



FFI-rapport 2014/00658

Operativ nytte av ensemblevarsling for hav



Petter Østenstad



Operativ nytte av ensemblevarsling for hav

Petter Østenstad

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)

2. juni 2014

FFI-rapport 2014/00658

1215

P: ISBN 978-82-464-2388-3

E: ISBN 978-82-464-2389-0

Emneord

Lyd – forplantning i sjøvann

Havlære – matematiske modeller

Undervannsakustikk

Godkjent av

Atle Ommundsen

Prosjektleder

Elling Tveit

Avdelingsjef

Sammendrag

I krigføring under vann er kunnskap om lydutbredelsen viktig, og en riktig beskrivelse av den vertikale lydastighetsprofilen er essensielt for beregninger av lydutbredelsen. Målte lydastighetsprofiler vil alltid være det beste, men disse vil som oftest være egnet for operativ bruk innenfor en kort tidsperiode og innenfor et svært begrenset geografisk område.

Numeriske havmodeller kan dekke et større geografisk område og beregne lydastigheten framover i tid. Et slikt oseanografisk varsel vil derfor kunne ha stor nytteverdi i planlegging og gjennomføring av ubåt- og antiubåt-operasjoner. Vanligvis har slike havmodeller blitt kjørt én gang med én initialtilstand for hver varslingsperiode, et såkalt deterministisk varsel. Erfaringene med bruk av deterministiske havmodeller er varierende og man opplever ofte sprik mellom målte lydastighetsprofiler og lydastighetsprofiler fra havmodeller. En årsak til denne forskjellen er at man ikke kjenner initialtilstanden i havet godt nok når modellkjøringene starter. Ved å kjøre havmodellene flere ganger med endringer i initialbetingelsene for hver kjøring, såkalte ensemblevarsler, kan man få et mål på variasjonen og usikkerheten i modellresultatet. Områder hvor modellresultatene spriker fra kjøring til kjøring angir hvor i modellområdet usikkerheten er stor. Dette vil indikere usikkerheten til lydastighetsprofilene som igjen bestemmer usikkerheten i lydutbredelsen. Mål på slik usikkerhet er viktig informasjon i planlegging og gjennomføring av ubåt- og antiubåt-operasjoner.

I rapporten er det brukt data fra to ulike årstider (april og august) og vindfeltet er den eneste initialbetingelsen som er perturbert. Tre temaer er belyst:

1. Hvordan presentere variasjon og usikkerhet i oseanografiske varsler for operative brukere?
2. Hvordan påvirker denne variasjonen beregnet sonarrekkevidde? Er det bedre å bruke ensemblevarsler istedenfor deterministiske varsler til å beregne sonarrekkevidde når man sammenligner med målte lydastighetsprofiler?
3. Hva er sammenhengen mellom oseanografisk variasjon og variasjon i beregnet sonarrekkevidde?

Generelt viste studiet at variasjonen var mye større i dataene fra august enn fra april. Under punkt 1 er usikkerhet i de oseanografiske varslene presentert som kart med fargeskala som angir hvor lydastighetsprofilene varierer mye eller lite.

Resultatene fra punkt 2 viste at en del av de målte lydastighetsprofilene har samme form som lydastighetsprofilene fra havmodellen, men at modellen har dårligst gjengivelse av de målte lydastighetsprofilene i de øverste 50-200 meterne av vannvolumet. I datasettet for april var det så lite variasjon i datasettet at det ikke gav noen gevinst i å bruke ensemblevarsel istedenfor deterministisk varsel. For datasettet for august viste resultatene økt gevinst ved bruk av ensemblevarsel. Her var det også relativt bra samsvar mellom sonarrekkevidde beregnet med målt lydastighetsprofil og profiler fra havmodellen.

Under punkt 3 viste resultatene dårlig samsvar mellom områder med stor oseanografisk variasjon og områder med stor variasjon i beregnet sonarrekkevidde. Et tiltak for å bedre resultatene kan være å perturbere flere initial- og randbetingelser. I tillegg vil assimilering av målte data i modellen gjøre at varslene blir riktigere.

English summary

In underwater warfare knowledge about sound propagation is important and a correct description of the vertical sound speed profile is essential for sonar performance prediction. Measured sound speed profiles will always be preferable, but these profiles are generally suitable in a short time frame and a very limited geographical area.

Numerical ocean models can cover larger areas and do sound speed predictions. An oceanographic forecast would be of great value for planning and conducting submarine and anti-submarine operations. Usually numerical ocean models are run once with one initial state for each forecast period, so-called deterministic forecasting. Use of deterministic ocean models show varying results and divergence between measured sound speed profiles and profiles from the ocean models is often experienced. This may be related to lack of information about the initial conditions in the ocean when starting a model run. Running ocean models several times and change the initial conditions for each run, a measure on the models variation and uncertainty is achieved. Areas where the model results diverge between each run highlight areas where the uncertainty in the model is large. This indicates the uncertainty of the sound speed profiles which indicates the uncertainty of the sound propagation. A measure of this uncertainty will be of importance for planning and conducting submarine and ant-submarine operations.

In this report data from two different seasons (April and August) is used and three topics are highlighted. The wind field is the initial condition perturbed in this study.

1. How do we present variation and uncertainty in oceanographic forecasts for the Navy?
2. What are the effects of this oceanographic variation on calculated sonar performance?
What do we gain using ensemble forecasts instead of deterministic forecasts when calculating sonar performance compared with sonar performance calculated with measured sound speed profiles?
3. What is the connection between oceanographic variation and variation in calculated sonar performance?

In point 1 the uncertainty in the oceanographic forecast is presented on a map. The color scale on the map indicates where the variation of the sound speed profiles is high or low.

The results in point 2 showed that measured sound speed profiles and sound speed profiles from the ocean model have more or less the same shape, except for the upper 50 – 200 meters of the water column. The dataset from April showed little variation and no gain using ensemble forecast instead of deterministic forecast was detected. There was also a poor correlation between sonar detection ranges calculated with measured and modelled sound speed profiles. For the dataset from August the results showed increased gain using ensemble forecast. A fairly good correlation between sonar detection ranges calculated with measured and modelled sound speed profiles was found for the August data.

In point 3 the results showed poor correlation between areas with large oceanographic variation and areas with large variation in calculated sonar detection range. To improve the results one approach is to perturb more initial or boundary conditions. Assimilation of measured data into the model will also improve the forecasts.

Innhold

1	Innledning	7
2	Datagrunnlag	8
3	Variasjon og usikkerhet i havvarsler – hvordan skal det presenteres?	9
3.1	Presentasjon av ulike ensembler	9
3.2	Eksempel på operativt produkt	13
4	Sammenligning av sonarrekkevidde beregnet med målt og modellert lyd hastighetsprofil	15
4.1	Metode	15
4.2	Sonarrekkevidde med bruk av målte og modellerte lyd hastighetsprofiler	16
4.2.1	Målte lyd hastighetsprofiler	16
4.2.2	Modellerte lyd hastighetsprofiler	17
4.2.3	Beregnet sonarrekkevidde	20
5	Sammenligning av oseanografisk variasjon og variasjon i sonarrekkevidde.	26
6	Oppsummering og konklusjon	28

1 Innledning

Kunnskap om lydutbredelsen i vann er viktig for krigføring under vann. Essensielt i beregninger av lydutbredelsen er en riktig beskrivelse av den vertikale lydastighetsprofilen. Måling av vertikalprofiler blir av taktiske årsaker gjerne utført med en engangssonde kalt expendable bathythermograph (XBT) eller i noen tilfeller en expendable conductivity temperature depth sensor (XCTD). Lydastigheten blir så beregnet ut fra enten temperaturprofilen alene (XBT) eller mer nøyaktig fra temperatur, saltholdighet og trykk (XCTD). Bruk av engangssonder er dyrt og det vil derfor være økonomisk gunstig å redusere antall målinger. Målte lydastighetsprofiler er alltid det beste, men vil som oftest kun være egnet for operativ bruk i en kort tidsperiode og innenfor et svært begrenset område. En havmodell kan dekke et større geografisk område og beregne lydastighetsprofiler (LHPer) fremover i tid. Bruk av slike modeller har derfor potensielt stor nytteverdi i planlegging og gjennomføring av undervannsoperasjoner hvor lydastigheten påvirker sensorytelsen, hovedsakelig ubåt- og anti-ubåtoperasjoner.

Til nå har slike havmodeller vært deterministiske, det vil si at de kjøres én gang med én initialbetingelse [1]. Erfaringer viser at det tidvis er store forskjeller mellom LHPer fra deterministiske modeller og målte LHPer [2]. En årsak til denne forskjellen er at man ikke kjenner initialtilstanden i havet godt nok når modellkjøringene starter. Dette skyldes primært at man har for få observasjoner i havet.

For å kunne si noe om usikkerheten i modellresultatene har man begynt å kjøre havmodellene flere ganger med litt ulike initialbetingelser for hver kjøring, såkalte ensemblekjøringer. Dermed vil man også få et estimat på usikkerheten til LHPene og dermed beregne usikkerheten til lydutbredelsen. Dette vil være nyttig i planlegging og gjennomføring av undervannsoperasjoner der sonar er den viktigste type sensor.

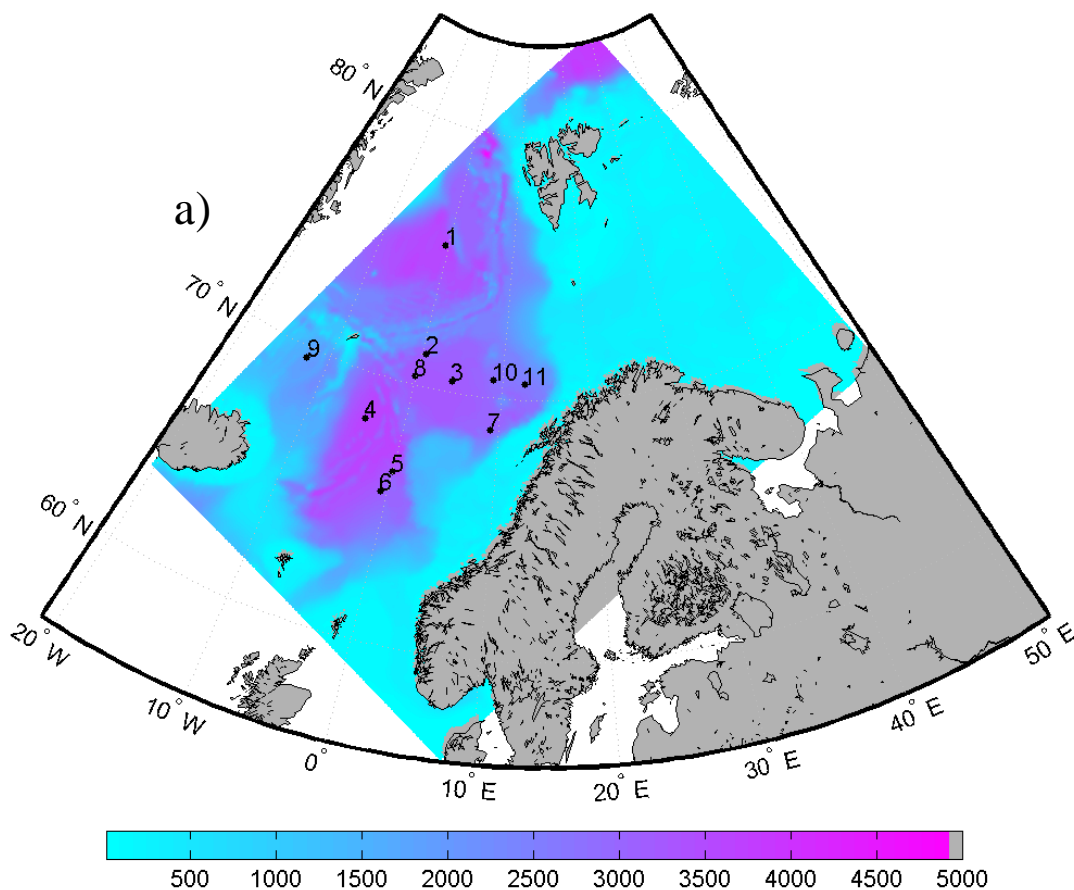
Denne rapporten inneholder tre deler hvor følgende vil bli belyst:

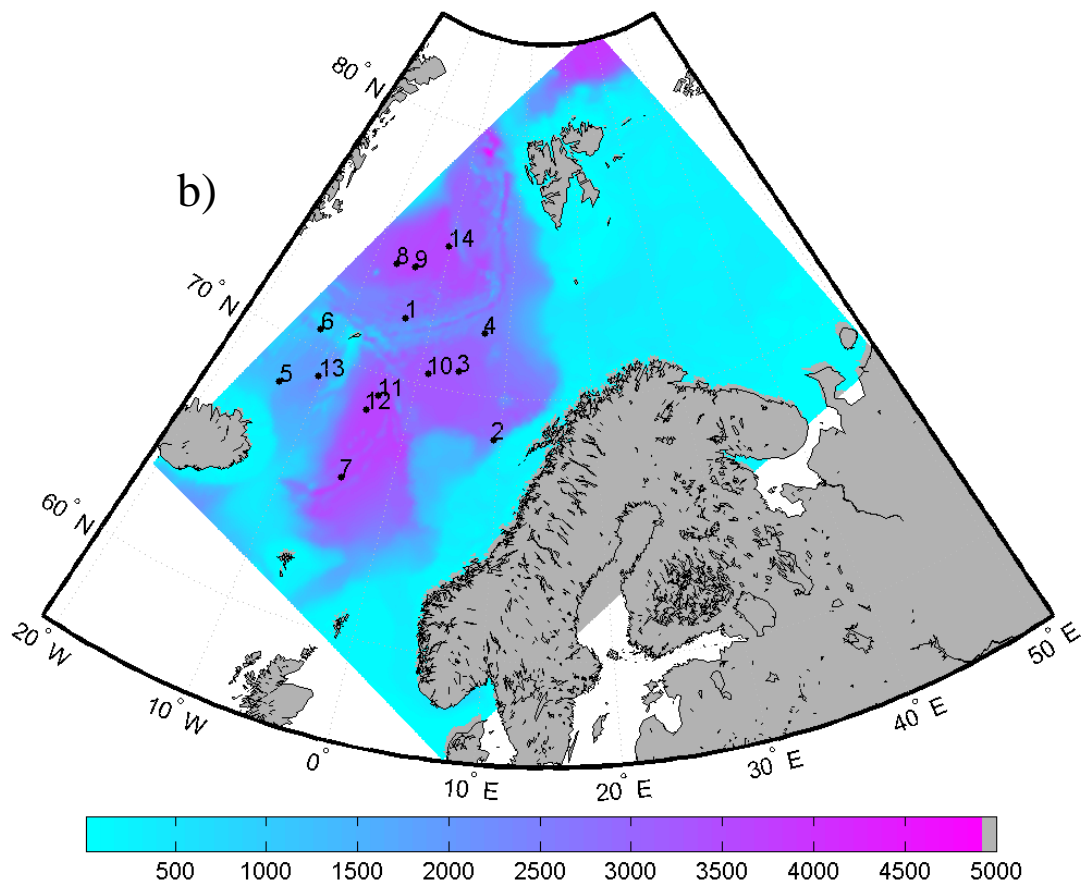
1. Hvordan presentere variasjoner og usikkerheter i oseanografiske varsler på en god måte for operative brukere. Det vil bli vist eksempler på hvordan slik variasjon kan presenteres. Det vil også bli vist eksempler på hvordan andre presenterer ulike ensemblevarsler.
2. Hvor stor er usikkerheten i de beregnede LHPene, og hvordan påvirker dette beregnet sonarrekkevidde? Vil sonarrekkevidde beregnet med en målt LHP ligge innenfor den usikkerhet vi får når vi benytter LHPer fra ensemblekjøringene? Vil det gi en operativ gevinst å benytte ensemblekjøringer kontra deterministiske modeller til planlegging og gjennomføring av sonaroperasjoner?
3. Hva er sammenhengen mellom oseanografisk og akustisk variasjon?

2 Datagrunnlag

I arbeidet er det brukt modellerte LHPer fra to perioder, 4.4 – 9.4.2013 og 25.08 – 30.08.2013. De modellerte LHPene kommer fra havmodellen ROMS (www.myroms.org) og kjøres av Meteorologisk institutt. Modellen er kjørt med 4 km horisontal oppløsning og 35 vertikale lag, og dekker området mellom Skagerak, Novaja Semlja, Svalbard og Island (Figur 2.1 a). Modellen er kjørt med 10 ensembler og en kontrollkjøring. Kontrollkjøringen betraktes som den deterministiske kjøringen. For å lage ensemblevarselet kjøres modellen med et perturbert vindfelt. Modellen har en varslingsperiode på 120 timer og modellkjøringene som er brukt gjelder for tidsrommet fra 4.4.2013 kl. 00:00 til 9.4.2013 kl. 00:00 og 25.8.2013 kl. 00:00 til 30.8.2013 kl. 00:00. Datasettene er valgt med tanke på variasjon mellom årstider. Dataene er midlet for hvert døgn slik at datasettet inneholder fem tidssteg som gjelder for kl. 12:00 hvert av de fem døgnene. Dette er gjort for å redusere størrelsen på datafilene slik at de er lettere å prosessere.

Vi har sammenlignet sonarrekkevidde beregnet med LHPer fra havmodellen med målinger fra ARGO-bøyer[3]. Data fra ARGO-bøyer er fritt tilgjengelige, og måledataene i denne rapporten er hentet fra [4]. Måledataene er tatt innenfor modellkjøringsperiodene og er fra 11 bøyer i april og 14 bøyer i august. Figur 2.1 a) og b) viser lokaliseringen av bøyene.





Figur 2.1 Dybdematrix som er brukt i modellen og plassering av Argo-bøyene i april (a) og august (b). Fargeskalaen er i meter

3 Variasjon og usikkerhet i havvarsler – hvordan kan det presenteres?

En problemstilling i forbindelse med planlegging og gjennomføring av undervannsoperasjoner er hvor mye man kan stole på lydhastighetsmålingen. For hvor stort geografisk område gjelder den og hvor lenge er den gyldig? Er man i et område med mye dynamikk eller i et område hvor forholdene forventes å variere lite i den tidsperioden man er der? Ved å bruke ensemblevarsler kan man få en bedre forståelse for hvor ofte man bør ta nye målinger.

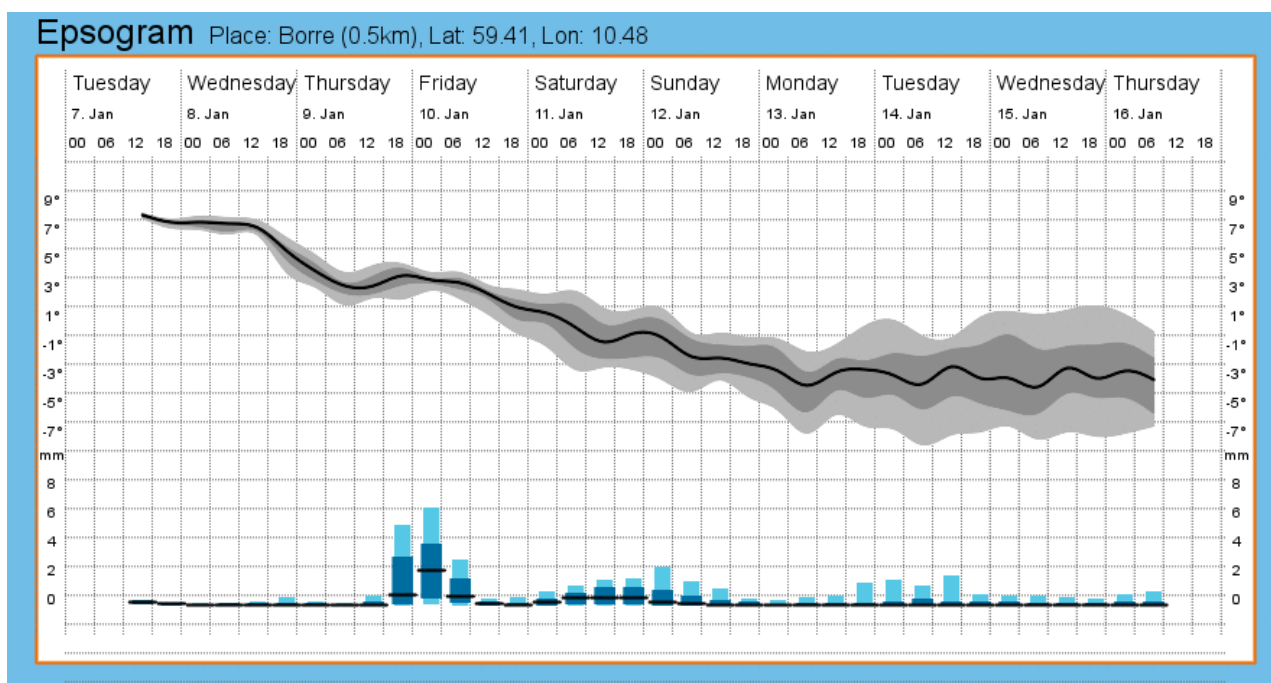
3.1 Presentasjon av ulike ensembler

Varsling ved bruk av deterministiske numeriske modeller startet på 1950-tallet. På grunn av usikkerhet i modellens initialtilstand vil avviket mellom varsel og observasjoner vokse etterhvert som modellen kjøres framover i tid. Utover på 1960-tallet arbeidet man med å innføre usikkerhet i deterministiske modeller. Dette ble kalt ensemble-varsling. På grunn av mangel på datakraft var

slik varsling ikke praktisk mulig i starten [5], men siden første halvdel av 1990-tallet har ensemble modeller vært brukt operasjonelt i værvarsling.

Fra litteraturen virker det som ensemblevarsler ikke er like utbredt for hav som for atmosfære. Noe som brukes mer i havvarsling ser ut til å være super-ensembler [6], [7]. I motsetning til å kjøre én modell flere ganger, kjøres flere modeller én gang for samme område. Tanken bak dette er at de ulike modellene beskriver fysikken på litt ulike måter. Én modell kan for eksempel være god på beregning av strømfeltet, mens en annen er god på å gjengi temperaturgradientene riktig. Resultatene fra slike kjøringar vektet ulikt og settes sammen til det beste varselet. I en slik super-ensemblekjøring oppgir man ikke usikkerheten til varselet.

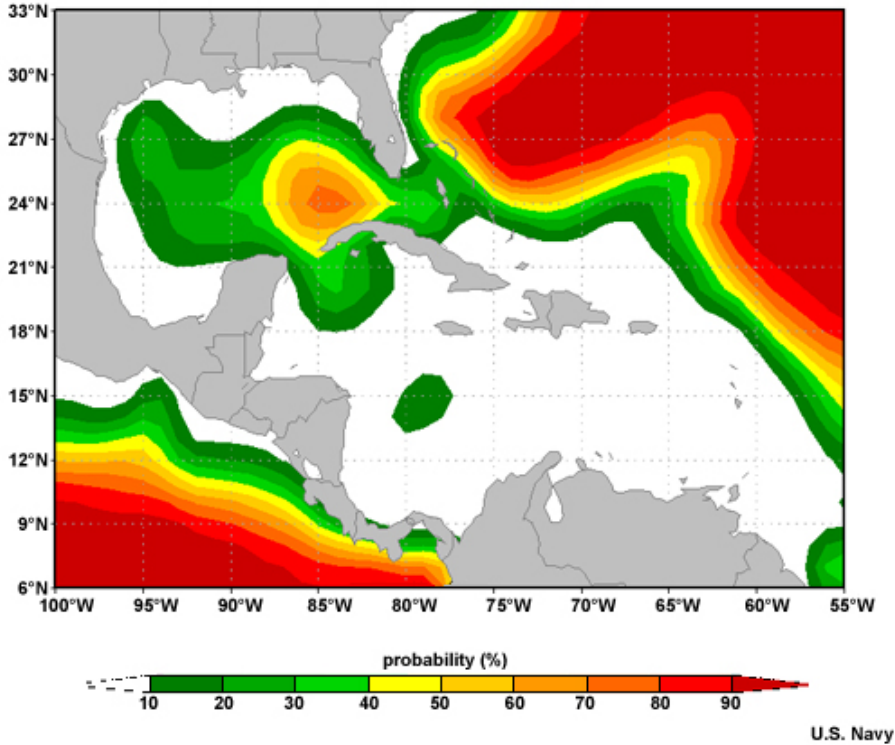
Det finnes ulike måter å presentere ensemblevarsler på. Under blir det vist eksempler på hvordan man kan presentere ensemble-varsler i både vær- og havvarsling. Eksempelene er tatt fra kilder hvor dette presenteres på daglig/ukentlig basis. En vanlig variant er å vise tidsutviklingen for gitte parametere for et geografisk punkt som i Figur 3.1. Dette angir sannsynligheter for flere mulige utviklinger av temperatur (grå) og nedbør (blå). Varselet er usikkert når det er stor spredning i de grå/blå feltene og sikrere når det er liten spredning. Figur 3.2 viser en annen måte å vise ensemble-varsler på; her presenteres sannsynligheten for bølgehøyde over 4 fot. Fargene angir om sannsynligheten er liten (grønn) eller stor (rød) for at bølgene vil være over 4 fot.



Figur 3.1 Sannsynlighetsvarsel for temperatur (svart og grå) og nedbør (mørk og lys blå) i Borre hentet fra geometoc.ffi.no. Varselet er produsert av European Center for Medium range Weather Forecasting (ECMWF). De grå feltene samlet (for temperatur) og blå feltene samlet (for nedbør) viser hvilke mulige værutviklinger som er overveiende sannsynlig (80 prosent). Det er 50 prosent sannsynlighet for at

temperaturen/nedbøren havner i den mørkeste delen og 30 prosent sannsynlig at temperaturen/nedbøren havner i den lyse delen utenfor det mørke.

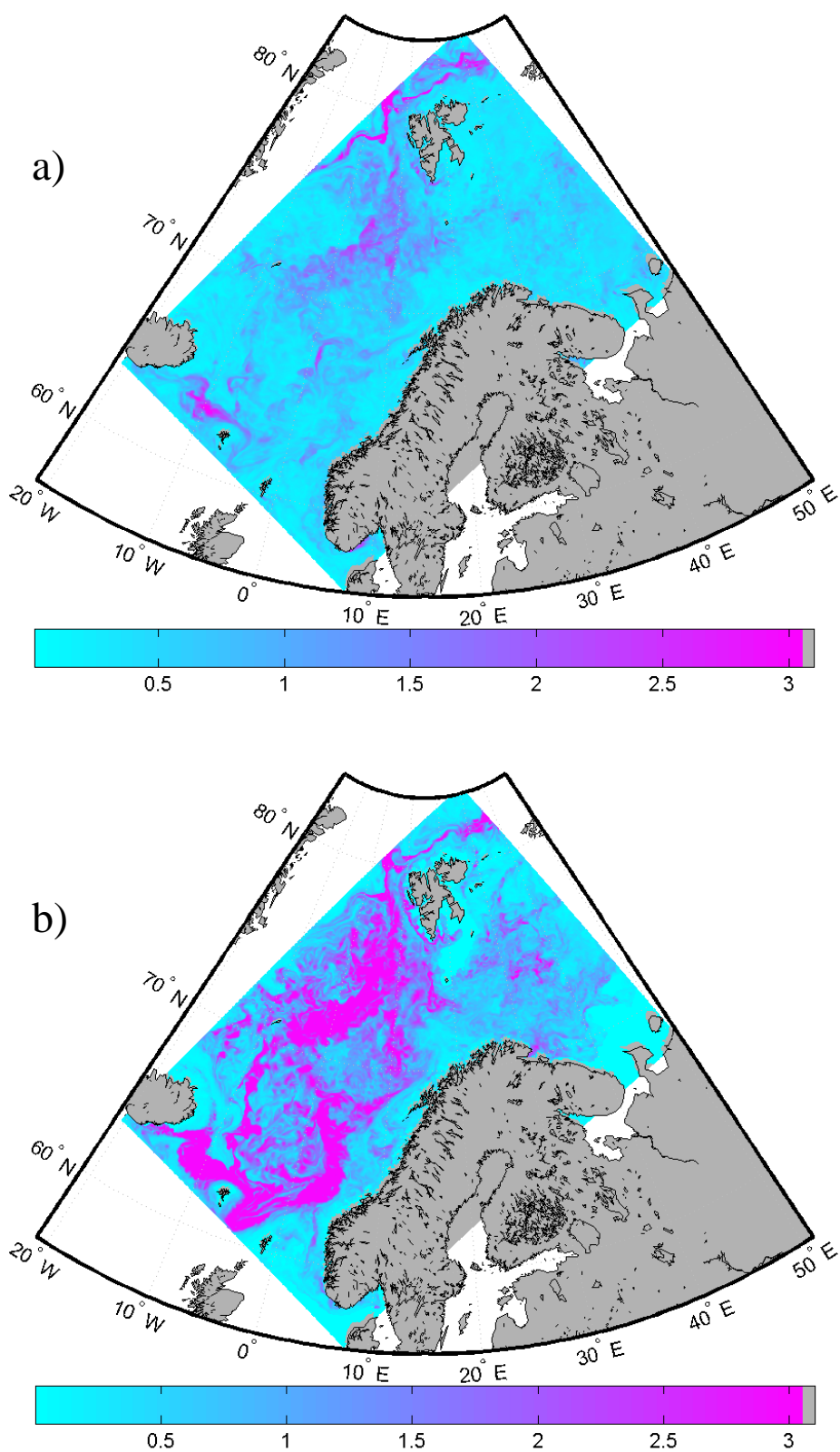
FNMOC EFS: Probability of Significant Wave Heights > 4 ft.
Run: 12 UTC 19 October 2012
Valid Time: 06 UTC 23 October 2012



Figur 3.2 Sannsynlighet for bølgehøyde over 4 fot i havområdene rundt Mellom-Amerika.
Hentet fra http://www.meted.ucar.edu/nwp/NAEFS-NUOPC/media_gallery.php

Figur 3.3 viser standardavviket til lydshastigheten i 5 og 100 meters dyp. Figuren viser at usikkerheten til ensemblevarselet er større i 100 enn i 5 meters dyp i store deler av modellområdet. Skagerrak skiller seg litt ut, der er det større variasjon i 5 meter enn i 100 meter.

For å få en indikasjon på hvor modellen har størst usikkerhet må man presentere variasjonen i hvert dyp, noe som vil være uoversiktlig hvis modellen har mange vertikale lag (i dette tilfellet er det 35 lag). Varslingsmodeller for både atmosfære og hav er tre-dimensjonale (4D hvis man tar med tidsvariabelen), men det er lite brukervennlig å presentere data i alle dimensjonene i en figur. Det mest intuitive er å presentere variasjon i to dimensjoner, enten som i et kart (Figur 3.2), vertikalsnitt (x-z), eller i én dimensjon; variasjon i et punkt som funksjon av dypet (Figur 4.1), eventuelt som funksjon av høyden i en atmosfæremodell. En mer komprimert og hensiktsmessig måte å presentere variasjonen på vil være å integrere variasjonen over alle dybdelagene. Dette blir vist i kapittel 3.2.



Figur 3.3 Standardavvik til lydshastigheten for 10 ensembler i a) 5 meter og b) 100 meters dyp ved tidssteg 1 i augustdatasettet

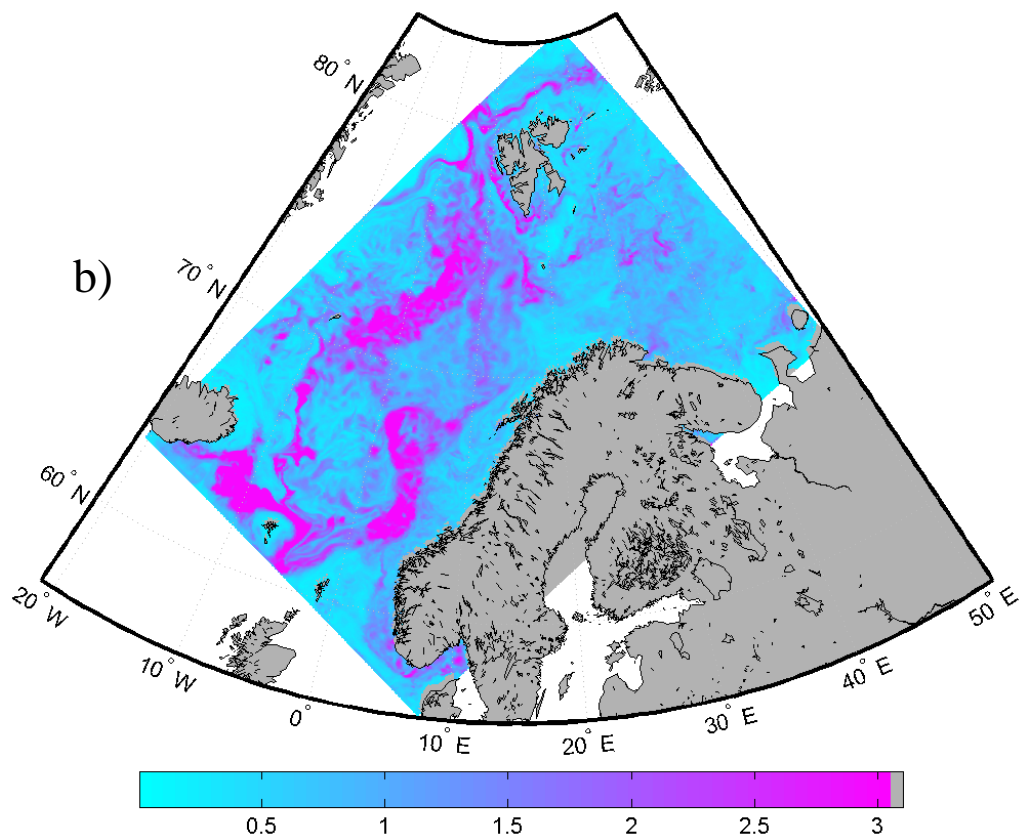
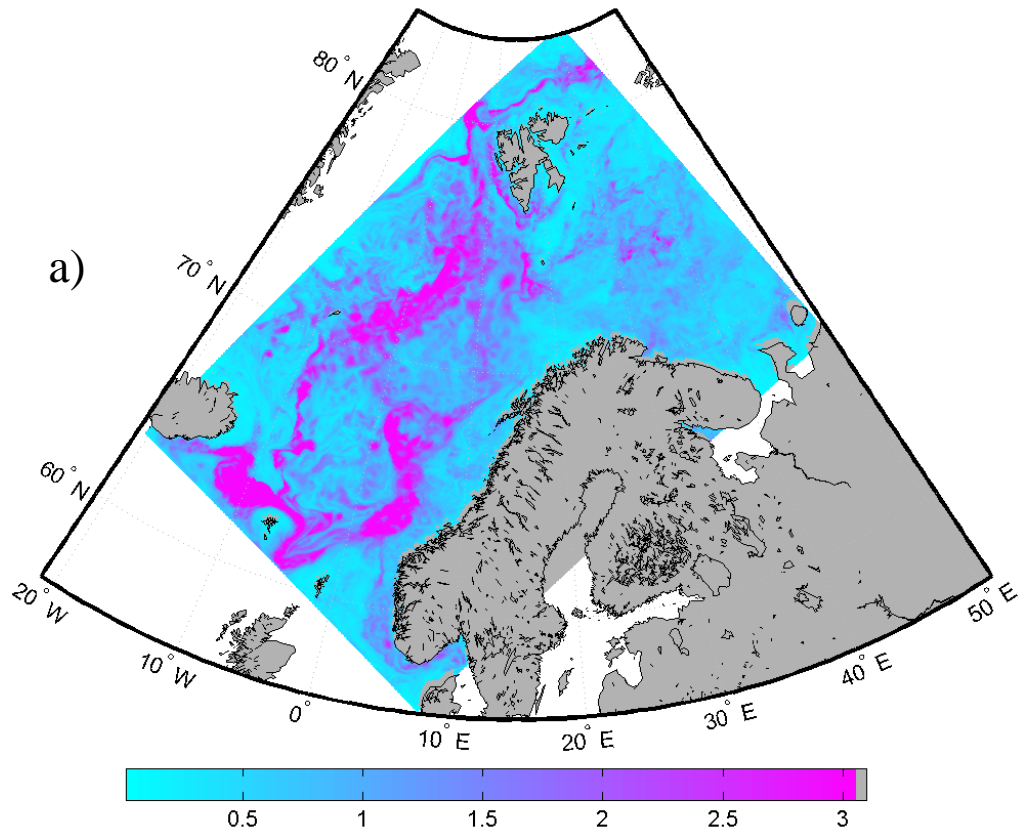
3.2 Eksempel på et operativt produkt

For å slå sammen standardavviket for hvert dyp er variansen i lydshastighet til de ti ensemblene for hvert dyp midlet over antall dyp. Deretter er det tatt kvadratroten til dette middelet. Resultatet er presentert i Figur 3.4 a) og b) for henholdsvis tidssteg 1 og tidssteg 5. Sammenligner man Figur 3.4 a) og Figur 3.3 a) ser man at usikkerheten er større når man midler over alle dyp enn den er i 5 meters dyp. I 100 meters dyp er det motsatt (Figur 3.3 b). Der er usikkerheten større enn når man midler over alle dyp (Figur 3.4 a). Man ser også at man i Figur 3.4 får fram markert usikkerhet i Skagerrak og langs vestkysten av Sør-Norge enn om man ser isolert på usikkerheten i både 5 og 100 meter (Figur 3.3).

Ser man på utviklingen i tid fra tidssteg 1 (Figur 3.4 a) til tidssteg 5 (Figur 3.4 b), så ser man spesielt i Skagerrak og langs vestkysten av Sør-Norge at usikkerheten øker når man kommer lengre ut i varselet, noe som er forventet.

Figur 3.4 viser variansen til de ti ensemblene for hvert dyp midlet over antall dyp (og deretter tatt kvadratroten av dette middelet). Siden modellen bruker sigma-koordinater (det vil si like mange dybdesteg uansett hvor dypt det er) vil man i dype områder kunne få en lavere varians enn i grunne områder. Dette gjelder hvis man antar at det meste av dynamikken skjer i de øvre delene av vannvolumet. Et eksempel: Anta at det meste av dynamikken skjer i de øverste 400 meterne av vannvolumet. I grunne områder vil dermed et stort antall av sigmalagene dekke dypene med mye dynamikk. I dype områder vil et færre antall sigma-lag dekke dypene med mye dynamikk. Midler man over alle dyp vil de grunne områdene få høyere dybdeintegrert varians enn de dypere områdene. Det er gjort forsøk med bare å bruke data ned til 400 meters dyp. Dette ga noen endringer i de dype områdene i forhold til i Figur 3.4 men ikke av stor betydning.

Et kart som vist Figur 3.4 vil være til stor hjelp i planlegging og gjennomføring av ubåt- og anti-ubåt operasjoner. I de blå områdene vil man kunne stole mer på en lydshastighetsmåling, det vil si at man kan måle sjeldnere, både i tid og rom, enn det man må gjøre i de rosa områdene, hvor modellen indikerer at det er mye mer variasjon.



Figur 3.4 Kvadratrot av dybdemidlet varians til lydshastigheten for tidsteg 1 (a) og tidssteg 5 (b) i augustdatasettet.

4 Sammenligning av sonarrekkevidde beregnet med målt og modellert lyd hastighetsprofil

4.1 Metode

Metoden består i å sammenligne modellert sonarrekkevidde beregnet med en målt lyd hastighetsprofil (LHP) fra Argo-bøyer og lyd hastighetsprofiler hentet fra havmodellen beskrevet i kapittel 2. LHPene fra havmodellen er tatt i en boks rundt posisjonen til den målte LHPen. Størrelsen på boksen er 12x12 kilometer og inneholder 36 profiler fra hvert ensemble. Motivasjonen for å ta med modell-LHPer i en boks rundt den målte LHPen, og ikke bare modell-LHPen fra det nærmeste punktet, er at havmodeller ikke er nøyaktige i plasseringen av fenomener som fronter og virvler. Ved å ta ut LHPer i en boks har man litt større mulighet for å fange opp slike fenomener. I tillegg stiger Argo-bøyene med bare rundt 10 cm/s. Bøyene vil dermed drifte mens de stiger til havoverflaten slik at profilene de måler ikke blir vertikale [3]. De modellerte LHPene er hentet fra det tidssteget som ligger nærmest det tidspunktet hvor den målte LHPen er tatt. Noen målinger er tatt tidlig i varslingsperioden, mens andre er tatt mot slutten.

Spredningen mellom ensemblene vil øke utover i varslingsperioden og dermed også spredningen i beregnet sonarrekkevidde med modellerte LHPer. En konsekvens av det kan være at det er større sannsynlighet for at beregnet sonarrekkevidde med målt LHP vil ligge innenfor usikkerheten til sonarrekkevidde beregnet med modellerte LHPer mot slutten av varslingsperioden enn i starten. Sonarrekkevidde er her definert som avstanden fra sonaren hvor signaloverskuddet blir null. Strålebanemodellen Lybin ([8], [9]) er brukt til å beregne signaloverskuddet. Lybin er kjørt for 10x36 LHPer fra modellen og én målt LHP. Dette er gjort for til sammen 11 posisjoner i april og 14 i august (Figur 2.1). Det er også beregnet sonarrekkevidde for kontrollkjøringen for å se om det er en gevinst ved å bruke ensembler.

Det er beregnet sonarrekkevidde for tre ulike sonardyp (50, 100 og 200 m) og to ulike vindpådrag (5 og 10 m/s), det vil si seks forskjellige konfigurasjoner. Andre Lybinparametre er oppgitt i Tabell 4.1 under. I sammenligningen av sonarrekkevidde mellom modellerte og målte LHPer er det valgt å se på midlere sonarrekkevidde i måldypintervallene 0-50 meter og 100 – 200 meter istedenfor sonarrekkevidde i et enkelt dyp.

Lybinparameter	Verdi
Kildnivå	220 dB
Frekvens	7000 Hz
Tilt	0°
Strålebredde sender	60°
Strålebredde mottaker	120°
Pulslengde	4000 ms
Sidelobe	15°
Båndbredde	1000 Hz
Deteksjonsterskel	13 dB
Direktivvitetsindeks	20 dB
Bunntype	4

Tabell 4.1 Parametre som er brukt i Lybin [9]

4.2 Sonarrekkevidde beregnet med målte og modellerte lyd hastighetsprofiler

Et utvalg av modellerte LHPer med tilhørende målt LHP vil bli vist under. Motivasjonen for å studere og sammenligne målt og modellerte LHPer er for å se på variasjonen i de modellerte LHPene og drøfte hva som er typiske trekk ved de målte og de modellerte LHPene. Ulikheter mellom målt og modellert LHP kan gi store utslag i beregnet sonarrekkevidde.

4.2.1 Målte lyd hastighetsprofiler

4.2.1.1 April

På stasjon 2 (Figur 4.1) ser vi at målt LHP (rød kurve) har økende lyd hastighet (positiv gradient) fra overflaten og ned til ca. 400 meters dyp med en lyd kanal med akse lokalisert i rundt 800 meters dyp. Ved stasjon 5 (Figur 4.2) ser vi at den målte profilen (rød kurve) har negativ gradient fra overflaten og ned til ca. 500 meters dyp for deretter å være positiv videre nedover mot havbunnen. Den målte LHPen på stasjon 8 (Figur 4.3) viser økende lyd hastighet fra overflaten og ned til ca. 800 meter. LHPen har også en lyd kanal med akse ved 1100 meters dyp. Ved stasjon 5 (Figur 4.2) har man ingen positiv gradient fra overflaten og nedover slik man har ved både stasjon 2 (Figur 4.1) og stasjon 8 (Figur 4.3). Aksene til lyd kanalen ligger også i ulike dyp for de tre figurene som er presentert. Stasjon 2 (Figur 4.1) og 8 (Figur 4.3) ligger nær hverandre (Figur 2.1), men observasjonene er tatt med 60 timers mellomrom, noe som kan forklare forskjellen mellom dem.

4.2.1.2 August

Stasjon 1 i august (Figur 4.4) viser en lyd kanal med akse på 80 meters dyp. På stasjon 10 (Figur 4.5) viser den målte LHPen to lyd kanaler, én med akse ved ca. 250 meter og én ved ca. 950 meters dyp. I motsetning til LHPene fra april har LHPene i august negative gradienter i de øverste

50-100 meterne av vannvolumet. Dette skyldes at vannet i og nær overflaten er varmet opp gjennom sommeren. I april er ikke oppvarmingen startet og man har kaldere vann i og nær overflaten og dermed positive gradienter. I Figur 4.2 strekker ikke den positive gradienten seg lenger ned enn til 30 meter, noe som kan skyldes oppblanding av varmere vann fra dypere lag under.

4.2.2 Modellerte lyd hastighetsprofiler

4.2.2.1 April

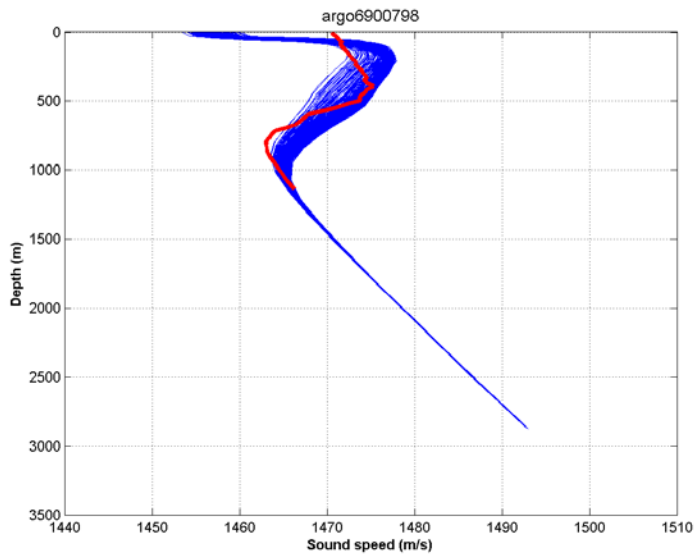
De modellerte LHPene på stasjon 2 (Figur 4.1) viser en kraftig positiv lyd hastighetsgradient fra overflaten og ned til rundt 100 meter etterfulgt av negativ gradient ned til 1000 meters dyp hvor man finner aksene til lydkanalen. På stasjon 5 (Figur 4.2) har de modellerte LHPene en kraftig økning i lyd hastigheten i de øverste 50 meterne og en lyd kanal med akse ved rundt 500 meters dyp. De modellerte LHPene på stasjon 8 (Figur 4.3) har også en kraftig positiv gradient i de øvre delene av vannvolumet, ned til ca. 100 meters dyp. LHPene viser også en lyd kanal med akse ved ca. 1100 meters dyp. LHPene på stasjon 2 (Figur 4.1) og 8 (Figur 4.3) har større spredning fra overflaten og ned til lydkanalens akse enn det stasjon 5 (Figur 4.2) viser. Dette kan skyldes at sistnevnte ligger i et område med lite oseanografisk variasjon.

Et tydelig trekk ved de modellerte LHPene på hver stasjon er at de har samme form. Både sjikt og gradienter forandrer seg lite mellom de ulike ensemblene. Dette gir en forventning om moderat variasjon i sonarrekkevidde beregnet med modellerte LHPer.

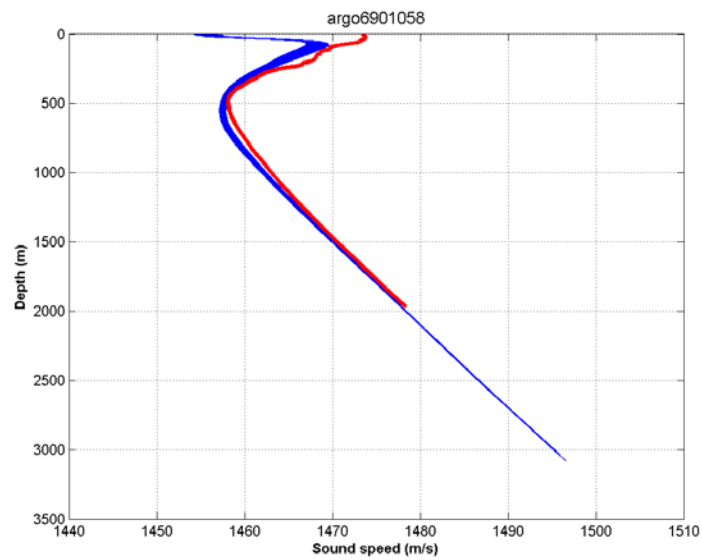
4.2.2.2 August

De modellerte LHPene ved stasjon 1 (Figur 4.4) har stor spredning, særlig i de øverste 400 meterne. Aksene til lydkanalene ligger på mellom 50 og 400 meters dyp. Fra rundt 500 meters dyp og nedover er det lite variasjon mellom LHPene. Ved stasjon 10 (Figur 4.5) er variasjonen mindre enn ved stasjon 1. De aller fleste LHPene har to lydkanaler med akser ved rundt 150 meter og 1000 meter, mens noen av LHPene mangler lydkanalen ved 150 meter.

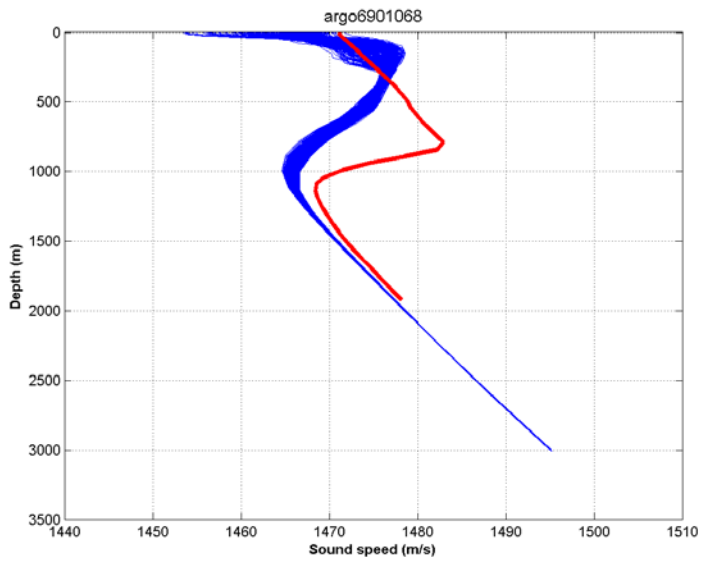
Spredningen til LHPene er større i august enn i april noe som impliserer større variasjon i beregnet sonarrekkevidde for august enn april. Tidligere analyser har vist at spredningen er større i august enn i april [10]. Imidlertid kan det faktum at modellen ikke ble kjørt lenge nok (modellen ble re-startet 3. mars) også forklare noe av forskjellen. Når en havmodell startes må den kjøres en viss tid for å nå likevekt. Når likevekt er oppnådd, antar man at resultatene er fysiske.



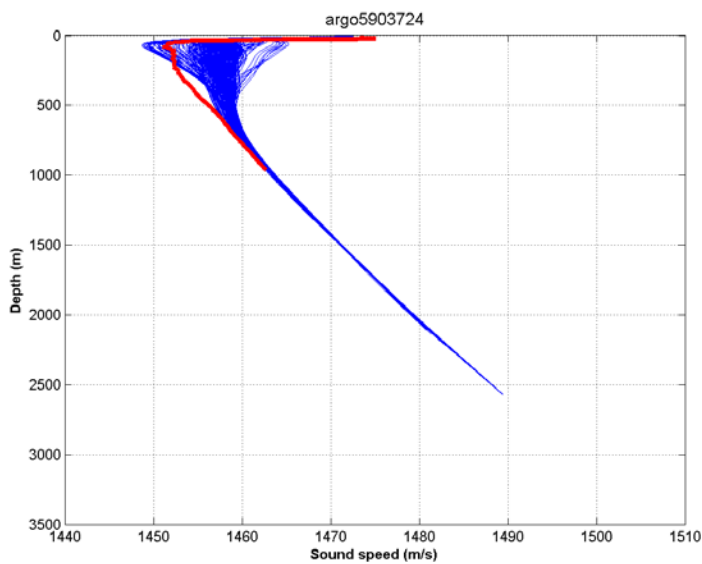
Figur 4.1 Lydhastighet for målt profil (rød) og modellerte profiler (blå) for stasjon 2 april



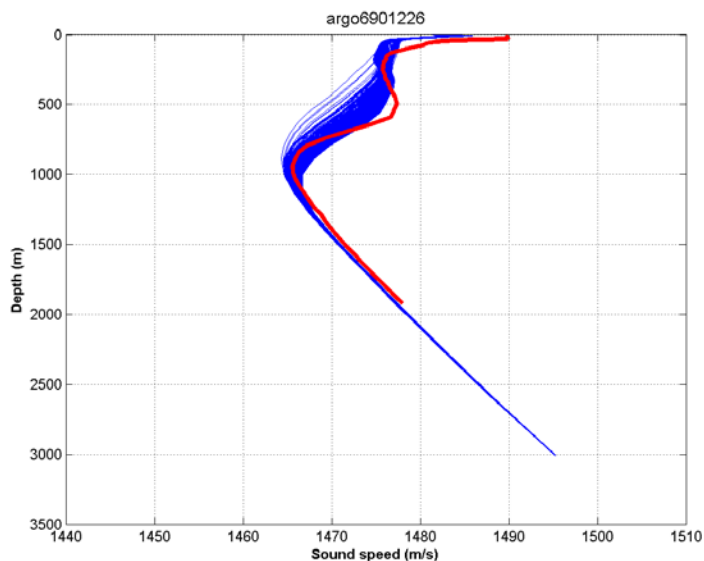
Figur 4.2 Lydhastighet for målt profil (rød) og modellerte profiler (blå) for stasjon 5 april



Figur 4.3 Lydhastighet for målt profil (rød) og modellerte profiler (blå) for stasjon 8 april



Figur 4.4 Lydhastighet for målt profil (rød) og modellerte profiler (blå) for stasjon 1 august



Figur 4.5 Lydhastighet for målt profil (rød) og modellerte profiler (blå) for stasjon 10 august

4.2.3 Beregnet sonarrekkevidde

Som nevnt i kapittel 4.1 er sonarrekkevidde beregnet for kombinasjoner av tre sonardyp og to vindhastigheter. Variasjonen i sonardyp har størst effekt for sonarrekkevidden og effekten av varierende sonardyp er større i dybdeintervallet 100-200 meter enn i 0-50 meter. Variasjonen i vindhastighet har liten innvirkning på resultatene. Derfor vises her bare beregnet sonarrekkevidde ved vindhastighet på 10 m/s. I kapitlene under er det oppgitt standardavvik til sonarrekkevidde beregnet med LHPer fra ensemblekjøringene og kontrollkjøringen. Som nevnt i kapittel 4.1 er LHPene fra modellen er tatt i en boks, som inneholder 36 LHPer, rundt den målte LHPen. Dette gjelder også for kontrollkjøringen. Standardavviket i beregnet sonarrekkevidde for ensemblekjøringene er gjort med 36x10 LHPer, mens det for kontrollkjøringen er gjort med 36 LHPer.

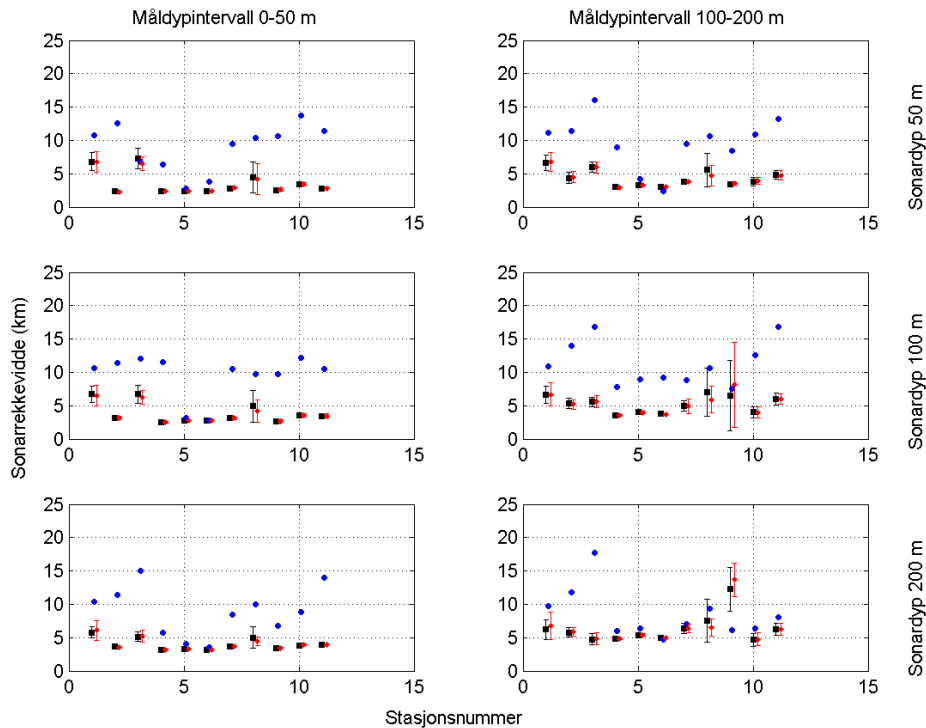
4.2.3.1 April

Sammenligner man de målte LHPene med de tilhørende modellerte LHPene i Figur 4.1 -Figur 4.3 er det noen trekk som tydelig skiller modellert og målt LHP fra hverandre. Det første er at alle de modellerte LHPene har en kraftig positiv gradient i de øverste 50 til 100 meterne. I de målte LHPene er slike gradienter fraværende (Figur 4.2), eller de er svakere og strekker seg over et større dybdeintervall (Figur 4.1 og Figur 4.3). I Figur 4.2 sammenfaller den målte og de modellerte LHPene godt fra ca. 50 meter og helt ned til havbunnen. I Figur 4.1-Figur 4.3 er det først fra 500 – 1000 meter og ned til havbunnen at de målte og modellerte LHPene har samme form. Siden beregningene for sonarrekkevidde er gjort med sonaren plassert i dypene 50, 100 og 200 meter bør man forvente avvik mellom beregnet sonarrekkevidde med målt og modellert LHP. Figur 4.6 viser midlet sonarrekkevidde for alle 11 stasjonene i april. Generelt ser man at standardavviket til sonarrekkevidden er lite for de fleste stasjonene. Dette gjelder for alle kombinasjoner av sonardyp og måldypsintervall og for både ensemblene og kontrollkjøringen. Forskjellen i standardavvik mellom ensembler og kontrollkjøring er også liten, noe som viser at

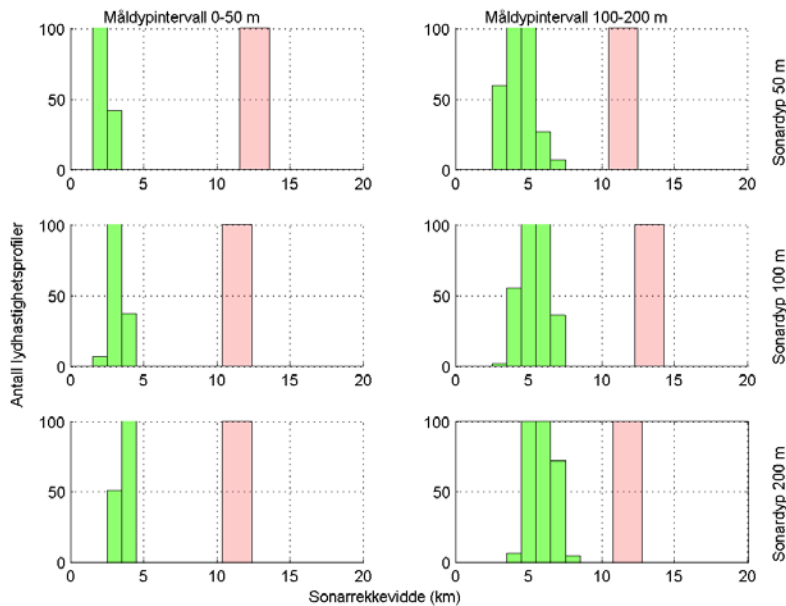
det ikke er noen gevinst i å bruke ensemble-varsler i dette tilfellet. Forskjellen i sonarrekkevidde beregnet med modell og måling er stor for de fleste tilfellene, fra 5-12 km. Unntakene er ved kombinasjonen av et sonardyp på 200 meter og måldypsintervall 100-200 meter. Ved denne kombinasjonen ligger beregnet sonarrekkevidde med målt og modellerte LHPer nær hverandre for stasjonene 1, 4, 5, 6, 7, 8, 10 og 11. I tillegg ligger sonarrekkevidde beregnet med måling og modell nær hverandre for stasjon 5 og 6, bortsett fra ved kombinasjonen sonardyp på 100 meter og måldypsintervall 100-200 meter.

Flere detaljer kommer frem i Figur 4.7 - Figur 4.9. Sonarrekkeviddene her er beregnet med LHPene som er presentert i Figur 4.1 - Figur 4.3. Figur 4.7 viser beregnet sonarrekkevidde for stasjon 2 og viser at de fleste modellerte LHPene gir en sonarrekkevidde på 3-7 km. Spredningen i sonarrekkevidde for modellerte LHPer er større i dybdeintervallet 100-200 meter enn i 0-50 meter. Rekkevidden øker også noe med økende sonardyp. Ser man på den målte profilen gir den en beregnet sonarrekkevidde på 11-13 km. Avviket i beregnet sonarrekkevidde mellom målt og modellerte LHPer er noe større i dybdeintervallet 0-50 meter enn i 100-200 meter. Uansett så er forskjellen i sonarrekkevidde stor for alle tilfellene ved stasjon 2. Dette kan forklares med den kraftige positive gradienten i de øverste 100 meterne etterfulgt av negativ gradient ned til 400 meter i de modellerte LHPene. I samme dybdeintervall har den målte LHPen positiv gradient. På stasjon 5 (Figur 4.8) ser man at beregnet sonarrekkevidde for målt og modellerte LHPer er tilnærmet like, bortsett fra for et sonardyp på 100 meter. Selv om målt LHP (Figur 4.2) ikke har den kraftige positive gradienten fra 0 – 50 meter sammenlignet med de modellerte LHPene, ser det ut til at gradienten ikke påvirker sonarrekkevidden siden øverste sonardyp er akkurat under den kraftige gradienten man ser i de modellerte LHPene. Forskjellen i sonarrekkevidde for målt og modellerte LHPer for et sonardyp på 100 meter skyldes et lokalt lydastighetsminimum i den målte LHPen som fanger energien akkurat ved dette sonardypet. Ellers har den målte og de modellerte LHPene i hovedtrekk lik form i resten av vannsøylen. Dette forklarer hvorfor sonarrekkeviddene samsvarer bra.

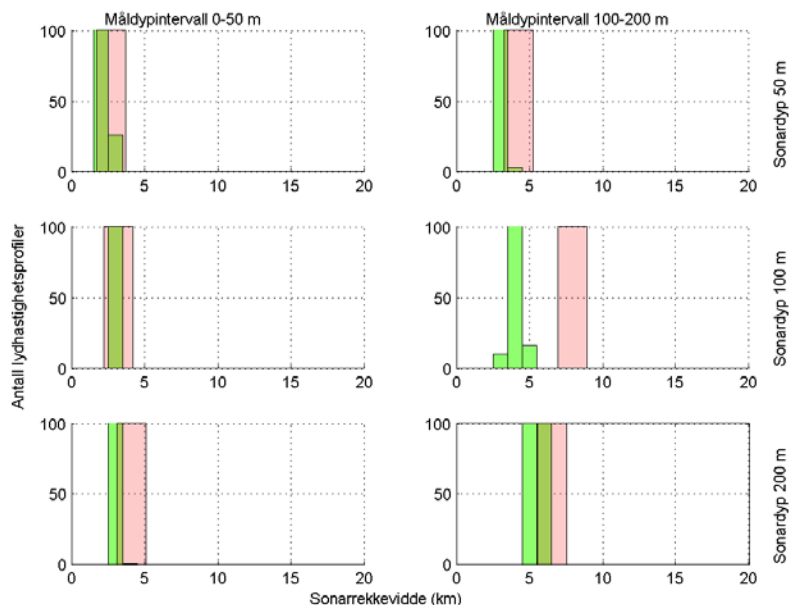
På stasjon 8 (Figur 4.9) ligger sonarrekkevidden beregnet med målt LHP på mellom 9 og 11 km for de seks tilfellene. For sonarrekkevidde beregnet med modellerte LHPer er spredningen stor. Dette skyldes stor variasjon i de modellerte LHPene i de øverste 300 meterne av vannsøylen. Selv om hovedtyngden av de modellerte LHPene gir sonarrekkevidder på 3 – 7 km, gir også en del av de modellerte LHPene rekkevidder som samsvarer med sonarrekkevidden beregnet med målt LHP. Grunnen til dette er at en del av de modellerte LHPene og den målte LHPen har fellestrekk i de øverste 300 meterne (Figur 4.3).



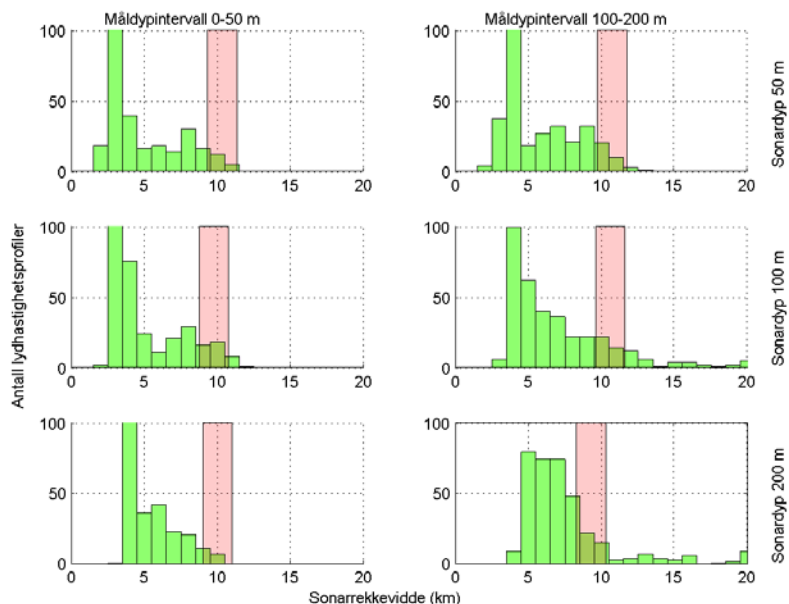
Figur 4.6 Midlet sonarrekkevidde med standardavvik for alle ensemblene (svart) ved de 11 stasjonene i april. De blå punktene er sonarrekkevidde beregnet med målt LHP. Røde punkter er midlet sonarrekkevidde med standardavvik for kontrollkjøringen.



Figur 4.7 Midlere sonarrekkevidde for målt (rød søyle) og modellerte lydshastighetsprofiler (grønne søyler) for stasjon 2 i april. Den røde søylen har bredde på +/- 1 km rundt beregnet sonarrekkevidde for målt lydshastighetsprofil. Sonarrekkeviddene er beregnet for sonardyp 50 m (øverst), 100 m (midten) og 200 m (nederst) og midlet i dybdeintervallene 0-50 m (venstre) og 100-200 m (høyre). Vindhastighet er 10 m/s.



Figur 4.8 Midlere sonarrekkevidde for målt (rød søyle) og modellerte lydshastighetsprofiler (grønne søyler) for stasjon 5 i april. Den røde søylen har bredde på +/- 1 km rundt beregnet sonarrekkevidde for målt lydshastighetsprofil. Sonarrekkeviddene er beregnet for sonardyp 50 m (øverst), 100 m (midten) og 200 m (nederst) og midlet i dybdeintervallene 0-50 m (venstre) og 100-200 m (høyre). Vindhastighet er 10 m/s.



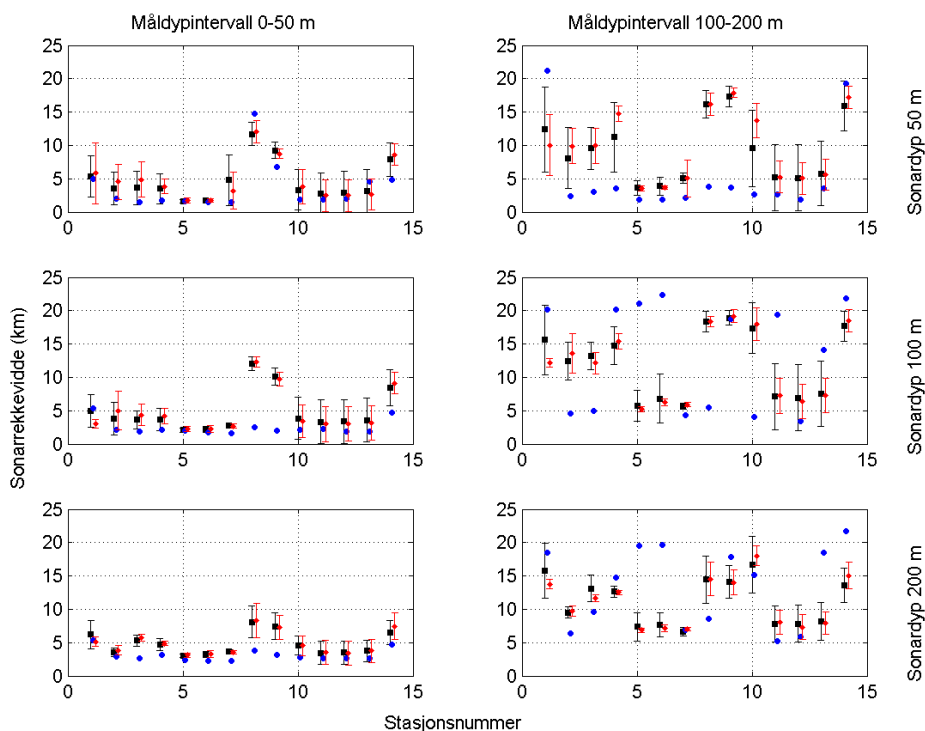
Figur 4.9 Midlere sonarrekkevidde for målt (rød søyle) og modellerte lydshastighetsprofiler (grønne søyler) for stasjon 8 i april. Den røde søylen har bredde på +/- 1 km rundt beregnet sonarrekkevidde for målt lydshastighetsprofil. Sonarrekkeviddene er beregnet for sonardyp 50 m (øverst), 100 m (midten) og 200 m (nederst) og midlet i dybdeintervallene 0-50 m (venstre) og 100-200 m (høyre). Vindhastighet er 10 m/s.

4.2.3.2 August

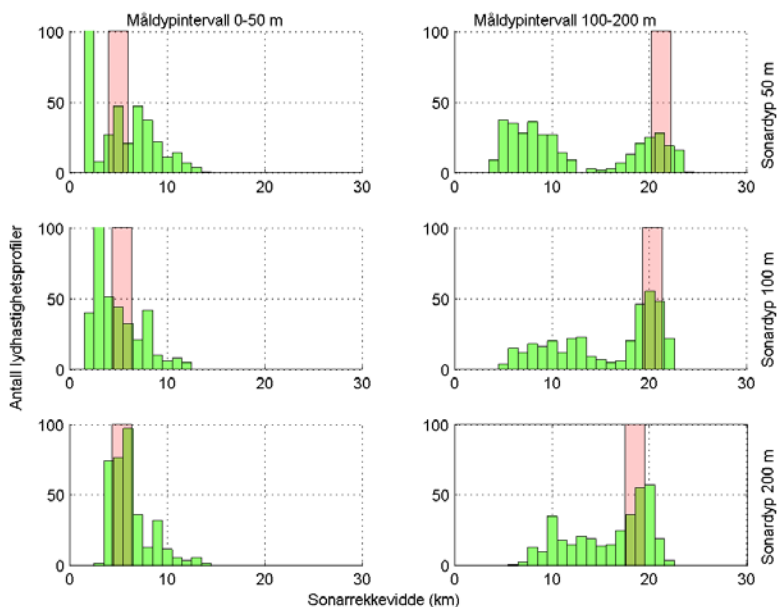
Figur 4.4 og Figur 4.5 viser at spredningen til de modellerte profilene er større i august enn i april (Figur 4.1 - Figur 4.3). Samtidig samsvarer de målte LHPene bedre med de modellerte LHPene i august enn i april. Dette ser vi igjen i Figur 4.10. Sonarrekkevidde beregnet med målt LHP ligger innenfor standardavviket til sonarrekkevidde beregnet med modellerte LHPer for 47 av 84 tilfeller. I dette tallet er det også tatt med tilfeller hvor sonarrekkevidde beregnet med målt LHP ligger like utenfor standardavviket til sonarekkevidden beregnet med modellerte LHPer, eks. stasjon 5 og 6 i øverste høyre panel i Figur 4.10. Særlig i måldypsintervallet 0-50 meter er samsvaret bra mellom sonarekkevidde beregnet med hhv. målt og modellert LHP. Av de 47 tilfellene beskrevet over er det en gevinst av å bruke ensemblevarsler for 14 tilfeller. Det vil si at sonarrekkevidde beregnet med målt profil ligger innenfor standardavviket til sonarrekkevidder beregnet med LHPer fra ensemblemodellen (svart), men ikke innenfor standardavviket til sonarrekkevidde beregnet med LHPer fra kontrollkjøringen (rød). Ut i fra analysen over gir det en gevinst i å bruke ensemble-varsler kontra deterministiske varsler i dette tilfellet.

Flere detaljer kommer fram i Figur 4.11 og Figur 4.12 som viser sonarrekkevidde beregnet med målt og modellerte LHPer vist i Figur 4.4 og Figur 4.5. Ved stasjon 1 (Figur 4.11) ser vi at sonarrekkevidde med målt LHP (rød søyle) faller innenfor sonarrekkevidde beregnet med modellerte LHPer (grønne søyler). En ser også at den røde søylen ligger på eller nær den sonarekkevidden som forekommer oftest av de som er beregnet med modellerte LHPer. For måldypintervallet 100-200 meter (høyre kolonne i Figur 4.11) er spredningen størst og man kan se (spesielt for et sonardyp på 50 meter) at sonarekkevidden beregnet med målte LHPer deler seg i to grupper, en rundt 5-8 km og en rundt 20 km. Dette skyldes i stor grad spredningen vi ser i de modellerte LHPene mellom 100 og 200 meter (Figur 4.4) og at det i dette dypet er stor forskjell på gradientene som man ikke finner i intervallet 0-50 meter.

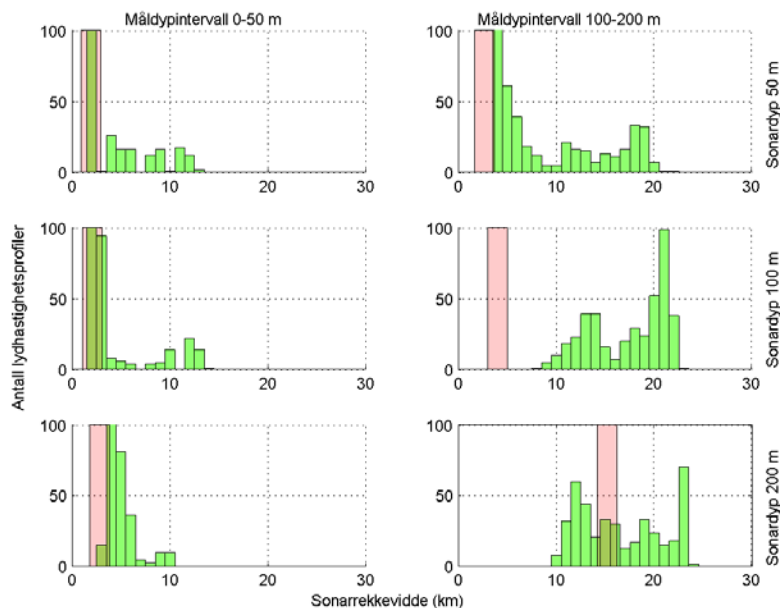
Ved stasjon 10 (Figur 4.12) er også spredningen i sonarekkevidde størst i måldypsintervallet 100-200 meter. Spredningen mellom de modellerte LHPene (Figur 4.5) er ikke like stor som ved stasjon 1 (Figur 4.4). De modellerte LHPene (Figur 4.5) er både svakt positive og svakt negative i dette dybdeintervallet og det er dette som gir den store spredningen i beregnet sonarekkevidde i dette tilfellet. Den målte LHPen blir i samme dybdeintervall gradvis svakere negativ. Det forklarer hvorfor man ikke har like god samsvar mellom sonarekkevidde beregnet med målt og modellert LHP i 100-200 meter som i 0-50 meter, hvor både målt og modellerte LHPer har mye likere gradienter.



Figur 4.10 Midlet sonarrekkevidde med standardavvik for alle ensemblene (svart) ved de 14 stasjonene i august. De blå punktene er sonarrekkevidde beregnet med målt LHP. Røde punkter er midlet sonarrekkevidde med standardavvik for kontrollkjøringen.



Figur 4.11 Midlere sonarrekkevidde for målt (rød søyle) og modellerte lydshastighetsprofiler (grønne søyler) for stasjon 1 i august. Den røde søylen har bredde på +/- 1 km rundt beregnet sonarrekkevidde for målt lydshastighetsprofil. Sonarrekkeviddene er beregnet for sonardyp 50 m (øverst), 100 m (midten) og 200 m (nederst) og midlet i dybdeintervallene 0-50 m (venstre) og 100-200 m (høyre). Vindhastighet er 10 m/s.



Figur 4.12 Midlere sonarrekkevidde for målt (rød søyle) og modellerte lydshastighetsprofiler (grønne søyler) for stasjon 10 i august. Den røde søylen har bredde på +/- 1 km rundt beregnet sonarrekkevidde for målt lydshastighetsprofil. Sonarrekkeviddene er beregnet for sonardyp 50 m (øverst), 100 m (midten) og 200 m (nederst) og midlet i dybdeintervallene 0-50 m (venstre) og 100-200 m (høyre). Vindhastighet er 10 m/s.

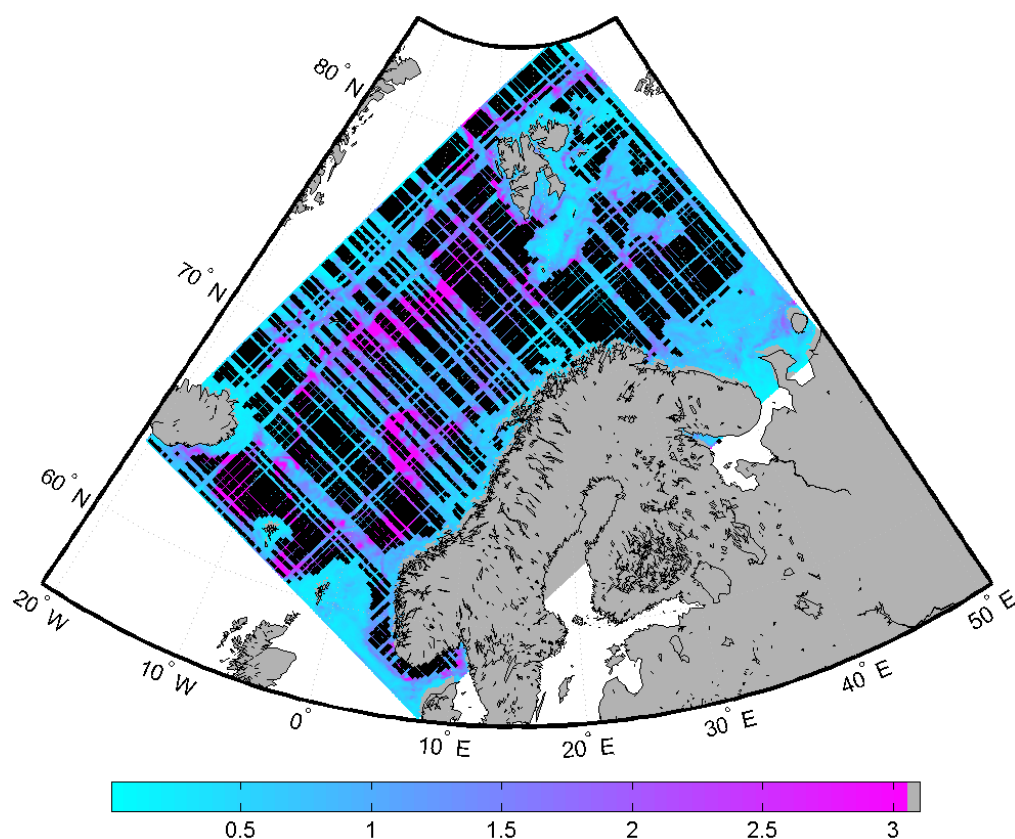
5 Sammenligning av oseanografisk variasjon og variasjon i sonarrekkevidde.

Nytten av kartene i Figur 3.4 er størst dersom det er godt samsvar mellom oseanografisk variasjon og variasjon i beregnet sonarrekkevidde. For å finne ut om det er en sammenheng mellom oseanografisk variasjon og variasjon i sonarrekkevidde er det valgt ut 12202 LHPer fra tidssteg 5 i augustdatasettet (Figur 5.1). LHPene er valgt ved å ta to tilfeldige vektorer med henholdsvis lengdegrad og breddegrad og kombinere disse. Det gir et datasett med LHPer spredt utover modellområdet fra områder med ulik oseanografisk variasjon. LHPer med maksdyp mindre enn 200 meter er utelatt fra datasettet. Sonarrekkevidden er beregnet med sonardyp 100 meter og sonarrekkevidden er midlet over måldypsintervallet 100-200 meter.

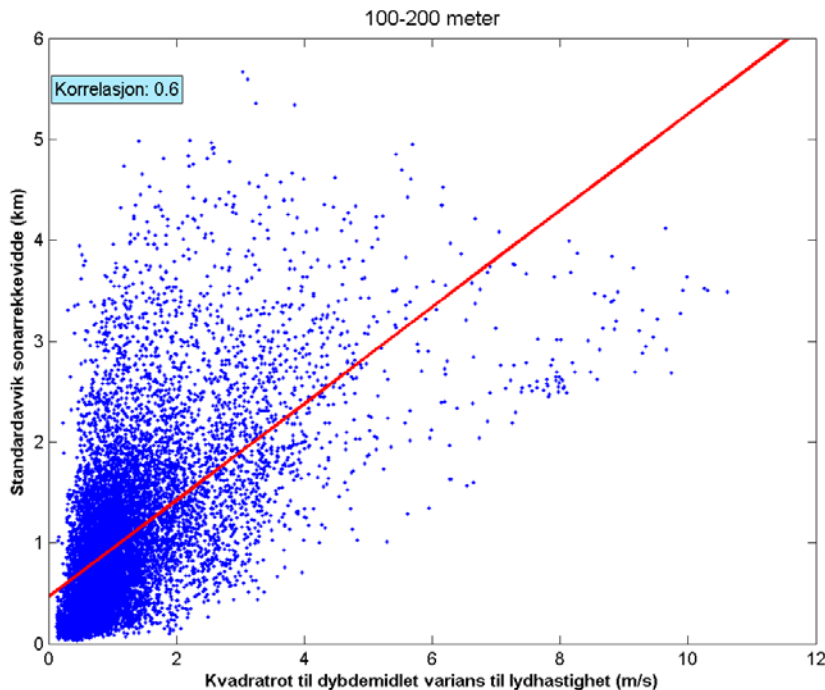
Figur 5.2 viser oseanografisk variasjon plottet mot variasjon i sonarrekkevidde for de 12202 tilfeldig valgte posisjonene. Selv om det er en viss trend at standardavvik i sonarrekkevidde øker med økende oseanografisk variasjon, viser Figur 5.2 at det ikke er noen tydelig sammenheng mellom de to størrelsene. Dette blir understreket av en korrelasjonskoeffisient på 0,6.

Sonarrekkevidde midlet over intervallet 0-50 meter viste enda dårligere samsvar, hvor korrelasjonskoeffisienten var 0,3. Det er også sett på om det å sammenligne oseanografisk variasjon i et dyp (istedenfor midlet over alle dyp) med midlere sonarrekkevidde vil gi et bedre resultat. Tilsvarende plott som i Figur 5.2 er laget hvor man sammenligner oseanografisk variasjon i dypene 5, 25, 50, 75, 100, 125, 150 og 200 meter med variasjon i sonarrekkevidde.

Resultatene fra den sammenligningen viste ikke noen bedre sammenheng mellom oseanografisk variasjon og variasjon i sonarrekkevidde enn resultatet som kom fra i Figur 5.2. Grunnen til at man ikke har noen klar sammenheng mellom variasjon i sonarrekkevidde og oseanografisk variasjon er at det ikke er en lineær kobling mellom lydshastighet og lydutbredelse. Dette fører til at små variasjoner i lydshastighetsprofilen kan gi store utslag i lydutbredelsen og motsatt. For å få et kart som angir usikkerhet i sonarrekkevidde, vil løsningen være å kjøre en akustisk modell for alle LHPene i modell-domenet. Det er mulig man kan klare seg med et representativt utvalg av LHPer, men det vil uansett kreve store dataressurser å gjennomføre.



Figur 5.1 Kvadratrot av dybdemidlet varians til lydshastigheten for tidsteg 5 i august. De svarte punktene er posisjonene til 12202 tilfeldig valgte LHPer.



Figur 5.2 Kvadratrot av dybdevidlet varians til lydshastigheten plottet mot variasjon i sonarrekkevidde beregnet med sonardyp 100 meter. Sonarrekkevidden er midlet mellom 100 og 200 meter. Den røde linjen er minste kvadraters lineær tilnærming.

6 Oppsummering og konklusjon

Informasjon og kunnskap om lydshastigheten i havet er essensielt i ubåt- og antiubåtoperasjoner. Vanligvis måler man lydshastighetsprofilen, men denne har nytteverdi i et kort tidsrom og begrenset geografisk område. Havmodeller dekker et større geografisk område og beregner lydshastigheten i havet en periode fram i tid. Til nå har havmodeller blitt kjørt med bare en initialbetingelse, såkalt deterministisk varsel. Ved å kjøre modellen flere ganger med litt forskjellige initialbetingelser, såkalt ensemblevarsling, kan man si noe om variasjonen og usikkerheten til varselet. Kunnskap om usikkerheten vil være verdifull i forbindelse med planlegging og gjennomføring av antiubåtoperasjoner og andre operasjoner der bruk av sonar er viktig.

I første del av rapporten (kapittel 3) er det vist hvordan ensemblevarsler kan presenteres for operative brukere. Det ble gjort ved å beregne ensemblevariansen i lydshastighet og midle over alle dyp. Produktet er et kart som viser hvor modellresultatene har stor usikkerhet og hvor usikkerheten er liten. Dette vil indikere hvor man bør gjøre lydshastighetsmålinger og hvor man kan stole lengre på hver lydshastighetsmåling.

I andre del av rapporten (kapittel 4) sammenlignes sonarrekkevidder beregnet med målte og modellerte lydshastighetsprofiler i to ulike sesonger (april og august). Sonarekkevidden ble beregnet for ulike sonardyp og måldypsintervall. I april datasettet var variasjonen i sonarekke-

vidde beregnet med modellerte lyd hastighetsprofiler liten, og gav derfor ikke mer informasjon enn et deterministisk varsel. I tillegg var det generelt store avvik mellom sonarrekkevidde beregnet med målt og modellerte lyd hastighetsprofiler.

For augustdatasettet var spredningen i sonarrekkevidde beregnet med modellerte lyd hastighetsprofiler større enn i april. Her var konklusjonen at man fikk en gevinst ved å benytte ensemblevarsel istedenfor deterministisk varsel. Ved 47 av 84 tilfeller ligger sonarrekkevidden beregnet med målt profil innenfor standardavviket til sonarrekkevidde beregnet med lyd hastighetsprofiler fra ensemblekjøringene. Til sammenligning gir sonarrekkevidde beregnet med lyd hastighetsprofiler fra det deterministiske varselet samsvar med sonarrekkevidde beregnet med målte lyd hastighetsprofiler i 31 av 84 tilfeller. Basert på datasettet for august gir det en gevinst å bruke ensemblevarsler ved at man får et inntrykk av hvor mye sonarrekkevidden kan variere i et område.

I kapittel 5 så vi på om det var noen sammenheng mellom den oseanografiske variasjonen og variasjonen i sonarrekkevidde. Resultatene i kapittel 5 viste ikke noen klar sammenheng. Det vil si at kartet i Figur 3.4 ikke gir noen klar indikasjon på hvor man kan forvente stor variasjon i sonarrekkevidde. Det forteller imidlertid hvor man kan forvente store oseanografiske variasjoner. For å få et tilsvarende kart som angir usikkerhet i sonarrekkevidde, vil løsningen være å kjøre en akustisk modell for alle LHPene i modell-rommet. Kanskje man kan klare seg med et representativt utvalg av LHPer, men det vil uansett kreve store dataressurser.

I denne rapporten er det bare sett på variasjon og usikkerhet til lyd hastighet, men flere andre parametere i en havmodell vil være nyttige for operative. Bølgevarsler med sannsynlighet for bølgehøyde over en viss høyde vil være et produkt. Et annet mulig produkt er iskonsentrasjon og utbredelse av isdekket. Man kan f.eks. angi midlere isgrense og usikkerheten til denne grensen.

For at ensemblevarsler skal gi et enda bedre bilde på usikkerheten, kunne man perturbert flere rand- og initialbetingelser i modellkjøringene. I modellen som dataene i denne rapporten er hentet fra er det bare vindfeltet som er perturbert. I tillegg vil assimilering av observasjoner inn i ensemblekjøringene gi et bedre bilde av tilstanden man forventer å finne i havet. Oppløsningen til modellen er også avgjørende for hvor godt modellen gjenspeiler fenomener i havet. Horisontal gitter-størrelse til modellen som er brukt i dette studiet er 4 km. Typiske fenomener som virvler har utstrekning på 10 – 50 km og disse blir ikke godt nok oppløst i et 4 km gitter.

Referanser

- [1] L. P. Røed, "Documentation of simple ocean models for use in ensemble predictions," Norwegian Meteorological Institute 3/2012, 2012.
- [2] P. Østenstad, "FFI-rapport 2007/01573. Forskjeller i transmisjonstap beregnet med målt, modellert og klimatologisk lydshastighetsprofil " 2007.
- [3] Argo. Available: <http://www.argo.ucsd.edu/index.html>
- [4] Coriolis. Available: <http://www.coriolis.eu.org/>
- [5] J. M. Lewis, "Roots of Ensemble Forecasting," *Monthly Weather Review*, vol. 133, p. 20, 2005.
- [6] M. Rixen and E. Ferreira-Coelho, "Operational prediction of acoustic properties in the ocean using multi-model statistics," *Ocean Modelling*, vol. 11, p. 12, 2005.
- [7] M. Rixen, J. Book, A. Carta, V. Grandi, L. Gualdesi, R. Trees, *et al.*, "NURC-FR-2008-023. Improved ocean prediction skill and reduced uncertainty in the coastal region from multi-mode-super-ensembles," 2008.
- [8] S. Mjølvsnes, "LYBIN SGP-180(C) – Model Description," 2000.
- [9] E. M. Dombestein, "Lybin 6.1 - user manual," FFI-rapport 2012/01463, 2012.
- [10] P. Østenstad and K. T. Hjelmervik, "FFI-rapport 2011/01986 Classification of acoustically stable areas using empirical orthogonal functions - examination of stability methods," 2011.