chesapeake Bay. *Journal of Hydrologic Engineering* 20, 05014034. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001135.
- Pardo-Igúzquiza, E., Dowd, P.A., 1997. AMLE3D: A computer program for the inference of spatial covariance parameters by approximate maximum likelihood estimation. *Computers & Geosciences* 23, 793–805. doi:10.1016/S0098-3004(97)00040-X.
- Rasmussen, C.E., Williams, C.K.I., 2006. *Gaussian Processes for Machine Learning*. Adaptive Computation and Machine Learning, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Rue, H., Tjelmeland, H., 2002. Fitting Gaussian Markov Random Fields to Gaussian Fields. *Scandinavian Journal of Statistics* 29, 31–49. doi:10.1111/1467-9469.00058.
- Simpson, D., Rue, H., Riebler, A., Martins, T.G., Sørbye, S.H., 2017. Penalising Model Component Complexity: A Principled, Practical Approach to Constructing Priors. *Statistical Science* 32. doi:10.1214/16-STSS76.
- Sjöfartsverket, 2021. Kvalitet i svenska sjökort. <https://sjofartsverket.se/sv/tjanster/sjokortsprodukter/kopa-sjokort2/sjokort/kvalitet/>.
- Stein, M.L., 1999. *Interpolation of Spatial Data*. Springer Series in Statistics, Springer New York, New York, NY. doi:10.1007/978-1-4612-1494-6.
- Svanberg, M., Santén, V., Hörteborn, A., Holm, H., Finnsgård, C., 2019. AIS in maritime research. *Marine Policy* 106, 103520. doi:10.1016/j.marpol.2019.103520.
- Union, I.T., 2014. Technical Characteristics for an Automatic Identification System Using Time Division Multiple Access in the VHF Maritime Mobile Frequency Band. Technical Report M.1371-5.

- Vahtmäe, E., Kutser, T., 2016. Airborne mapping of shallow water bathymetry in the optically complex waters of the Baltic Sea. *Journal of Applied Remote Sensing* 10, 025012. doi:[10.1117/1.JRS.10.025012](https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.025012).
- Wiberg, P., Wallhagen, M., Öiås, H., Hedenström, A., Nyberg, J., Rågvall, J., Olsson, P.A., Lysell, G., Gullberg, E., Larsson, S., 2018. Geodata för kust och strandzon. Technical Report Dnr: 17-03140. Sjöfartsverket. Norrköping.

Bilaga B

A multiple trip vehicle routing approach to ferry service network design

A multiple trip vehicle routing approach to ferry service network design

Michael Sederlin¹ and Tomas Lidén²

Abstract—In this paper we propose a model for joint ferry network design and scheduling in archipelago public transport systems. The model uses a multi-trip vehicle routing approach with inbound-outbound and returning trip structures where traffic requirements are implemented as window requirements. A case study is performed scheduling a full day of traffic in the southern archipelago outside of Gothenburg, Sweden. Results indicate that this approach can capture the many different stopping patterns of a line seen in real systems and produce realistic time-tables. Computational performance is shown to be highly dependent on the number of window constraints included.

I. INTRODUCTION

The archipelago case differs from other rural areas in a few ways. First, and most obvious, vehicles traverse continuous water bodies and are not tied to a fixed road network. Furthermore, the public transport system in an archipelago is often the only means of transport between islands as well as to the mainland [1]. The location of services such as schools, medical centers and stores is directly connected to the population of an island placing further demand on the capacity, reliability and connectivity of ferry systems. Planning and designing such a system with sparse demand, lack of other modes of transport and large number of possible trip combinations require methods which can incorporate flexibility as well as represent strict traffic requirements and produce a time-table against which to schedule connections. Flexible public transport approaches handle the uncertainty and sparsity in the demand during the operating phase, and are less predictable for travelers and less able to work reliably in connection to a larger transportation system [2].

The multiple trip vehicle routing problem (MTVRP) extends the traditional vehicle routing problem (VRP) by allowing vehicles in the fleet to make several trips starting and ending at a depot within a scheduling period. Cattaruzza et al. [3] presents a thorough review of model formulations and applications of the MTVRP. Like the traditional VRP, the MTRVP works on a (directed or undirected) graph $G = (V, A)$, and determines arcs $a \in A$ of a trip such that the demand at vertices $v \in V$ is satisfied. Essential for our application is the ability to handle temporal demand through

window constraints on the vertex visits. Several strategies exist for removing the reliance on sub-tour elimination constraints, in a maritime context. A time-expanded acyclic graph has been used for planning of maritime surveillance operations by [4] and liner shipping optimization in [5] Reinhardt et al. [6] impose a structure on the allowed routes in the liner-shipping network design problem. They expanded a strict outbound-inbound structure commonly used in liner shipping problems which require a fixed order in port visits. While this may be valid for linear systems, such as a channel or along a straight coast-line, it would produce suboptimal solutions in more topologically complex study regions. Instead, they introduce the concept of butterfly routes which are cyclic and are allowed to visit the same port multiple times during a journey. We use a similar outbound-inbound approach which gives a directed network structure that by construction will ensure valid ferry routes without the need for sub-tour elimination constraints

The remainder of this paper is as follows; Section II describe the a formulation of the MTVRP for ferry service network design. This is followed by section III where a set of computational experiments for a case-study area are described and analyzed. Lastly, conclusions from the work are presented in section IV.

II. METHOD

Given a time-horizon H , the presented model provides a ferry schedule which satisfies demand provided as a minimum number of required visits to each stop, while minimizing the associated costs. In the model, we consider four types of locations: Terminal(s), ports, berths and waypoints where all except berths correspond to vertices in the routing graph.

Let $G = (V, A)$ be a directed graph consisting of vertices V and arcs A . Each arc $a \in A$ has an associated arc duration and berths at which traversing the arc implies a mandatory or optional stop. A terminal is a vertex where lines originate from and where ferry assignment is done. Ports are transit stops which can form part of a ferry route which correspond to vertices. Waypoint vertices has no associated stop, and are inserted to allow route choice.

Each trip is defined by the tuple $(l, r) \in L \times R_l$ described by its line l and route r , determining the number of repeats of that line during the study period. Trips are assumed to be ordered such that (l, r) occurs after (l, s) if $s > r$. A line in the model can take an outbound-inbound or a returning, cyclic, structure. An outbound-inbound line contain a sequence of an outbound and inbound trip. The outbound trip start at a terminal vertex and end in a port vertex representing the

This research has been funded by The Swedish Transport Administration through project OSKAR with number TRV 2019/119584.

¹Michael Sederlin is with the Swedish Road and Transport Research Institute (VTI), Stockholm, Sweden and with the Department of Science and Technology (ITN), Linköping University, Norrköping, Sweden michael.sederlin@vti.se

²Tomas Lidén is with the Swedish Road and Transport Research Institute (VTI), Stockholm, Sweden and with the Department of Science and Technology (ITN), Linköping University, Norrköping, Sweden tomas.liden@vti.se

turning port of that line where dwelling can occur before the inbound trip component commences. It is required that the same ferry is used for both the outbound and inbound trips, but different stopping patterns and routes are allowed (and sometimes required). For a returning line, the destination terminal is the origin terminal and no dwelling is possible while making a trip.

The possible decisions in the model are (i) event times, (ii) routing and (iii) ferry assignment. Timing decisions can be made for the (i) start of each route and (ii) stop at a berth location, which incurs a small addition to the trip duration. Routing is done by determining which arcs a trip (l, r) consists of.

There are two ways of implementing traffic requirements in the model. Either as the total number of times Q_v a stop v should be visited during the entire model period, or through window constraints which further specify a minimum number of visits inside a given period. While the first requirement type works on all lines and directions, the window constraints can be specified to apply to only one, several or all lines in the transit service. In this way, a rough representation of OD-demand can be included.

The set of ferries $f \in \mathcal{F}$ defines the available vehicles. Each ferry is assigned from a class $f_c \in F_c$ with associated speed with which arc durations π_a for each arc a and vertex travel times $\xi_v^{l,f}$ for each vertex v are calculated. Model notation is described in table I

To aid understanding of how the arc-sets for outbound-inbound and returning lines are constructed, Figure 1 show a small example depicting the difference between the different vertex and stop types. The grey terminal, red ports and blue waypoint nodes in the figure are all vertices in the graph, while the green squares are berths representing public transport stops without associated vertices connected to any arcs. Instead, a choice can be made to stop at berths if an arc with either a mandatory or optional stop is used. These arcs are indicated with blue dashed lines for arcs with optional berth visits and red dashed lines for arcs with mandatory berth visits. For example, a choice can be made to stop at b_1 if arc (w_2, p_1) is used, while the arc (t, w_2) contain a mandatory stop at b_2 . In the outbound-inbound line, port p_2 represent the destination of an outbound trip. Making a stop at b_1 would incur a trip duration penalty of length β , while the stopping time at b_2 is included in the arc travel time.

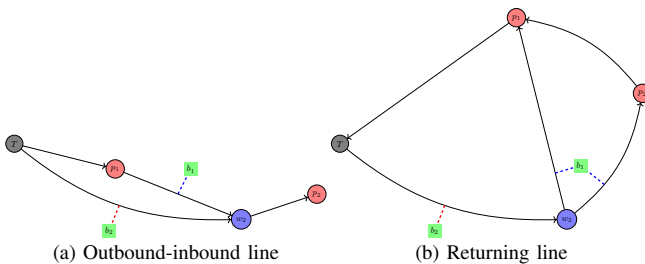


Fig. 1: Example of model graph network

The set of arcs must ensure that all stops where stopping

requirements are defined are also reachable. In addition, we must ensure that the set of arcs assigned to the outbound and inbound components of each line $A_l \subseteq A$ can reach stops where window requirements for that line are defined. Lastly, the arcs of each line are chosen to remove the possibility of sub-tours in the produced solutions.

The remainder of this section will consist of a description of the model components. The model objective function is:

$$\min z = c^t \sum_{(l,r) \in R} \left(t_{(l,r)}^1 - t_{(l,r)}^0 \right) + \sum_{(l,r) \in R} \sum_{f \in F} c_f^F z_f^{(l,r)}, \quad (1)$$

The first sum represents the travel time, with associated cost coefficient c^t calculated as the departure from the starting vertex of line l and the arrival at the destination vertex. The second sum represent the cost of assigning a ferry to a specific route. This is added to capture an operator preference against using certain ferries on certain lines, for example if they have higher operational costs.

Model constraints:

The route scheduling constraints: Ensuring that all scheduled routes in the input data are performed by the model is done with the route scheduling constraints expressed as

$$\sum_{(v,j) \in A_l} x_{v,j}^{(l,r)} = 1 \quad \forall (l,r) \in R, v = o_l \quad (2)$$

where $v = o_l$ is the origin port of line l . It makes sure that one departing arc is selected from the first vertex of each trip.

The route choice constraints: Consistency in the arc usage for a route is ensured using route the route choice constraints where, for each vertex except the initial terminal $fr(l)$ and the arrival port $tp(l)$, we require that an outgoing arc is used if an incoming arc is used. We also require that no outgoing arc is used if no incoming arc is used through the constraint:

$$\sum_{(i,v) \in A_l} x_{(i,v)}^{(l,r)} = \sum_{(v,j) \in A_l} x_{(v,j)}^{(l,r)} \quad \forall (l,r) \in R; v \in V^p \cup V^w \setminus \{o_l, d_l\}. \quad (3)$$

Assignment of ferries: Whether a ferry f is used on trip (l, r) is determined by whether the binary variable $z_f^{(l,r)}$ is one or zero. Asserting that only one ferry is used for each trip is done through the ferry assignment constraints in equation (4). Furthermore, it is necessary to require that the same ferry is used on both the inbound and outbound parts of a trip, which is done by the constraints in Equation (5). For each inbound line, which returns to the origin terminal in V_0 , there is a coupling to the outbound portion through L^{cpl} .

$$\sum_{f \in F} z_f^{(l,r)} = 1 \quad \forall (l,r) \in R \quad (4)$$

$$z_f^{(i,r)} = z_f^{(L_i^{cpl}, r)} \quad \forall i \in L^{in}; r \in R_i; f \in F. \quad (5)$$

TABLE I: Model definitions

Geographical network	V V^0, V^p, V^w V^b	Set of vertices $\{v_i : i = 1, \dots, N\}$ disjunctive set of terminal, port and waypoint vertices s.t. $V = V^0 \cup V^p \cup V^w$ berth locations
Model parameters	H π_a β λ^0, λ_i c^t c_f^F $\delta_{l,f}^t$ $\xi_v^{l,f}$	Schedule horizon arc duration for arc a without optional berth visits Time addition for optional berth visits Minimum dwelling time at origin terminal and destination terminals Time cost coefficient Additional cost for using ferry f for a single trip (l, r) A penalizing time supplement whenever ferry f is used on line l Shortest path travel time from origin port to vertex v using ferry f on line l
Ferry fleet	F F_f^c	The set of ferries f The ferry class assigned to ferry f
Service network	L L^{out}, L^{in} L_i^{cpl} L^{ret} N_l^R R_l A $A_l \subset A$ A^b $B_{(a,v)}$	set of traffic lines l , each of which are either outbound-inbound or returning disjunctive set of outgoing and incoming line components s.t. $L = L^{out} \cup L^{in}$ coupling of outgoing and incoming lines, s.t. $i \in L^{in}$ and $L_i^{cpl} \in L^{out}$ set of returning lines (all $l \in L^{out} \setminus \bigcup_{i \in L^{in}} L_i^{cpl}$) the number of routes to schedule for line $l \in L$ set of routes $1, \dots, N_l^R$ for a traffic line $l \in L$ set of all directed arcs $a = (i, j)$ where $i, j \in V$ subset of arcs for line $l \in L$ set of tuples $(a, v) \in A \times V^b$ s.t. a covers/passes berth v Indicator for whether $(a, v) \in A^b$ has a fixed (= 1) or optional (= 0) visit by arc a at berth v .
Auxiliary sets	$R = L \times R_l$ $o_l \in V^0 \cup V^p$ $d_l \in V^0 \cup V^p$ $A_l^b \subset A^b$	Convenience notation for the set of all trips (l, r) to schedule The origin port of line $l \in L$ The destination port of line $l \in L$ The subset of tuples (a, b) for arcs $a \in A_l$ that cover berth b
Decision variables	$x_a^{(l,r)} \in \mathbb{Z}_2^{R \times A}$ $z_f^{(l,r)} \in \mathbb{Z}_2^{R \times F}$ $t_{(l,r)}^0 \in \mathbb{R}_+$ $t_{(l,r)}^1 \in \mathbb{R}_+$ $p_v^{(l,r)} \in \mathbb{Z}_2^{R \times V^b}$ $q_w^0{}^{(l,r)} \in \mathbb{Z}_2^{R \times W}$ $q_w^1{}^{(l,r)} \in \mathbb{Z}_2^{R \times W}$ $q_w^{(l,r)} \in \mathbb{Z}_2^{R \times W}$	whether trip (l, r) uses arc a or not whether ferry $f \in F$ is assigned trip (l, r) or not the departure time for trip (l, r) The arrival time for trip (l, r) whether trip (l, r) has a stop at berth v or not whether trip (l, r) fulfills lower time limit of window requirement w whether trip (l, r) fulfills the upper time limit of window requirement w whether trip (l, r) contributes to window requirement w

Trip duration constraints: Ensuring that trips fulfill minimum duration requirements is done with:

$$t_{l,r}^1 - t_{(l,r)}^0 \geq \sum_{a \in A_l} \pi_a x_a^{(l,r)} + \sum_{f \in F} \delta_{l,f} z_f^{(l,r)} + \beta \sum_{v \in V^b} p_v^{(l,r)}, \quad (6)$$

which computes a sum of travel times of arcs used by a trip. To incorporate ferries with lower speed is done with the second sum which uses the time difference $\delta_{l,f}$ of the current ferry and the fastest as an addition. Lastly, each optional berth visit $p_v^{(l,r)}$ adds β to the duration of trip (l, r) .

Minimum dwelling between routes and trips: A correct time ordering of trips is ensured by constraints

$$t_{l,r}^0 \geq t_{l,r-1}^0 \quad \forall l \in L^{out}; r \in R_l \setminus 1 \quad (7)$$

while constraints

$$t_{(m,s)}^0 + H(2 - z_f^{(l,r)} - z_f^{(m,s)}) \geq t_{(l,r)}^1 + \lambda^0 \quad (8)$$

$$(9)$$

ensure adequate time separation of trips for all $f \in F$; $l \in L^{in} \cup L^{ret}$; $r \in R_l$; $m \in L^{out} \cup L^{ret}$; $s \in R_m$: $(l, r) \prec (m, s)$. The minimum time separation for trips sharing a ferry is given by the parameters λ^0 . This is achieved by the term

$H(2 - z_f^{(l,r)} - z_f^{(m,s)})$ which is zero only when f is used for both trips (l, r) and (m, s) . This uses the lexicographical ordering of trips (l, r) and (m, s) which follows from the trip order given by r and s . Furthermore, we have assumed that there is some lexicographical ordering of the considered lines to remove symmetries in the constraint definitions such that $l \prec m$ if $(l, s) \prec (m, r)$. Note that we make no assumptions regarding the departure ordering of trips on two different lines. Time separation for the inbound portion of an outbound/inbound trip is achieved with constraints

$$t_{i,r}^0 \geq t_{L_i^{cpl},r}^1 + \lambda_i \quad \forall i \in L^{in}; r \in R_i, \quad (10)$$

where we do not need to check for ferry assignment.

Berth stopping and route choice variable coupling: The variable $p_v^{(l,r)}$ decides if trip (l, r) stop at berth $v \in V^b$ or not. This construction of allowing transit stops to be separated from graph vertices allows flexibility in designing the network since arcs can then pass stops along the way and end in waypoint vertices at sea.

In the first constraint set, $B_{(a,v)}$ is 1 if arc a has a mandatory visit at berth v and a is used by the trip (l, r) , then the decision variable $p_v^{(l,r)}$ will be 1, which ensures that $p_v = 1$ if an arc with a mandatory visit for berth v is used.

Conversely, constraint (12) ensure that p_v is zero if no arc with a mandatory or optional visit at berth v is used.

$$B_{(a,v)}x_a^{(l,r)} \leq p_v^{(l,r)} \quad \forall v \in V^b; (l,r) \in R; (a,v) \in A_l^b \quad (11)$$

$$p_v^{(l,r)} \leq \sum_{(a,v) \in A_l^b} x_a^{(l,r)} \quad v \in V^b; (l,r) \in R \quad (12)$$

Traffic requirement constraints (minimum stopping and window constraints): For berth stops, a minimum number of visits are ensured by constraints:

$$\sum_{l \in L} \sum_{r \in R_l} \sum_{(i,v) \in A_l} p_v^{(l,r)} \geq Q_v \quad \forall v \in V^b, \quad (13)$$

where Q_v is the minimum number of stops for stop v . For port vertices on the other hand, the minimum stops are ensured by constraints:

$$\sum_{l \in L} \sum_{r \in R_l} \sum_{(i,v) \in A_l} x_{(i,v)}^{(l,r)} \geq Q_v, \quad \forall v \in V^p \quad (14)$$

These constraints work on both outbound and inbound lines together, and therefore allow visits at the same stop in both directions of a trip to be counted.

For the window constraints, first let W be the set of window constraint tuples $w = (v, l, \tau_0, \tau_1, \sigma)$ with τ_0 and τ_1 being the lower and upper bounds of the time window during which lines(s) l should make at least σ stops at v . The following constraint sets ensure the window conditions are fulfilled for stops:

$$H \left(q0_w^{(l,r)} - 1 \right) \leq t_{(l,r)}^0 + \sum_{f \in F} \xi_v^{l,f} z_f^{(l,r)} - \tau_0 \leq H q0_w^{(l,r)} \quad (15)$$

$$H \left(q1_w^{(l,r)} - 1 \right) \leq \tau_1 - t_{(l,r)}^0 + \sum_{f \in F} \xi_v^{l,f} z_f^{(l,r)} \leq H q1_w^{(l,r)} \quad (16)$$

$$1 + q_w^{(l,r)} \geq q0_w^{(l,r)} + q1_w^{(l,r)} \quad (17)$$

$$q_w^{(l,r)} \leq q0_w^{(l,r)} \quad (18)$$

$$q_w^{(l,r)} \leq q1_w^{(l,r)} \quad (19)$$

$$\sum_{(i,v) \in A_l} x_{(i,v)}^{(l,r)} \geq q_w^{(l,r)} : \quad (20)$$

$$\sum_{(l,r) \in R} q_w^{(l,r)} \geq \sigma, \quad (21)$$

for all $(l,r) \in R$ and $(v, l, \tau_0, \tau_1, \sigma) = w \in W$. The first constraint set in equations (15) and (16) ensure that the variables $q0_w^{(l,r)}$ and $q1_w^{(l,r)}$ are only 1 if the approximated visit time to vertex v is within the constraint bounds. This is a simplification since it does not use the actual visit time but the pre-computed shortest path travel $\xi_v^{(l,f)}$ to v to increment time of departure $t_{(l,r)}^0$ from the line departure port. This

provides flexibility in defining the window constraints and allows further handling of ferries with different speeds. If a trip (l,r) is within these bounds it is said to fulfill the requirement and will count towards the minimum number of visits in constraint (21).

Since constraint set (20) count port visits using incoming arcs, it will not capture visits at the departure port of a line. For this special case, constraints

$$\sum_{(v,j) \in A_l} x_{(v,j)}^{(l,r)} \geq q_w^{(l,r)}, \quad (22)$$

for all $(l,r) \in R; (v, l, \tau, \tau_1, \sigma) = w \in W : v = o_l$ replace (20). This is necessary to enable setting constraints on the time a trip can start from the terminal or when it leaves the port to start its inbound trip.

III. COMPUTATIONAL EXPERIMENTS

A case study has been performed on the ferry public transport network servicing the southern archipelago outside of Gothenburg, Sweden. This system has a highly irregular configuration where the schedule is primarily fixed, yet the lines can contain many unique stop sequences as shown in Table II.

Each ferry is assigned to a class with a given speed. This is shown with the marked speed for each ferry operating the area in Table III. Model parameter values are given in Table IV

TABLE II: Ferry traffic patterns

Line	Type	Origin - Destination	# trips	# sequences
281	out/in	Saltholmen - Vrångö	31	19
282	out/in	Saltholmen - Styrösö Tången	20	12
283	out/in	Saltholmen - Brännö Rödsten	35	5
284	ret	Saltholmen - Saltholmen	3	1

TABLE III: Servicing vehicles

Name	Speed [kt]	Assigned class	Class speed [kt]
Fröja	12.5	Slow	10
Kungsö	13.5	Slow	10
Rivö	28.5	Fast	30
Silvertärnan	13.5	Slow	10
Skarven	13.5	Slow	10
Valö	28.5	Fast	30
Vesta	13.5	Slow	10
Vipan	17.5	Medium	20
Ylva	13	Slow	10

TABLE IV: Parameter values

Parameter	Name	Value
H	Horizon	24 hours
c_t	Time cost coefficient	1 cost per hour
λ^0	Terminal time	0.025 hours
β	Berth stop supplement	0.05 hours
$\lambda_{281}^1, \lambda_{282}^1, \lambda_{283}^1, \lambda_{284}^1$	Turning time	0.1 hours

Gurobi [7] was used to solve the optimization problem described. In order to achieve solutions within a reasonable computation time, the MIPGap parameter,

$$MIPGap = \frac{|ObjBound - ObjVal|}{|ObjVal|}, \quad (23)$$

was set to 5% for individual lines and 10% for all lines.

A. Line routings

Figures 2 and 3 show a selection of outbound-inbound trips for lines 281, 282 and clearly illustrate the different stopping patterns and corresponding arc choices for the trips. In the real system line 282 has multiple ending ports. This has been represented through arcs which further extend the inbound portion of the trips, and can be seen as an extra tour before returning to the terminal of the inbound portions of trip 1 and trip 6 in Figure 3. In each line plot, the start and end times $t_{(l,r)}^0$ and $t_{(l,r)}^1$ are shown at the corresponding vertex. We note that the trip durations are consistently shorter than the reported time tables. This indicates that further calibration of arc travel times would be necessary for realistic results which could be applied to the real system directly using the current vehicle fleet. Figure 4 shows the routing of the first trip of each line in a jointly scheduled model.

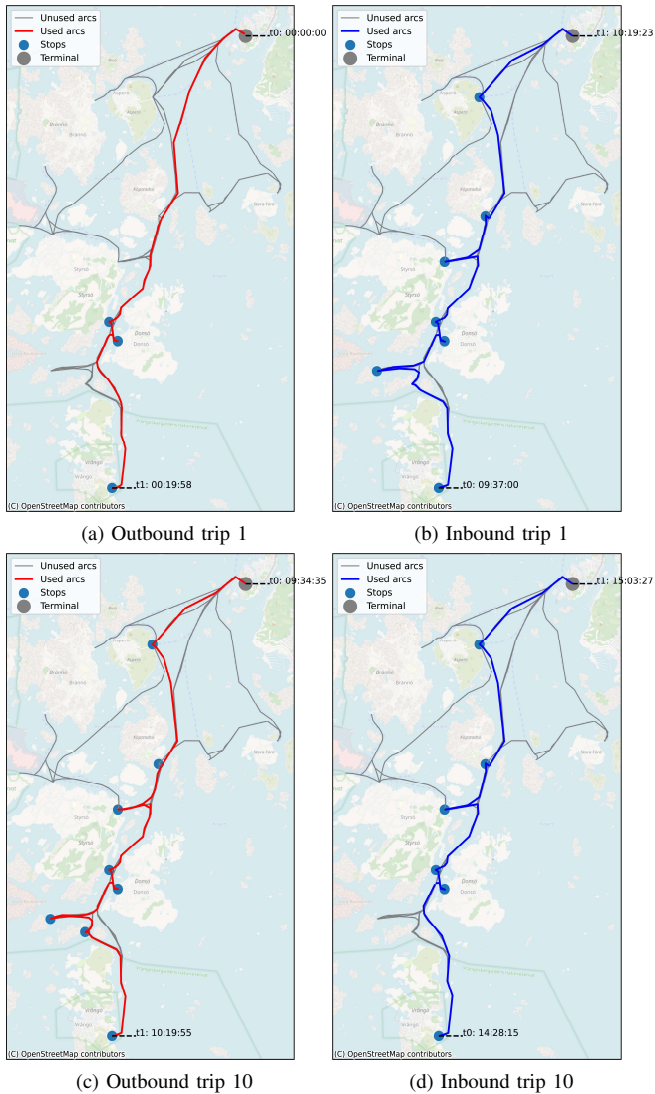


Fig. 2: Trip routing examples for line 281

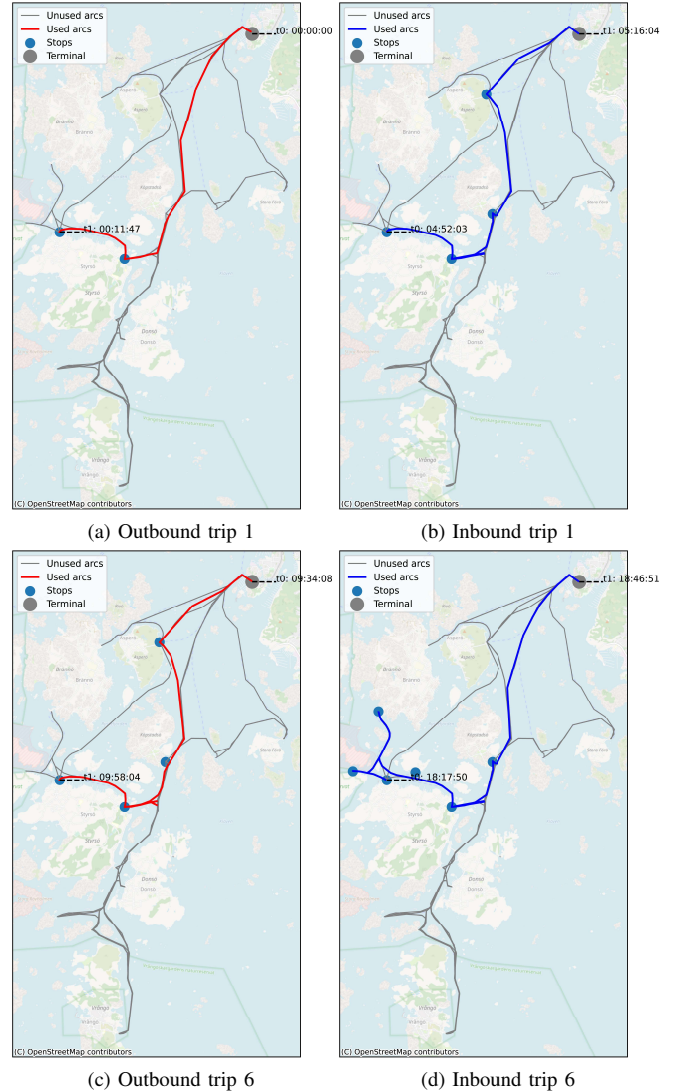


Fig. 3: Trip routing examples for line 282

B. Computation results

While it is also important to evaluate model performance in terms of transport related performance measures, we currently focus on the computation time. Table V show the running time in seconds, objective function values, number of continuous and integer variables and the number of constraints in the model before the presolve step. The table also show the obtained MIP Gap. In scenario "full", the model is jointly optimized for all lines using previously achieved separate solutions to guide the solver. In "full clean" no partial solutions are given. Scenarios "full peak wc" and "full no wc" examine the impact of window constraints on solver time. In "full peak wc" window constraints between 00:00 and 05:00 and from 19:00 to 24:00 are removed, only keeping those affecting traditional peak demand times. In "full no wc" all window constraints are omitted. This means that traffic requirements are only included through the stop visit constraints in Equations (13) and (14). In both cases no

TABLE V: Model results

	281	282	283	284	full	full clean	full peak wc	full no wc
Runtime [s]	91.94	2.48	0.71	0.05	388.55	449.09	10.70	0.49
Objective	22.14	11.28	6.35	0.68	42.50	42.08	38.86	35.73
# Variables	7700	4144	3360	150	41136	41136	22161	3876
# Integer variables	7612	4088	3280	144	40906	40906	21931	3646
# Constraints	12010	6211	6010	273	35264	35264	27145	19780
# Window constraints	2024	1064	720	18	12420	12420	6095	0
Solution MIP gap [%]	4.69	3.81	3.37	0.13	9.91	9.92	7.79	0

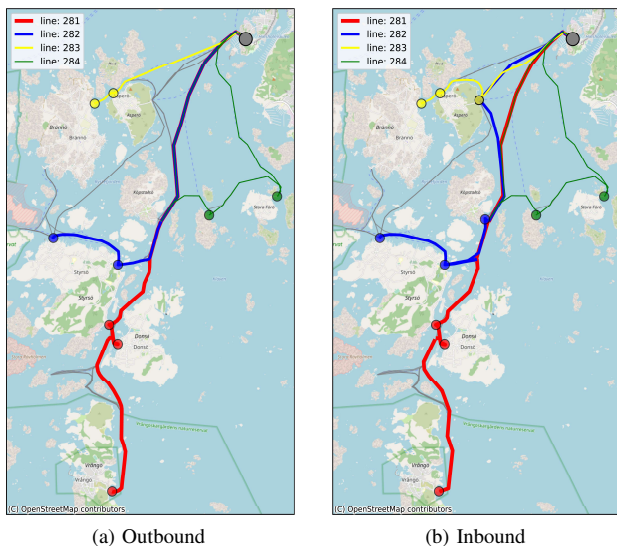


Fig. 4: The first trip of each line. Returning line shown for both outbound and inbound

partial solutions were given. Comparing the runtime with and without partial solutions for the full model show that guiding the solver with partial solutions improves the solution time by a full minute, which needs to be contrasted with the time spent producing the partial solutions. If we compare scenarios "full clean", "full peak wc" and "full no wc" it is clear that the number of window requirements has substantial impact on the computation time of this formulation, which is necessary to study further.

IV. CONCLUSIONS

We have presented a ferry network design model for simultaneous scheduling and routing of the public transport system in archipelago environments. We show that the model is able to jointly schedule multiple lines and produce plausible schedules which take into account stopping requirements as window conditions. Introducing a large number of window constraints in the model is shown to have a major impact on the time spent finding optimal solutions.

Future developments on this research will focus on three components:

- (i) The scheduling value of currently unused or unavailable links can be assessed by supplying alternate pathways with fixed costs. This will be examined in combination with high density depth measurements and spatial modeling.

- (ii) The computational properties of the model will be further examined. Particular attention will be given to the effect of varying the ferry fleet sizes and properties as well as the amount of, and distribution of, window constraints.
- (iii) In addition to computation time, key performance indicators (KPI) which express the quality of a solution in some dimension not captured by the objective function should be developed. Examples of such indicators are environmental impacts, distribution of stops and ferry usage. Such information is of high relevance when making decisions based on model results.

REFERENCES

- [1] T. Makkonen, M. Salonen, and S. Kajander, "Island accessibility challenges: Rural transport in the Finnish archipelago," *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, no. 4, pp. 274–290, Sep. 2013. [Online]. Available: <https://journals.open.tudelft.nl/ejtir/article/view/3005>
- [2] F. Errico, T. G. Crainic, F. Malucelli, and M. Nonato, "A survey on planning semi-flexible transit systems: Methodological issues and a unifying framework," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 36, pp. 324–338, Nov. 2013.
- [3] D. Cattaruzza, N. Absi, and D. Feillet, "Vehicle routing problems with multiple trips," *4OR-Q J Oper Res*, vol. 14, no. 3, pp. 223–259, Sep. 2016.
- [4] M. F. Fauske, C. Mannino, and P. Ventura, "Generalized Periodic Vehicle Routing and Maritime Surveillance," *Transportation Science*, vol. 54, no. 1, pp. 164–183, Jan. 2020.
- [5] M. Christiansen, K. Fagerholt, B. Nygreen, and D. Ronen, "Ship routing and scheduling in the new millennium," *European Journal of Operational Research*, vol. 228, no. 3, pp. 467–483, Aug. 2013.
- [6] L. B. Reinhardt and D. Pisinger, "A branch and cut algorithm for the container shipping network design problem," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 24, no. 3, pp. 349–374, Sep. 2012.
- [7] Gurobi Optimization, LLC, "Gurobi Optimizer Reference Manual," 2023. [Online]. Available: <https://www.gurobi.com>

Bilaga C

Samhällsekonomiska analyser för sjömätningar

Samhällsekonomiska analyser för sjömätningar

Delrapport i OSKAR-projektet

Inge Vierth

The logo for VTI (Västra Tekniska Institutet) consists of the lowercase letters 'vti' in a bold, sans-serif font. A vertical red line is positioned to the left of the logo.

VTI PM 2024:11
Utgivningsår 2024
vti.se/publikationer

VTI PM 2024:11

Samhällsekonomiska analyser för sjömätningar

Delrapport i OSKAR-projektet

Inge Vierth

Översatt titel: Socio-economic analyzes of hydrographic surveys – deliverable in OSKAR project.

Författare: Inge Vierth, VTI ([orc-ID-nr 0000-0001-6401-653](#))

Diarienummer: 2020/0108-7.4

Publikation: VTI PM 2024:11

Utgiven av VTI 2024

Kort sammanfattning

Sjöfartsverket initierade projektet OSKAR (Optimering av Sjöburen Kollektivtrafik och Annan Regelbunden trafik) med Göteborgs södra skärgård som referensområde. Utgångspunkten är att moderna sjömätningar förbättrar informationen om sjöbotten och sjökorten, något som potentiellt kan användas för att 1) förbättra sjösäkerheten, 2) reducera kostnaderna för kollektivtrafiken, vilket i sin tur innebär lägre behov av offentliga medel och/eller lägre biljettpreiser och/eller kortare restider, 3) minska fartygens bränsleförbrukning och utsläpp och 4) förbättra underlagen som används för att planera det framtida kollektivtrafikutbudet.

Detta delprojekt avser samhällsekonomiska analyser för sjömätningar. För att mätningarna i det 20 km² stora området studerat inom OSKAR ska vara samhällsekonomiskt lönsamma måste de årliga nyttorna överstiga Sjöfartsverkets årliga kostnader på cirka 174 000 kr. Överslagsmässigt är detta givet om två grundstötningar (som leder till fartygsskador på sammanlagt ca 200 000 kr per år) kan undvikas. Säkerhetsnyttor kopplade till personalen och trafikanterna på dessa två fartyg och säkerhetsnyttor relaterade till andra fartyg, miljön med mera kan tillkomma.

De samhällsekonomiska nyttorna är potentiellt stora för kollektivtrafikens fartyg som genomför 65 % av trafikarbetet i ”OSKAR-området”. Nyttobräkningarna kräver dock tillgång till detaljerade kollektivtrafikdata, något som OSKAR-projektet inte har. Nyttor kan även uppkomma genom att bränsleförbrukningen och utsläppen av de andra fartygen reduceras.

Myndigheterna kan använda informationen om sjöbotten för att utnyttja den befintliga maritima infrastrukturen på ett effektivare sätt och att identifiera lönsamma infrastrukturprojekt. En övergripande fråga är i vilken utsträckning en bättre samordning av sjömätningarna kan bidra till att minska kostnader för de olika sektorerna och samhället i stort.

Projektet visar att det finns ett behov av att utveckla effektsambanden och de monetära värderingarna av materiella skador och miljöskador till följd av sjöolyckor. Avseende data är en fråga hur potentialen för öppna, användbara och tillgängliga data över hav och kustområden förhåller sig till Försvarmaktens behov att begränsa möjligheten att dela data om sjöbotten. Ytterligare en fråga rör finansieringen av sjömätningarna, det vill säga i vilken grad sjömätningar ska finansieras via skatter, sålda sjökort, respektive avgifter för skraddarsydda tjänster.

Nyckelord

Sjömätningar, samhällsekonomiska analyser, trafiksäkerhet, kollektivtrafik, fallstudie.

Abstract

The Swedish Maritime Administration initiated the project OSKAR (Optimization of Seaborne Public Transport and Other Regular Traffic) with Gothenburg's southern archipelago as the reference area. The starting point is that modern hydrographic surveys improve the information about the sea bed and charts which can possibly be used to 1) improve maritime safety, 2) reduce the costs of public transport, which in turn means a lower need for public funds and/or lower ticket prices and/or shorter travel times, 3) reduce the ships' fuel consumption and emissions and 4) improve the basis used to plan the future public transport supply.

This project deliverable addresses socio-economic analyzes of hydrographic surveys. To be socio-economically profitable, the annual benefits must exceed the Maritime Administration's annual costs in the 20 km² studied area in OSKAR of approx. SEK 174,000. Roughly speaking, this is a given if two groundings (which lead to ship damage costs of about SEK 200,000 per year) can be avoided. Safety benefits linked to the staff and travellers on these two ships and safety benefits related to other ships and the environment etc. may be added.

The socio-economic benefits are potentially great for the ships that are carrying out public transport services, which stand for about 65% of the ship-kilometers in the OSKAR area. However, the benefit calculations require access to detailed public transport data, which the OSKAR-project did not have. Benefits can also be achieved by reducing the fuel consumption and emissions of the other ships.

Authorities can use the hydrographic surveys to make better use of the existing maritime infrastructure in a more efficient way and to identify profitable infrastructure projects. An overarching question is to what extent a better coordination of the hydrographic surveys can contribute to reducing costs for the various sectors and society in general.

The project showed that there is a need to develop the impact relationships (effektsamband in Swedish) and the monetary valuations regarding material damage and environmental damage as result of maritime accidents. Regarding data, it is a question of how the potential for open, useful, and accessible data over seas and coastal areas relates to the Armed Forces' need to limit the possibility of sharing data about the seabed. Another question concerns the funding, for example to what extent hydrographic surveys should be funded via taxes, sold nautical charts or fees for specific services.

Keywords

Hydrographic surveys, cost-benefit analysis, traffic safety, public transport, case study

Innehållsförteckning

Kort sammanfattning.....	5
Abstract.....	6
Förord.....	8
1. Bakgrund	9
1.1. Sjöfartsverkets initiative	9
1.2. Fortsättning av ADAPT-projekt.....	10
1.3. Syfte, metod och data.....	13
1.3.1. Syfte.....	13
1.3.2. Metod.....	13
1.3.3. Data.....	14
2. Samhällsekonomiska analyser	16
2.1. Steg i analysen	16
2.2. Kostnader och finansiering	17
2.3. Nyttor	19
2.3.1. Förbättrad sjösäkerhet.....	19
2.3.2. Effektivare kollektivtrafik.....	20
2.3.3. Lägre klimat- och miljöpåverkan.....	20
2.3.4. Övriga nyttor.....	21
2.4. Övergripande resultat	23
3. Avslutande diskussion.....	25
Referenser	27

Förord

Sjöfartsverket koordinerade projektet OSKAR (Optimering av Sjöburen Kollektivtrafik och Annan Regelbunden trafik) med Göteborgs södra skärgård som referensområde. Projektet genomfördes av Sjöfartsverket, Linköpings universitet och VTI mellan sommaren 2020 och våren 2024.

Detta delprojekt avser samhällsekonomiska analyser för sjömätningar. Författaren tackar alla som har bidragit med information till detta PM. Vi kunde inte genomföra delprojektet som planerat, dock har vi lärt oss mycket på vägen och identifierat många utvecklingsbehov.

Stockholm, maj 2024

Inge Vierth
Delprojektledare

Granskare/Examiner

Magnus Johansson, VTI.

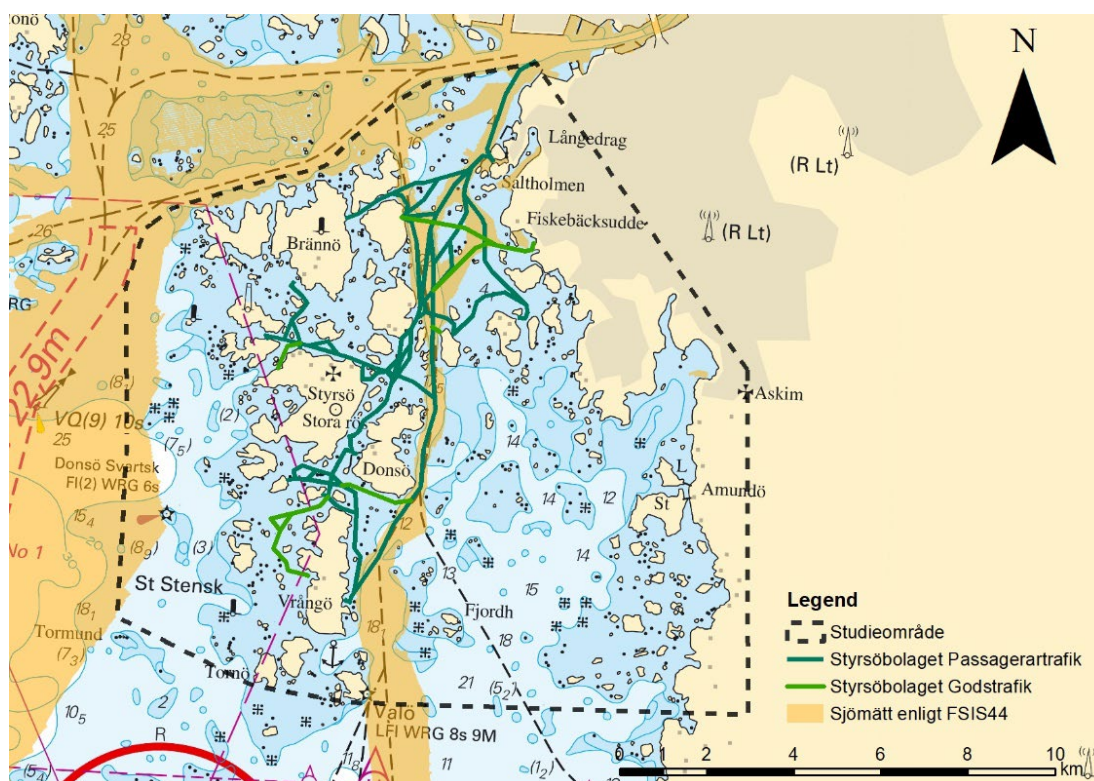
De slutsatser och rekommendationer som uttrycks är författarens/författarnas egna och speglar inte nödvändigtvis myndigheten VTI:s uppfattning./The conclusions and recommendations in the report are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of VTI as a government agency.

1. Bakgrund

1.1. Sjöfartsverkets initiative

Sjöfartsverket svarar för sjögeografisk information och dess samordning inom Sverige, Sveriges riksdag (2023). I Sjöfartsverkets långtids-plan för sjömätning prioriteras i enlighet med HELCOM (2021)¹ följande: 1) Sjömätning av de områdena som i första hand används av handelssjöfarten och oftast går till allmänna hamnar eller kommersiella hamnar, beräknas klart 2024, 2) Sjömätning av de områdena som i första hand används av övrig kommersiell trafik beräknas vara klart 2036 och 3) Sjömätning av den övriga kustzonen planeras in efter 2036.

År 2019 initierade Sjöfartsverket projektet OSKAR (Optimering av Sjöburen Kollektivtrafik och Annan Regelbunden trafik) med Göteborgs södra skärgård som referensområde. OSKAR-området utgörs av en del av Göteborgs södra skärgård som ligger söder om inloppet till Göteborg och Göta älv (se Figur 1). Området ingår i prioritetskategori 2 ovan. Området har inte undersökts med moderna mätmetoder, utan endast handlodats på 1800-talet, vilket gör att detaljerad information saknas. Göteborgs södra skärgård valdes som referensområde eftersom det finns grunda passager som kan utgöra säkerhetsproblem och för att området har en hög kollektivtrafikandel. Enligt Sjöfartsverkets uppskattningar står kollektivtrafiken för ca. två tredjedelar av de seglade kilometrarna i OSKAR-området.² Kollektivtrafiken och en del av godstrafiken genomförs av Styröbolaget (se Figur 1).



Figur 1. Studerad del av referensområdet i Göteborgs södra skärgård. Figuren visar också Styröbolagets linjekarta (2020) samt de delar av området som blivit modernt uppmätta enligt FSIS44 (Finsk-svensk realisering av den internationella sjömätningens standarden S-44) innan OSKAR-projektet startade 2020 (Källa Sjöfartsverket, 2022).

¹ De ”actions” som Sjöfartsverket främst grundar sin verksamhet på i detta fall är S2 och S3 (p.41).

² Se avsnitt 2.3.

Öarna i OSKAR-området har omkring 5 000 fastboende invånare, Sjöfartsverket (2022). Området utgör en populär destination för turism och öarnas befolkning ökar markant under sommarperioden.

1.2. Fortsättning av ADAPT-projekt

OSKAR-projektet, som genomfördes mellan sommaren 2020 och våren 2024, kan ses som en fortsättning på ADAPT-projektet (Assuring Depth of Fairways for Archipelago Public Transportation)³ som genomfördes under perioden 2015 till 2019 i Stockholms och Ålands skärgård. Sjöfartsverket koordinerade båda projekten. I ADAPT var Stockholms Läns Landsting (numera Region Stockholm) och Ålands Landskapsregering projektpartner och i OSKAR Linköpings universitet och Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI). ADAPT finansierades av EU:s regionala utvecklingsfond Interreg Central Baltic och OSKAR av Trafikverkets Sjöfartsportfölj.

I båda projekten var utgångspunkten att moderna sjömätningar förbättrar informationen om sjöbotten och i förlängningen sjökorten samt att denna information kan användas

- för att förbättra sjösäkerheten för de fartyg som seglar i respektive område
- för att minska fartygens bränsleförbrukning och därmed utsläpp. De med hänsyn till bränsleförbrukningen optimerade rutterna behöver inte vara de kortaste eftersom det kan löna sig att gå där det är lite djupare då mer vatten under kölen medför mindre friktion. Sambandet beskrivs bl. a. i Catarino (2021). Det kan också löna sig att sänka farten eller att optimera fartygsstorleken för att reducera bränsleförbrukningen.
- för att förbättra ruttdragningen i det befintliga kollektivtrafikutbudet och därmed reducera kostnaderna, vilket i sin tur leder till lägre behov av offentliga medel och/eller lägre biljettpriser för resenärerna. Den sjöburna kollektivtrafiken finansieras i första hand av skattemedel; i ADAPT (2018) anges skatteandelar på 65 procent (Stockholm) och 95 procent (Åland).
- för att förbättra planeringsunderlagen för det framtida kollektivtrafikutbudet, dvs. för att förbättra förutsättningarna för att analysera i vilken mån det är möjligt att minska trafikanternas restider/förseningar, erbjuda ytterligare avgångar (med en given eller förändrad flotta) eller förbättra utbudet på andra sätt.

I ADAPT genomfördes sjömätningar i Stockholms skärgård (176 km²) och Ålands skärgård (104 km²) medan det i OSKAR genomförts mätningar i södra Göteborgs skärgård (ca 20,51 km²), Sjöfartsverket (2022). Förutsättningarna skiljer mellan de olika områdena. I Ålands skärgård är det den åländska regeringen som ansvarar för sjömätning och planeringen av de offentliga farlederna, ADAPT (2019a). I Stockholm analyserades även hur de multimodala persontransporterna skulle kunna förbättras. Regionens engagemang bekräftas av att Trafikförvaltningen delfinansierade sjömätningen med ca 3 miljoner kr, Blied (2024),

I ADAPT (2019a) uppskattades effekterna på mängden CO₂-utsläpp för enskilda rutter, dock gjordes det inga heltäckande samhällsekonomiska analyser⁴. Sjöfartsverket uppdaterade de allmänt tillgängliga elektroniska och tryckta sjökorten (med tre meters djup) och tog fram specialanpassade produkter med en meters djup. Waxholmsbolaget använde kartorna i sitt trafikledningsverktyg. I efterhand har representanter för region Stockholm (Poldma, 2024) och Sjöfartsverket (Wallhagen, 2024a) gjort bedömningen att den detaljerade informationen var en förutsättning för att Waxholmsbolaget skulle kunna effektivisera ruttdragningarna.

³ ADAPT-projektet publicerade ingen officiell slutrapport; informationen i rapporten är tagen från delrapporter och material som togs fram inom ramen för workshops. <http://database.centralbaltic.eu/project/31>.

⁴ Se avsnitt 1.3.2 och avsnitt 2.1.

Sjöfartsverket publicerade över 50 underrättelser för sjöfarande (Ufs-notiser) i Stockholms skärgård, ADAPT (2019a). Ufs-notiserna bör anses som komplement till gällande sjökort tills korten har uppdaterats.

ADAPT-projektet var värdefullt för Stockholms skärgård även om potentialen efter sjömätningarna inte utnyttjades till fullo, Poldma (2024). Idag används nya/justerade rutter, bland annat vid Tjärstören (efter Sjöfartsverkets trafikomläggning och -separering) och på Edöfjärden (där Trafikförvaltningen flyttade och förnyade utprickningen och Sjöfartsverket justerade båtsportleden, vilket ledde till att antalet incidenter minskade). Trafikförvaltningen gjorde inte någon systematisk uppföljning och intresset för att genomföra de inom ramen för ADAPT-projektet framtagna förslagen var över lag begränsat, Poldma (2024). En skärpning av Sjöfartsverkets rutiner har dock, bland annat, inneburit att spridningen av specialanpassade produkter med en meters djup inte längre är möjligt, Karlsson (2024a).

Skärpningen av Sjöfartsverkets rutiner innebar inte någon förändring av lagstiftningen gällande skydd av geografisk information, Wallhagen (2024b). Det förändrade säkerhetsläget kan möjligen ha påverkat olika bedömningar, men Sjöfartsverket och Försvarmakten har en pågående dialog om hur en mer stringent tolkning av lagen kan göras för att möjliggöra mer högupplöst djupdata för sjöfart än vad som idag är tillgängligt. Skärpningen påverkade inte förutsättningarna för genomförandet av OSKAR-projektets analyser, Wallhagen (2024b).

I OSKAR-projektet ingick inte några organisationer som upphandlar eller utför kollektivtrafik i Göteborgs södra skärgård. Västtrafiken och Styröbolaget följde dock projektet som medlemmar i en referensgrupp. Förutsättningarna för upphandling av den sjöburna kollektivtrafiken skiljer sig åt mellan områdena. Region Stockholm äger Waxholmsbolaget som äger de fartyg som ska användas till kollektivtrafiken. Region Stockholm upphandlar driften av dessa fartyg sedan 1998, ADAPT (2019b). I Västra Götalandsregionen upphandlar Västtrafiken den operatör eller de operatörer som ska genomföra kollektivtrafiken i Göteborgs södra skärgård.

Ytterligare en skillnad mellan de två projekten är att ADAPT-projektet genomförde samtliga planerade steg medan OSKAR-projektet endast genomförde sjömätningarna (inkl. cleaning) och uppdaterade Djupdatabasen (DIS). Inom OSKAR gjordes ingen uppdatering av Sjökortsdatabasen (SJKBAS), Electronical Navigational Chart (ENC) eller sjökort, se Tabell 1. Enligt Sjöfartsverkets riktlinjer ska Sjökortsdatabasen uppdateras sex månader efter sjömätningen. Efter ett byte av systemet för sjökortshanteringen för några år sedan dras processen dock med stora förseningar och uppdateringen i Sjökortsdatabasen tar för närvarande uppemot två till tre år. Detta innebar att sjökorten i OSKAR-området inte uppdaterades under projektiden, Sjöfartsverket (2024a) och att aktörernas i området inte kunde använda den förbättrade informationen om sjöbotten som det var tänkt från början.⁵

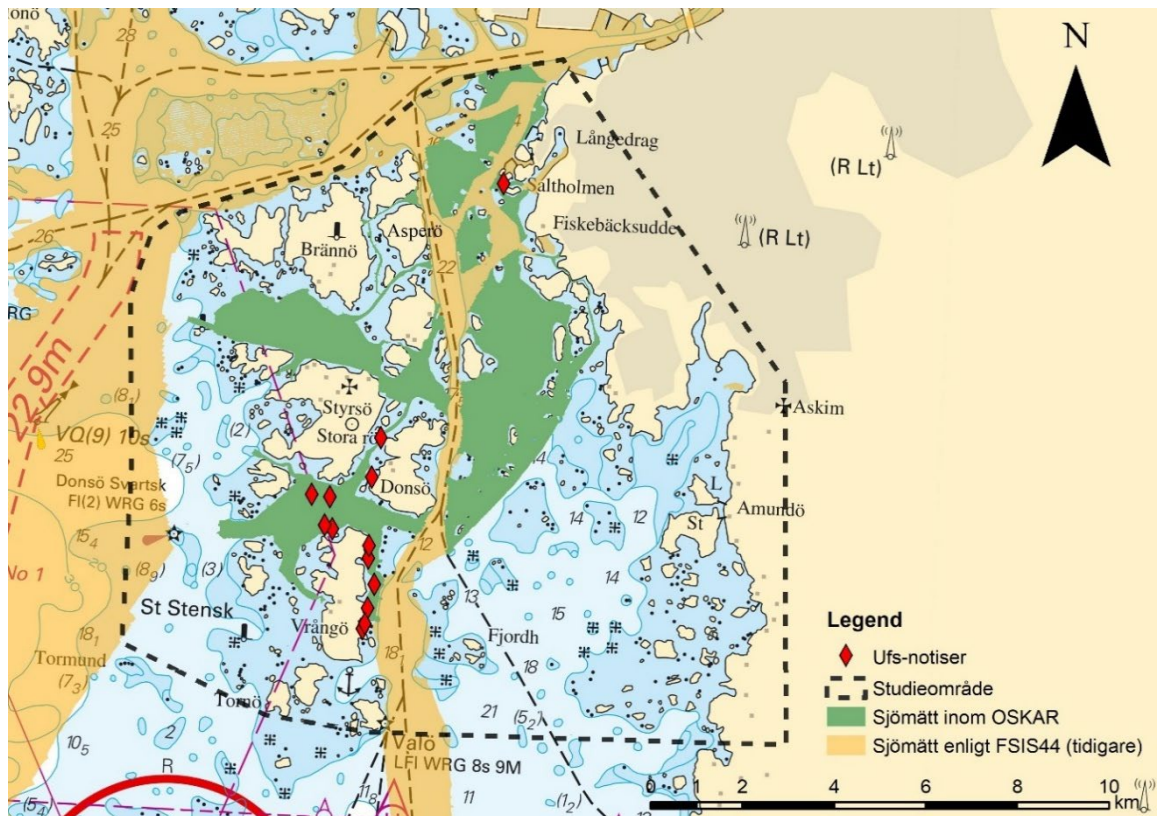
Sjöfartsverket har dock vid sjömätningen inom ramen för OSKAR-projektet upptäckt förhållanden som kan innebära fara för sjöfarande (till exempel tidigare okända grund i eller nära farleden) och har utan fördröjning skickat ut tolv Ufs-notiser om detta. Se Tabell 1 och Figur 2.

⁵ Planen var även att använda de uppdaterade sjökorten som utgångspunkt för att utveckla i beslutsstödsystem iterativt i samspel mellan aktörerna.

Tabell 1. Steg som genomfördes i projekten ADAPT och OSKAR.

Steg	Innehåll	Genomfört inom ADAPT-projekt	Genomfört inom OSKAR-projekt
Beredning	Årlig och långsiktig sjömättningsplan Principer, prioriteringar och avgränsningar Specifikation med syfte, uppdragsgivare, vattenstånd m.m.	Ej relevant	Ej relevant
Sjömätning	Kalibreringar, val av kursavstånd, kontrollkurser mm. Avvikelse från sjökortsbild? Vidta åtgärder om fara för sjöfart.	X	X
Cleaning	Rensa insamlat data från felaktig botten (sjögräs, fiskar m.m.) Registrera funna vrak och objekt.	X	X
Uppdatering DIS	Importera djup till Djupdatabasen (DIS) Skapa källa och bedöm kvalitet, kontrollera mot sjökort	X	X
Ufs-notiser	Skicka ut underrättelser för sjöfarande (Ufs)	X	X
Uppdatering SJKBAS	Uppdatera sjökortsdatabasen (SJKBAS)	X	
Uppdatering produkter	Uppdatera ENC (Electronical Navigational Chart) Uppdatera sjökort, båtsportkort, specialprodukter m.m.	X	

Källor: Sjöfartsverket (2022, 2024a).



Figur 2. Ufs-notiser som Sjöfartsverket skickade ut inom ramen för OSKAR-projektet. Källa Blied, (2023).

1.3. Syfte, metod och data

1.3.1. Syfte

Det ursprungliga syftet med denna PM var att analysera de samhällsekonomiska kostnader och nyttor som är förknippade med att sjömäta och uppdatera sjökorten i OSKAR-området och att utveckla en metod för att optimera rutterna i den sjöburna kollektivtrafiken utgående från samhällsekonomiska kriterier. Mer konkret skulle Sjöfartsverkets kostnader för att mäta, bearbeta data och sprida information om säkerhetsrisker och uppdatera sjökorten jämföras med de nyttor som uppstår (eller kan uppstå) för samhället. Då Sjöfartsverket hittills inte har uppdaterat sjökorten, så att aktörerna i området kan ta till sig den förbättrade informationen om sjöbotten, och eftersom projektet inte hade tillgång till detaljerade kollektivtrafikdata var det emellertid endast möjligt att leverera en bredare och mer övergripande samhällsekonomisk analys. Fokus ligger i stället på hur analysen borde genomföras och förutsättningarna för analysen.

1.3.2. Metod

Samhällsekonomiska analyser (kostnadsnyttoanalyser, cost-benefit analyses (CBA)) är en metod som används för att säkerställa att samhällets begränsade resurser används på ett effektivt sätt. Positiva effekter (nyttor) och negativa effekter (kostnader) av en åtgärd för samhället identifieras, kvantifieras i monetära termer och jämförs. Med samhället avses kollektivet av berörda invånare och privata och offentliga organisationer i ett avgränsat område. Man kan säga att företagens företagsekonomiska analyser på ett motsvarande sätt ska garantera att ett företags resurser används på ett effektivt sätt.

Behovet av samhällsekonomiska analyser uppstår på grund av förekomsten av marknadsmisslyckanden i form av externa effekter⁶, kollektiva nyttigheter⁷, stordriftsfördelar⁸ mm. Vanligtvis utgör den samhällsekonomiska analysen en av flera delar i ett beslutsunderlag.

Det övergripande målet för den svenska transportpolitiken är att säkerställa en *samhällsekonomiskt effektiv* och långsiktigt hållbar transportförsörjning för medborgare och näringsliv i hela landet. Under det övergripande målet har regeringen också satt upp funktionsmål och hänsynsmål, innefattande tillgänglighet, jämställdhet, säkerhet, miljö och hälsa, Regeringskansliet (2024a).

Som utgångspunkt används de effektsamband som Trafikverket (2024a) rekommenderar och den metod och de kalkylvärden som ASEK-gruppen⁹ rekommenderar för transportsektorns samhällsekonomiska analyser, Trafikverket (2023)¹⁰. Relevanta nyttor som ligger helt eller delvis utanför transportsektorn diskuteras också. De i den samhällsekonomiska analysen ingående stegen beskrivs i avsnitt 2.1 nedan.¹¹

1.3.3. Data

Sjöfartsverkets kostnader för sjömätning med de bemannade fartygen Anders Bure och Petter Gedda (totalt 20,51 km²), cleaning, utskickandet av UFS, uppdatering av Djupdatabasen, Sjökortsdatabasen och sjökortsprodukterna (se Tabell 1) används för att beskriva samhällets åtgärds-kostnader. De relativt begränsade mätningarna med det autonoma fartyget Skräddaren (0,08 km²) inkluderas inte i den

⁶ Externa effekter innebär att en individs eller ett företags agerande påverkar andra individers nytta och/eller företags produktion utan att detta regleras på en marknad och kompenseras ekonomiskt. Förekomsten av externa effekter beror i huvudsak på avsaknad av äganderätter samt höga transaktionskostnader för att åstadkomma en marknadslösning. Därigenom misslyckas marknaden med att sätta ett pris på externaliteten trots att den medför en verklig kostnad eller nytta. Avsaknad av ett pris på externaliteten innebär att individer inte kommer att göra val på den fria marknaden som är optimala för samhället som helhet. I OSKAR-projektet är de emissioner som fartygen som rör sig i området ger upphov till ett exempel på en extern effekt.

⁷ En kollektiv nytta karaktäriseras av icke-rivalitet i konsumtion och av icke-exkluderbarhet. Det sistnämnda innebär att det inte går att avgränsa konsumtionen av nyttigheten till de som betalar för den. Förekomsten av icke-exkluderbarhet innebär att någon marknadslösning inte uppkommer spontant, eftersom inget företag av vinstintresse kan producera och sälja varan i fråga. Förekomsten av icke-rivalitet innebär att även om det skulle vara möjligt att utestänga de som inte betalar för nyttigheten så är det inte samhällsekonomiskt önskvärt att göra det. När väl en nytta tillhandahålls av någon kan den nyttjas av flera personer utan att det orsakar en minskad nytta för någon, dvs. tillhandahållandet är associerat med en positiv extern effekt.

⁸ Transportinfrastruktur karaktäriseras generellt sett av höga fasta och låga rörliga kostnader. I sådana fall sjunker genomsnittskostnaden för produktion över ett relativt stort intervall av produktionsvolym.

⁹ ASEK står för ”Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden”. Trafikverket ansvarar för att utveckla de principer för samhällsekonomisk analys och de kalkylvärden som ska tillämpas i transportsektorns samhällsekonomiska nyttokostnadsanalyser. ASEK-arbetet är kopplat till en myndighetsövergripande samrådsgrupp som består av representanter för Trafikverket, Transportstyrelsen, Sjöfartsverket, Naturvårdsverket, Energimyndigheten, Boverket, Stockholms Läns Landsting/SL samt Trafikanalys (adjungerad). ASEK-arbetet stöds av ett vetenskapligt råd bestående av vetenskaplig expertis inom ämnesområdena nationalekonomi, miljöekonomi, regionalekonomi och transportanalys. ASEK-arbetet ska bidra till samordning av de forsknings- och utvecklingsinsatser som genomförs inom området.

¹⁰ Tidsmässigt har det inom ramen för OSKAR-projektet inte varit möjligt att relatera till den uppdaterade versionen av ASEK-rapporten som publicerades 2024-04-02 <https://bransch.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/Planera-och-utreda/Samhallsekonomisk-analys-och-trafikanalys/samhallsekonomi/analysmetod-och-samhallsekonomiska-kalkylvardenasek/>. Detta påverkar dock inte slutsatserna i denna PM.

¹¹ Trafikverket och Sjöfartsverket använder samma metod för att analysera till exempel den samhällsekonomiska lönsamheten av investeringar i transportinfrastrukturen.

samhällsekonomiska analysen eftersom mätningarna genomfördes för att testa den tekniska genomförbarheten och inte för att identifiera nya möjliga rutter.¹²

AIS-data används för att beskriva sjötrafikarbetet i OSKAR-området. Se Sjöfartsverket (2024b).

Transportstyrelsens säkerhetsöversikt används för att beskriva antalet sjöolyckor (och resulterade personskador) i Sverige. Se Transportstyrelsen (2023).

Mot bakgrund av att OSKAR-projektet inte hade tillgång till detaljerade kollektivtrafikdata i området beskrivs de potentiella nyttorna kopplade till kollektivtrafiken och de externa effekter som denna trafik ger upphov till enbart i ord. Övriga potentiella nyttor beskrivs också enbart kvalitativt.

¹² Internationellt och därmed även inom Sjöfartsverket pågår ett arbete med nya standarder för nästa generations navigationssystem (S-100 ECDIS) för sjöfarten. Övergången innebär att nya sjögeografiska produkter behöver tas fram enligt de nya standarderna, samtidigt som befintliga produkter behöver vidmakthållas i en övergångsperiod. De nya så kallade S-100 produkterna innebär att detaljerad djupinformation kan visas i fartygens navigationssystem och också kompenseras med vattenstånduppgifter. Även väder och navigationsvarningar kan inkluderas direkt i S-100 ECDIS, Wallhagen (2024e).

2. Samhällsekonomiska analyser

Nedan presenteras i avsnitt 2.1 översiktlig de olika stegen som brukar ingå i en samhällsekonomisk analys i transportsektorn. I avsnitten 2.2 och 2.3 identifieras, kvantifieras och värderas, så långt som möjligt de i OSKAR-projektet relevanta kostnaderna och nyttorna. I avsnitt 2.4 sammanställs resultaten översiktligt.

2.1. Steg i analysen

ASEK (Trafikverket, 2023) rekommenderar att genomföra analyserna i följande steg:

1) Definiera och avgränsa: Normalt jämförs ett (eller flera) utredningsalternativ (UA) som innehåller den betraktade åtgärden med ett jämförelsealternativ (JA) där inte någon åtgärd genomförs. JA kallas även för referensalternativ eller nollalternativ. Jämförelsen mellan UA och JA kan göras på kort sikt (med givna förutsättningar) eller på längre sikt (med större frihetsgrader). I Tabell 2 illustreras vad kort och långt sikt kan innebära i OSKAR-projektet.

Tabell 2. Antaganden för analyser på kort och långt sikt i OSKAR-projektet.

	Kort sikt	Långt sikt
Reseefterfrågan	Given	Möjlighet att attrahera fler resenärer och därmed förbättra tillgängligheten till Göteborgs skärgård och förutsättningarna för regional utveckling. För de tillkommande transporter (den tillkommande trafiken) beaktas vid beräkningen av tids- och kostnadsbesparingarna om dessa är ny genererade transporter eller överflyttade transporter, Trafikverket (2023).
Kollektivtrafikutbud (antal linjer och deras utformning) Antal och lokalisering av hållplatser	Given	Kan utvecklas Inom ramen för OSKAR-projektet har en generell optimeringsansats tagits fram, se Sederlin & Lidén (2023)
Fartygsflottans sammansättning och använt bränsle	Given	Kan utvecklas Interreg-projektet REISFER (Reducing CO ₂ emissions in island ferry traffic) har som målsättning att minska färjornas CO ₂ -utsläpp i Estland, Finland, Åland och Sverige med tio till tjugo procent, REISFER (2023). Projektet koordineras av Tekniska universitet i Tallinn. Som svenska partners ingår Blidösbolaget och VTI. Projektet pågår mellan 2024 och 2026 och kan också ses som en fortsättning av ADAPT-projektet då det utöver ruttoptimeringen inkluderar åtgärder som bränslebyten och eco-driving.

2) Identifiera effekter: dvs. att identifiera de relevanta (åtgärds)kostnader och nyttor, dvs. effekter till följd av åtgärden (som ingår i UA men inte i JA). Här är det viktigt att reda ut om effekterna inträffar till följd av åtgärden eller om de skulle inträffat ändå. Man kan till exempel förvänta sig en ökning av reseefterfrågan oavsett om åtgärden i UA (sjömätning, uppdatering av sjökort m.m.) genomförs eller inte. För kostnaderna inkluderas nedan även information om finansieringen.

Effektsamband för transportsystemet är ett stöd vid planering, projektering och uppföljning av åtgärder inom transportsystemet (Trafikverket, 2024a). Verket arbetar kontinuerligt med att ta fram, värdera och sammanställa bättre kunskap om effekter av åtgärder i transportsystemet, men än så länge innehåller ”Effektkatalogen” inga samband för sjötransporter. ASEK (Trafikverket, 2023) rekommenderar dock emissionsfaktorer för sjöfartens utsläpp till luft. I kalkylverket för farledsinvesteringar (Trafikverket, 2024b) ingår vissa antaganden för säkerhetsberäkningar, dessa är dock inte relevanta för OSKAR-projektet.

3) Kvantifiera och värdera effekter: Många effekter värderas genom marknadspriser. Om det inte finns marknadspriser kan man utgå ifrån berörda individers betalningsvilja (för till exempel bättre luft). Analyser görs som regel i reala priser, d.v.s. alla priser är uttryckta i ett och samma penningvärde. Analyserna brukar utgå ifrån årsdata; i OSKAR-projektet skulle det dock vara möjligt att ta hänsyn till kollektivtrafikens tre olika tidtabeller, att fritidsbåtar främst seglar mellan maj och september eller aspekter som is/vinter, dimma och låg-/högvatten.

ASEK (Trafikverket, 2023) rekommenderar inga trafikeringskostnader för persontrafik på vatten. Potentiella kostnadsbesparingar, till följd av kortare/snabbare/bränslesnålare rutter för redare, bör därför uppskattas med utgångspunkt i de fartygstyper och -storlekar som Styröbolaget använder idag eller liknande fartyg.

Avseende säkerhet rekommenderar ASEK monetära värderingar för personskador (dödade/saknade och lindrigt och allvarligt skadade) men inte för materiella skador på fartyg och gods eller miljöskador till följd av olyckor.

Slutligen rekommenderar ASEK hur utsläppen av växthusgaser och luftföroreningar ska värderas.

4) Sammanställa kalkyl: För att samtliga kostnader och nyttor som uppkommer under åtgärdens livslängd ska bli jämförbara diskonteras framtida värden till nuvärden. I kalkylen sammanställs och summeras nuvärdet av alla löpande kostnader och nyttor som utfaller under kalkylperioden och från denna summa dras åtgärds-kostnaden. Resultatet blir ett nettonuvärde som ska vara större än noll för att visa på lönsamhet (när det gäller alla effekter som värderas i kalkylen).

5) Göra känslighetsanalyser: Den samhällsekonomiska analysen förknippas liksom andra beslutsunderlag med osäkerheter; därför är det viktigt att genomföra känslighetsanalyser för att göra beslutsfattare medveten om hur robusta de beräknade kvantitativa resultaten är.

2.2. Kostnader och finansiering

Sjöfartsverket har registrerat kostnader för arbetsmomenten sjömätning med de bemannade mätfartygen och cleaning på ca 3,3 miljoner kr. Sjöfartsverket har även uppskattat att kostnaderna för arbetsmomenten Uppdatering i Djupdatabasen, Uppdatering i Sjökortsdatabasen och Uppdatering av produkter kommer uppgå till ytterligare ca 0,4 miljoner kr. Ur Tabell 3 framgår att kostnaderna för sjömätningen (inkl. cleaning) utgör nästan 90 procent av Sjöfartsverkets samlade åtgärds-kostnader.

Tabell 3. Sjöfartsverkets kostnader som resulterar i färdiga sjökortsprodukter inom ramen för OSKAR.

Steg	Kostnader	Kostnader inkl. OH (kr)	
Sjömätning	Lodning (personal), drift (bunker, fartyg, utrustning), övriga kostnader (resor mm)	2 040 677	Redovisade kostnader (Olsson, 2022)
Cleaning (inkl. redovisning)	Cleaning (personal) och redovisning (personal)	1 280 728	Redovisade kostnader (Olsson, 2022)
Uppdatering DIS	Importera djup till Djupdatabasen (DIS) Skapa källa och bedöm kvalitet, kontrollera mot sjökort	114 000	Kostnader baserat på redovisade timmar (Karlsson, 2024b)
Skicka ut UFS		10 000	Kostnader baserat på antagandet att det krävs få timmar (Wallhagen, 2024c)
Uppdatering SJKBAS	Uppdatera sjökortsdatabasen (SJKBAS)	273 600	Kostnader baserat på uppskattat tidsåtgång (Löfstrand, 2024)
Uppdatering produkter	Uppdatera ENC (Electronical Navigational Chart) Uppdatera sjökort, båtsportkort, specialprodukter mm.	10 000	Kostnader baserat på antagandet att det krävs få timmar (Wallhagen, 2024c)
Summa		3 729 005	

Sjömätningarna behöver upprepas i olika intervaller för olika områden. Som tumregel kan man säga vart 20:e år. Grunda passager och områden med tidvatten behöver dock mätas oftare, Olsson (2022). Botten i OSKAR-området består i första hand av berg, grus och lera. Enligt Sjöfartsverket behöver stråken där fartygen huvudsakligen rör sig (uppskattningsvis ca 20 % av området) mätas ungefär vart tionde år och de övriga ytorna ungefär vart trettionde år, Wallhagen (2024d). Utgående från dessa antaganden uppgår Sjöfartsverkets årliga kostnader i den samhällsekonomiska analysen till ca 174 000 kr per år. Kostnaderna ökar förstås om ett större område skulle betraktas som huvudsakliga stråk.

Förutsättningarna för framtagningen av sjökort med en meters djup (som användes i ADAPT-projektet i Stockholms skärgård) har inte utretts när detta PM skrivs i maj 2024. I OSKAR-området kunde det enligt Styröbolaget (Svensson, 2024) vara intressant att studera områden inom Asperösundet mellan Asperö och Brännö. Styröbolaget har slutat köra här pga. av grundstötningar och osäkerheter; man kunde eventuellt köra igen i detta delområde om man visste var grunden ligger. Det handlar om en företagsekonomisk analys om ett privat bolag köper en skräddarsydd produkt i form av detaljerad information om sjöbotten och använder dessa för eget bruk och om en samhällsekonomisk analys om en aktör köper detaljerade information och gör dessa allmänt tillgängliga.

Med hjälp av information från båtlivsorganisationer prioriterar Sjöfartsverket de områden som har störst behov och potential att höja säkerheten. Sjöfartsverkets nyligen påbörjade mätningar i Stockholms skärgård bekostas till en början av intäkter från sjökortsförsäljning, SVT Nyheter Stockholm (2024). Vi har inte information om vilka båtägare som köper vilka sjökort, det är dock närliggande att denna lösning innehåller både samhällsekonomiska och företagsekonomiska element.

2.3. Nyttor

Nyttorna kopplas i huvudsak till de individer och företag som framför eller använder fartygen och de boende i OSKAR-området.¹³ År 2022 genomfördes sammanlagt ca 678 000 fartygskilometer i området, därav ca två tredjedelar av kollektivtrafikens fartyg. Näst störst andel stod fritidsbåtar för med 16 procent av utfört trafikarbete. Lastfartyg och myndigheternas fartyg stod för ca sex procent var och fiskefartyg för ca fyra procent av trafikarbetet i området. Uppskattningen baseras på AIS-data för fyra veckor 2022 (en vecka i varje kvartal), Sjöfartsverket (2024b). Se Tabell 4.

Tabell 4. Uppskattade fartygskilometer per fartygstyp i OSKAR-området 2022.

	Fartygskilometer	Andelar
Kollektivtrafikens passagerarfartyg	287 575	42 %
Kollektivtrafikens höghastighetsfartyg	151 286	22 %
Fritidsbåtar	110 594	16 %
Lastfartyg	37 953	6 %
Myndigheternas fartyg m.m.	43 121	6 %
Fiskefartyg	23 909	4 %
Övrigt (sophämtning, ambulans m.m.)	23 257	3 %
Totalt	677 695	100 %

Källa: Sjöfartsverket (2024b).

Nyttorna i transportsektorn kan huvudsakligen kopplas till sjösäkerhet (se avsnitt 2.3.1), kollektivtrafiken (se avsnitt 2.3.2) och klimat- och miljöpåverkan (se avsnitt 2.3.3). Därutöver kan det finnas nyttor i och utanför transportsektorn (se avsnitt 2.3.4).

2.3.1. Förbättrad sjösäkerhet

Sjöolyckskostnaderna utgörs av den samhällsekonomiska olyckskostnaden till följd av den riskökning som ytterligare en fartygskilometer bidrar till. Den interna olyckskostnaden avser kostnaden för det betraktade fartyget och den externa olyckskostnaden den kostnad som faller på andra fartyg, trafikanter, miljön mm. Nedan inkluderas både de interna och externa olyckskostnaderna i beräkningen av nyttorna kopplad till förbättrad sjösäkerhet.

Transportstyrelsens statistik för hela landet visar att lejonparten av olyckorna till sjöss med dödlig utgång inträffar inom fritidssjöfarten (som inte inkluderas i transportsektorn). År 2022 omkom i Sverige 15 personer inom fritidssjöfarten och ingen inom yrkessjöfarten, se Tabell 5. Inom yrkessjöfarten registrerades samma år 117 skadade. Statistiken innehåller inte motsvarande uppgifter för fritidssjöfarten.

Tabell 5. Omkomna/saknade inom yrkessjöfarten och fritidssjöfarten 2022 och i genomsnitt per år över perioden 2017–2021.

Omkomna/saknade	Antal 2022	Medelvärde 2017–2021
Yrkessjöfart	0	2
Fritidssjöfart	15	20

Källa Transportstyrelsen (2023).

¹³ Klimateffekter (till följd av lägre utsläpp av växthusgaser) är av global karaktär.

Ur Transportstyrelsens sammanställning av antalet sjöolyckor inom yrkessjöfarten efter typ av ”initial händelse” framgår att det registrerades 203 sjöolyckor år 2022 och att maskinhaverier (28 procent), kollisioner med annat föremål (20 procent) och grundstötningar (12 procent) var det mest vanliga ”initiala händelser”, se Diagram 11 i Transportstyrelsen (2023).

Styrsöbolaget registrerar i snitt tre grundstötningar per år i OSKAR-området och reparationskostnaderna uppskattas uppgå till ungefär 100 000 kr per grundstötning, Svensson (2024). Sjöfartsverket anger reparationskostnader på ca 100 000 kr om det uppstår lindriga skador när ett av verkets fartyg går på grund och kostnader på en eller flera miljoner kronor om en propeller, axlar, stödbockar, skrovgenomföringar eller plåt och spant blir skadat, Hagander (2023).

Bättre information om var man kan köra innebär för företagen och individerna som framför/äger fartygen en tentativ nytta i form av lägre reparationskostnader och/eller lägre försäkringspremier. Även om bättre sjökort kan förväntas bidra till att minska olycksriskerna, antalet olyckor och/eller olyckornas allvarighet saknas kausala samband. Mot bakgrund av att det inte finns effektsamband och enbart värderingar för personskador¹⁴ är det svårt att beräkna hur olika åtgärder påverkar sjösäkerheten. Här finns ett utvecklingsbehov.

2.3.2. Effektivare kollektivtrafik

Generellt är det enklare att uppskatta hur bättre information om sjöbotten kan användas för att effektivisera kollektivtrafiken än för att förbättra sjösäkerheten. Förklaringen är att den bättre informationen kan användas för att beräkna hur ett optimalt kollektivtrafikutbud borde se ut och hur kollektivtrafiktjänsterna borde produceras (jämfört med nuläget). Teoretiskt är det förstås möjligt att optimeringen som beaktar den förbättrade informationen om sjöbotten och kollektivtrafikens externa effekter kopplad till säkerhet och miljö skulle kunna innebära lägre hastigheter/längre restider eller lägre avgångsfrekvenser.

Inom ramen för OSKAR-projektet har det inte varit möjligt att uppskatta nyttorna för trafikanterna (som använder kollektivtrafiken), organisationerna som genomför kollektivtrafiken och skattebetalarna (som delfinansierar kollektivtrafiken). Det har inte heller varit möjligt att studera avvägningar mellan lägre restider/färre/kortare förseningar för trafikanter, kollektivtrafikens produktionskostnader och de externa effekterna som kollektivtrafiken ger upphov till. En i detta sammanhang relevant fråga är hur mycket bränsle som krävs för att köra i kapp en försening och hur många resenärer som krävs för att ikappkörningen ska vara samhällsekonomisk lönsam.

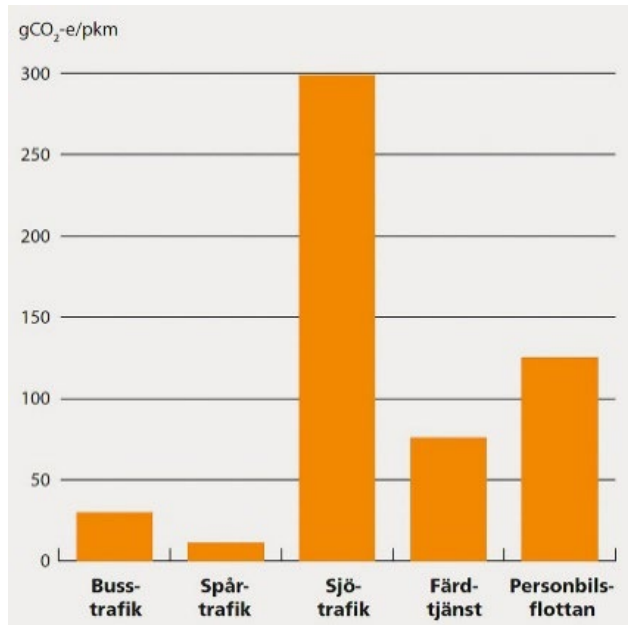
2.3.3. Lägre klimat- och miljöpåverkan

Teoretiskt kan samtliga fartyg, förutom segelbåtar, reducera sin bränsleförbrukning och därmed sina kostnader och utsläpp genom att använda bättre information om sjöbotten. Nyttorna för samhället skulle kunna beräknas genom att multiplicera den beräknade utsläppsminskningen (i gram eller ton) med ASEK:s rekommenderade monetära värderingar för växthusgaser och luftföroreningar.¹⁵ Teoretiskt är det möjligt att inkludera effekter på bullernivån och dess effekter för samhället. Här saknas dock också effektsamband och specifika monetära värderingar.

¹⁴ Som det nämns ovan innehåller Effektkatalogen inte effektsamband för sjötransporter och ASEK rekommenderar inte värderingar för materiella skador och miljöskador, Trafikverket (2024a, 2023).

¹⁵ När det gäller kollektivtrafiken som kör enligt en tidtabell och utgör den största delen av det i OSKAR-området genomförda trafikarbetet skulle man utgående ifrån den uppskattade bränsleförbrukningen i jämförelsealternativet (med nuvarande rutter) och utredningsalternativen (med optimerade rutter) kunna beräkna hur mycket olika utsläpp skulle kunna reduceras.

I Stockholmsregionen ger trafiken upphov till ca 28 000 ton direkta CO₂-utsläpp, Bussmagasinet (2024). Mätt i gram CO₂-utsläpp per passagerarkilometer är de utsläppen överlägset högst för sjötrafiken, nästa högst för biltrafiken och lägst för spårtrafiken (tunnelbana, pendeltåg). Se Figur 3.

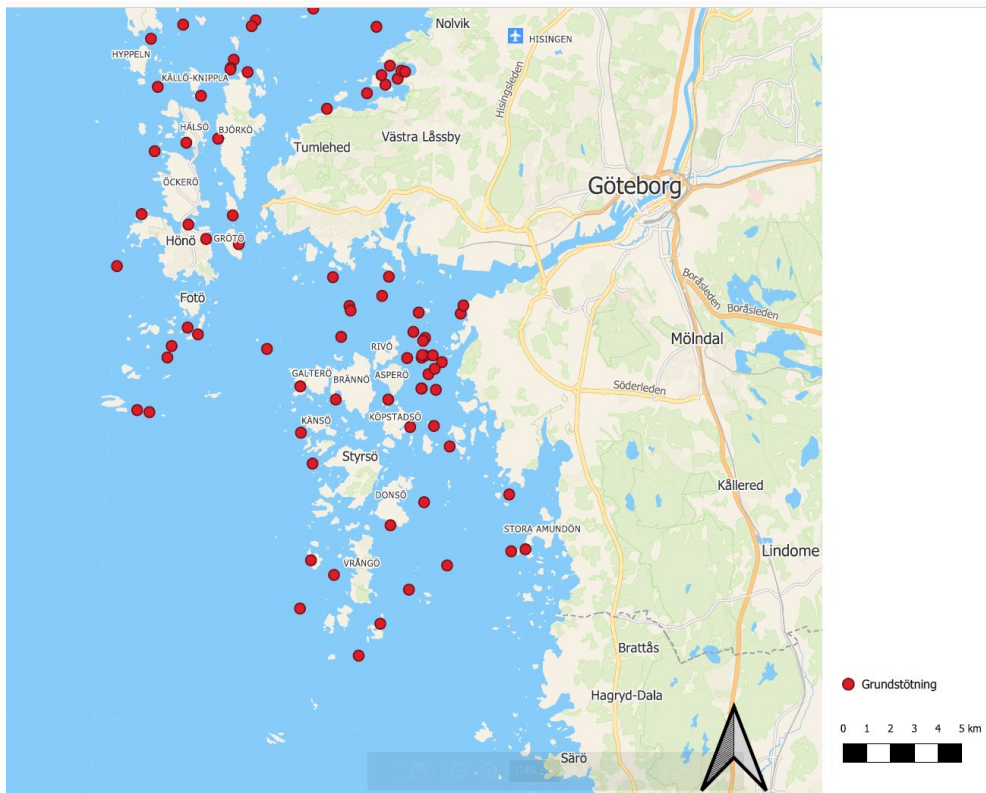


Figur 3. CO₂-utsläpp per passagerarkilometer uppdelat per trafikslag och i jämförelse med personbilsflottan år 2023. Källa: Trafikförvaltningen i Region Stockholm, se Bussmagasinet (2024).

Utmaningen och nyttan av att minska sjötrafikens direkta klimatpåverkan är således relativt stor. Sjötrafiken borde dock ge upphov till lägre indirekta CO₂-utsläpp då den inte kräver byggprojekt och underhåll i samma utsträckning som spår- och vägtrafiken. I Stockholmsregionen står indirekta utsläpp från inköpt el, värme och kyla för ca 44 000 ton och indirekta utsläpp från bygg- och anläggningsprojekt mm. för ca 186 000 ton.

2.3.4. Övriga nyttor

Bättre information om sjöbotten bör även kunna användas för att reducera bränslekostnaderna och andra kostnader för lastfartygen och myndigheternas fartyg (som genomför ca sex procent var av trafikarbetet i OSKAR-området). På motsvarande sätt som för kollektivtrafikens fartyg borde det finnas en potential att effektivisera de transporter som utförs till exempel för Sjöfartsverkets lotsbåtar och Kustbevakningens båtar, som används för att miljösanera. Det är även tänkbart att kostnaderna för sjöräddningen reduceras genom att antalet olyckor och helikopterinsatser reduceras; enligt Sjöfartsverkets Sjö- och flygräddningscentral (Joint Rescue Co-ordination Centre, JRCC) skedde ett trettio-tal grundstötningar i området 2017–2021. Se Figur 4.



Figur 4. Registrerade grundstötningar i OSKAR-området 2017–2021, Källa: JRCC.

Bättre information om sjöbotten kan användas för att utnyttja den befintliga infrastrukturen på ett effektivare sätt. Informationen kan till exempel brukas som underlag för att separera trafiken. Styröbolaget nämner att det skulle förbättra sjöbefälens arbetsmiljö och minska risken för olyckor om fritidsbåtarna hade egna farleder i högre grad. Idag är befälen ofta stressade och kör runt fritidsbåtarna för att hålla tidtabellen, Svensson, (2024). Den allmänna bilden är att omdirigeringen av fritidsbåtstrafiken i Böttöleden har lett till positiva reaktioner inom handelssjöfarten, denna ”trafikseparering” har dock hittills inte utvärderats systematiskt, Blied (2024).

Bättre information om sjöbotten kan även användas för att identifiera lönsamma infrastrukturåtgärder, till exempel för att hitta områden där begränsade muddringar kan möjliggöra användningen av mycket kortare rutter.

Medan OSKAR-projektet pågick bad Sjöfartsverket, Lantmäteriet och Sveriges geologiska undersökning (SGU) regeringen om ett uppdrag för att genomföra ett nationellt kustzonskarteringsprogram (inkl. CBA) med syfte att bistå samhället med viktig information om havsbotten för planering, klimatanpassning och hållbart nyttjande av marina resurser (Sjöfartsverket, Lantmäteriet och SGU, 2021). I Tabell 6 listas myndigheternas förväntade nyttor per statligt utgiftsområde och det är uppenbart att Nr 22 Transporter enbart utgör ett av flera områden.

Tabell 6. Nyttor av kustzonskartering.

Utgifts- område	Nyttor av kustzonskartering
6	Försvar, ras och skredrisker, översvämningsmodellering, sanering av utsläpp, search & rescue
16	Forskning inom miljö, klimat, havsresursförvaltning
18	Fysisk planering, översvämningsmodellering, ras och skredrisker
19	Företagande i kust och skärgårdsmiljö, turism, båtliv, fiske
20	Miljöanalyser, habitatkartering, miljöövervakning
21	Etablering av vind- och vågkraft, termisk energiutvinning
22	Kollektivtrafik, taxiverksamhet, godstransporter
23	Fisk och musselodling, fiske, algodling, skydd av yngelområden
24	Företagande i kustmiljö, företagsetableringar, materialutvinning

Källa: Sjöfartsverket, Lantmäteriet och SGU (2021).

I hemställan utvecklas att den nationella Geodatastrategin¹⁶ och EU:s Östersjöstrategi¹⁷ framhåller den stora potentialen för *öppna, användbara och tillgängliga data* över hav och kustområden inom bl. a samhällsplanering, areella näringar, energi, sjöfart, försvar, klimatanpassning, beredskaps- och havsmiljöfrågor samtidigt som det saknas geografisk information i Sveriges kustområden som möjliggör nödvändiga analyser.¹⁸ Wallhagen (2022) nämner att nyttorna kopplade till havsplanering (vindkraftverk mm.) och klimatanpassning (byggande av skyddsvallar, översvämningsmodellering mm.) och etableringar av el, fiber och avlopp mm har ökat i betydelse under de senaste åren. I många fall handlar det om regionala eller lokala intressen och Sjöfartsverket arbetar en del ihop med Länsstyrelserna. Hemställan beviljades inte, Wallhagen (2024a).

2.4. Övergripande resultat

Mot bakgrund av att Sjöfartsverket inte genomförde samtliga planerade steg och att nyckelaktörerna i OSKAR-området inte hade fullständig tillgång till den förbättrade informationen om sjöbotten och att projektet inte hade tillgång till detaljerade kollektivtrafikuppgifter görs endast en översiktlig samhällsekonomisk analys. Denna utgår ifrån genomsnittliga årsvärden i stället för att diskontera kostnaderna och nyttorna. Det är uppenbart att den ca tre år försenade uppdateringen av sjökorten minskar de potentiella nyttorna.

För att sjömätningen och uppdateringen av sjökorten i OSKAR-området ska vara samhällsekonomiskt lönsamt måste de årliga nyttorna vara minst lika stora som Sjöfartsverkets årliga kostnader på ca 174 000 kr. Utgående från denna premiss är åtgärden sjömätning och uppdatering av sjökorten överslagsmässigt lönsamt om den leder till att ca två grundstötningar (med materiella skador) per år kan undvikas.

¹⁶ <https://www.lantmateriet.se/sv/Om-Lantmateriet/Samverkan-med-andra/geodataradet/nationell-geodatastrategi/>

¹⁷ <https://www.naturvardsverket.se/om-miljoarbetet/internationellt-miljoarbete/multilateralt-miljosamarbete/eus-ostersjostrategi/>

¹⁸ Enligt ”Öppna data-direktivet” bör myndigheter tillgängliggöra sina offentliga data för vidareutnyttjande, fritt eller enligt standardiserade och generösa villkor, för att bidra till innovationer som bygger på digital information och för att bidra till ökad öppenhet i offentlig förvaltning, Regeringskansliet (2024).

Det är dock viktigt att komma ihåg att det inte finns kausala samband som säger att förbättrade sjökort leder till att grundstötningar kan undvikas. Möjliga minskningar av exempelvis personskadorna på de betraktade fartygen och andra fartyg, materiella skador och miljöskador (till exempel till följd av oljespill) kan tillkomma. Det finns ett behov att utveckla de effektsamband och monetära värderingar som krävs för samhällsekonomiska analyser. När det gäller effektsamband kan det krävas uppdelningar i olika fartygssegment mm.

Vi har beskrivit potentiella nyttor kopplade till kollektivtrafiken, men det var inte möjligt att kvantifiera de potentiella nyttorna och inte heller kartlägga samspelet med de externa effekterna som kollektivtrafikens fartyg ger upphov till. Detta då OSKAR-projektet inte hade tillgång till detaljerade uppgifter om kollektivtrafiken. Datatillgången styrs av de organisatoriska förutsättningarna för upphandlingen av den sjöburna kollektivtrafiken (och därmed de olika parternas perspektiv och incitament). Detta utvecklas i den avslutande diskussionen nedan.

På motsvarande sätt som för kollektivtrafiken borde ägarna av de statliga fartygen, lastfartygen och fiskefartygen som seglar i OSKAR-området kunna reducera sina bränslekostnader, samlade transportkostnader och externa effekter som deras fartyg ger upphov till. För samtliga segment (även fritidsbåtar) bör bättre information om sjöbotten kunna användas för att höja sjösäkerheten.

Inom transportsektorn kan bättre information om sjöbotten brukas för att utnyttja den befintliga infrastrukturen mer effektivt eller för att identifiera lönsamma investeringar. Det borde även finnas samordningsvinster om samma information om sjöbotten kan utnyttjas inom flera samhällssektorer.

3. Avslutande diskussion

Sjöfartsverket initierade år 2019 projektet OSKAR (Optimering av Sjöburen Kollektivtrafik och Annan Regelbunden trafik) med Göteborgs södra skärgård som referensområde. Projektet kan ses som en fortsättning av ADAPT-projektet (Assuring Depth of Fairways for Archipelago Public Transportation) som Sjöfartsverket genomförde tillsammans med bland annat dåvarande Stockholms Läns Landsting.

I båda projekten är utgångspunkten att moderna sjömätningar förbättrar informationen om sjöbotten och sjökorten och att denna information möjligtvis kan användas för att 1) förbättra sjösäkerheten, 2) reducera kostnaderna för kollektivtrafiken, vilket i sin tur innebär lägre behov av offentliga medel och/eller lägre biljettpreiser och/eller kortare restider för trafikanterna, 3) minska fartygens bränsleförbrukning och utsläpp och 4) förbättra underlagen som används för att planera det framtida kollektivtrafikutbudet.

Sjöfartsverkets kostnader för sjömätningen och uppdateringen av sjökorten i de ca 20 km² stora OSKAR-området uppgår till ca 174 000 kr per år. För att åtgärden ska vara samhällsekonomiskt lönsamt måste de årliga nyttorna överstiga Sjöfartsverkets kostnader. Överslagsmässigt skulle detta vara givet om två grundstötningar som leder till fartygsskador på sammanlagt ca 200 000 kr per år kan undvikas. Utöver kostnadsbesparingar kopplade till Styröbolagets fartyg, kan kostnaderna för personalen och trafikanterna mm. på dessa fartyg och olyckskostnaderna kopplat till andra fartyg påverkas. Den enkla beräkningen ovan bygger inte på ett kausalt samband (om hur förbättrade sjökort påverkar antalet grundstötningar och olycksrisker generellt). Det finns ett behov att utveckla effektsambanden och de monetära värderingarna avseende materiella skador och miljöskador så att de samhällsekonomiska säkerhetsanalyserna för sjötransporter kan uppnå en liknade kvalitet som analyserna för vägtransporter.

De samhällsekonomiska nyttorna kopplade till kollektivtrafiken är i princip enklare att uppskatta än nyttorna kopplade till ökad sjösäkerhet eftersom de baseras på optimeringar av olika slag. Potentialen är också störst för denna fartygskategori eftersom kollektivtrafikens fartyg genomför ca två tredjedelar av det samlade sjötrafikarbetet i OSKAR-området. Slutligen har kollektivtrafiken specifika krav eftersom den är tidtabellsstyrd. Nyttoberäkningarna kräver tillgången till detaljerade kollektivtrafikdata, något som OSKAR-projektet inte hade. I ADAPT-projektet var de offentliga problemägarna i Stockholm (Trafikkontoret, Waxholmsbolaget) pådrivande projektparter medan nyckelaktörerna i Göteborgs södra skärgård (Västrafiken och Styröbolaget) enbart ingick OSKAR-projektets referensgrupp.

Även om det övergripande transportpolitiska målet i den svenska transportpolitiken är att säkerställa en samhällsekonomiskt effektiv och långsiktigt hållbar transportförsörjning för medborgare och näringsliv i hela landet och att en betydande del av den regionala sjöburna kollektivtrafiken finansieras via skattemedel (Stockholm 65 procent) är det uppenbart att de olika organisatoriska förutsättningarna, till exempel hur den sjöburna kollektivtrafiken upphandlas, påverkar analysmöjligheterna och möjligheterna att generalisera resultaten.

De potentiella nyttorna av att använda bättre information om sjöbotten för att reducera bränsleförbrukningen, kostnaderna och utsläppen mm. för myndigheternas fartyg, lastfartygen och fiskefartygen borde också studeras baserade på de respektive fartygsägarnas underlag. Förutsättningarna inom segmentet fritidsbåtar skiljer då dessa fartyg används främst privat och under sommaren.

Vidare kan de infrastukturanvariga myndigheterna bruka bättre information om sjöbotten både för att utnyttja den befintliga maritima infrastrukturen på ett effektivare sätt och för att utveckla infrastrukturen, dvs. för att identifiera lönsamma infrastrukturprojekt och avskryva olönsamma projekt.

Förbättrad information om sjöbotten kan även leda till nyttor utanför transportsektorn. Informationen skulle till exempel kunna användas för att utveckla åtgärder som syftar till att reducera antalet omkomna i fritidssjöfarten. Avseende kopplingen till andra samhällssektorer är ett givet spörsmål i vilken utsträckning en bättre samordning kan bidra till att spara kostnader för de olika sektorerna och samhället i stort.

En central fråga är hur regeringens ”Öppna data-direktiv” och potentialen för öppna, användbara och tillgängliga data över hav och kustområden förhåller sig till det övergripande säkerhetsläget och Försvarmaktens behov att begränsa möjligheten att dela data och information om sjöbotten.

En relaterad fråga är i vilken detaljnivå information om sjöbotten bör anses vara en kollektiv nytthet. (som kännetecknas av icke-rivalitet och icke-exkluderbarhet). I de fallen där Sjöfartsverket säljer information till enskilda kunder bör det till exempel vara möjligt att avgränsa nyttjandet till den som betalar. Ytterligare en fråga är i vilken grad sjömätningar (som bedöms som samhällsekonomiskt lönsamma) ska finansieras via sålda sjökort eller skatter. Vi ser ett behov att förtydliga dessa förutsättningar, eftersom de påverkar de samhällsekonomiska kostnaderna och nyttorna och hur de fördelas på olika aktörer.

Referenser

- ADAPT (2018), Plan A.T2.4 Method for optimization of vessel capacity.
- ADAPT (2019a), ADAPT T35.1. Seminar 3 – proposals for improved and adjusted routes.
- (ADAPT (2019b). WP3 Relevant Challenges, Tools, and Evaluations.
- Blied,, L. (2023), E-mail från Linda Blied, 2023-12-11 OSKAR - Ufs-notiser.
- Blied,, L. (2024), E-mail från Linda Blied, 2024-05-13.
- Bussmagasinet (2024), Indirekta utsläpp största miljöboven i Stockholms kollektivtrafik, publicerat 21 februari 2024, <https://www.bussmagasinet.se/2024/02/indirekta-utslapp-storsta-miljoboven-i-stockholms-kollektivtrafik/>.
- Catarino, G. R. (2021). Dynamic Draft and Under Keel Clearance: A Hydrographic View. *The International Hydrographic Review*, (26), 21–37. Retrieved from <https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/33118>
- Hagander, A. E-mail från A. Hagander, Teknisk Chef, Rederi, Tekniska enheten, Sjöfartsverket, 2023-12-20.
- HELCOM (2021), Baltic Sea Action Plan, 2021 update, <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2021/10/Baltic-Sea-Action-Plan-2021-update.pdf>
- Karlsson, C. (2024a). Skärpning av Sjöfartsverkets sekretessrutiner, 2024-03-27.
- Karlsson, C. (2024b). Uppskattning av Sjöfartsverkets kostnader för uppdatering av Djupdatabasen, 2024-03-27.
- Löfstrand, A. (2024), Uppskattning av Sjöfartsverkets kostnader för uppdatering av Sjökortsdatabasen, 2024-03-27.
- Olsson, U. (2022), EXCEL-fil per e-mail från sjömättningschef, Sjöfartsverket U. Olsson 2022-05-30.
- Poldma, I. (2024), E-mail Indrek Poldma, Sjöblick 2024-03-12. .
- Regeringskansliet, (2024a), Mål för transportpolitiken <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/transporter-och-infrastruktur/mal-for-transporter-och-infrastruktur/>
- Regeringskansliet, (2024b), Öppna data-direktivet, <https://www.regeringen.se/om-webbplatsen/psi-direktivet/>
- REISFER (2023), REISFER - Reducing CO₂ emissions in island ferry traffic), Interreg Application Form Export, Downloaded on 16.10.2023, Version 2.0
- Sederlin, M. & Lidén, T. (2023), A multiple trip vehicle routing approach to ferry service network design. Bilbao, ITSC (Intelligent transport systems conference).
- Sjöfartsverket (2022), OSKAR-projektet, Sjömätning, Författare L. Blied, rapportutkast.
- Sjöfartsverket (2024a), Processen hos AO Sjögeografi, specifikt för OSKAR, E-mail från L. Blied 2024-02-16.
- Sjöfartsverket (2024b), Uppskattning av fartygskilometer per fartygstyp i OSKAR-området (E-mail M. Levin & C. Stormare, Sjöfartsverket, 2024-01-11)
- Sjöfartsverket, Lantmäteriet och SGU (2021). Hemställan om uppdrag och anslagsmedel för kustzonkartering, 2021-12-09.
- Svensson, E., Trafikchef Styröbolaget (2024). Muntlig information 2024-01-30.

Sveriges riksdag (2023), Förordning 2007:1161 med instruktion för Sjöfartsverket, Utfärdad 2007-11-22. Ändrad: t.o.m. SFS 2023:183, Landsbygds- och Infrastrukturdepartementet RSIB US.

SVT Nyheter Stockholm (2024) Moderna mätningar i skärgården för säkrare båtliv, publicerad 3 maj 2024. <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/stockholm/moderna-matningar-i-skargarden-for-sakrare-batliv>

Trafikverket (2023), Version 2023-02-01 Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 7.1 Kapitel 2 Samhällsekonomisk teori och metod. https://bransch.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/2023/02_samhalls_ekonomi_teori_a71.pdf

Trafikverket (2024a), Effektsamband Senast uppdaterad/granskad: 2024-02-22, <https://bransch.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/Planera-och-utreda/Samhallsekonomisk-analys-och-trafikanalys/Effektsamband/>

Trafikverket (2024b), Rapport Sjöskalk 2024.1, Användarmanual. https://bransch.trafikverket.se/contentassets/0acd03a751d8497e93ad2cc9d225638d/2024/sjokalk_2024.1_anvandarmanual.pdf

Transportstyrelsen (2023), Säkerhetsöversikt Sjöfart 2022. <https://www.transportstyrelsen.se/globalassets/global/publikationer-och-rapporter/rapporter/sjofart/sakerhetsoversikt-sjofart-2022.pdf>

Wallhagen, M. (2022), Intervju avseende Hemställan om uppdrag och anslagsmedel för kustzonkartering, 2022-09-16.

Wallhagen, M., (2024a). Muntlig information 2024-01-30.

Wallhagen, M., (2024b). Muntlig information 2024-05-13.

Wallhagen, M., (2024c). Uppskattning av Sjöfartsverkets kostnader för att skicka ut UFS och uppdatera produkter, Sjöfartsverket 2024-03-27.

Wallhagen, M., (2024d). Information behov för ommätning i OSKAR-området. 2024-03-19.

Wallhagen, M., (2024e). Information om standard för nästa generationens navigationssystem (S-100) 2024-03.12.

VTI är ett oberoende och internationellt framstående forskningsinstitut inom transportsektorn. Vi bedriver forskning och utveckling för att förbättra kunskapen om infrastruktur, trafik och transporter. Genom vårt arbete bidrar vi till att nå Sveriges transportpolitiska mål för tillgänglighet, säkerhet, miljö och hälsa.

Vi utför forskning på uppdrag inom alla transportslag och arbetar i en tvärvetenskaplig organisation. Den kunskap vi genererar ger viktig information till aktörer inom transportsektorn och används ofta direkt i nationell och internationell transportpolitik.

Utöver forskning erbjuder vi utredningar, rådgivning samt olika mät- och provningstjänster. På VTI har vi avancerad forskningsutrustning av olika slag och världsledande körsimulatorer. Vi har även ackrediterade laboratorier för vägmaterial och krocksäkerhetstestning.

Biblioteket vid VTI är en nationell resurs som samlar in och sprider information om svensk transportforskning. Utöver frågeservice och lån erbjuds tjänster såsom informationssökning, omvärldsbevakning och strukturering av publikationer och projekt på en webbplats.

I Sverige samarbetar VTI med universitet och högskolor som bedriver relaterad forskning och utbildning. Vi deltar regelbundet i internationella forskningsprojekt, främst i Europa, och är aktiva inom internationella nätverk och allianser. Vi är cirka 240 medarbetare och finns i Linköping, Stockholm, Göteborg och Lund.

