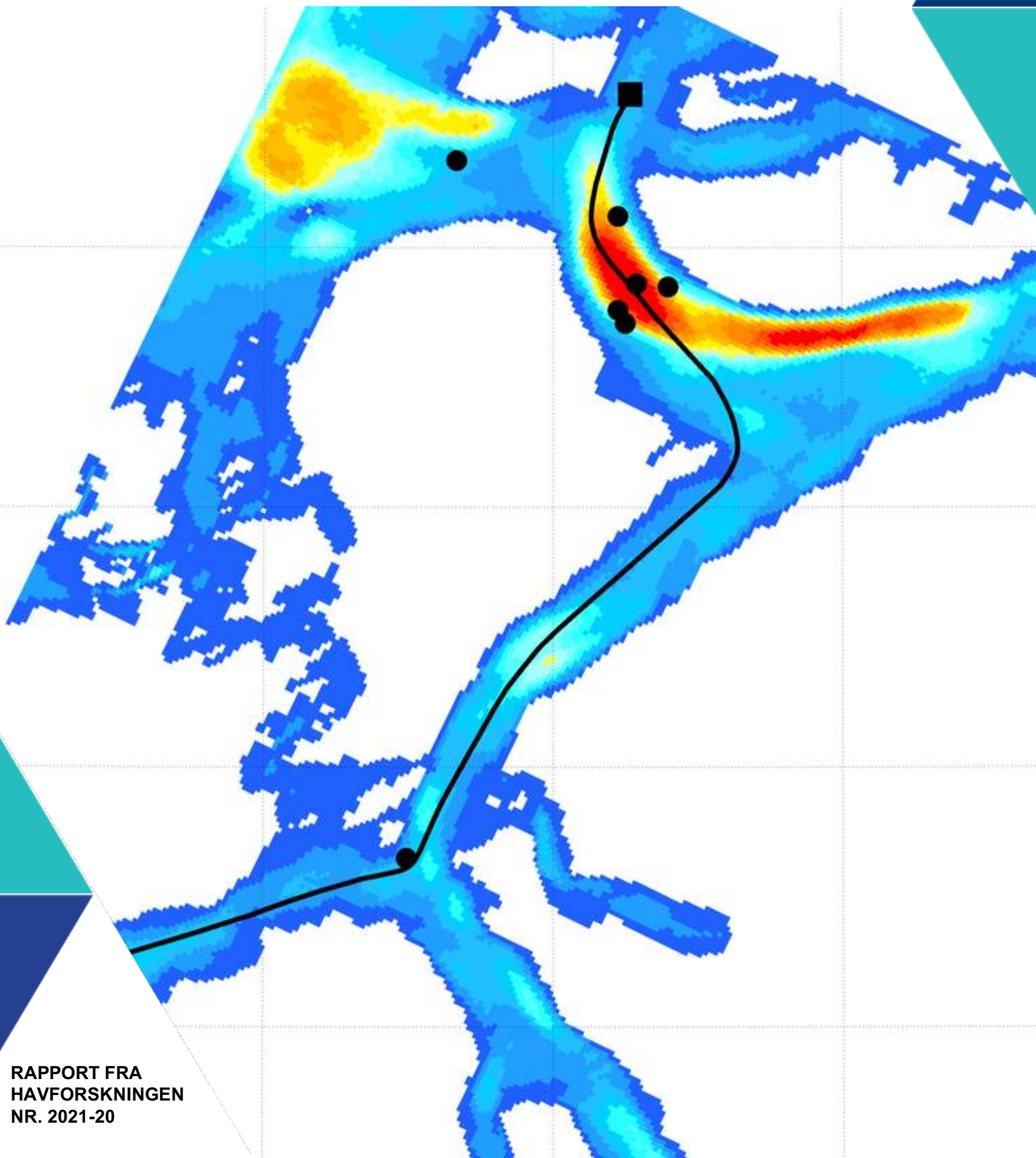
HVILKEN BETYDNING HAR OPPLØSNING FOR KYST- OG FJORDMODELLER?

Validering og representasjonsberegninger av strømmodeller med eksempler fra Sulafjorden, Møre og Romsdal

Jon Albretsen og Lars Asplin (HI)



RAPPORT FRA HAVFORSKNINGEN NR. 2021-20

Tittel (norsk og engelsk):

Hvilken betydning har oppløsning for kyst- og fjordmodeller?
What are the impacts of resolution in coastal and fjord models?

Undertittel (norsk og engelsk):

Validering og representasjonsberegninger av strømmodeller med eksempler fra Sulafjorden, Møre og Romsdal
Validation and estimates of representation in current models, examples from Sulafjorden, Møre og Romsdal

Rapportserie: | **År - Nr.:** | **Dato:**

Rapport fra havforskningen | 2021-20 | 06.05.2021

ISSN:1893-4536

Forfatter(e):

Jon Albretsen og Lars Asplin (HI)

Forskningsgruppeleder(e): Jan Erik Stiansen (Oseanografi og klima)
Godkjent av: Forskningsdirektør(er): Geir Lasse Taranger
Programleder(e): Terje Svåsand

Distribusjon:

Åpen

Prosjektnr:

14894-01

Oppdragsgiver(e):

Kongsberg Maritime CM AS (Norges Forskningsråd)

Oppdragsgivers referanse:

RTP000144

Program:

Miljøeffekter av akvakultur
Kystøkosystemer

Forskningsgruppe(r):

Oseanografi og klima

Antall sider:

32

Samarbeid med

Kongsberg Maritime CM AS

Meteorologisk institutt

Sammendrag (norsk):

Strømmodeller er nyttige verktøy som kan brukes til å beskrive det fysiske miljøet i havet og i kystsonen. Havforskningsinstituttet (HI) bruker resultater fra slike modeller i svært mye av den forskningen og rådgivningen som foregår. For kyst- og fjordområdene er det NorKyst800 (NK800) som er arbeidshesten, og dette modellsystemet er hovedsakelig utviklet av Havforskningsinstituttet og Meteorologisk institutt. Denne modellen har en gitteroppløsning på 800 m. HI har dessuten utviklet et modellsystem parallelt med NK800 som kalles NorFjords160, og dette består av fjordmodeller med fem ganger bedre oppløsning. NorFjords160 er ment for applikasjoner som skal beskrive det fysiske miljøet i fjordområder der farvannene er for smale og trange til at NorKyst800 er egnet.

I prosjektet Innocurrent er det NK800 som er hovedmodellvektøyet for anvendelse mot bl.a. evaluering av skipsmontert ADCP (strømmåler) og data til skipsrutingsalgoritmer. I prosjektet er det også relevant å studere hvilken effekt man kan oppnå ved å øke modelloppløsningen i typiske farvann der skipstrafikken går. Ettersom man har et omfattende nettverk av målebøyer i Møre og Romsdal i forbindelse med utredning av fergefri E39, har vi validert både NK800 og NorFjords160 (Aalesund-160m-modell, A160) mot bøyedataene samt studert variabilitet og representativitet. Selv om denne rapporten fokuserer på Sulafjorden og områdene rundt, så vil resultatene kunne generaliseres til andre kyst- og fjordområder.

Vi viser at både NK800 og A160 validerer veldig godt mot målingene i Sulafjorden og i Breisundet utenfor, som begge er relativt brede i utstrekning, mens det kun er A160 som kan brukes i de noe smalere farvannene innenfor, f.eks. sør i Vartdalsfjorden. Det man vinner på økt oppløsning er at man får en noe mer realistisk gjengivelse av strømstyrke og av strømretning, primært ettersom bunndybdene er mer presist gjengitt når oppløsning er bedre.

Variabiliteten av de fysiske forholdene er stor både i rom og tid. På tvers i Sulafjorden kan strømskjæret nær overflaten i enkelttilfeller være mer enn 40-50cm/s over en avstand på 160m. Det er derimot kun i rundt 0,5% av tilfellene at strømskjæret er over 25cm/s over denne avstanden, for i omtrent 75% av tilfellene er strømskjæret under 2,5cm/s. Endringen i strømstyrken med tiden ligger for det meste under 10cm/s mellom to timesverdier, men det er likevel tilfeller hvor målingene og modellresultatene viser en endring opp mot 20cm/s fra én time til neste.

Ved å studere tidsutviklingen av strømstyrke i enkeltlokaliteter kan man antyde hva dette representerer romlig ut over akkurat den posisjonen. Et enkelt mål på lokaliteters samvariasjon er korrelasjonskoeffisient, og ved å bruke korrelasjon på 0,9 som en grense har vi definert hvor stor utstrekning enkeltpunkter kan representere. Arealene for samvariasjon varierer ut fra om man befinner seg midtfjords eller nært land, og en slik prosedyre kan f.eks. være nyttig når man skal sette ut målestasjoner for at disse skal kunne representere et størst mulig område. I prosjektet Innocurrent hvor strømmålinger fra skip er et viktig fokus, har vi også kvantifisert hvordan modellerte representasjonsarealer varierer gjennom skipsled med utgangspunkt i en reell seilas. Kort oppsummert så viser vi at de største områdene for samvariasjon har man et stykke vekk fra land, i de bredeste fjordene og spesielt tilknyttet og på langs av hovedstrømretninger.

Sammendrag (engelsk):

Ocean current models are useful tools that can be used to describe the physical environment in the ocean and in the coastal zone. The Institute of Marine Research (IMR) makes extensively use of results from such models in their research and advisory work. For the coastal and fjord areas, NorKyst800 (NK800) is the workhorse, and this model system has mainly been developed by the IMR and the Norwegian Meteorological Institute (MET-Norway). This model has a grid resolution of 800 m. IMR has also developed a model system in parallel with the NK800 called NorFjords160, and it consists of fjord models with five times better resolution. NorFjords160 with higher resolution is a necessary step to resolve the hydrodynamic environment in fjord areas which cannot be resolved by NorKyst800.

In the Innocurrent project, the NK800 is the main model tool for use against e.g., evaluation of ship based ADCP (current profilers) and data for ship routing algorithms. In the project, it is also relevant to study what effect can be achieved by increasing the model resolution in fjord regions with ship traffic. Since we have an extensive network of measuring buoys in Møre og Romsdal in connection with the impact assessment of a ferry-free E39, we have validated both NK800 and NorFjords160 (Aalesund-160m model, A160) against the buoy data and studied variability and representativeness. Although this report focuses on Sulafjorden and the surrounding areas, the results can be generalized to other coastal and fjord areas.

We show that both NK800 and A160 validate very well against the measurements in Sulafjorden and in Breisundet outside, while A160 only is able to reproduce the detailed dynamics in the narrower waters south of Vartdalsfjorden. What you gain from increased resolution is that you get a more realistic reproduction of current strength and current direction, primarily since the bottom depths are more accurately reproduced when resolution is better.

A simple measure of the covariation of localities is the correlation coefficient, and by using a correlation of 0.9 as a limit, we have defined the extent of which individual grid cells/locations can represent. The areas for covariation vary

depending on whether you are in the middle of the fjord or close to land, and such a procedure can e.g., be useful when setting up observation stations so that they can represent the largest possible area. In the Innocurrent project we have also quantified how modelled representation areas vary through ship tracks based on real sailing routes. In short, we show that the largest areas for covariation are some distance away from land, in the widest fjords and particularly connected to and along the main current directions.

Innhold

1 Innledning 6

2 Datagrunnlag 8

2.1 Målingene 8

2.2 Modellene 9

3 Validering av strømmodellene 10

3.1 Strøm gjennom vertikalsnitt i Sulafjorden 10

3.2 Validering av bøyeposisjonene i Sulafjorden og Breisundet 12

3.2.1 *Strøm* 12

3.2.2 *Hydrografi* 18

4 Gradienter i strømstyrke i rom og tid 21

5 Representativitet 23

6 Oppsummering 28

7 Acknowledgement 29

8 Referanser 30

1 - Innledning

Strømmodeller er et anvendelig verktøy som kan brukes til å gjengi fysisk oseanografisk informasjon fra både storhavet og fra fjord- og kystområder med en stor grad av presisjon. Havforskningsinstituttet (HI) bruker data fra strømmodeller i svært mye av den forskningen og rådgivningen som foregår ettersom kvaliteten på modellene blir stadig bedre og resultatene er i dag på et tilfredsstillende nivå. For de norske kyst- og fjordområdene er det modellsystemet NorKyst800 (NK800 der 800 peker på den horisontale oppløsningen på 800m x 800m) som er arbeidshesten. HI har sammen med hovedsakelig Meteorologisk institutt (MET) utviklet et modellsystem for norskekysten som produserer svært realistiske resultater. Daglige varsler som produseres brukes bl.a. operasjonelt for beregning av smittepress fra lakselus. Mens NK800 har begrensninger i mer trange farvann og inne i mange av fjordene, så har HI også utviklet et modellsystem parallelt med NK800 som kalles NorFjords160, mao. fjordmodeller med 160m x 160m oppløsning. Det er opplagt at alle applikasjoner som skal studere dynamikken i fjorder må kunne beskrives av modeller med høy nok oppløsning slik at de faktiske farvannene blir dekket med et tilstrekkelig antall beregningspunkter, og derfor vil det i en del tilfeller være behov for bedre oppløsning enn det NK800 kan gi. De tungregnemaskinene som anvendes for å simulere strøm, klarer i dag å kjøre NK800 for hele landet, mens 160m-modellene må deles opp i delområder som tar for seg en del av kysten.

Den tidligste versjonen av NorKyst800 ble beskrevet i Albretsen et al. (2011), mens en lengre historisk simulering med modellsystemet er grundig beskrevet i Asplin et al. (2020). Data fra NorKyst800 er brukt i svært mange ulike arbeider, som f.eks. i forbindelse med den operasjonelle modellen for smittepress fra lakselus (Myksvoll et al., 2020, Sandvik et al., 2020, Myksvoll et al., 2018), spredning av torske-egg og larver (Huserbråten et al., 2018, Strand et al., 2017), spredning av dyreplankton (Espinasse et al., 2017) og modellering av vekstområder for stortare (Bekkby et al., 2019). Modellsystemet med 160m x 160m oppløsning er også brukt i svært mange ulike sammenhenger, som f.eks. i forbindelse med ny valideringsmetode av strøm (Dalsøren et al., 2020), spredning av lakselus (Skardhamar et al., 2018 og 2019), spredning av tare (Filbee-Dexter et al., 2020), biomassemodellering av stortare (van Son et al., 2020), spredning og resuspensjon av organiske materiale fra lakseoppdrettslokaliteter (Carvajalino-Fernández et al., 2020), spredning av bakterier (Storesund et al., 2017) og spredning av radioaktivitet i fjorder (Simonsen et al., 2019).

Havforskningsinstituttet sine strømmodeller for Sulafjorden i Møre og Romsdal er tidligere kun beskrevet i prosjektrapporter som Kjeller Vindteknikk (nå en del av Norconsult) har levert i forbindelse med deres arbeid i prosjektet «Fergefri E39», finansiert av Statens Vegvesen. Statens Vegvesen Region Midt har siden 2014 finansiert prosjektet for å utrede klimaforholdene i Sulafjorden, Vartdalsfjorden og Halsafjorden i Møre og Romsdal, både med hensyn til vind, bølger og strøm. Mens Kjeller Vindteknikk/Norconsult har målt og modellert vind (Furevik et al., 2020), så har Meteorologisk institutt modellert bølger, Fugro Oceanor har satt ut og vedlikeholdt målebøyer med strømmålere og CTD, mens Havforskningsinstituttet har modellert strøm. Innenfor strømmodellering så har fokus vært validering av strøm samt estimater av ekstremverdier, og mye er beskrevet i prosjektrapporter utgitt av Kjeller Vindteknikk (f.eks. Harstveit et al. 2018 og Ágústsson et al. 2019).

Både NorKyst800 og A160 er beskrevet for fjordområdene rundt Sulafjorden i Møre og Romsdal, og både målinger og modell antyder at det er en netto nordgående strøm konsentrert i et tynt vannlag i overflaten. Denne overflatestrømmen er vesentlig sterkere om vinteren enn om sommeren. Like under overflatelaget er det en kjerne av noe sterkere strøm som er motsatt rettet av overflatestrømmen. Denne kjernen av sørgående strøm i de to fjordene er også sterkere om vinteren samtidig som den da strekker seg dypere ned. I tillegg til at det er vesentlige sesongvariasjoner i strømstyrke, så har man også en betydelig variabilitet med mye kortere tidsskala, både på times- og døgnnivå.

Sulafjorden er rundt 4 km bred, og en 800 m x 800 m modell, som NK800, vil kun ha fire beregningspunkter på tvers av fjorden. Dette er normalt i minste laget for å beskrive fjorddynamikken i detalj, men det har vist seg i flere modelleringsarbeider at NK800 reproduserer forholdene godt også i slike fjorder til tross for begrenset oppløsning. Ved å øke oppløsningen med en faktor fem i begge retninger, til 160m x 160m, får man et helt annet handlingsrom for hydrodynamisk modellering, ikke bare til å beskrive kystlinja, men også for å gjengi dybdeforholdene bedre. Til tross for

at det ble vist i Ágústsson et al. (2019) at strømgradientene hadde mer kontinuerlige overganger mellom områder med svak og sterk strøm, så viste valideringen av overflatestrømmen i Sulafjorden og Breisundet at A160 bare var marginalt bedre enn NK800. Merk at selv om A160 bruker en mer realistisk gjengivelse av bunndybdene, så er der fortsatt nødvendige forenklinger som gjør at dybdeforholdene er glattere enn i virkeligheten.

Denne rapporten vil først ta for seg en nærmere beskrivelse av måledataene i sjøen samt modellsystemene NorKyst800 og A160. Deretter er det beskrevet en grundig presentasjon og sammenlikning av den modellerte strømmen mot målingene. Siste delen går gjennom hvilken variabilitet i strømstyrke som målinger og modelldata antyder samt at modellenes komplette dekningsgrad er benyttet til å beregne enkeltlokaliteters representativitet.

2 - Datagrunnlag

2.1 – Målingene

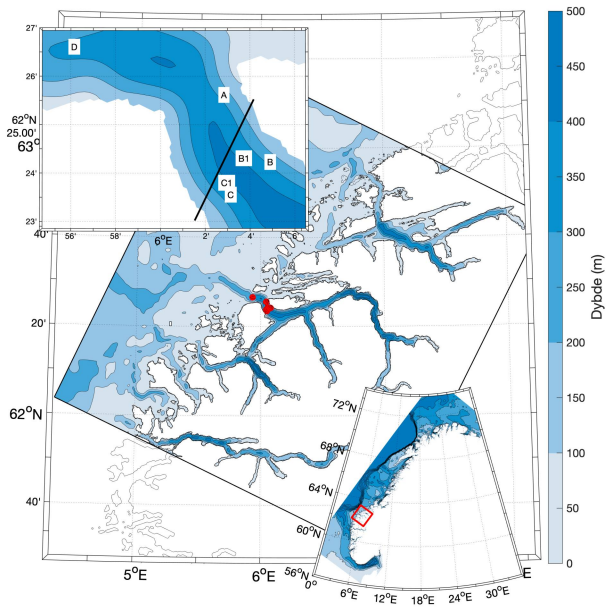
Etter at E39-bøyene ble satt ut, er det nå store datamengder fra strømmålinger tilgjengelig (Aquadopp i én meter dyp og ADCP i flere dyp fra 5 m og nedover) og CTD-målinger med veldig god tidsoppløsning (se [4] og [5] for beskrivelse av instrumenter, målinger er tilgjengelige fra https://thredds.met.no/thredds/catalog/obs/buoy-svv-e39/catalog.html). Plasseringen av bøyene i Sulafjorden og Breisundet er angitt i Figur 1.

E39-bøyene utgjør helt unike måledatasett i oseanografisk sammenheng. I tillegg til at man får tilgang til målinger på flere lokaliteter i tilhørende fjordsystemer, så er kontinuiteten (nær uavbrutt) og lengden (flere år) på målekampanjen helt unik. Dessuten får man også løst opp de vertikale gradientene godt med flere profilerende ADCP-instrumenter for strøm og flere CTD-instrumenter som henger tett over hverandre på linje.

Målingene fra bøyene ligger lagret hvert minutt. Det har vist seg nødvendig å først filtrere bort en del feilregistreringer og deretter finne et underutvalg ved å lage én-times-middelverdier. Selv om man mister noe variabilitet ved å redusere utvalget fra minuttverdier til timesverdier, vil timesverdier være tilstrekkelig for det meste av variabilitet. I tillegg får man også bort det aller meste av fluktuasjonene som åpenbart er falske verdier (støy) ved å midle i tid. Modellresultatene lagres også kun hver time, og det er mer hensiktsmessig at begge dataseriene da er enklere sammenlignbare.

De bøyene som vi har fokusert på her er bøye A, B, B1, C, C1 i Sulafjorden og bøye D i Breisundet som kobler Sulafjorden mot storhavet utenfor. Bøye A, B og D har registrert målinger siden oktober 2016, bøye C fra april 2017 og bøye B1 og C1 siden februar 2019. Modellvalideringen tar derfor utgangspunkt i alle målingene fra oppstart og fram t.o.m. desember 2019, m.a.o. timesverdier i 1-3 år avhengig av lokalitet. Merk også at bøye C på vestsiden av Sulafjorden måler strøm helt ned til 445m, mens alle de andre måler strøm ned til 100m.

Mens bøye B1 og C1 har CTD-målinger fra 17 dyp ned til 80m og derfor har god vertikal oppløsning, så måler de andre bøyene hydrografi kun i de fire dybdene 1, 20, 40 og 80m.



Figur 1. Dybdekart og utstrekning av strømmodellene NK800 (landsdekkende, nede til høyre) og A160. Utsnittet fra Sulafjorden oppe til venstre viser plasseringen av E39-bøyene i 160m-modellens dybdekart, og disse er også angitt med røde sirkler i 160m-kartet. Merk at bøye F sør i Vartdalsfjorden ikke er gjengitt i utsnittet. Den sorte linjen på skrått i Sulafjorden-utsnittet angir vertikalsnittet som vi har hentet ut modellresultater fra og som er brukt for å representere strømforholdene for hele nordre del av Sulafjorden.

2.2 - Modellene

Modellsystemet som har vært brukt for Sulafjorden er basert på ROMS (Regional Ocean Modeling System, f.eks. Shchepetkin og McWilliams, 2005; Haidvogel et al. 2008, eller se http://myroms.org), og prosjektet har til nå dokumentert resultater fra strømmodellen NK800 (Asplin et. al, 2020 og Albretsen et al., 2011), som dekker hele landet med en oppløsning på 800 m x 800 m, og fra fjordmodell med 160 m x 160 m oppløsning (se kart i Figur 1).

NK800 er godt beskrevet og dokumentert i Asplin et al. (2020), men vi kan nevne at langs de åpne rendene er det brukt døgnmidlet vannstand, temperatur, saltholdighet og strøm fra en havmodell med 4 km x 4 km oppløsning (Lien et al., 2014) for perioden ut 2017 og fra den operasjonelle Nordic4km-modellen til Meteorologisk institutt fra 2018. Tidevannsbidrag kommer fra den globale analysen TPXO7.2 (Egbert og Erofeeva, 2020). Fjordmodellen som har vært brukt, A160, dekker kystområdene og fjordene fra Stadt i vest og til og med Storfjorden i øst (Figur 1). Elveavrenningen i både NK800 og A160 er representert hhv. for hvert vassdragsområde og hver hovedelv, og daglige volumflukser er hentet fra NVE (Norges vassdrags- og energidirektorat) sin HBV-modell (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model) med 1 km horisontal oppløsning (Beldring et al., 2003). De bathymetriske dataene er hentet via Norge Digitalt fra Statens Kartverk Sjø og har opprinnelig en horisontal romlig oppløsning på ca. 50 m. De atmosfæriske drivkreftene i begge modeller for tidsperioden tom. 2016 er hentet fra en høyoppløst versjon av værvarslingsmodellen WRF (Weather Research and Forecasting model, se Skamarock et al. 2008) som er utviklet av National Center of Atmospheric Research (NCAR) og satt opp med 3km x 3km oppløsning for hele norskekysten. Fra 2017 ble data fra værvarslingsmodellen AROME MetCoOp 2.5km (Müller et al., 2017) ved Meteorologisk institutt brukt. NK800 er kjørt for perioden 1995-2019 og A160 er kjørt fra 2013-2019, men valideringen tar utgangspunkt i måleperioden fra høsten 2016 og ut 2019.

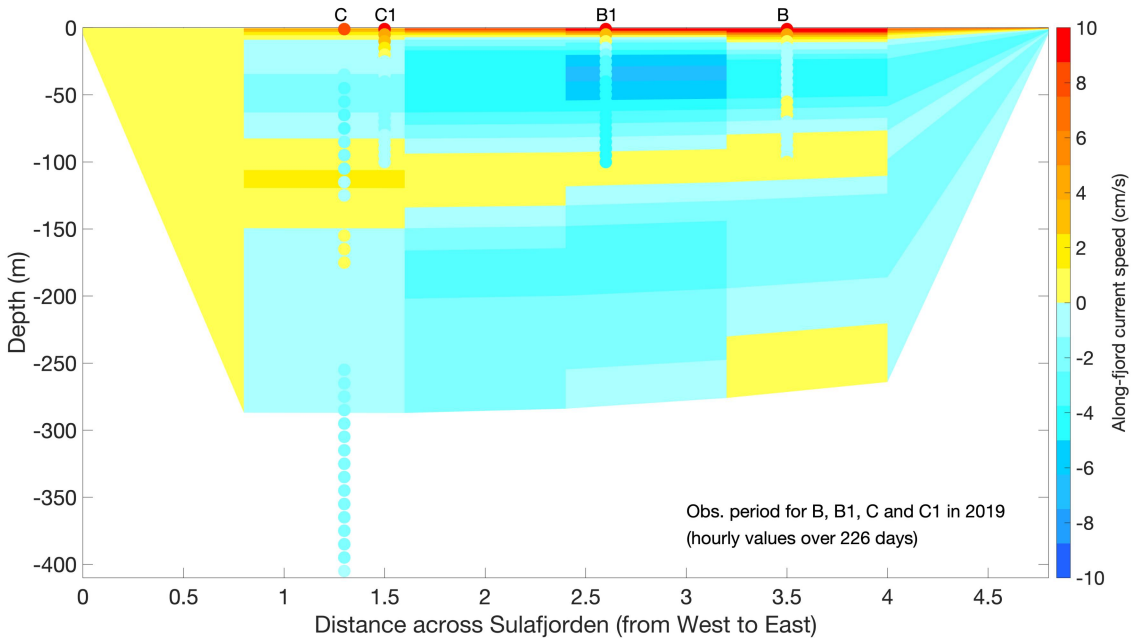
Da analysene av strømmålingene fra skipsmontert ADCP ikke førte frem i InnoCurrent-prosjektet, så ble det utført et evalueringsarbeid mellom strøm fra den Meteorologisk institutt sin operasjonelle versjon av NK800 og primitive skipsdata som differansen mellom «fart-over-grunn» og «fart-gjennom-vann». Dette arbeidet er beskrevet i Kristensen og Gusdal (2021) og kan sees i sammenheng med valideringen i denne rapporten.

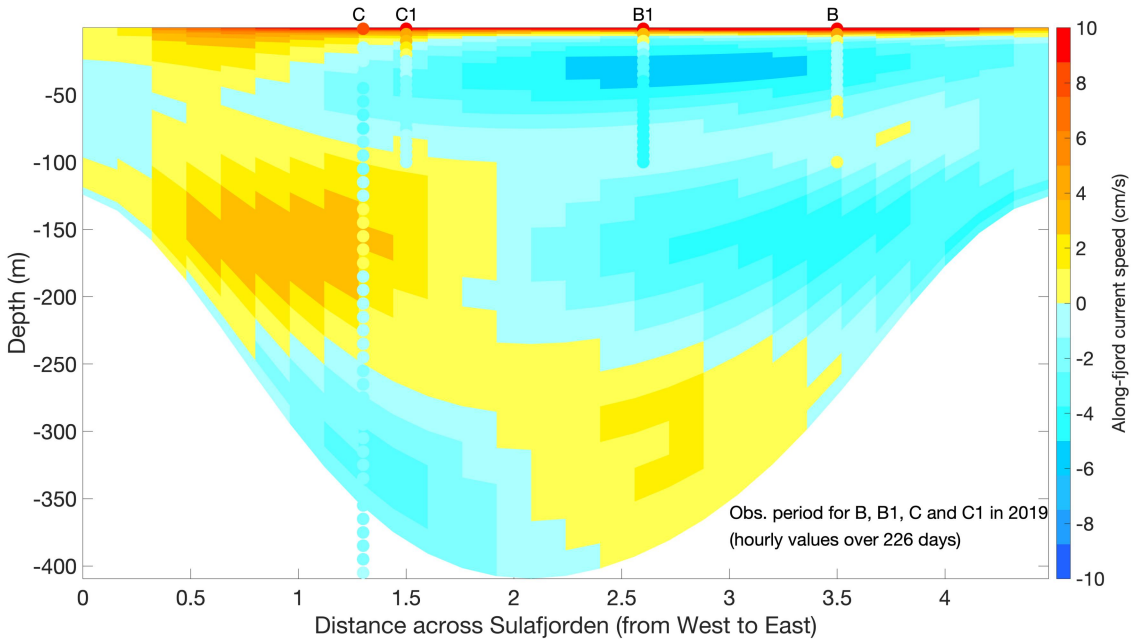
3 - Validering av strømmodellene

Vi vil her presentere modellresultater og valideringsanalyser for hele vannsøylen i nordre del av Sulafjorden. Vanntransport og strømmønster i Sulafjorden er hovedsakelig rettet langs fjordaksen. Ettersom det er satt ut flere målebøyer både på vest- og østsiden av fjorden, vil vi for enkelthets skyld vise en sammenlikning langs et vertikalsnitt som går omtrent fra Langeneset sør for Brandal på vestsiden og opp til Trælbodneset på østsiden (se sort linje i forstørrelsen i Figur 1). Vi bruker dette snittet både fordi det er plassert mellom alle målebøyene i Sulafjorden samt at det følger strømmodellenes akser. Ettersom de sterkeste strømmene går på langs av fjorden, vil dette snittet representere både midtre og nordlige del av Sulafjorden godt.

3.1 – Strøm gjennom vertikalsnitt i Sulafjorden

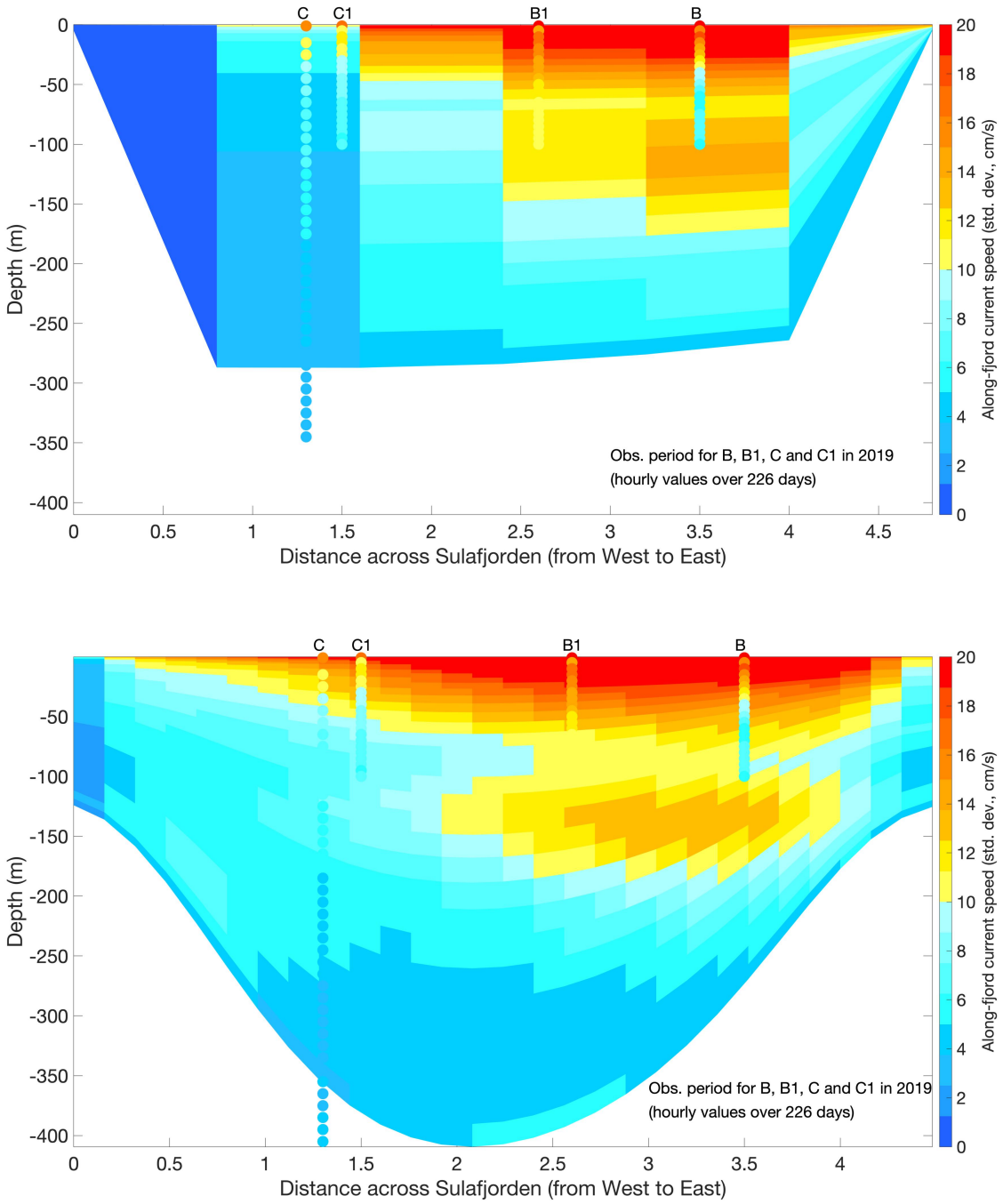
Selv om der er satt opp hele fem bøyer i Sulafjorden og hver av disse måler strøm kontinuerlig fra 20-40 dybder, så får man en uvurderlig mye bedre dekning med en numerisk havmodell så lenge denne gjengir den virkelige tilstanden godt nok. I Figur 2 er midlere langs-fjord strømstyrke fra både NK800 og A160 vist sammen med målingene. Begge modellene viser at der er en relativt sterk nordgående strøm i overflatelaget i hele Sulafjorden, og dette blir bekreftet av målingene. Under rundt 10m og ned til rundt 100m viser både modellene og målingene at strømmen i middel er rettet sørover, og at det er en kjerne av noe sterke strøm sørover litt øst for midten av fjorden, dvs. nær bøye B1. Under rundt 100m dyp og ned til rundt 250m er det en horisontal gradient i strømretning der vi i middel finner en kjerne av nordgående strøm på vestsiden og sørgående strøm på østsiden. Under rundt 250m dyp indikerer A160 at den midlere strømretningen er sørgående på vestsiden og nordgående på østsiden. NK800 har begrenset oppløsning i Sulafjorden, og spesielt under ca. 200m dyp, men likevel er de midlere strømretninger og strømstyrker realistiske i forhold til målingene. Det samme gjelder A160 som enda bedre gjengir de horisontale og vertikale gradientene i strømstyrke som observeres. Forskjellene mellom modell og måling går helst på hvor strømskillene ligger, noe som er avhengig av sjiktning og tetthetsgradienter. Små avvik i tetthetsfeltet i modellen, som f.eks. kan avhenge av kvaliteten på modellen som brukes langs de åpne grenseflatene (dvs. storskala-modellen), kan forplante seg innover i fjordene og ødelegge noe av den vertikale tetthetssjiktningen som igjen vil korrumpere noe av strømmønsteret.





Figur 2. Strømstyrke langs fjordaksen (i cm/s) i hele vannsøylen gjennom vertikalsnittet angitt i Figur 1. Gul- og rød-farger antyder strømretning mot nord, mens blåfargene angir strømretning sørover. Øverste panel viser middelstrøm fra NK800, mens nederste panel viser fra A160. Modellenes oppløsning både horisontalt og vertikalt er gjenspeilet i størrelsen på de fargede rutene. Modellenes verdier er overskrevet med fylte sirkler som indikere middelstrøm fra målingene fra bøyene B, B1, C og C1. Alle bøyene og modellene bruker kun strømverdier fra korresponderende tidspunkt, dvs. timesverdier fra 226 dager i løpet av 2019. Horisontalaksen angir avstand fra vest til øst i km.

En middeltilstand sier ikke så mye om variabiliteten, og en god modell skal ikke bare gjengi en realistisk tilstand i strømstyrke uten systematiske avvik, men også gjenspeile variabilitet på en god måte. I Figur 3 vises standardavvik til langs-fjord strømstyrke basert på de samme modell- og måle-data som vist i Figur 2. Her kommer modelloppløsningen noe tydeligere frem der NK800 med 800m mellom punktene horisontalt og dårligere beskrivelse av bunndybdene gjør at denne ikke klarer å gjenskape detaljer like godt som A160. Standardavviket i A160 er realistisk i de fleste dybder i alle bøyeposisjonene, og resultatene viser at høyest variabilitet er synlig i de øverste vannmassene av østre del av Sulafjorden. Verd å merke seg er at i sjiktet mellom 100 og 200m, der hvor strømmen i middel går nordover på vestsiden og sørover på østsiden, er variabiliteten vesentlig høyere i kjernen med vann som går sørover. Merk også at absoluttverdien til standardavviket er en del høyere enn middelstrømmen. Dette skyldes at tidevannsbevegelsen er inkludert i standardavviket, mens den «forsvinner» i langtidsmiddelet.



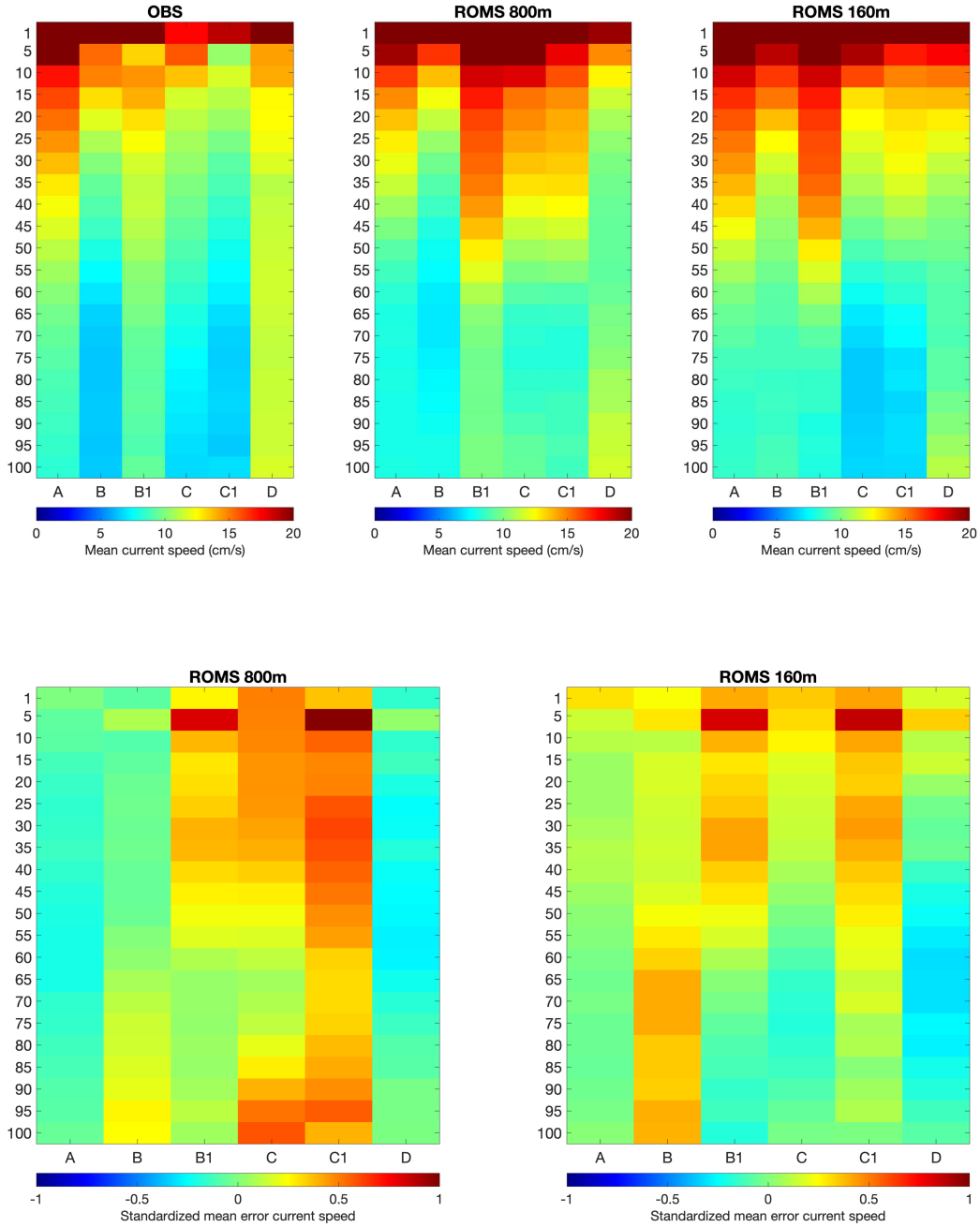
Figur 3. Tilsvarende Figur 2, men her angir fargene standardavviket til strømstyrken langs fjordaksen (i cm/s) i hele vannsøylen gjennom vertikalsnittet angitt i Figur 1. Øverste panel viser standardavvik i strømstyrke fra NK800, mens nederste panel viser fra A160. Modellenes verdier er overskrevet med fylte sirkler som indikere tilsvarende standardavvik fra målingene fra bøyene B, B1, C og C1. Alle standardavvikene er kun basert på strømverdier fra korresponderende tidspunkt, dvs. timesverdier fra 226 dager i løpet av 2019. Horisontalaksen angir avstand fra vest til øst i km.

3.2 - Validering av bøyeposisjonene i Sulafjorden og Breisundet

3.2.1 - Strøm

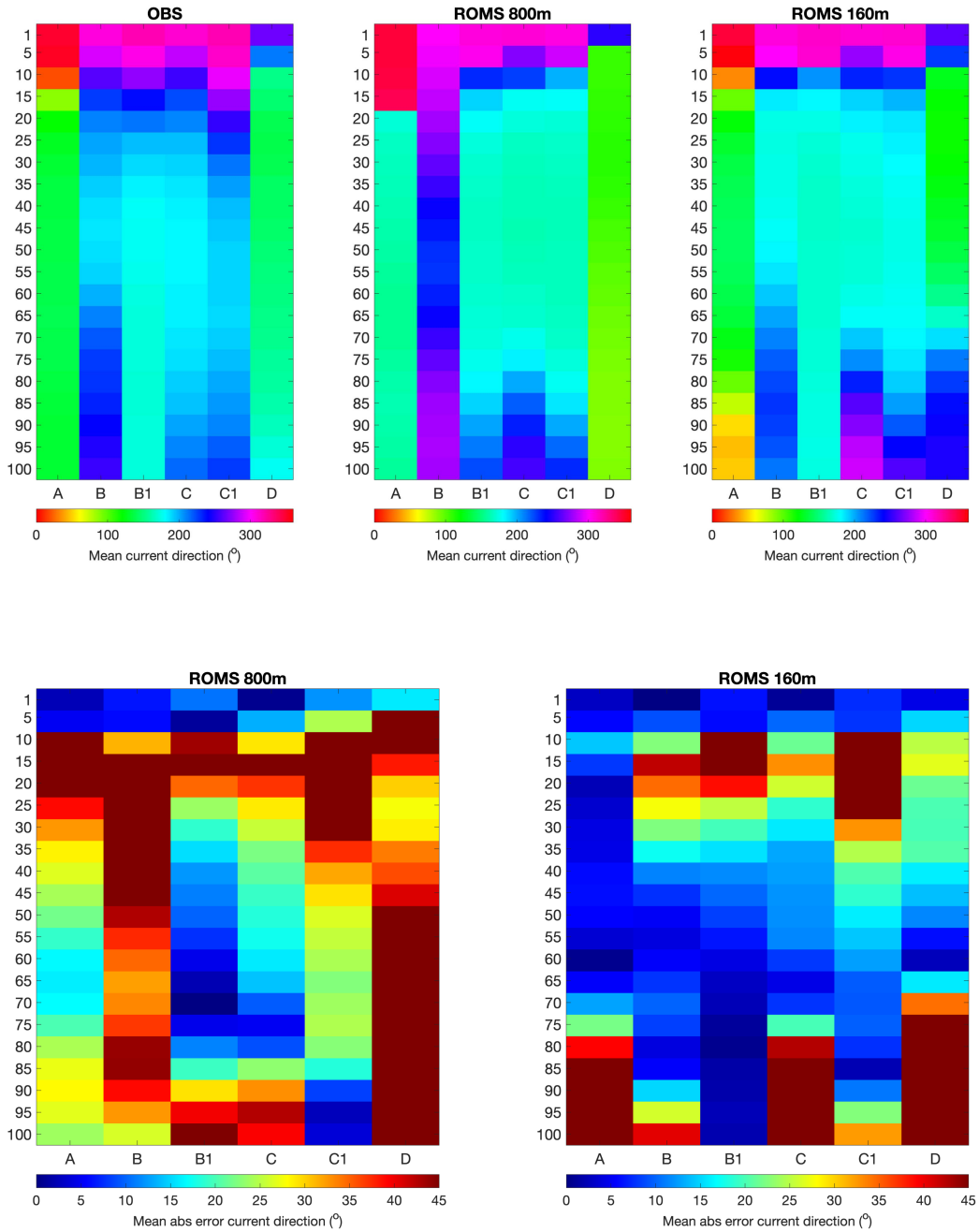
Basert på at begge modellene, men A160 spesielt, gjenskaper den storstilte dynamikken i Sulafjorden svært godt, er modellene også validert i bøyenes målepunkter. Figur 4 viser midlere strømstyrke for alle bøyeposisjonene og i alle måledypene ned til 100m sammen med den systematiske feilen som begge modellene har. Modellfeilen i strømstyrke

er generelt noe lavere i A160 enn NK800 selv om sistnevnte også gjengir observasjonene på en tilfredsstillende måte. Modellfeilen viser seg også noe høyere for de to punktene med kortest måleserie (B1 og C1 med ca. 11 måneder med målinger). Vertikalt ser vi at modellene har størst feil i måledypet på 5m, og dette er knyttet til usikkerheten med tykkelsen på overflatelaget og hvordan den turbulente blandingen homogeniserer de øverste vannmassene. F.eks. vil feil plassering av pyknoklin kunne medføre helt feil strømfart og retning i måledypet hvis dette blir liggende på feil side av tetthetsskillet, og selv om dette ikke er et persistent fenomen, så vil det kunne gi utslag på statistikken. Det kan også være usikkerheter ved å måle strøm så nær overflaten, noe som kan bety at observasjonene kan ha et avvik i forhold til naturlig strøm.



Figur 4. De øverste panelene viser midlere strømstyrke fra bøye A, B, B1, C, C1 og D i de ulike måledypene angitt i meter langs vertikalaksen, hhv. fra målingene (OBS), NorKyst800 og A160. Fargen angir strømstyrke i cm/s i henhold til fargeskalaen under. De to panelene nederst angir midlere modell-avvik i strømstyrke standardisert mot standardavvikene til målingene, dvs. at modellbias er angitt i standardavvik.

I tillegg til strømfart er også observert strømretning sammenliknet med tilsvarende resultater fra modellene i alle dybder ned til 100m (Figur 5). Her kommer det noe tydeligere frem at A160 har en mer realistisk strømretning enn NK800, og dette knytter vi først og fremst til en bedre gjengivelse av de batymetriske forholdene. Nær overflaten gir både NK800 og A160 realistiske strømretninger, men lenger ned er A160 en del bedre enn den grovere modellen. De avvikene i strømretning som dukker opp i A160 er kun i enkelte dyp og ikke i hele vannsøylen, men stort sett gir den best oppløste modellen god overenstemmelse med målingene.

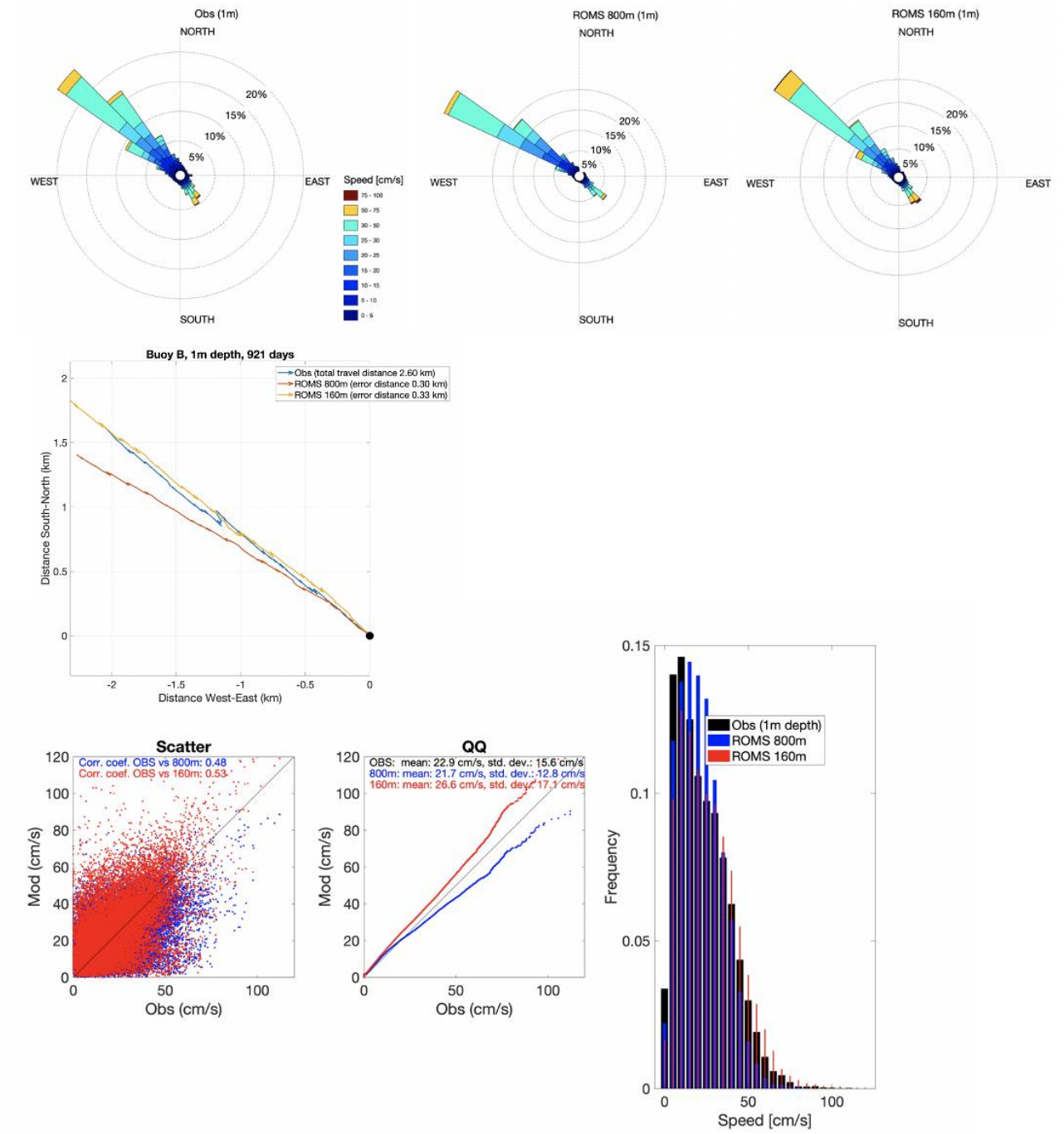


Figur 5. De øverste panelene viser midlere strømretning fra bøye A, B, B1, C, C1 og D i de ulike måledypene angitt i meter langs vertikalaksen, hhv. fra målingene (OBS), NorKyst800 og A160. Fargen angir strømretning i grader i henhold til fargeskalaen under. Mens 0/360° betyr strøm fra sør, så er 90° definert som strøm fra vest. De to panelene nederst angir modellenes bias i strømretning, og fargene er definert slik at blåfarge indikerer god overenstemmelse mellom målinger og modell.

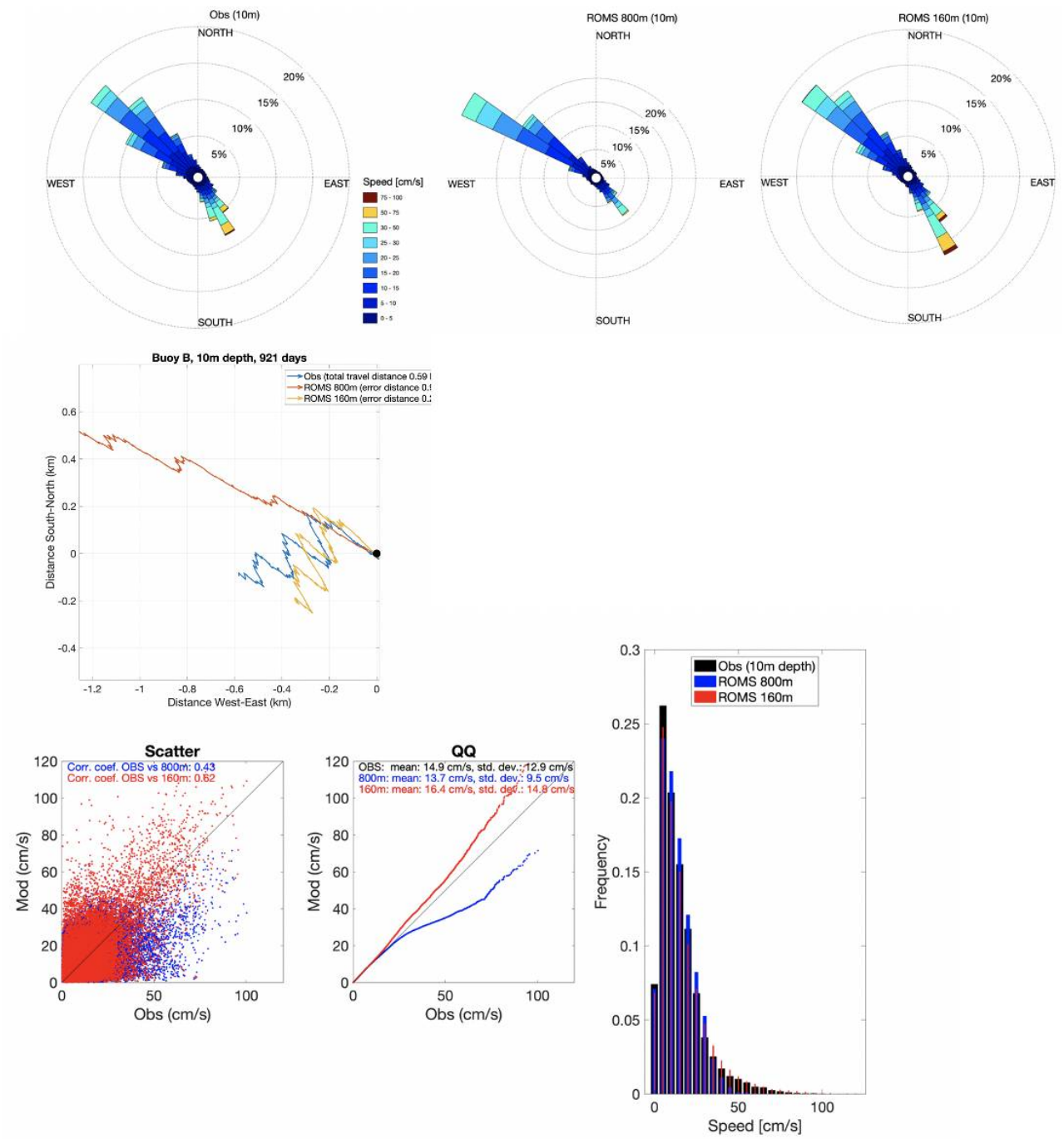
Det finnes flere framgangsmåter for å validere modellert strøm. Ved å ta utgangspunkt i 1, 10 og 50 meter dyp i lokaliteten til bøye B som eksempel, viser Figur 6 ulike eksempler på grafikk som illustrerer hvordan modellenes beregning av strømstyrke og -retning passer med de målte verdiene. Selv om det kan være feil i målingene, antar vi at disse verdiene er nær den sanne tilstanden. Merk også at denne statistikken er basert på hele 921 dager med timesverdier.

I dette eksemplet ser man fra strømrosene at hovedvekten av overflatestrømmen går mot nordvest og at A160 gjenskaper dette noe bedre enn NK800, spesielt mht. strømretning hvor NK800 dreier strømmen noen grader for mye i vestlig retning. Progressive vektorplott, der alle vektorene som beskriver strømmen er summert, er nyttige for å se om strømmen har en persistent dreining i feil retning. På 1m dyp så ser man det samme som i strømrosene at NK800 har et avvik i strømretning, men at begge modellene treffer godt i forhold til strømstyrken. Ved å sammenligne målt strømstyrke med modellerte verdier kan man lage spredningsplott. Hvis modellen er perfekt, skal alle punktene ligge langs diagonallinja. Strømmodeller er avhengig av flere variable drivkrefter som atmosfæremodellresultater, ferskvannstilførsel og påvirkninger fra storhavet gjennom åpne grenseflater. Små feil i rom og tid av disse inngangsdataene vil introdusere små feil i strømmodellresultatene. Det er også interne forenklinger i strømmodeller (som for eksempel gitteroppløsning) slik at mange modellerte estimater havner utenfor diagonalen. I praksis kan dette bety at modellen gjenskaper flere av de dynamiske episodene, men at dette skjer til feil tidspunkt (eller på feil sted). Det er derfor vanlig å benytte Q-Q-plott (kvantil mot kvantil), som egentlig er et sannsynlighetsplott. I et Q-Q-plott sorteres først observerte og modellerte strømstyrker, før de sammenliknes mot diagonallinja (perfekt modell). I eksempelet fra 1m dyp fra bøye B så ser man at mens NK800 underestimerer de sterkeste strømmene noe, så overestimerer A160 disse tilsvarende. Det siste kan man også lese ut av frekvensdiagrammet som også er vist til slutt i Figur 6. Et frekvensdiagram er nyttig for å finne ut om de ulike strømstyrkene er gjenskapt innenfor de ulike segmentene av strømstyrker. I tillegg til at A160 overestimerer de sterkeste strømmene, så ser man også at modellene har litt for få episoder med svak strøm.

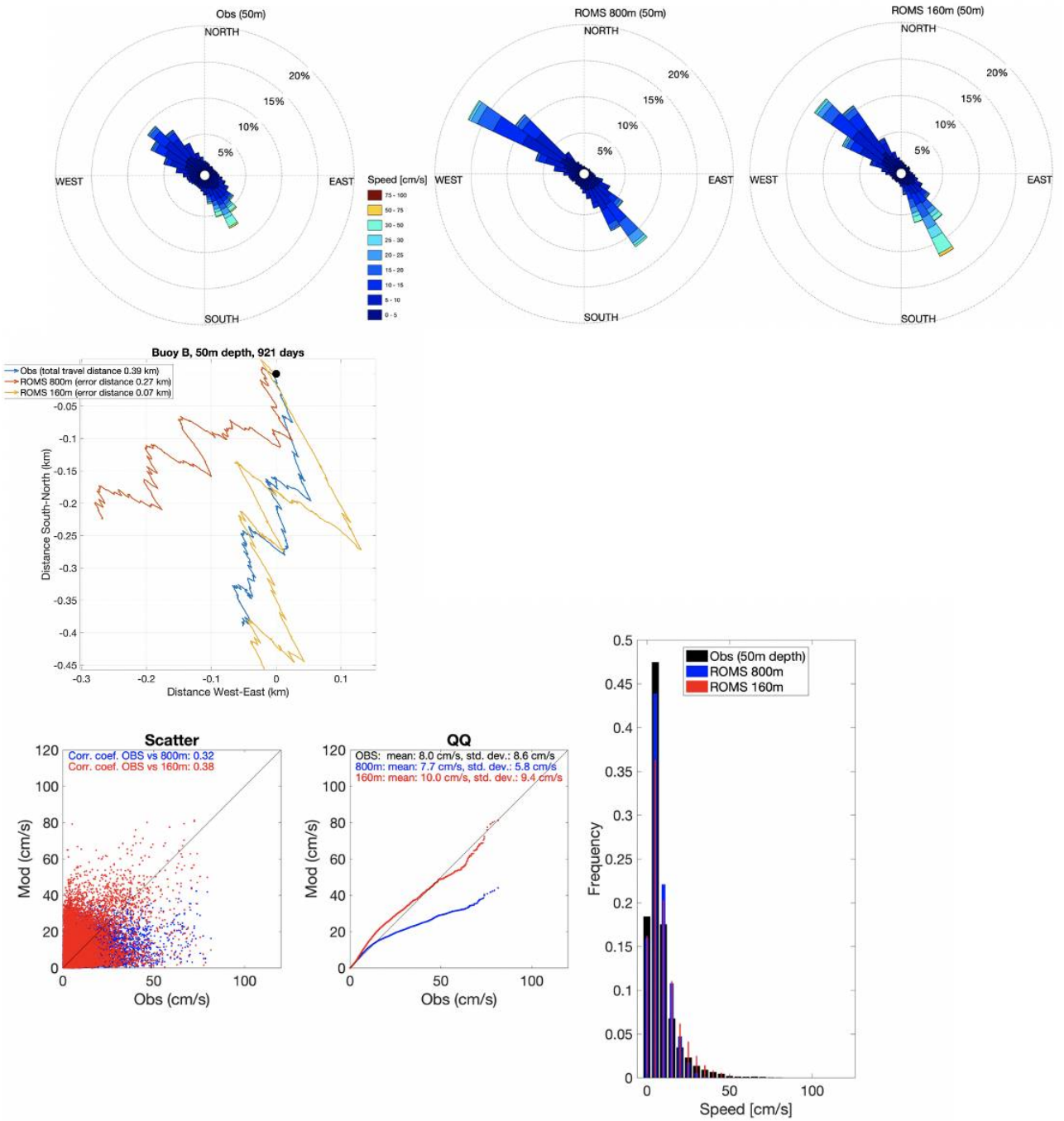
Tilsvarende grafikk er også lagd for 10m (Figur 7) og 50m (Figur 8) dyp for lokaliteten ved bøye B. I 10m dyp ser man tydelig at NK800 ikke fanger opp episodene med strøm mot sørøst, og at strømstyrken generelt er litt for svak. A160 har som for overflatestrømmen en liten overestimering av de sterkeste strømmene, men det er ellers svært god overenstemmelse. I 50m dyp klarer også NK800 å gjengi noen av episodene med strøm mot sørøst, men de er litt for svake. A160 treffer veldig bra i dette dypet både i forhold til strømretning og -styrke, men som vanlig så bommer modellen en del på å gjengi deler av den dynamiske variabiliteten til rett tid.



Figur 6. Eksempel på direkte sammenlikning mellom målt og modellert strøm for bøye B i 1m dyp. De øverste panelene viser strømroser fra hhv. målingene, NK800 og A160. De fargede sektorene angir retningen som strømmen går mot, fargeskalaen indikerer strømstyrke og lengden på sektorene angir hvor ofte strømmen gikk i den retningen. Mellomste panel viser et progressivt vektorplott som er summen av alle vektorene som kommer fra målinger og modeller. Aksene angir her total avstand i km. De nederste plottene sammenligner timesverdier av strømstyrke ved hjelp av spredningsdiagram (tidsvariant), qq-plott (verdiene rangert fra minst til høyest) og frekvensdiagram.



Figur 7. Eksempel på direkte sammenlikning mellom målt og modellert strøm for bøye B i 10m dyp. Se forklaring i tekst for Figur 6.



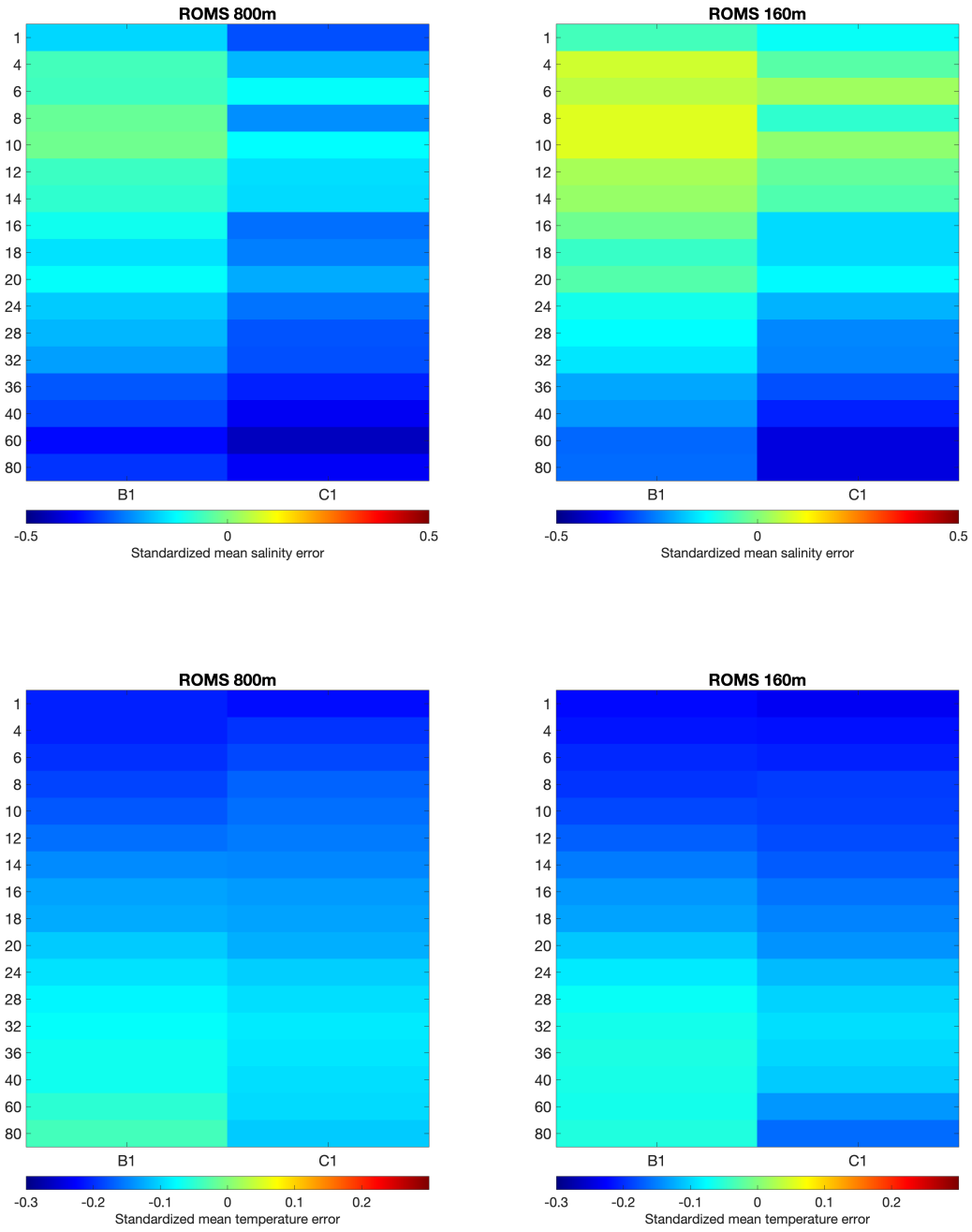
Figur 8. Eksempel på direkte sammenlikning mellom målt og modellert strøm for bøye B i 50m dyp. Se forklaring i tekst for Figur 6.

3.2.2 - Hydrografi

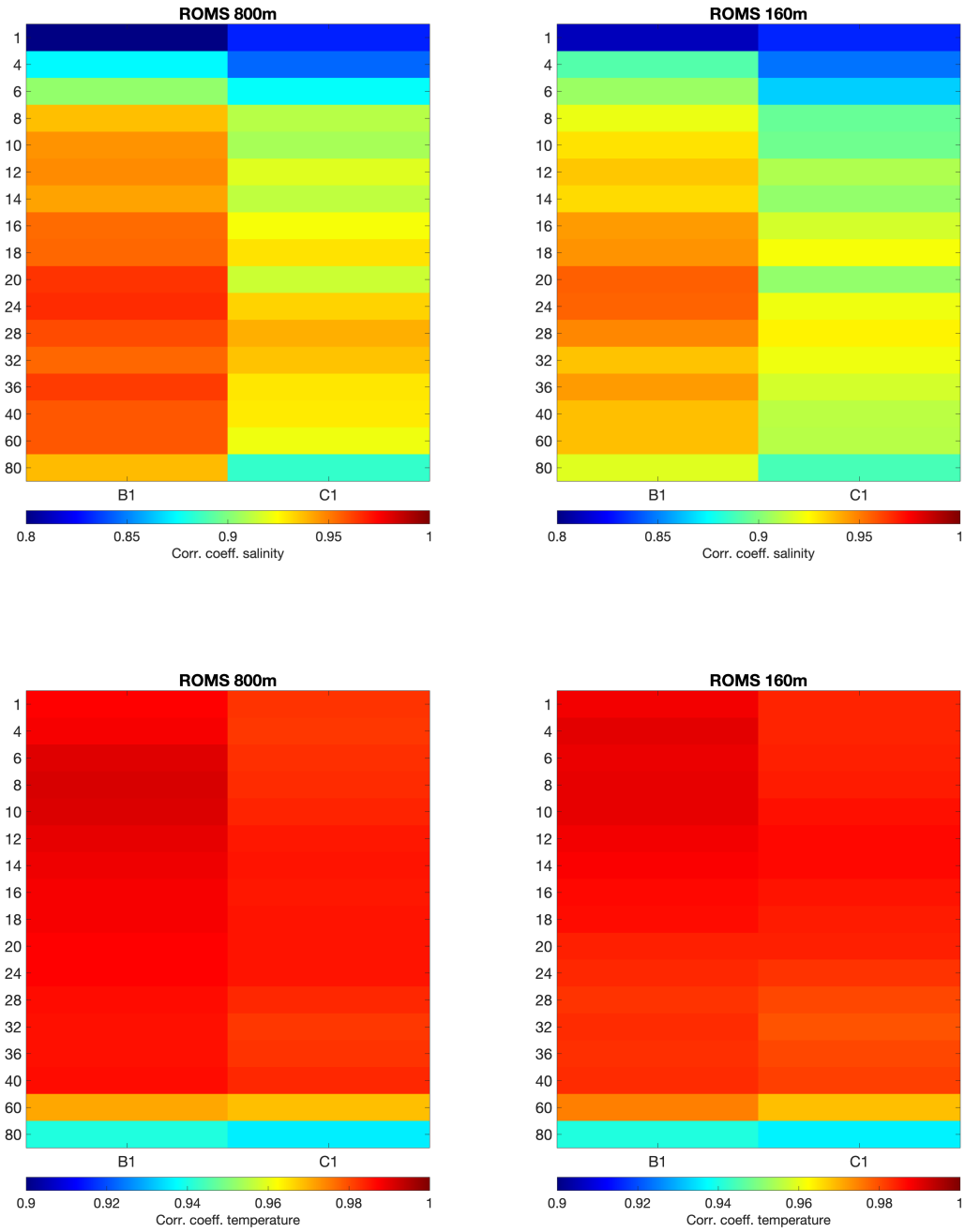
Når man har validert den modellerte strømmen og funnet god overenstemmelse, betyr dette i praksis at hydrografien i modellen også vil være realistisk. I norske fjorder vil hydrografien (tettheten) være svært avgjørende for strømmønsteret i tillegg til vind og tidevann. Ettersom strømmodellene er drevet med gode, høyoppløste atmosfæremodeller, er det de tetthetsdrevne strømmene som kan være mest utfordrende å få riktig i modellen. For å vise hvilken presisjon modellene har i forhold til tetthet, dvs. saltholdighet og temperatur, er det tatt utgangspunkt i bøye B1 og C1 ettersom de hadde veldig god vertikal oppløsning. Sammenlikninger fra de andre bøyene er ikke vist her, men resultatene er tilsvarende.

Ved å standardisere den langtids-midlete modellfeilen, får man frem modellens bias i forhold til variabiliteten. Generelt ser man at både NK800 og A160 har kun små feil i både saltholdighet og temperatur, men at begge modellene har litt

for lav saltholdighet under rundt 20m og litt for lav temperatur i de øvre 20m. Ved å se på korrelasjonsfaktorene i Figur10, så ser man at disse er veldig like for både NK800 og A160 og at verdiene er svært høye for de øvre 40m. Overflatesaltholdigheten har noe lavere korrelasjon, men dette skyldes at variabiliteten er høy og at ferskvannsavrenning og ytre påvirkninger kan gi betydelige endringer som ikke nødvendigvis gjenskapes til rett tid i modellen.



Figur 9. Standardisert modellfeil for saltholdighet (øverst) og temperatur (nederst) fra NK800 (venstre) og A160 (høyre) for alle måledypene angitt i meter langs vertikalaksen. At feilen er standardisert betyr at den midlere modellfeilen (bias) er dividert med standardavviket til målingene, dvs. at fargeskalaen angir modellfeilen i antall standardavvik. Grønnfargen betyr bra overenstemmelse mellom modell og målinger, mens blåfarge betyr at modellen underestimerer noe.

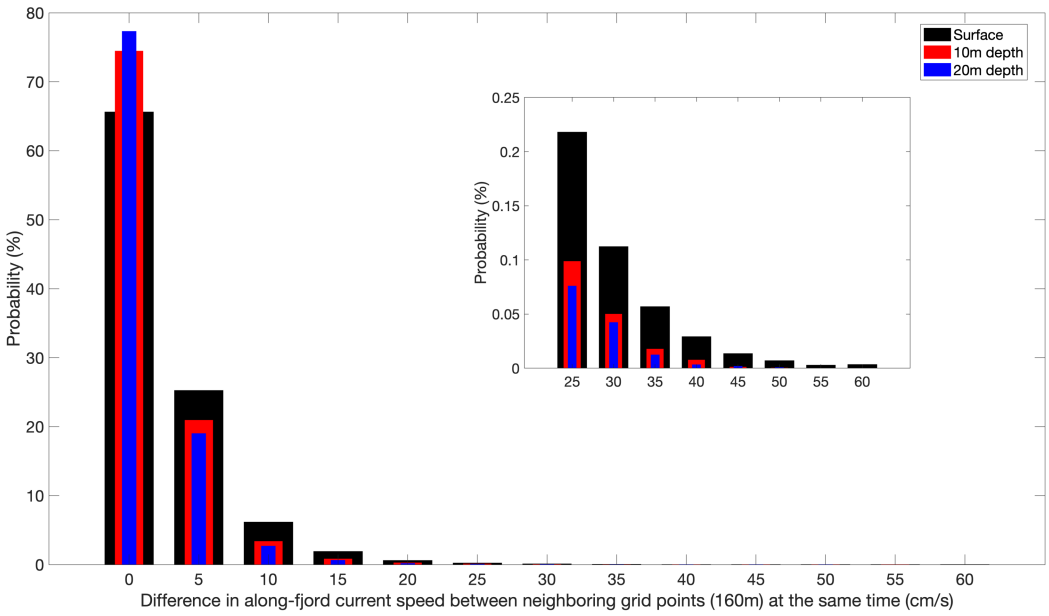


Figur 10. Korrelasjon mellom målinger og modell for saltholdighet (øverst) og temperatur (nederst) fra NK800 (venstre) og A160 (høyre) for alle måledypene angitt i meter langs vertikalaksen. Høy korrelasjon er et mål på at variasjonene i saltholdighet og temperatur, dvs. tetthet, er realistiske og følger hverandre i tid.

4 - Gradienter i strømstyrke i rom og tid

Det er velkjent at variabiliteten i havet er stor både i rom og i tid. Det finnes flere måter å klassifisere variabilitet på, f.eks. ved hjelp av standardavvik/varians, som vist for bøyeposisjonene, eller mer dynamisk klassifisering som mål på mesoskala variabilitet (virvler, meandere etc.). Et intuitivt mål er kun å se på forskjell i strømstyrke mellom nabogridpunktene i modellen. Ettersom de kraftigste strømmene går langs fjordaksen er denne strømkomponenten hentet ut fra alle gridpunkter på tvers i nordlige Sulafjorden (se sort linje i Figur 1) hver time fra 2,5 år av simuleringen med A160-modellen. Differansen av strømmen gjennom dette snittet mellom nabopunktene for alle gridpunktene langs snittet er summert opp og vist i Figur 11. Fordelingen er vist både for overflaten, 10m og 20m dyp, og selv om hastighetsskjæret er størst i overflaten, er det markant også helt ned til 20m. Rundt 2/3 av tiden er differansen mellom nabopunktene mindre enn 2,5cm/s i overflaten, og selv om det i løpet av denne perioden dukket opp tre tilfeller hvor differansen i strømstyrke oversteg 50cm/s, viser modellen at sannsynligheten for at man opplever et strømskjær på 25cm/s over 160m avstand er under 0,5%.

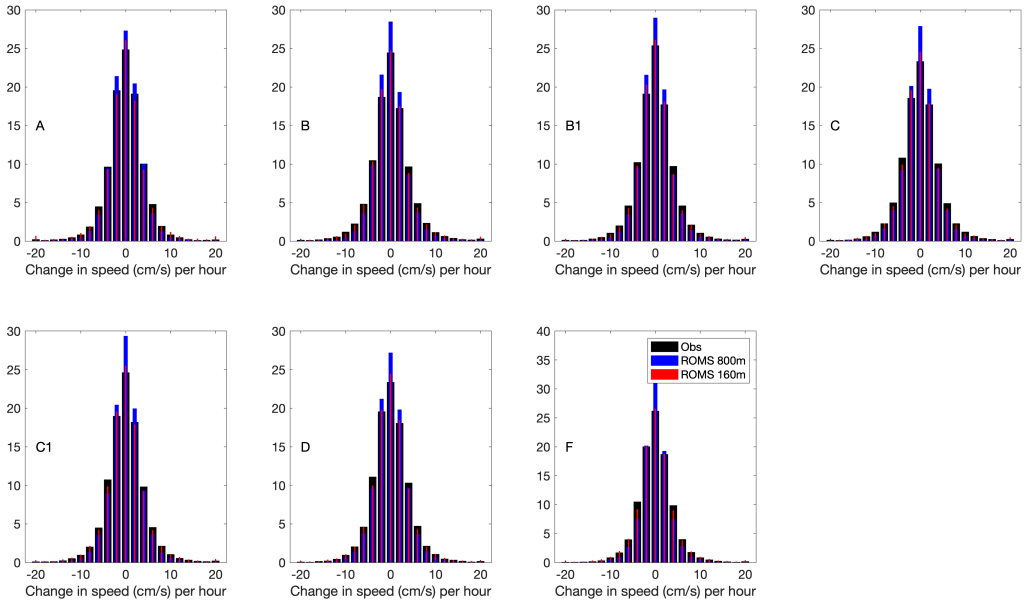
Kvantifisering av strømstyrker på tvers av fjorder er essensielt for både å få bedre oversikt over hvilke strømskjær man kan forvente seg. Samtidig må man må ta høyde for at modellen kan feilberegne dynamikken noe både i tid og rom, og dette kan gi store utslag på plassering av hastighetsskjær selv om det overordnete strømmønsteret i den modellerte fjorden er realistisk.



Figur 11. Frekvensdiagram som tar utgangspunkt i langs-fjord strøm i gridpunktene på tvers i nordlige Sulafjorden (langs linja i Figur 1) og som angir differansen i strømstyrke mellom nabopunktene. Alle gridpunktene langs snittet er inkludert. Vertikalaksen angir sannsynlighet i %, og de ulike søylene angir fordelingen av gradienter i strømstyrke for overflaten (sort), 10m (rød) og 20m (blå) dyp. Der hvor strømmen har gått i motsatt retning, er differansen fremkommet ved å addere det ekstra bidraget. Det ekstra, lille panelet viser fordelingen av de kraftigste gradientene (mer enn 25cm/s forskjell mellom nabopunkter), men der sannsynlighetene er små.

Ved å bruke bøyeposisjonene som utgangspunkt er endring i strømstyrke fra time til time beregnet og oppsummert i frekvensdiagram både fra målingene og modellresultatene (Figur 12). En slik oppdeling viser en tilnærmet perfekt Gauss-fordeling der hovedvekten av verdiene ligger innenfor +/- 10cm/s. Både målinger og modeller viser at der kan forekomme både økning og reduksjon i strømstyrke som ligger på mellom 10-20cm/s i løpet av én time. Fordelingen av endringer i strømstyrke i alle bøyeposisjonene er så å si lik. Merk også at denne fordelingen er svært godt representert i

A160 i forhold til målingene, mens strømstyrken i NK800 underestimerer endringene noe.

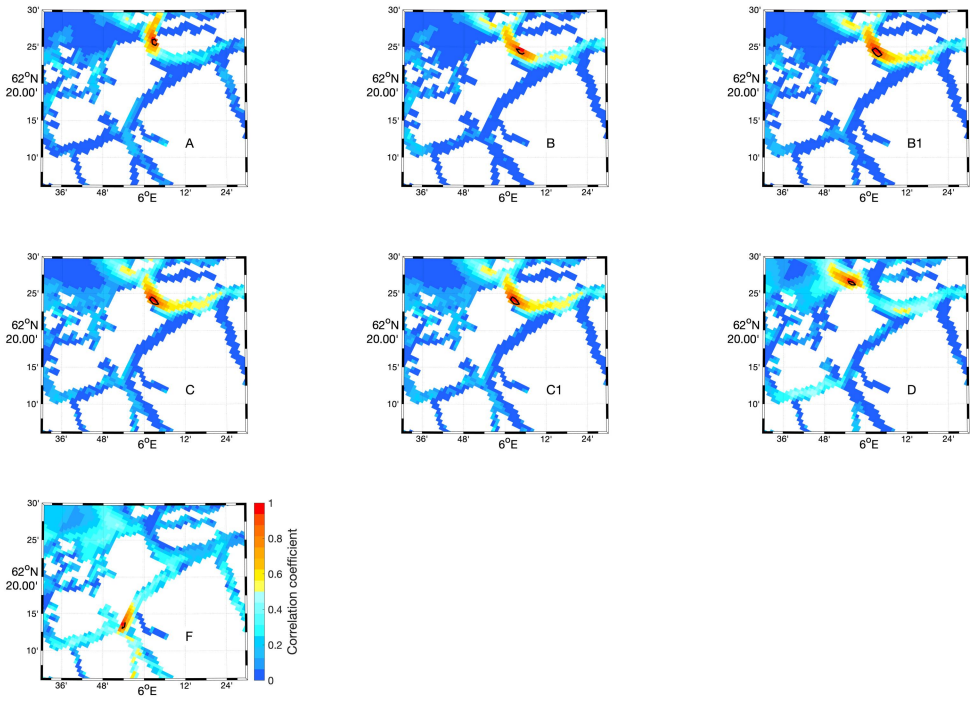


Figur 12. Frekvensdiagram som tar utgangspunkt i bøyeposisjonene A, B, B1, C og C1 i Sulafjorden, D i Breisundet og F sør i Vartdalsfjorden (ett panel per bøye) og som viser differansen i strømstyrke mellom to påfølgende tidspunkter med én times mellomrom. Fargene skiller mellom målinger (sort), NK800 (blå) og A160 (rød). Negative og positive verdier indikerer at strømstyrken hhv. avtok eller økte, og vertikalaksen angir verdier i %.

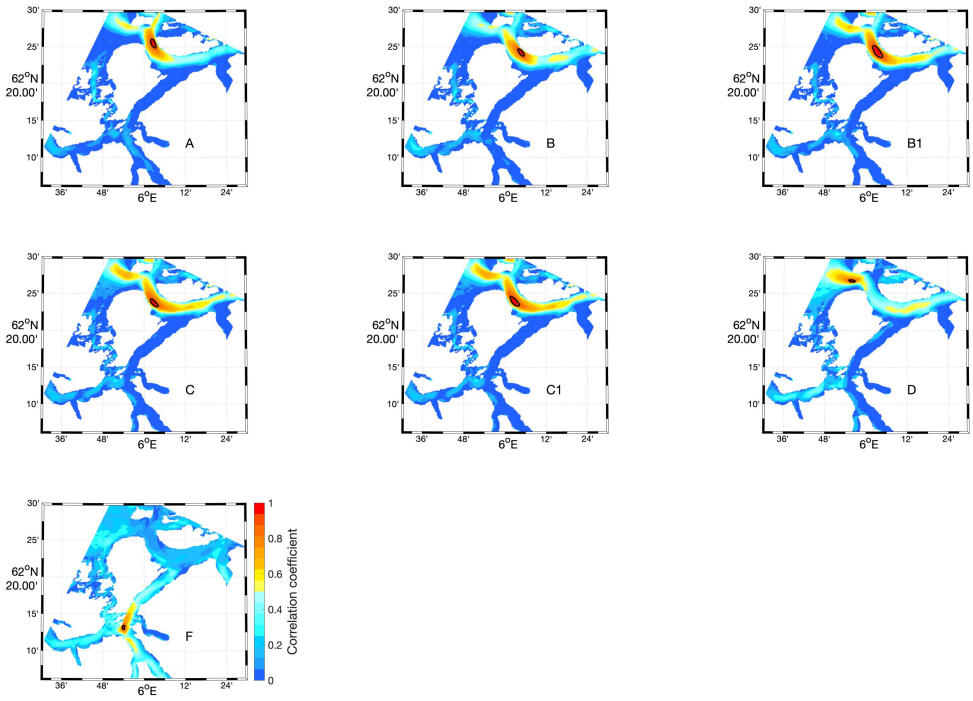
5 - Representativitet

E39-bøyene i Møre og Romsdal utgjør et stort og kostbart nettverk av målebøyer med akustiske og profilerende strømmålere samt flere CTD-instrumenter som alle sender data i nåtid til dataservere. Selv om det står fem strømmålere i nordligste halvdel av Sulafjorden, vil man ikke nødvendigvis fange opp all variabilitet i fjorden dersom de ulike dynamiske hendelsene bommer på målelokalitetene. Gode, numeriske fjordmodeller er derfor et verdifullt verktøy som kan utfylle måledata med realistiske estimater. Her er modellene brukt til å undersøke hvor representative målelokalitetene er i forhold til omgivelsene. Hvis man har en lengre måle- og modellserie med strømverdier, er det vanlig å beregne en korrelasjonskoeffisient mellom disse. Ofte kan et slikt kvalitetsmål forringes fordi de dynamiske hendelsene i modellen ikke korresponderer helt i tid med virkeligheten. Selv om modellen statistisk sett kan gjengi strømforholdene veldig godt, viser f.eks. spredningsdiagrammene i Figur 6-8 at korrelasjonskoeffisienten mellom målt og modellert (A160) strømstyrke i bøyelokalitetene ligger på 0,4-0,5.

Eksempler på korrelasjon mellom enkeltpunkter (bøyelokalitetene) og resten av det modellerte feltet er vist i Figur 13 (fra NK800) og 14 (fra A160). Her ser man at der er et område rundt lokalitetene med høy korrelasjon, men at denne avtar raskt på tvers av hovedstrømmønstrene. I noen lokaliteter vil de dynamiske endringene strekke seg et godt stykke inn i eller ut av fjordområdet, men avhengig av hvor godt korrelert man krever at et område er i forhold til referansepunktet vil enkeltpunktene kun representere et mindre område rundt selve målepunktet. Konklusjonene rundt representativitet endrer seg ikke så mye ved å gå ned i oppløsning til 160m, men man får frem mye mer detaljer, spesielt i overgangen mellom vannmasser samt inn mot land.



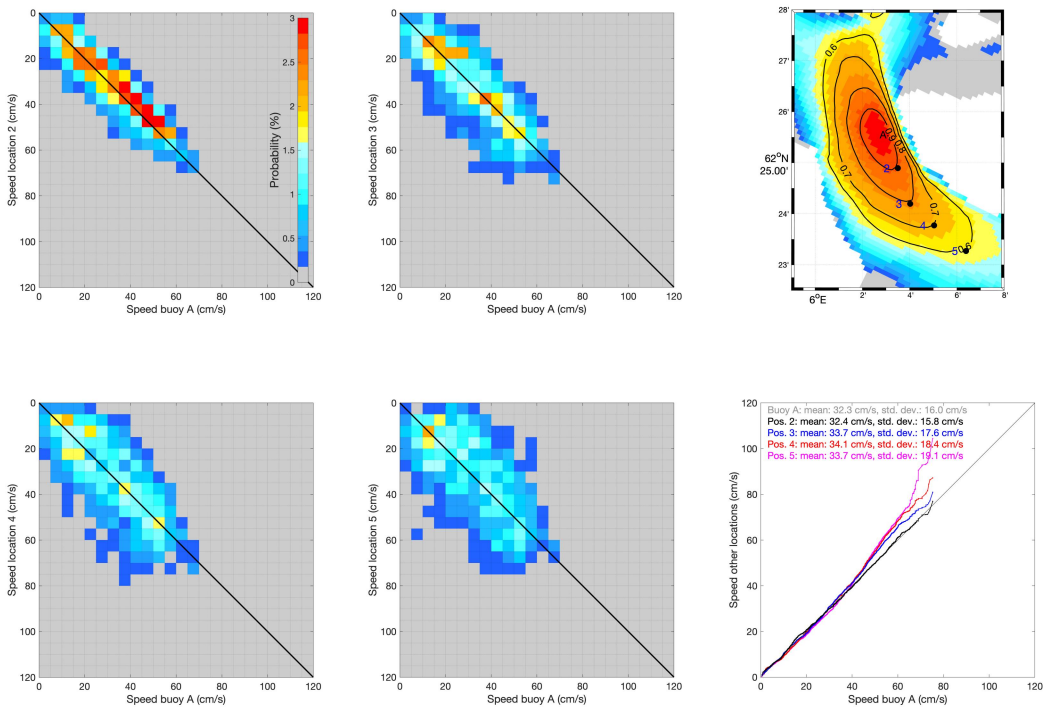
Figur 13. Korrelasjonskoeffisient i strømstyrke i overflaten fra NK800 mellom bøyelokalitetene (navn på bøye angitt med bokstav inne på land) og resten av det modellerte strømfeltet. Fargene angir styrken på korrelasjonskoeffisienten og sort linje indikerer grensen for verdi på 0,9.



Figur 14. Som Figur 13, men her fra A160. Merk at kartutsnittene er skjært ut av det originale modellfeltet i vest og nord.

Hvis variabiliteten i strømstyrke i lokaliteten til bøye A i 1m dyp fra A160 korreleres med området rundt, dekker samvariasjonen mest på langs av fjordaksen (Figur 15, panel oppe til høyre). Rundt bøyeposisjonen A er det omtrent 80 gridpunkter som har korrelasjon over 0,9, og det vil si at ca. 2,0 km2 ligger innenfor et slikt dekningsområde. Tilfeldige punkter som har korrelasjonskoeffisient på hhv. 0,9, 0,8, 0,7 og 0,6 er plukket ut og vist i sprednings- og qq-plott mot tidsserien i bøyeposisjon A (Figur 15). Jo lavere korrelasjonen er, jo større spredning er det i strømfartverdiene, og selv med korrelasjon på 0,9 ligger en stor del av verdiene utenfor diagonal-linja. Når man sammenlikner verdiene rangert fra lavest til høyest, viser alle posisjonene god overenstemmelse med unntak av de høyeste verdiene. Det siste skyldes at lokale dynamiske artefakter gir forskjeller i ekstremstrøm.

Merk at denne måten å bruke korrelasjon på ikke kan sammenliknes med f.eks. valideringen som ble gjort mellom bøyemålinger og modellresultater. I denne representativitetsberegningen ser vi på hvordan modell oppfører seg med konsistente drivkrefter over alt og en konkret beskrivelse av hvordan dynamikken er beskrevet. Når vi sammenlikner målinger mot modelldata, vil det være utenforliggende faktorer som også medfører en forringelse av samvariasjon, f.eks. at atmosfæremodellen eller andre drivkrefter ikke er helt presist angitt. Strømmodeller har vist seg å ha en klar tidsvariasjon i forhold til når samvariasjonen mot målinger er god eller dårlig (Dalsøren et al., 2020), og derfor vil tidvis beregning av korrelasjon gi en bedre kvantifisering av hvordan målinger og modellresultater samvarierer.

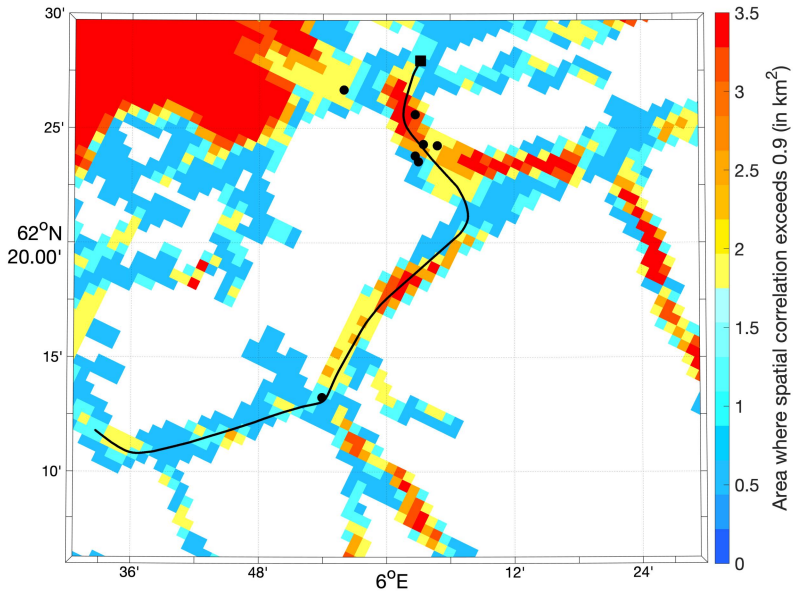


Figur 15. Kartet oppe til høyre viser korrelasjonen i overflatestrømstyrke angitt med farger mellom posisjonen til bøye A nordvest i Sulafjorden og alle omkringliggende gridpunkter i A160-modellen. De sorte konturlinjene markerer grensene for korrelasjonskoeffisient på hhv. 0,9, 0,8, 0,7 og 0,6, og de sorte prikkene med tilhørende blå tall markerer eksempelposisjonene som er brukt til å sammenlikne overflatestrøm mot midtpunktet (A). De fire panelene til venstre viser spredningsplott (sortert i bins) mellom strømstyrke (1m) i posisjonen til bøye A og de fire punktene angitt som sorte prikker og blå tall i kartet, hhv. med korrelasjonskoeffisient på 0,9, 0,8, 0,7 og 0,6. Fargene angir her sannsynlighet i % og fargeskalaen går fra 0% (grå) til 3% (rød) i alle fire panelene. De samme strømstyrkeverdiene er rangert fra lavest til høyest og presentert nede til høyre i et qq-plott.

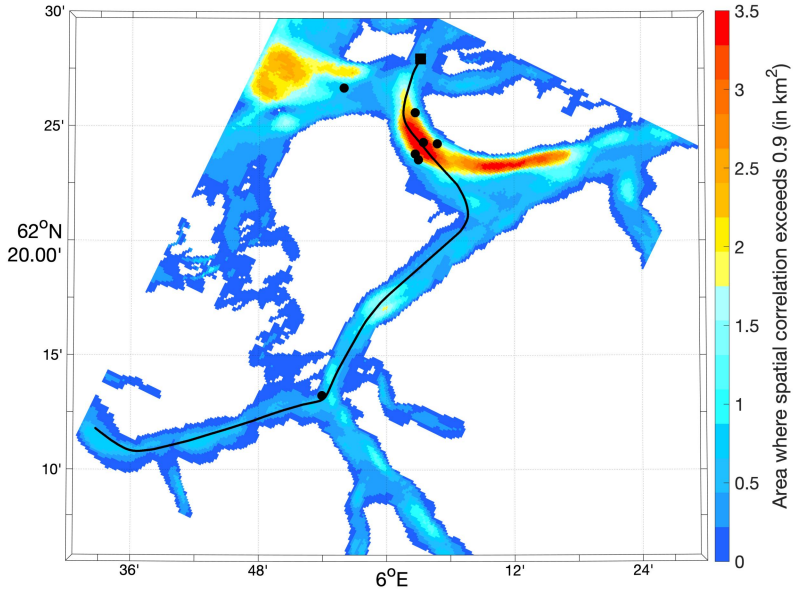
For å estimere hvor godt strømstyrken i overflaten samvarierer i modellene, er korrelasjonskoeffisient på 0,9 satt som en grense for å kunne si at variabiliteten i ett punkt også forklarer tilsvarende i nærliggende områder. Ved å beregne størrelsen på det området rundt en lokalitet som har korrelasjonskoeffisient over 0,9 så får man et forenklet bilde av hvilke fjordområder som kan beskrive dynamikken for en større del av fjorden bedre enn andre. En oppsummering av de ulike arealene som fremkommer er vist i Figur 16 for NK800 og i Figur 17 for A160. En tolkning av disse arealene er at i områder med høy verdi så vil en dataserie kunne representere et større geografisk område enn om man henter tidsserie fra en lokalitet med lav verdi, mao. et slags representasjonsestimat.

Fra NK800-feltet (Figur 16) ser man høye verdier ut mot kysten, sentralt i Sulafjorden samt i endel enkeltpunkter der fjordene kun er 2-3 gridpunkter brede. Fra A160 (Figur 17) ser man at områdene med høy samvariasjon er modifisert i forhold til NK800 med unntak av området sentralt i Sulafjorden og østover mot Storfjorden. Ettersom A160 har vist seg å være noe mer realistisk i forhold til både strømretning og strømstyrke i alle målepunktene, gir nok A160 også et mer realistisk estimat på samvariasjon. De høye verdiene i NK800-feltet skyldes nok artefakter fra modellens oppløsning.

Man kan også legge merke til at mens noen bøyer er plassert i områder hvor de vil beskrive dynamikken godt for et større fjordområde (spesielt C1 og B1), samt at noen ligger i randsonen for høy samvariasjon (A, B og C), er bøye D i Breisundet og bøye F i Vartdalsfjorden noe mer isolert i forhold til å kunne brukes utenfor denne lokaliteten.



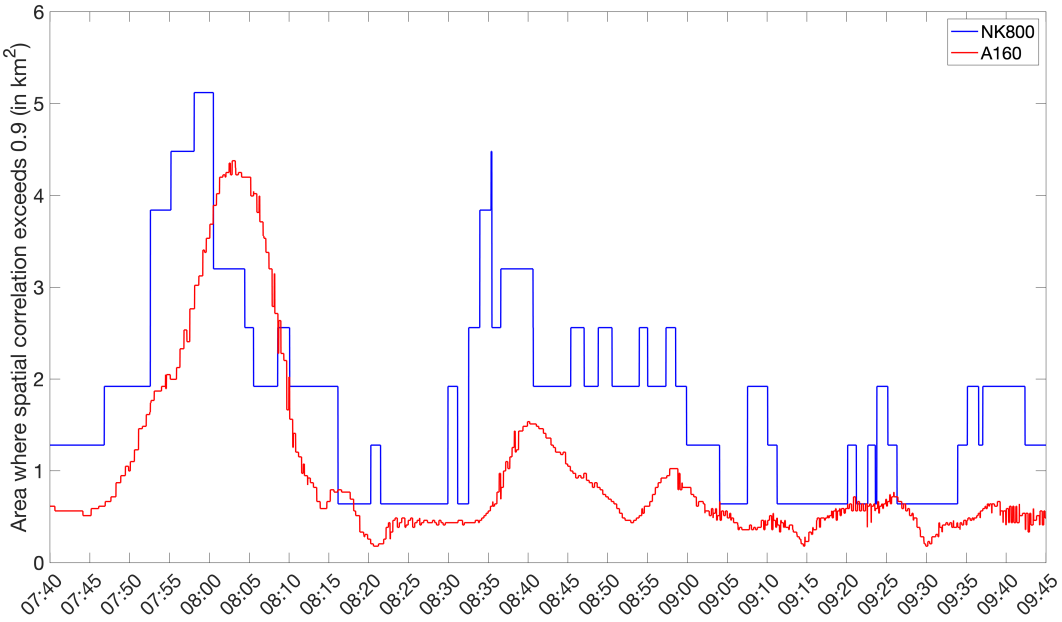
Figur 16. Basert på strømstyrke i overflaten fra NK800 og korrelasjon mellom enkeltpunkter og resten av strømfeltet er arealet der korrelasjonskoeffisienten er over 0,9 beregnet og vist med farger. Fargeskalaene er i km^2, og målepunktene er vist som sorte prikker. Den sorte linjen viser eksempel seilas for MS Kvitbjørn.



Figur 17. Som Figur 16, men her fra A160. Merk at kartutsnittene er skjært ut av det originale modellfeltet i vest og nord.

Relevant i prosjektet Innocurrent er å se på hvor stort areal hver strømmåling fra et skip vil kunne representere og hvordan dette varierer gjennom en typisk kystled. Vi har derfor tatt utgangspunkt i en del av en reell seilas gjennom Møre og Romsdal der Samskip Kvitbjørn seilte sørover gjennom Sulafjorden og Vartdalsfjorden og vestover ut Rovdefjorden (traséen er angitt i Figur 17 og 18). Selv om typisk sampling-intervall er 1 Hz og dette gir vesentlig høyere

oppløsning langs traséen enn både NK800 og A160 tilsvarer, så har vi likevel brukt skipets posisjon hvert sekund (posisjonsdata sendt over fra Leif Aarseth ved Kongsberg Maritime AS). Vi har derfor tatt ut verdiene fra Figur 17 (NK800) og 18 (A160) langs skipsruten som da kvantifiserer hvor stort areal målepunktene har med området rundt med kravet om en korrelasjon i overflatestrøm over 0,9 (Figur 18). Vi ser da at variasjonen i hvor representativt hvert målepunkt er med omgivelsene varierer stort langs seilingsruten. I tillegg kommer det frem klare forskjeller som kan forklares med modellenes oppløsning der NK800 stort sett estimerer dette arealet høyere enn A160. Siden Samskip Kvitbjørn i dette tilfellet seiler rett gjennom de sentrale områder av Sulafjorden hvor store arealer samvarierer sterkt mht. overflatestrøm, så ser vi at målinger som foretas der vil representere et opp mot 10 ganger større areal enn målinger som samles nærmere land eller i de smalere fjordområdene.



Figur 18. Kurvene viser hvor stort areal (i km^2) hvert målepunkt representerer basert på Samskip Kvitbjørn sin seilas 10. februar 2018 fra kl. 07:40 til 09:45. Traséen er angitt i Figur 16 og 17, og verdiene langs vertikalaksen er hentet fra de samme kartene.

6 - Oppsummering

Vi finner at begge modellene, NK800 og A160, gjenskaper de observerte verdiene bra. Selv om NK800 ikke har mange gridpunkter på tvers av fjordene i Møre og Romsdal, så gjenskaper også denne modellen mange av de dynamiske hendelsene. Gitteroppløsningen på 160m, som i A160, medfører at man har mer kontinuerlige, realistiske overganger mellom strømsterke og strømsvake områder, samt mer naturlige gradienter inn mot land. Dette gir også en forbedring av strømretning, hovedsakelig grunnet en mer presis gjengivelse av bunndyp.

Variabiliteten er stor i tid og rom i dataene. Endringer i strømstyrke i tid er veldig presist gjengitt i A160. Gradienter i strømstyrke i rom kan kun beregnes fra modellene, og det kan forekomme svært kraftige gradienter (>50cm/s) fra ett gridpunkt til nabopunktet (160m). Selv om dette forekommer sjeldent, kan man ikke avskrive at dette er reelt ut fra at modellen validerer såpass godt mot målingene. Med det relativt grove beregningsgitteret numeriske strømmodeller anvender, er forøvrig ikke frontdynamikk, som ofte har karakteristiske lengdeskalaer på noen få meter, noe som gjenskapes helt presist uansett.

Vi har estimert hvor stort område strømverdier i ulike punkter vil kunne gjelde for, og midt i fjordene der hovedstrømmen går langs fjordaksen, er dette representativitetsarealet på drøye 3km2. Innenfor Sulafjorden og nærmere land er arealet beregnet til 1,5km2 eller mindre. Vi har også sett på hvor mye dette representativitetsarealet varierer langs en reell seilingsrute. En slik type informasjon kan være nyttig for å vurdere egnetheten til observasjoner i forhold til å representere en generell beskrivelse av forholdene. Man kan også bruke slike modellestimater til å finne lokaliteter hvor målinger representerer et størst mulig område, samt at man potensielt også kan bruke denne type informasjon når man vurderer modellers pålitelighet mot måledata.

7 - Acknowledgement

Forfatterne ønsker å takke Jenny Ullgren ved Runde Miljøsenter AS for verdifulle diskusjoner rundt feilretting og tilpasning av måledata fra E39-bøyene. En stor takk til Birgit Kjoss Lynge og Leif Aarseth ved Kongsberg Maritime AS (tidligere Rolls-Royce Marine AS) for gjennomlesning og aksept av rapporten, samt til Birgit Kjoss Lynge som stødig prosjektleder av det Forskningsrådsstøttede innovasjonsprosjektet i næringslivet Innocurrent (Innovative ship speed and Power optimization by the aid of sea current predictions).

8 - Referanser

Ágústsson H, Albretsen J, Grini S & Broe BR (2019) Sulafjorden, Vartdalsfjorden og Halsafjorden, Møre og Romsdal - Kart for ekstremstrøm og validering av modellert strøm, KVT/HÁ/2019/R100, Kjeller Vindteknikk.

Albretsen J, Sperrevik AK, Staalstrøm A, Sandvik AD, Vikebø F og Asplin L (2011) NorKyst-800 Report No. 1 - User Manual and Technical Descriptions, Fisken og Havet 2/2011, Institute of Marine Research.

Asplin L, Albretsen J, Johnsen IA og Sandvik AD (2020) The hydrodynamic foundation for salmon lice dispersion modeling along the Norwegian coast, Ocean Dynamics. doi: 10.1007/s10236-020-01378-0, 2020.

Bekkby T, Smit C, Gundersen H, Rinde E, Steen H, Tveiten L, Gitmark JK, Fredriksen S, Albretsen J & Christie H (2019) The Abundance of Kelp Is Modified by the Combined Impact of Depth, Waves and Currents, Front. Mar. Sci., 6, 475.

Beldring S, Engeland K, Roald LA, Sælthun NR and Voksø A (2003) Estimation of parameters in a distributed precipitation-runoff model for Norway, Hydrology and Earth System Sciences, 7(3), 304-316.

Carvajalino-Fernández MA, Sævik PN, Johnsen IA, Albretsen J & Keeley NB (2020) Simulating particle organic matter dispersal beneath Atlantic salmon fish farms using different resuspension approaches, Mar. Poll. Bull., 161, 111685.

Dalsøren S, Albretsen J & Asplin L (2020) New validation method for hydrodynamic fjord models applied in the Hardangerfjord, Norway, Estuarine Coastal and Shelf Sci., 246, 107028.

Egbert GD and Erofeeva SY (2002) Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. J. Atmos. Oceanic Technol., 19, 183204.

Espinasse B, Tverberg V, Basedow SL, Hattermann T, Nøst OA, Albretsen J, Skardhamar J & Eiane K (2017) Mechanisms regulating inter-annual variability in zooplankton advection over the Lofoten shelf, implications for cod larvae survival, Fish. Oceanogr., 26, 229–315.

Filbee-Dexter K, Pedersen MF, Fredriksen S, Norderhaug KM, Rinde E, Kristiansen T, Albretsen J. & Wernberg T (2020) Carbon export is facilitated by sea urchins transforming kelp detritus, Oecologia, 192, 213–225.

Furevik BR, Ágústsson H, Borg AL, Zakari M, Nyhammer F & Gausen M (2020) Meteorological observations in tall masts for mapping of atmospheric flow in Norwegian fjords, Earth System Science Data, doi: 10.5194/essd-2020-32.

Haidvogel D, Arango H, Budgell W, Cornuelle B, Curchitser E, Lorenzo ED, Fennel K, Geyer W, Hermann A, Lanerolle L, Levin J, McWilliams J, Miller A, Moore A, Powell T, Shchepetkin A, Sherwood C, Signell R, Warner J, Wilkin J (2008) Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. J Comput Phys 227(7): 3595–3624, predicting weather, climate and extreme events. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.06.016.

Harstveit K, Ágústsson H, Bredesen RE, Furevik B, Aarnes OJ & Albretsen J (2018) Sulafjorden og Vartdalsfjorden, Møre og Romsdal. Analyse av modellert vind, strøm og bølger for 2007-2017, KVT/KH/2018/R0105, Kjeller Vindteknikk.

Huserbråten MBO, Moland E & Albretsen J (2018) Cod at drift in the North Sea, Prog. Oceanogr., 167, 116–124, doi:10.1016/j.pocean.2018.07.005.

Kristensen NM & Gusdal Y (2021) NorKyst800 model currents validation. METreport no. 2/2021.

Lien VS, Gusdal Y and Vikebø FB (2014) Along-shelf hydrographic anomalies in the Nordic Seas (1960–2011): locally generated or advective signals? Ocean Dyn., 64: 1047-1059.

Müller M, Homleid M, Ivarsson K-I, Køltzow MAØ, Lindskog M, Midtbø KH, Andrae U, Aspelien T, Berggren L, Bjørge D, Dahlgren P, Kristiansen J, Randriamampianina R, Ridal M og Vignes O (2017) AROME-MetCoOp: a Nordic convective-scale operational weather prediction model. Weather Forecasting 32(2):609−627, doi: 10.1175/WAF-D-16-0099.1.

Myksvoll MS, Sandvik AD, Johnsen IA, Skardhamar J & Albretsen J (2020) Impact of variable physical conditions and future increased aquaculture production on lice infestation pressure and its sustainability in Norway, Aquacult. Environ. Interact., 12, 193–204.

Myksvoll MS, Sandvik AD, Albretsen J, Asplin L, Johnsen IA, Karlsen Ø, Kristensen NM, Melsom A, Skardhamar J & Ådlandsvik B (2018) Evaluation of a national operational salmon lice monitoring system—From physics to fish, PLoS ONE, 13, e0201338.

Sandvik AD, Johnsen IA, Myksvoll MS, Sævik PN & Skogen MD (2020) Prediction of the salmon lice infestation pressure in a Norwegian fjord, ICES J. Mar. Sci., doi:10.1093/icesjms/fsz256

Shchepetkin AF, McWilliams JC (2005) The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography- following- coordinate oceanic model. Ocean Model 9(4):347–404, doi: 10.1016/j.ocemod.2004.08.002.

Simonsen M, Lind OC, Sætra Ø, Isachsen PE, Teien H-C, Albretsen J & Salbu B (2019) Coastal transport of river-discharged radionuclides: Impact of speciation and transformation processes in numerical model simulations, Sci. Tot. Envir., 669, 856–871

Skamarock W, Klemp J, Dudhia J, Gill D, Barker D, Duda M, Huang XY, Wang W (2008) A description of the advanced research WRF ver- sion 3, NCAR technical note NCAR/TN-475+STR, p. 113

Skardhamar J, Fagerli MN, Reigstad M, Sandvik AD & Bjørn PA (2019) Sampling planktonic salmon lice in Norwegian fjords, Aquacult. Environ. Interact., 701–715.

Skardhamar J, Albretsen J, Sandvik AD, Lien VS, Myksvoll MS, Johnsen IA, Asplin L, Ådlandsvik B, Halttunen E & Bjørn PA (2018) Modelled salmon lice dispersion and infestation patterns in a sub-arctic fjord, ICES J. Mar. Sci., 75, 1733–1747.

Storesund JE, Sandaa R-A, Thingstad TF, Asplin L, Albretsen J & Erga SR (2017) Linking bacterial community structure to advection and environmental impact along a coast-fjord gradient of the Sognefjord, western Norway, Prog. Oceanogr., 159, 13–30.

Strand KO, Sundby S, Albretsen J & Vikebø FB (2017) The Northeast Greenland Shelf as a Potential Habitat for the Northeast Arctic Cod, Front. Mar. Sci., 4, 304.

van Son TC, Nikolioudakis N, Steen H, Albretsen J, Furevik BR, Elvenes S, Moy F & Norderhaug KM (2020) Achieving Reliable Estimates of the Spatial Distribution of Kelp Biomass, Front. Mar. Sci., 7, 107



HAVFORSKNINGSINSTITUTTET

Postboks 1870 Nordnes
5817 Bergen
E-post: post@hi.no
www.hi.no