



FFI-rapport 2015/01550

# En forbedret modell av oseanografien til bruk i akustisk modellering – kombinasjon av klimatologi og havmodell



Petter Østenstad





## **En forbedret modell av oseanografien til bruk i akustisk modellering – kombinasjon av klimatologi og havmodell**

Petter Østenstad

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)

13. november 2015

FFI-rapport 2015/01550

121501

P: ISBN 978-82-464-2612-9

E: ISBN 978-82-464-2613-6

## **Emneord**

Oseanografi

Matematiske modeller

Undervannsakustikk

## **Godkjent av**

Atle Ommundsen

Forskningsleder

Elling Tveit

Avdelingssjef

## Sammendrag

Informasjon om lyd hastighetsprofiler er essensielt i planlegging og gjennomføring av sonaroperasjoner. En riktig beskrivelse av hvordan lyd hastigheten varierer med dybden er spesielt viktig i modellering av lyd utbredelse i havet. Lyd hastigheten i havet varierer både i tid og rom, og det er viktig å ha informasjon om både midlere lyd hastighetsprofil og hvordan profilen varierer innenfor et operasjonsområde. Har man et representativt antall historiske lyd hastighetsprofiler fra operasjonsområdet, kan man gi et mål på både middelfprofil og forventet variasjon.

I områder med få eller ingen historiske lyd hastighetsprofiler tilgjengelig kan man benytte seg av klimatologiske databaser eller numeriske havmodeller. Klimatologiske databaser inneholder midlere lyd hastighetsprofiler for hver måned og dekker store områder. En ulempe med slike klimatologiske databaser er at de ikke inneholder tilstrekkelig informasjon til å beskrive den forventede variasjonen til lyd hastigheten i et område. Numeriske havmodeller kan gi informasjon om variasjonen hvis de er basert på simuleringer over flere år eller hvis samme havmodell er kjørt mange ganger med ulike startbetingelser.

Erfaringer har vist at havmodeller ofte ikke representerer målte lyd hastighetsprofiler godt nok for akustisk modellering og at klimatologi gir et riktigere bilde av målt lyd hastighet. I denne rapporten er det presentert en metode for å kombinere lyd hastighetsprofiler fra klimatologi med varians fra en havmodell. Resultatet av metoden er et nytt sett med lyd hastighetsprofiler som har midlere lyd hastighetsprofil fra klimatologi, men som også har med variansen fra havmodell.

Metoden er testet på 21 områder i Norskehavet og Barentshavet. Resultatene viser at metoden gir en bedre representasjon av det modellerte akustiske feltet sammenlignet med målte lyd hastighetsprofiler enn det lyd hastighetsprofiler fra havmodell eller klimatologi alene gjør. Forbedringen varierer, men ligger i snitt på opp mot 3 dB når man sammenligner modellert transmisjonstap basert på havmodell og metoden presentert i rapporten.

Metoden er forventet å gi operativ merverdi sammenlignet med hva som benyttes i dag, og det anbefales derfor at metoden umiddelbart tas i bruk av Forsvaret. Dette kan gjøres i første omgang ved at resultater tas inn som en del av Environmental Briefing Docket som produseres og vedlikeholdes av KNMT/TAS/METOC og brukes i planlegging av operasjoner.

## English summary

Information about sound speed profiles are essential when planning and conducting sonar operations. A realistic description of how sound speed varies with depth is especially important when modeling sound propagation in the ocean. The sound speed varies both spatially and temporally, and it is essential to have information on mean sound speed profile and its variability in an operational area. The expected mean sound speed profile and its variability in an area can be estimated using a group of historical sound speed profiles.

In areas with few or no historical sound speed profiles, climatological databases or numerical ocean models can provide information about the ocean environment. Climatological databases usually provide mean and standard deviation of sound speed profiles for a given month. On the other hand they do not contain sufficient information to fully describe the variability of the sound speed profiles, since they do not have any information on correlation between different depth steps. Numerical ocean models can provide such information about variability. This requires that the ocean model is run over a several years simulation period or that the model is run several times with perturbed initial conditions.

Previous experience has shown that ocean models do not necessarily represent measured sound speed profiles with sufficient accuracy for acoustic modeling. Climatology, on the other hand, gives a more correct representation of measured sound speed profiles. This report presents a method for combining mean sound speed profiles from climatology with variance from an ocean model. The result is a new set of sound speed profiles with the mean sound speed profile from climatology, including the variance from the ocean model.

The method is tested in 21 areas in the Norwegian and Barents Seas. The results show that the acoustic field modeled with sound speed profiles from the proposed method is closer to the acoustic field calculated with observed sound speed profiles compared with acoustic fields calculated with sound speed profiles from ocean model or climatology.

The method is expected to provide added value to operational planning compared to what is currently used. It is recommended that the method is immediately adopted by the Navy by implementing the method in Environmental Briefing Docket. Environmental Briefing Docket is produced and maintained by KNMT/TAS/METOC and is widely used in operational planning.

## **Innhold**

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Metode</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Data</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Resultater</b>	<b>10</b>
4.1	Forskjell i lydhastighetsgradienter	10
4.2	Varians i havmodell og målinger	13
<b>5</b>	<b>Effekten på akustisk modellering</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>20</b>





## 1 Innledning

Sonarmodellering er svært avhengig av lyd hastighetsprofilen (LHP). Spesielt feil i lyd hastighetsgradienten kan forårsake store feil i det modellerte akustiske feltet. Siden lyd hastigheten i havet varierer, er en realistisk beskrivelse av midlere LHP og dens forventet variasjon essensielt for modellering av middelet og variansen til det akustiske feltet. Den forventede variasjonen til det akustiske feltet i et interesseområde kan estimeres ved å bruke et representativt antall historiske LHPer i den akustiske modelleringen.

I områder med få eller ingen historiske data, kan klimatologiske databaser eller numeriske havmodeller være kilder til informasjon om oseanografien i området. Klimatologiske databaser, som f. eks. Generalized Digital Environmental Model (GDEM [1]), inneholder månedlige midler og standardavvik av temperatur og saltholdighet. Slike klimatologiske databaser inneholder imidlertid ikke tilstrekkelig informasjon til å beskrive variabiliteten fullt ut - siden de ikke har informasjon om korrelasjonen mellom de ulike dybdestegene. Numeriske havmodeller kan gi oss god informasjon om selve variabiliteten til LHPer. Det ved at havmodellen enten er kjørt for mange år i en såkalt hindcast simulering eller at modellen er kjørt som ensembler [2-4].

Det er vist i [5-7] at havmodeller ikke gir riktige estimater av vertikale temperatur- og saltholdighetsgradienter. Dette gjelder både hvor kraftige gradientene er og i hvilke dyp de befinner seg i. En tidligere studie [8], har også vist at LHPer fra klimatologi er forventet å gi en bedre beskrivelse av det modellerte akustiske feltet enn LHPer fra to ulike havmodeller. På den annen side er det vist i [5] at en havmodell kan reprodusere mye av den observerte variansen. Dette gjaldt særlig for temperatur, som er den dominerende parameteren for lyd hastighet i havet.

I dette arbeidet presenteres det en ny metode som er gitt navnet MCVM – Mean Climatology and Variance from Model. Denne kombinerer midlere LHP fra klimatologi med variansen fra en havmodell. Metoden er testet på 21 områder i Norskehavet og Barentshavet med svært lovende resultater. Disse områdene inneholder tilstrekkelig historiske målte referanse LHPer. Fra de samme områdene er det hentet ut LHPer fra havmodellen og klimatologien. Ved å benytte empirisk ortogonale funksjoner (EOF), representeres et sett av LHPer ved hjelp av en midlere LHP og en sum av ortogonale basisfunksjoner med tilhørende koeffisienter [9]. Summen av koeffisienter og basisfunksjoner representerer variansen i datasettet. For eksempel kan et datasett være LHPer fra en havmodell. Da kan man erstatte midlere LHP fra havmodell med midlere LHP fra klimatologi. Dermed får man et nytt datasett, som har profiler som ligner på klimatologien og en varians som havmodellen.

## 2 Metode

For å kombinere midlere LHP fra klimatologi med varians fra havmodell kan man bruke empirisk ortogonale funksjoner (EOF). Gitt et datasett med  $M$  LHPer fra f.eks. en havmodell. Lyd hastigheten  $c_{mod}$  i dypet  $z_j$  uttrykkes som

$$c_{mod}(z_j) = \bar{c}_{mod}(z_j) + \sum_{n=1}^N \kappa_n u_n(j) \quad (2.1)$$

hvor  $\bar{c}_{mod}(z_j)$  er gjennomsnittlig lydshastighet for datasettet ved dypet  $z_j$ .  $u_n(j)$  er et sett av  $N$  ortonormale basisfunksjoner med koeffisienter  $\kappa_n$ . Basisfunksjonene bestemmes ved å løse egenverdioproblemet

$$\mathbf{R}_x \mathbf{u}_k = \lambda_k \mathbf{u}_k \quad (2.2)$$

hvor  $\mathbf{u}_k$  er egenvektorer og inneholder funksjonsverdier til de diskrete ortonormale basisfunksjonene  $u_k(j)$  og refereres ofte til som EOFer.  $\lambda_k$  er de tilhørende egenverdiene og er lik variansen til de tilhørende koeffisientene [10].  $\mathbf{R}_x$  er kovariansmatrisen til datamatriksen  $\mathbf{X}$

$$\mathbf{R}_x = \frac{1}{M} \mathbf{X}^T \mathbf{X} \quad (2.3)$$

hvor  $\mathbf{X}$  radvis i dette tilfellet består av lydshastighetsprofiler.. Summen i likning (2.1) representerer variansen i datasettet. Ved å erstatte  $\bar{c}_{mod}(z_j)$  med  $\bar{c}_{lim}(z_j)$  i likning (2.1) kan vi generere et nytt sett med LHPer med midlere LHP fra klimatologi, men som også inneholder variansen til det opprinnelige modellerte settet med LHPer.

### 3 Data

For å demonstrere metoden beskrevet i kapittelet over, er det brukt klimatologiske, målte og modellerte LHPer. Dataene er hentet fra Norskehavet og Barentshavet. Alle dataene er gitt som profiler av salt og temperatur, som man beregner LHPer fra.

Klimatologien er hentet fra Generalized Digital Environment Model (GDEM) [1]. GDEM er en database som dekker hele verden og består av salt- og temperaturprofiler. Profilene er griddet med horisontal oppløsning på 0,25 grader og fordelt over 78 dybdelag. Avstanden mellom dybdelagene er 2 m fra 0-10 m, 5 m fra 10-100 m, 10m fra 100-200 m, 20 m fra 200-300, 50 m fra 300-400 m, 100 m fra 400-1800, 200 m fra 1800-6600 m.

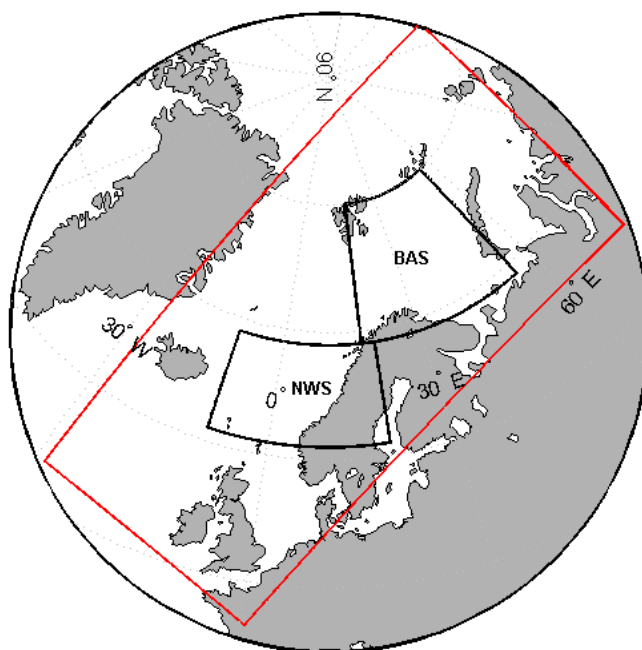
De modellerte dataene er produsert i samarbeid mellom Havforskningsinstituttet og Meteorologisk institutt [5]. Datasettet består av modellkjøringer som dekker årene 1960 til 2011. Regional Ocean Modeling System (ROMS) [11] er brukt for å produsere dataene. Modellen bruker terrengfølgende sigma-koordinater og antall lag som er brukt i modellkjøringene er 32. Horisontal oppløsning er 4 kilometer. Modellen dekker havområdene som er vist i Figur 3.1. Dataene fra modellen er gitt som daglige middelverdier av salt og temperatur.

De målte dataene er hentet fra World Ocean Database [12] og består CTD-profiler (Conductivity Temperature Depth). Dataene dekker to områder, Norskehavet og Barentshavet (Figur 3.1).

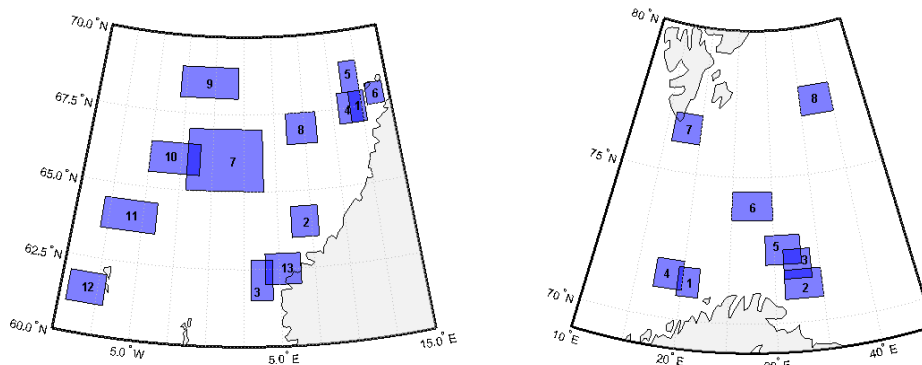
Observasjonene dekker tidsperioden 1964 – 2013, hvor av 32544 er fra Norskehavet og 25588 er fra Barentshavet. Profilene har en vertikaloppløsning på mellom 1 og 5 meter, noe som tilsvarer mellom 100 – 300 dybdepunkter pr. profil.

For å sammenligne klimatologi, målte og modellerte data er de målte og modellerte LHPene interpolert til samme vertikaloppløsning som de klimatologiske LHPene. Siden klimatologien er delt inn i månedlige midler er de observerte og modellerte dataene sortert månedsvis.

For å verifisere metoden er man avhengig av å lokalisere områder som inneholder et tilstrekkelig antall målte LHPer. Disse områdene bør heller ikke være for store i geografisk utstrekning. Totalt 21 slike områder ble lokalisert, hvor av 13 befinner seg i Norskehavet og 8 i Barentshavet (Figur 3.2). I hvert område er det satt et terskeldyp på de LHPene som er tatt med i analysen. Dette terskeldypet varierer noe fra område til område, med største terskeldyp satt til 400 meter. LHPer som er grunnere enn satt terskeldyp i et område er utelatt fra analysen. De resterende LHPene i området er kuttet på terskeldypet slik at alle LHPene som inngår i den videre analysen er like dype. En slik preprosessering av datagrunnlaget var nødvendig, da EOF-analysen forutsetter at alle LHPene har samme antall dybdesteg [13].



*Figur 3.1 Området som dekkes av havmodellen (rødt) og områdene hvor de målte dataene er hentet fra (sort). NWS = Norskehavet og BAS = Barentshavet*



Figur 3.2 Geografisk plassering av de områdene som er brukt for sammenligning av klimatologiske, målte og modellerte LHPer i Norskehavet (venstre) og Barentshavet (høyre)

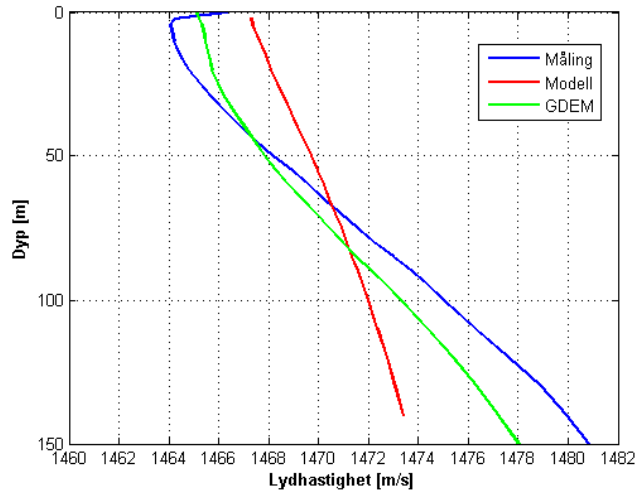
## 4 Resultater

I [8] ble det konkludert med at klimatologi gir en bedre representasjon av målt LHP enn to havmodeller, hvor modellene hadde horisontaloppløsning på henholdsvis 200 meter og 4 kilometer. Den høyoppløselige modellen hadde skarpere gradienter i de øverste 50 meterne enn målingene, mens modellen med 4 km oppløsning hadde svakere gradienter enn målingene.

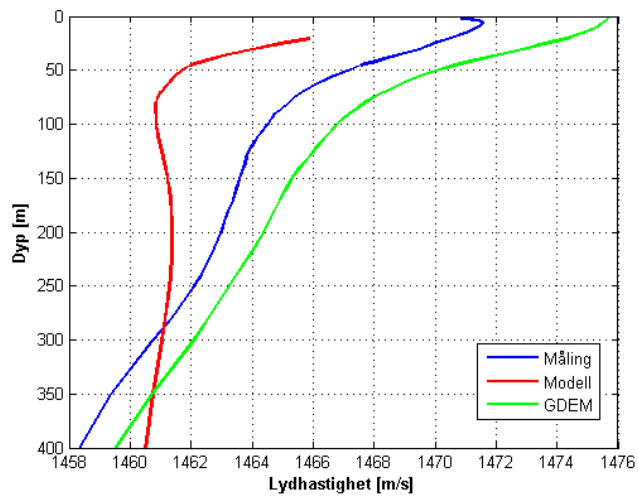
I [5] og [6] er det vist sammenligninger av modell og målte data for salt og temperatur, midlet over perioden 1980-2009, langs tre snitt i Norskehavet og Barentshavet. Resultatene viser at det er forskjeller både i styrke og plassering av vertikalgradienter mellom målinger og havmodell.

### 4.1 Forskjell i lydshastighetsgradienter

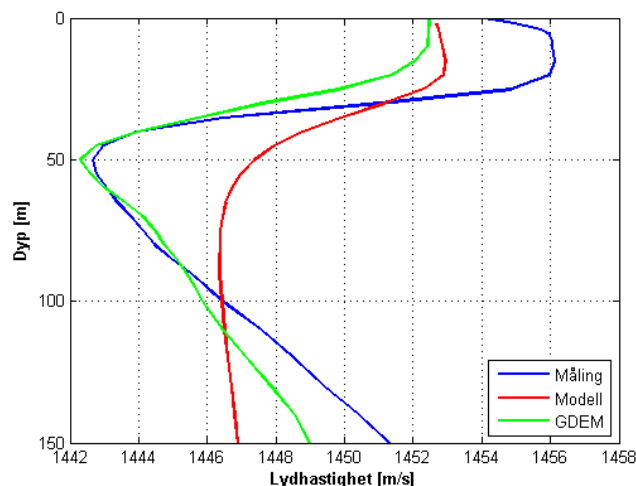
For å verifisere at midlere observert LHP generelt gir bedre samsvar med midlere klimatologisk LHP enn midlere modellert LHP, er lydshastighetsgradientene fra de 21 områdene i Figur 3.2 nærmere studert. Under er det vist noen eksempler på gjennomsnittlig LHP for både klimatologi, måling og modell; fra område 7 (Figur 4.1) og 11 (Figur 4.2) i Norskehavet og område 8 (Figur 4.3) i Barentshavet. Bortsett fra en negativ gradient helt i overflaten for midlere observert LHP, viser Figur 4.1 at midlere observert, klimatologisk og modellert LHP har positiv gradient i hele vannsøylen. Observert og klimatologisk LHP har gradienter som ligger nærmere hverandre og har en skarpere gradient sammenlignet med midlere modellert LHP. I Figur 4.2 har midlere modellert LHP en lydkanal på ca. 80 meters dyp, mens observert og klimatologisk LHP ikke har det. I tillegg har de to sistnevnte negativ gradient i hele vannsøylen. Klimatologisk og målt LHP har tilnærmet lik gradient gjennom hele vannvolumet. I Figur 4.3 ser vi at både midlere klimatologisk og observert LHP har lydkanal på 50 meter, men at observert LHP har skarpere gradienter enn klimatologisk LHP både over og under 50 meter. Midlere modellert LHP har antydning til lydkanal på rundt 75 meters dyp, men den er betydelig svakere enn den vi ser for observert og klimatologisk LHP.



Figur 4.1 Gjennomsnittlig LHP i område 7 i Norskehavet for henholdsvis måling (blå), modell (rød) og klimatologi (grønn).



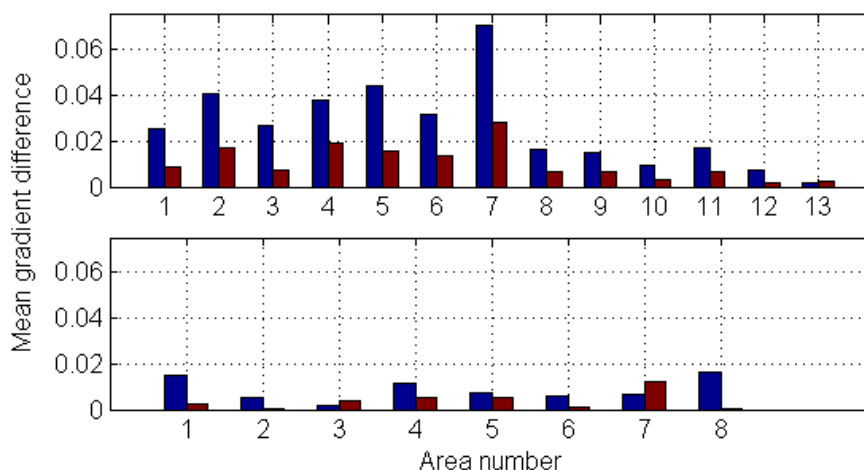
Figur 4.2 Gjennomsnittlig LHP i område 11 i Norskehavet for henholdsvis måling (blå), modell (rød) og klimatologi (grønn).



Figur 4.3 Gjennomsnittlig LHP i område 8 i Barentshavet for henholdsvis måling (blå), modell (rød) og klimatologi (grønn).

Figur 4.4 viser forskjell i midlere lydhastighetsgradient (MLG) mellom midlere observert og modellert LHP og midlere observert og klimatologisk LHP. MLG er definert som forskjell i lydhastighet mellom det grunneste og dypeste punktet i de midlere LHPene i de 21 områdene (Figur 3.2). For områdene i Norskehavet (Figur 4.4 øverst) er det en klar tendens at middelgradienten til de midlere klimatologiske LHPene er bedre i samsvar med de midlere målte LHPene enn tilfellet er for de midlere modellerte LHPene. I Barentshavet (Figur 4.4 nederst) ligger MLG for både klimatologi og modell nærmere observert MLG enn tilfellet er for Norskehavet (Figur 4.4 øverst). Like fullt gir klimatologi også her bedre samsvar med observert data enn det modell gjør.

Område 3 og 7 i Barentshavet (Figur 4.4) skiller seg fra de andre områdene i analysen ved at MLG fra modell er nærmere målt MLG enn hva klimatologisk MLG er. I område 3 har midlere målt LHP lydkanal på 75 meter, mens midlere modellert LHP har lydkanal på 110 meter. Midlere klimatologisk LHP har ingen lydkanal. For område 7 har midlere målt LHP et sjikt på ca. 20 meters dyp. Midlere LHP fra modell har sjikt på 30 meters dyp, mens klimatologi har sjikt på ca. 75 meters dyp.

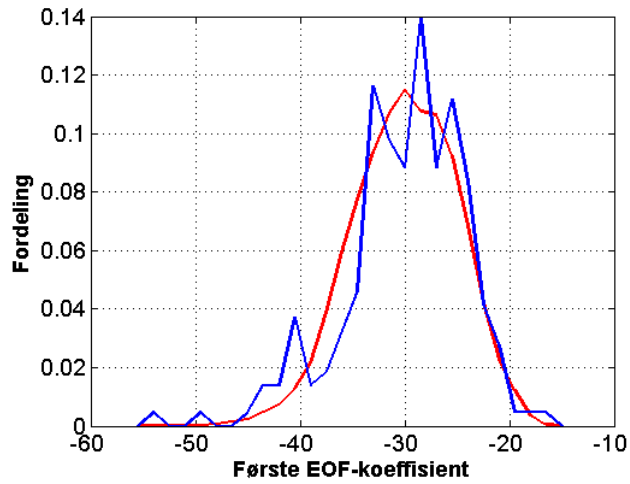


Figur 4.4 Forskjeller i midlere lydastighetsgradient mellom midlere observert og modellert LHPer (blå) og midlere observert og klimatologisk LHP (rød) for 13 områder i Norskehavet (øverst) og 8 områder i Barentshavet (nederst).

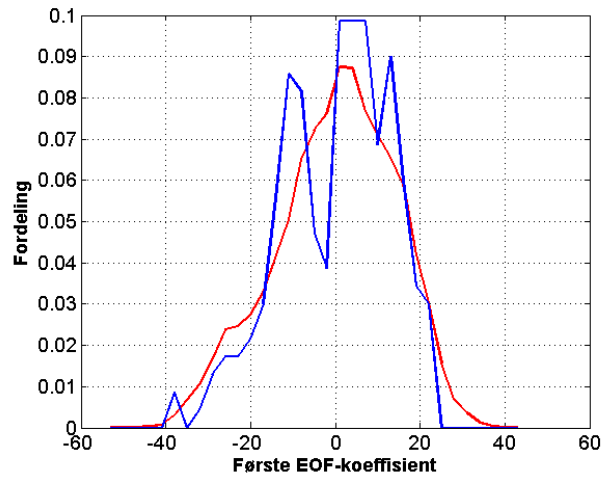
## 4.2 Varians i havmodell og målinger

For at MCVM-metoden skal ha noe for seg, må havmodellen reprodusere variansen man finner i de observerte dataene. En måte å sjekke det på er å sammenligne fordelingen av første EOF-koeffisient for de observerte og modellerte dataene i hvert av de 21 områdene (Figur 3.2). Første EOF-koeffisient inneholder mellom 70 og 80 % av variansen i datasettet. Figur 4.5 - Figur 4.7 viser fordelingen av første koeffisient for observerte LHPer og LHPer fra havmodellen for henholdsvis område 3, 7 og 2 i Norskehavet (Figur 3.2). Beregningen av koeffisientene er gjort ved å slå sammen LHPene i datasettene for både observasjoner og havmodell for hvert av områdene i Figur 3.2. Dette tilsvarer å la  $\mathbf{X}$  i (2.1) bestå av både målte og modellerte profiler.

Et mål på om modellen reproduserer variansen til observasjonene er å se på overlappende areal under fordelingskurvene for første koeffisient til LHPene fra havmodell og målte profiler. For kurvene vist i Figur 4.5 og Figur 4.7 er prosentvis overlappende areal under fordelingskurvene henholdsvis 84,5, 85,8 og 84,5 %. En tilsvarende overlappende arealberegning er gjengitt i Figur 4.8 for områdene i Norskehavet og Figur 4.9 for Barentshavet. Vi ser at for de fleste områdene, 16 av 21, er prosentvis overlappende areal på over 70 %. Gjennomsnittet i overlappende areal for Norskehavet og Barentshavet er henholdsvis 76 og 74 %. Dette vil si at havmodellen klarer å gjengi mesteparten av variansen i de observerte datasettene. For de høyere ordens koeffisienter er overlappende areal lavere. Dette er forventet siden observasjonene inneholder mer småskala variasjon enn det havmodellen er i stand til å fange opp.

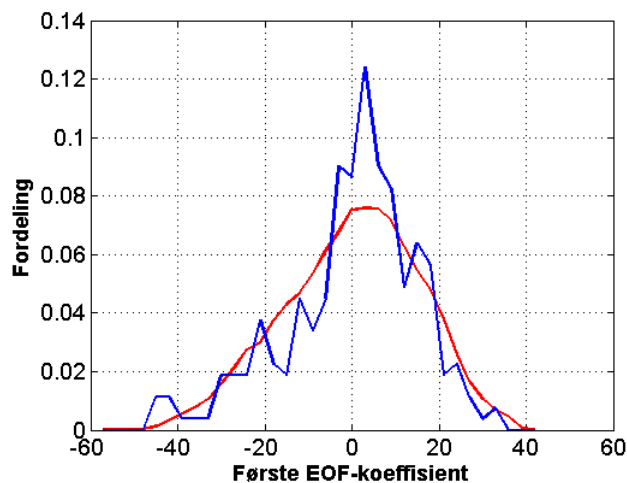


Figur 4.5 Fordeling av første koeffisient for observasjoner (blå) og havmodell (rød) i område 3 i Norskehavet.

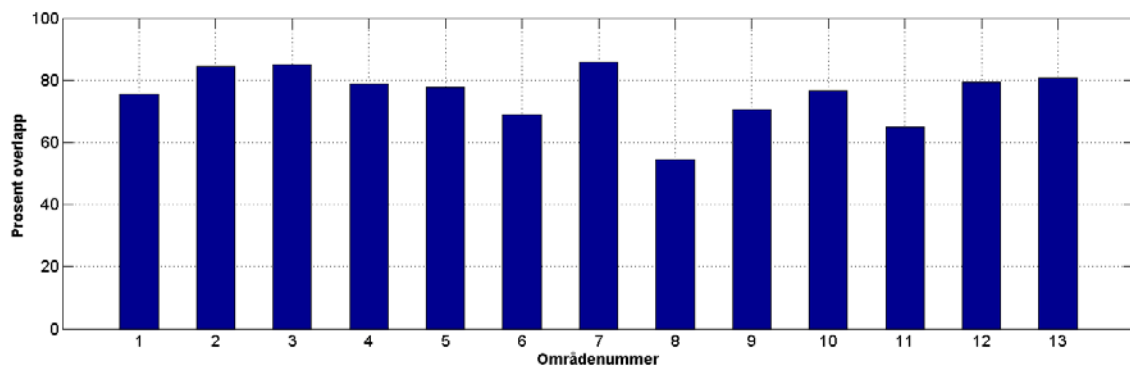


Figur 4.6 Fordeling av første koeffisient for observasjoner (blå) og havmodell (rød) i område 7 i Norskehavet.

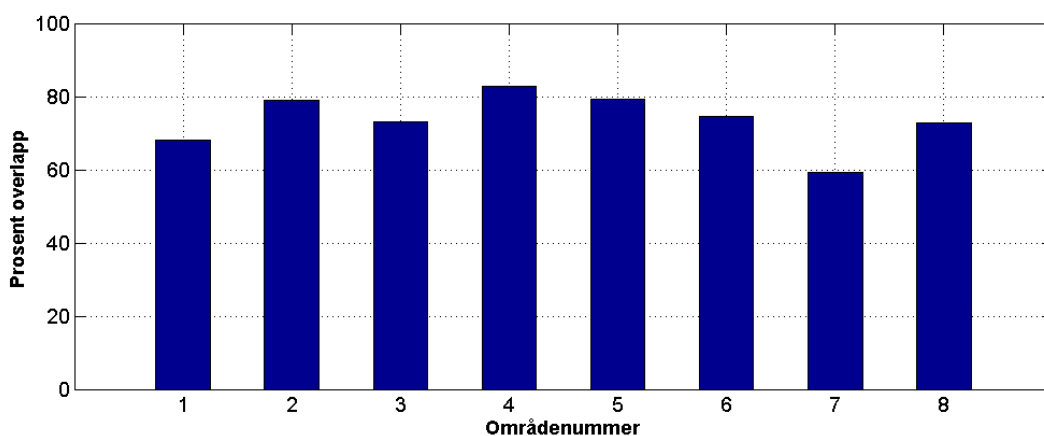




Figur 4.7 Fordeling av første koeffisient for observasjoner (blå) og havmodell (rød) i område 2 i Norskehavet.



Figur 4.8 Prosentvis overlappende areal under fordelingskurvene for første koeffisient for observasjoner og havmodell for områdene i Norskehavet.



Figur 4.9 Prosentvis overlappende areal under fordelingskurvene for første koeffisient for observasjoner og havmodell for områdene i Barentshavet.

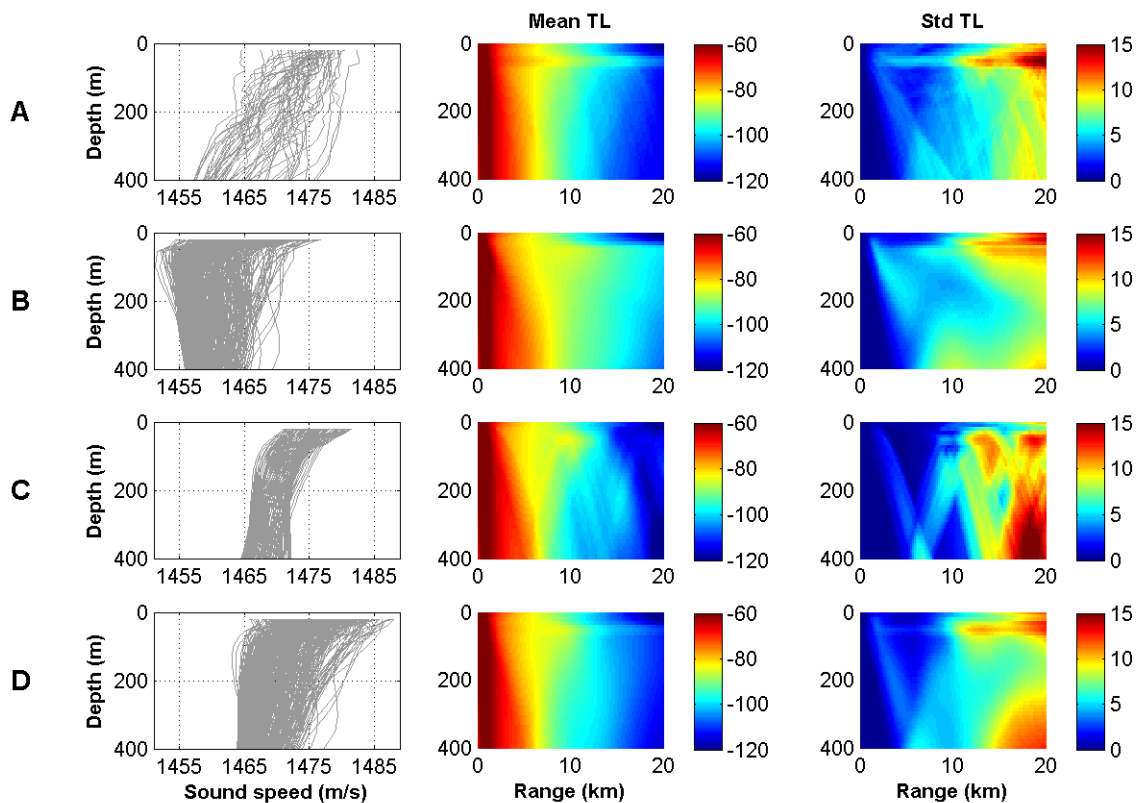
## 5 Effekten på akustisk modellering

For å studere hvilken effekt MCVM-metoden har på lydpropagasjonen er propagasjonsmodellen Lybin [14] brukt for å beregne transmisjonstap (TL). TL er beregnet med LHPer, fra observasjoner, klimatologi, havmodell og MCVM, som input fra hvert av de 21 områdene i Figur 3.2. Områdene inneholder svært mange profiler fra havmodellen, i størrelsesorden mellom  $10^5$  -  $10^6$ . Å modellere TL for en slik mengde profiler er tidkrevende. Derfor er det plukket 10 000 vilkårlige LHPer fra havmodellen fra hvert av de 21 områdene for å redusere regnetiden. Samtidig er 10 000 LHPer tilstrekkelig til at man bevarer variasjonen i datasettet. I TL-beregningene i Lybin er det brukt flat bunn. Bunndypet er satt til den dypeste LHPen i hvert av de 21 områdene, men med maksimumsdyp på 400 meter. Vertikal celledørrelse er 10 meter, det vil si at antall dybdeceller varierer fra område til område, men at største antall dybdeceller er 40. Sonardypet er satt til 50 meter i alle områdene bortsett fra område 13 i Norskehavet og områdene 1, 5 og 8 i Barentshavet, hvor sonardypet er henholdsvis 40, 75, 75 og 100 meter. Dypene er valgt fordi det er i disse dypene forskjellen mellom observert, modellert og klimatologisk LHP er mest fremtredende. Det er beregnet TL ut til 20 km fra sonaren med celledørrelse 200 meter i lengderetningen, totalt 100 celler.

Figur 5.1 viser LHPer, midlere TL og standardavvik i TL for observasjoner, havmodell, klimatologi og MCVM for område 9 i Norskehavet. Midlere TL er beregnet ved å beregne TL for hver LHP og så midle over alle de beregnede TLene (ikke TL beregnet fra midlere LHP). I det venstre panelet i Figur 5.1 ser man at LHPene fra havmodellen (B) har skarpere gradient i de øvre 50 meterne enn observasjonene (A) viser. Havmodellen (B) viser også økende lydshastighet fra ca 50 meter og nedover for en god del av LHPene. LHPene fra klimatologien (C) har en form som ligner mer på observasjonene enn LHPene fra havmodellen (B). Havmodellen har omtrentlig samme spredningen på LHPene som observasjonene (A), mens klimatologien (C) har liten variasjon i LHPene. MCVM (D) har LHPer som ligger nært klimatologien (C) i form (og dermed også observasjonene i A), mens MCVM (D) gjengir variasjonen til havmodellen (B).

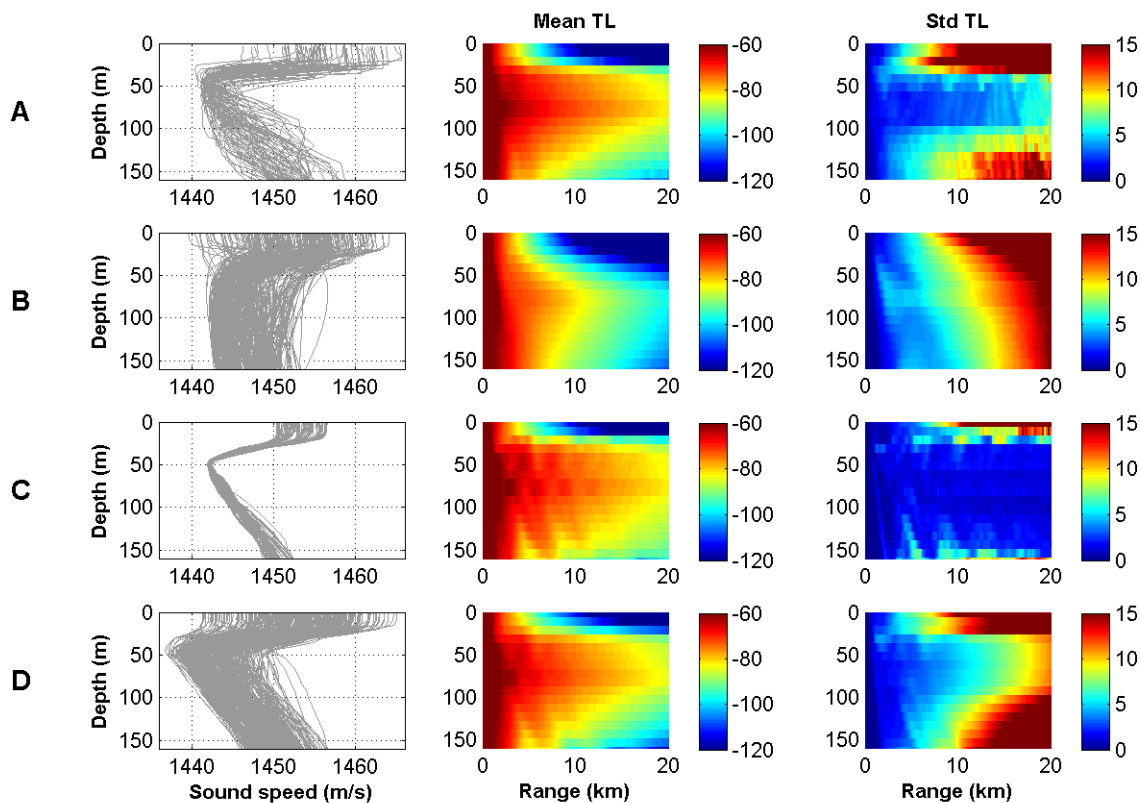
I det midtre panelet i Figur 5.1 viser midlere TL. Havmodell (B) viser mindre TL enn de tre andre (A, C og D). Observasjonene (A) har et område på rundt 40-60 meters dyp med lav TL som vi ikke ser igjen i TL for havmodell (B). MCVM (D) reproducerer et midlere TL-felt som ligner svært mye på det man ser for observasjonene (A).

Det høyre panelet i Figur 5.1 viser standardavvik i TL. Havmodellen (B) viser har et område mellom 50 og 250 meters dyp i avstand 2 – 7 km med høyere standardavvik enn det observasjonene (A) viser. MCVM (D) viser et standardavvik som er nærmere observasjonene (A) enn det havmodellen (B) gjør.



Figur 5.1 Lydhastighetsprofiler (venstre panel), midlere transmisjonstap i dB (midtre panel) og standardavviket til transmisjonstapet i dB (høyre panel) for henholdsvis A) observasjoner, B) havmodell, C) klimatologi og D) MCVM-metoden for område 9 i Norskehavet

Figur 5.2 viser LHPer, midlere TL og standardavvik i TL for observasjoner, havmodell, klimatologi og MCVM for område 8 i Barentshavet. Her det enda bedre samsvar mellom observasjoner (A) og MCVM (D) enn i Figur 5.1 og man ser tydelig hvordan havmodellen gir en helt gal representasjon av LHPene (venstre panel i Figur 5.2). Både observasjonene (A) og klimatologien (C) har en lydkanal på rundt 50 meter, mens havmodellen (B) ikke har en lydkanal. Dette kommer også tydelig fram når man ser på midlere TL (midtre) og standardavvik i TL (høyre panel). Observasjonene (A) og MCVM (D) gir mye lengre midlere sonarrekkevidder fra 40 til 100 meters dyp enn det havmodellen (B) gjør. Klimatologien (C) gjengir midlere TL fra observasjonene (A) tilfredstillende, men kan ikke reprodusere standardavviket som observasjonene (A) gir. MCVM (B) gjengir derimot standardavviket bra.



Figur 5.2 Lydhastighetsprofiler (venstre panel), midlere transmisjonstap i dB (midtre panel) og standardavviket til transmisjonstapet i dB (høyre panel) for henholdsvis A) observasjoner, B) havmodell, C) klimatologi og D) MCVM-metoden for område 8 i Barentshavet

Figur 5.3 og Figur 5.4 viser RMS-feilen (RMSE) mellom midlere TL (øverste panel) og standardavvik (nederste panel) for henholdsvis områdene i Norskehavet og Barentshavet. RMSE er beregnet med

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \left( \overline{TL}_{Obs}^{i,j} - \overline{TL}_{source}^{i,j} \right)^2}{M \times N}} \quad (5.1)$$

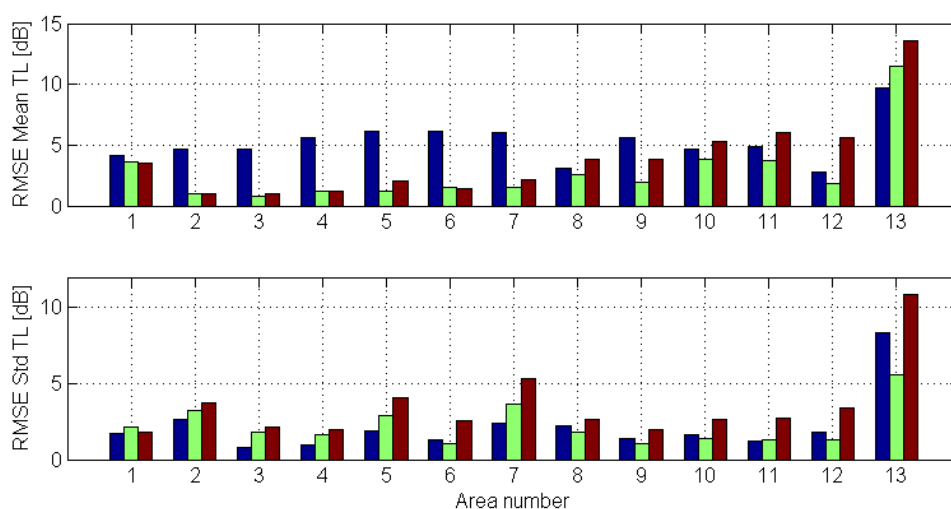
hvor  $\overline{TL}_{Obs}$  er midlere TL beregnet med observert LHPer,  $\overline{TL}_{source}$  er midlere TL beregnet med LHPer fra havmodell, klimatologi eller MCVM, M er antall dybdeceller i TL matrisen og N er antall lengdeceller. N er 100 (20 km) for alle områdene, mens M er satt til det antall dybdeceller som tilsvarer dypeste LHP i området og maks 20 (200 meter).

For RMSE for midlere TL (Figur 5.3, øverst) ser vi at MCVM (grønn) er bedre enn både havmodell (blå) og klimatologi (rød) for de fleste områdene. Klimatologi er marginalt bedre enn MCVM for område 1 og 6, mens havmodell er bedre enn MCVM i område 13. Område 13 skiller seg dog ut ved at RMSE er høy for alle tre metodene. Når det gjelder RMSE for standardavviket

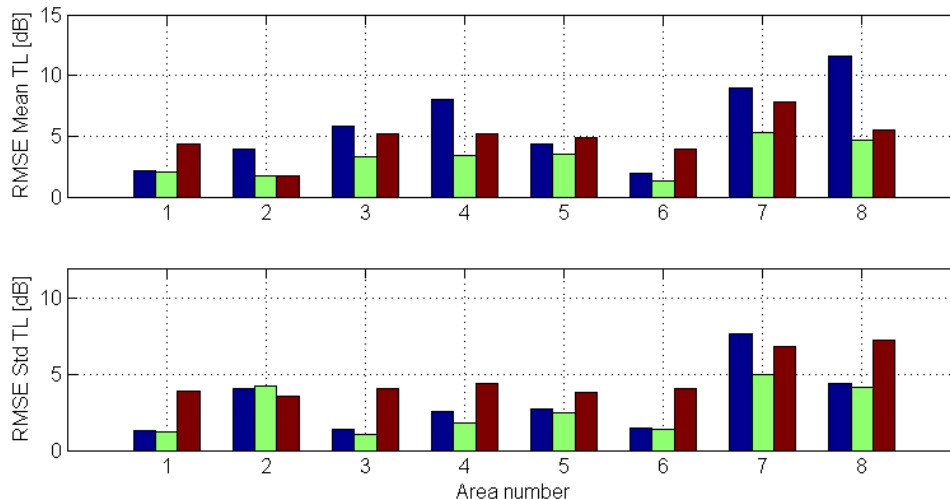
(Figur 5.3, nederst) er fordelingen jevnere mellom MCVM og havmodell, hvor de er best i henholdsvis 6 og 7 områder. Foruten i område 1 er klimatologi dårligst på standardavvik. Det er forventet siden klimatologien inneholder lite variasjon.

For områdene i Barentshavet (Figur 5.4, øverst) er MCVM bedre enn både klimatologi og havmodell på midlere TL i alle de 8 områdene. MCVM er også bedre enn havmodell i 7 av 8 områder når det kommer til standardavvik (Figur 5.4, nederst). Ser man på RMSE for midlere TL for alle 21 områder gir MCVM bedre resultat enn havmodell og klimatologi i henholdsvis 20 av 21 og 19 av 21 områder. For standardavvik er tallene 13 av 21 og 19 av 21 for i favør MCVM mot henholdsvis havmodell og klimatologi.

Gjennomsnittlig midlere TL og standardavvik for Norskehavet og Barentshavet er gjengitt i Tabell 5.1 og viser at MCVM gir bedre resultater sammenlignet med observasjoner enn havmodell og klimatologi. MCVM gir lavest gjennomsnittlig RMSE bortsett fra for standardavvik i Norskehavet, hvor det er likt for havmodell og MCVM (2,2 dB). Samtidig ser man at klimatologi er bedre enn havmodell når det kommer til midlere TL.



Figur 5.3 RMSE for midlere TL (øverst) og standardavvik (nederst) for alle områdene i Norskehavet. RMSE for TL beregnet med observasjoner og havmodell (blå), RMSE for TL beregnet med observasjoner og klimatologi (rød) og RMSE for TL beregnet med observasjoner og MCVM (grønn).



Figur 5.4 RMSE for midlere TL (øverst) og standardavvik (nederst) for alle områdene i Barentshavet. RMSE for TL beregnet med observasjoner og havmodell (blå), RMSE for TL beregnet med observasjoner og klimatologi (rød) og RMSE for TL beregnet med observasjoner og MCVM (grønn).

	Gj. snitt RMSE midlere TL		Gj. snitt RMSE standardavvik TL	
	Norskehavet	Barentshavet	Norskehavet	Barentshavet
Havmodell	5.2	5.8	2.2	3.2
Klimatologi	3.9	4.8	3.5	4.8
MCVM	2.8	3.1	2.2	2.7

Tabell 5.1 Gjennomsnittlig RMSE for midlere TL og standardavvik for Norskehavet og Barentshavet.

## 6 Konklusjon

For å beregne lydubredelse i havet er man avhengig av riktig lydastighetsprofil og spesielt at den vertikale gradienten til lydastigheten er korrekt. Siden lydastigheten i havet varierer er det viktig med en realistisk beskrivelse av både midlere lydastighetsprofil i et område og hvilken variasjon man kan forvente til lydastigheten i området.

Erfaringer har vist at numeriske havmodeller ikke alltid modellerer lydastighetsprofiler med tilstrekkelig nøyaktighet for akustisk modellering. Ofte klarer de ikke å gjengi vertikalgradientene godt nok, både når det gjelder styrke og plassering i vannvolumet. Klimatologi har vist seg å kunne gi en bedre representasjon av observert lydastighetsprofil, men en ulempe med klimatologiske databaser er at de ikke inneholder tilstrekkelig informasjon om forventet variasjon. Havmodeller kan gi informasjon om variasjonen hvis havmodellen er simulert over flere år eller kjørt som ensemble.

En metode for å kombinere lydastighetsprofiler fra klimatologi med varians fra en havmodell er presentert i dette studiet. Ved å bruke empirisk ortogonale funksjoner kan man erstatte midlere

lydhastighetsprofil fra havmodellen med midlere lydhastighetsprofil fra klimatologi. Dermed får man et nytt datasett med midlere lydhastighetsprofil fra klimatologi, men hvor man samtidig har bevart variansen fra havmodellen. Denne metoden er testet på 21 områder i Barentshavet og Norskehavet. Resultatene viser at man får en bedre beskrivelse av det modellerte akustiske feltet med lydhastighetsprofiler fra den foreslåtte metoden sammenlignet med observerte lydhastighetsprofiler enn om man bruker lydhastighetsprofiler fra havmodell eller klimatologi.

Metoden er forventet å gi operativ merverdi sammenlignet med hva som benyttes i dag, det anbefales derfor at metoden umiddelbart tas i bruk av forsvaret. Dette kan gjøres i første omgang ved at resultater tas inn som en del av Environmental Briefing Docket – et produkt som produseres og vedlikeholdes av KNMT/TAS/METOC og som brukes i planlegging av operasjoner og øvelser.

## Referanser

- [1] M. R. Carnes, "Description and Evaluation of GDEM-V 3.0," DTIC Document 2009.
- [2] L. P. Røed, "Documentation of simple ocean models for use in ensemble predictions," Norwegian Meteorological Institute 3/2012, 2012.
- [3] P. Østenstad, "FFI-rapport 2014/00658. Operativ nytte av ensemblevarsling for hav," 2014.
- [4] J. M. Lewis, "Roots of Ensemble Forecasting," *Monthly Weather Review*, vol. 133, p. 20, 2005.
- [5] V. S. Lien, Y. Gusdal, J. Albertsen, A. Melsom, and F. B. Vikebø, "Evaluation of a Nordic Seas 4 km numerical ocean model archive," *Fisken og Havet*, pp. 7-79, 2013.
- [6] A. Melsom, V. S. Lien, and W. P. Budgell, "Using the Regional Ocean Modelling System (ROMS) to improve the ocean circulation from a GCM 20th century simulation," *Ocean dynamics*, vol. 59.6, pp. 969-981, 2009.
- [7] J. Albretsen and L. P. Røed, "Decadal long simulations of mesoscale structures in the northern North Sea/Skagerrak using two ocean models," *Ocean Dynamics*, vol. 60.4, pp. 933-955, 2010.
- [8] P. Østenstad, "FFI-rapport 2007/01573. Forskjeller i transmisjonstap beregnet med målt, modellert og klimatologisk lydshastighetsprofil " 2007.
- [9] J. K. Jensen, K. T. Hjelmervik, and P. Østenstad, "Finding Acoustically Stable Areas Through Empirical Orthogonal Functions (EOF) Classification," *Oceanic Engineering*, vol. 37, pp. 103-111, 2012.
- [10] C. W. Therrien, *Discrete random signals and statistical signal processing*: Prentice Hall PTR, 1992.
- [11] A. F. Shchepetkin and J. C. McWilliams, "The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic mode," *Ocean Modelling*, vol. 9.4, pp. 347-404, 2005.
- [12] S. Levitus, J. Antonov, O. Baranova, T. Boyer, C. Coleman, H. Garcia, *et al.*, "The World Ocean Database," *Data Science Journal*, vol. 12, pp. WDS229-WDS234, 2013.
- [13] K. T. Hjelmervik and K. Hjelmervik, "Estimating temperature and salinity profiles using empirical orthogonal functions and clustering on historical measurements," *Ocean Dynamics*, vol. 63, pp. 809-821, 2013.
- [14] E. M. Dombestein, "Lybin 6.1 - user manual," FFI-rapport 2012/01463, 2012.