



## Propagasjonsforhold for radiofrekvensspekteret i norske havområder — klimatologi for fordampningsducthøyde og atmosfærisk stabilitet

Petter Østenstad  
Marthe Marie Meltzer



**Propagasjonsforhold for  
radiofrekvensspekteret i norske havområder  
– klimatologi for fordampningsducthøyde og  
atmosfærisk stabilitet**

Petter Østenstad  
Marthe Marie Meltzer

---

---

## **Emneord**

Atmosfærisk refraksjon  
Meteorologi  
Radiometeorologi  
Radar

## **FFI-rapport**

19/00865

## **Prosjektnummer**

1405

## **ISBN**

P: 978-82-464-3172-7

E: 978-82-464-3173-4

## **Godkjenner**

Ottar Graasvoll, *forskningsleder*

Trygve Sparr, *forsknings sjef*

*Dokumentet er elektronisk godkjent og har derfor ikke håndskreven signatur.*

## **Opphavsrett**

© Forsvarets forskningsinstitutt (FFI). Publikasjonen kan siteres fritt med kildehenvisning.

---

---

## Sammen drag

Kunnskap og oversikt over de atmosfæriske propagasjonsforholdene i det marine grenselaget er viktig for planlegging og gjennomføring av militære operasjoner på sjøen. Propagasjon i radiofrekvensspekteret er avhengig av de refraktive forholdene, som bestemmes av den vertikale fordelingen av lufttemperatur, mengden vanndamp og lufttrykk. Særlig interessant er fordampningsduct, som skyldes negative refraktivitetsgradienter i luftlaget fra 0–40 meter over havoverflaten. Slike fordampningsducter er alltid til stede over havet, men varierer i høyde og styrke. Fordampningsducthøyde (EDH) kan enten måles eller beregnes ved å benytte bulkmodeller. En svakhet ved slike bulkmodeller er at små variasjoner i inngangsverdiene potensielt kan gi store variasjoner i beregnet EDH under stabile atmosfæriske forhold. Stabile/ustabile atmosfæriske forhold er definert ved at lufttemperaturen er høyere/lavere enn overflate-sjøtemperaturen.

Fram til nå har det ikke eksistert noen tilstrekkelig detaljert oversikt over forventet EDH med tilhørende variasjon i norske havområder og tilstøtende farvann. For å lage en slik klimatologi for atmosfærisk stabilitet og EDH har vi i denne studien brukt re-analyser fra NORA10-arkivet til Meteorologisk institutt og bulkmodellen Naval Atmospheric Vertical Surface Layer Model (NAVSLaM).

Resultatene fra studien viser at ustabile forhold dominerer i norske havområder i vintermånedene fra november til februar, mens det i perioden april til juli er områder med stabile forhold opp mot 60 % av tiden, spesielt nær norskekysten samt i Skagerrak og Nordsjøen. I slike stabile forhold bør resultatene fra bulkmodeller brukes med større forsiktighet, og man bør vurdere å estimere EDH fra målt refraktivitetsprofil fra atmosfæriske målinger for å vurdere gyldigheten av resultatene fra NAVSLaM.

Områder med de laveste median EDH-verdiene varierer med tid og sted. I åpent hav finner vi de høyeste verdiene i desember/januar og de laveste i juli. Nær norskekysten er median EDH høyest i september. Nær kysten i sør er median EDH lavest i mars/april, mens lengst nord langs kysten er median EDH lavest i juli. I åpent hav er EDH-variasjonen størst i august/september og lavest i perioden desember til februar. Langs norskekysten og i Skagerrak er det store variasjoner i EDH fra april til september.

I rapporten ser vi også på effekten fordelingen av EDH har på beregnet radarrekkevidde for en X-båndradar. Det er valgt to posisjoner som representerer åpent hav og kystnære forhold. Beregningene viser at estimert radarrekkevidde i åpent hav lå mellom 18,4 og 21,5 km, størst rekkevidde i perioden desember til januar og lavest i perioden mai til juni, mens variasjonen innenfor hver måned var ganske lik gjennom hele året. Kystnært lå beregnet radarrekkevidde mellom 17 og 23,7 km med lavest rekkevidde i perioden februar til mars og størst i august. Til forskjell fra posisjonen i åpent hav var det store variasjoner i fordelingen av radarrekkevidde mellom mai og august. Beregnet rekkevidde lå stort sett alltid over radarrekkevidde beregnet med standard atmosfære. Resultatene fra studien bør implementeres i Sjøforsvarets taktiske publikasjon nr. 40 (STP-40) og i et eventuelt framtidig beslutningsstøtteverktøy.

---

---

## Summary

Knowledge of the atmospheric propagation conditions in the marine boundary layer is essential when planning and conducting military naval operations. Propagation in the radio frequency spectrum is dependent on the refractive conditions, which are determined by the vertical distribution of water vapor, air temperature and atmospheric pressure. Of particular interest is the evaporation duct, caused by negative refractive gradients in the layer between 0 and 40 meters above the sea surface. Such evaporation ducts are always present over the ocean, but they vary in height and strength. Evaporation duct height (EDH) can either be measured or calculated by using bulk models. A weakness of such bulk models is that small variations in input values can potentially cause large variations in the calculated EDH in stable atmospheric conditions. Stable/unstable conditions are defined as the air temperature being higher/lower than the sea surface temperature.

Currently there is no statistical overview over expected EDH and its corresponding variations for Norwegian waters and surrounding areas that are sufficiently detailed. We have used hindcast data from the Norwegian Meteorological institute's NORA10 archive to develop a climatology for atmospheric stability and EDH by combining the hindcast data with the bulk model Naval Atmospheric Vertical Layer Model (NAVSLaM). Our results show that the Norwegian waters are dominated by unstable conditions during the winter months from November to February. From April to July stable conditions are present up to 60% of the time, especially near the Norwegian coast, in Skagerrak and the North Sea. The results from bulk models should be used with caution in stable conditions, and estimation of EDH from measured refractivity profiles should be considered.

Areas with the highest median EDH values vary, depending on the season and location. In open ocean areas the highest median EDH values are found in December and January, while the lowest values are found in July. Closer to the Norwegian coast the highest median EDH values are found in September. In the coastal areas of southern Norway and Skagerrak the lowest median EDH is found in March and April, while further north along the coast the lowest values are found in July. The variation in EDH is largest in open ocean areas in August and September and lowest in the period from December to February. Along the Norwegian coast and in Skagerrak large variations in EDH are found from April to September. We have also studied the impact of the EDH distribution on computed radar detection range. We have chosen two different locations, representing open ocean and coastal conditions. At the open ocean location, our calculations showed that computed radar detection ranges were between 18.4 and 21.5 km, with greatest range in December and January and shortest from May to June. The distribution in radar detection range was more or less the same throughout the year. At the coastal location, computed radar detection ranges varied from 17 to 23.7 km, with shortest range in February and March and greatest in August. But unlike the open ocean location, we found great variations in monthly detection ranges in the period May to August. The results from this study should be implemented in the Norwegian Navy's Tactical Publication no. 40 (STP-40) and in a future tactical decision aid.

---

---

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>3</b>
<b>Summary</b>	<b>4</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>7</b>
<b>2 Teori</b>	<b>8</b>
<b>3 Datagrunnlag</b>	<b>8</b>
<b>4 Bulk-modell</b>	<b>9</b>
<b>5 Resultater og diskusjon</b>	<b>10</b>
5.1 Air–Sea Temperature Difference (ASTD)	10
5.2 Fordampningsducthøyde (EDH)	13
5.3 Eksempler på radarrekkevidde	17
<b>6 Konklusjon</b>	<b>25</b>
<b>Forkortelser og akronymer</b>	<b>27</b>
<b>Referanser</b>	<b>28</b>





---

---

# 1 Innledning

Å ha oversikt og kontroll over propagasjonsforholdene i et maritimt operasjonsmiljø er essensielt for planlegging av militære operasjoner til havs. Elektromagnetiske bølger i radiofrekvensspekteret påvirkes av de atmosfæriske forholdene ved at strålene bøyes av (refrakterer). Skipsradarer som opererer i frekvensbåndet 2–18 GHz, er spesielt påvirket av forholdene nær havoverflaten (0–50 m). I dette området forårsaker den konstante fordampningen av sjøen til omkringliggende luft en såkalt fordampningsduct [1]. Radarbølger i det nevnte frekvensbåndet kan fanges i slike ducter og gi radaren økt rekkevidde nær havoverflaten, som på engelsk kalles for *trapping*.

De refraktive forholdene bestemmes av vertikalfordelingen av lufttemperatur, relativ fuktighet (vanndamp) og lufttrykk. Vertikale profiler av disse parameterne brukes til å beregne en modifisert refraktivitetsprofil (M-profil) og dens tilhørende fordampningsducthøyde, som på engelsk kalles *evaporation duct height* (EDH). Siden det er utfordrende å måle vertikallprofiler operasjonelt, bruker man ofte bulk-modeller til å beregne slike profiler. Én slik modell er Naval Atmospheric Vertical Layer Model (NAVSLaM) [2]. For å beregne M-profiler og EDH i bulk-modeller trenger man lufttemperatur, relativ fuktighet, vindhastighet og lufttrykk i en kjent høyde over havet, samt overflatesjøtemperatur som inngangsverdier. En svakhet med bulk-modeller er at små variasjoner i inputparameterne gir potensielt store variasjoner i beregnet EDH under stabile atmosfæriske forhold, det vil si når lufttemperaturen er høyere enn overflatesjøtemperaturen [2]. Under slike stabile forhold bør man bruke resultatene fra bulk-modeller med mer forsiktighet, samt vurdere å måle EDH og refraktivitetsprofil i tillegg til bulk-måling eller istedenfor [3].

Oversikt over EDH og propagasjonsforhold har fram til nå ikke vært tilgjengelig for norske havområder på et tilstrekkelig detaljert nivå. Til å generere en slik oversikt (klimatologi) trenger man historiske værddata over et stort område. Slike data kan man få fra re-analyser fra numeriske værvarslingsmodeller. Meteorologisk institutt har et arkiv, NORA10 [4, 5], som dekker perioden fra 1958 og fram til i dag (oppdateres fortløpende med nye data). Vi har brukt data fra perioden 1980–2015 som input til NAVSLaM, for å generere månedlig statistikk for EDH, både medianverdier og forventet variasjon innenfor hver enkelt måned. I denne rapporten presenterer vi medianverdier og variasjon i EDH for alle måneder, samt fordeling av EDH og estimert radarrekkevidde for noen utvalgte posisjoner. Den estimerte radarrekkevidden er kun ment som et eksempel for å illustrere effekten av endringer i propagasjonsforhold; den faktiske radarrekkevidden – og påvirkningen av endringene – vil nemlig variere fra system til system. Vi presenterer også oversikt over når på året det er stabile atmosfæriske forhold, der NAVSLaM ikke er like god som i ustabile forhold.

Deler av arbeidet i denne rapporten ble presentert på symposiet «Bridging the gap between development and operational deployment of naval tactical decision aids» (SET-244) i Den Helder høsten 2017 [6] og er beskrevet i [7].

---

---

## 2 Teori

Propagasjon av elektromagnetiske bølger gjennom atmosfæren er påvirket av de refraktive forholdene, som er bestemt av den vertikale fordelingen av relativ fuktighet, lufttemperatur og -trykk. For bølger i radiofrekvensspekteret kan refraktiviteten,  $N$ , uttrykkes ved likningen

$$N = \frac{77.6}{T} \left( P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (2.1)$$

der  $P$  er lufttrykket (hPa),  $T$  er lufttemperaturen (K) og  $e$  er vanndamptrykket (hPa), hvor sistnevnte kan utledes fra relativ fuktighet. På grunn av jordens krumning bruker man ofte modifisert refraktivitet,  $M$ , gitt som

$$M = N + 0.157z \quad (2.2)$$

hvor  $z$  er høyden over bakken. Fordampningsducthøyden (EDH) er definert som høyden over havoverflaten hvor  $dM/dz = 0$ . For mer detaljer om refraktivitet og ulike propageringsforhold, se [8, 9].

## 3 Datagrunnlag

For å oppnå datadekning over et stort havområde er det brukt data fra hindcast-arkivet NORA10 [4, 5] til Meteorologisk institutt. Dataene er generert med værmodellen High Resolution Limited Area Model (HIRLAM), som har en horisontal oppløsning på 11x11 km og en tidsoppløsning på én time for perioden 1958 og fram til i dag (oppdateres fortløpende). HIRLAM dekker området som er vist i Figur 3.1. I dette arbeidet har vi tatt ut data fra et mindre område (90x200 gridpunkter, rød boks) for å redusere datamengden nok til å kunne håndtere det i MatLab[10]. NORA10-arkivet inneholder luft- og overflatesjøtemperatur, vindhastighet og relativ fuktighet, i tillegg til flere andre meteorologiske parametere. I dette arbeidet er det brukt lufttemperatur og relativ fuktighet i 2 meters høyde og vindhastighet i 10 meters høyde, og vi har brukt data fra tidsperioden 01.01.1980 til 31.12.2015 med én times oppløsning.



Figur 3.1 Dekningsområdet til HIRLAM-modellen (blå) og utsnittet som er brukt i denne studien (rød).

## 4 Bulk-modell

Til å beregne EDH og M-profiler bruker man vanligvis bulk-modeller. De fleste slike bulk-modeller er basert på Monin-Obukhov similaritets-teori (MOST), som beskriver turbulente egenskaper i det atmosfæriske grenselaget nær bakken (0–100 meter) [11]. I denne rapporten har vi brukt versjon 1.1 av bulk-modellen Navy Atmospheric Vertical Surface Layer Model (NAVSLaM) [2]. NAVSLaM har vist seg å være bedre enn bulk-modellen Paulus-Jeske [12, 13], som tidligere var en mye brukt modell for beregning av EDH og M-profiler [14].

Som inngangsverdier bruker NAVSLaM lufttemperatur ( $T$ ), relativ luftfuktighet ( $RH$ ), lufttrykk ( $P$ ) og vindhastighet i en kjent høyde over havoverflaten. De innbyrdes høydene disse parameterne er målt i, kan være ulike. I tillegg brukes overflatesjøtemperatur. Med disse parameterne kan man da med NAVSLaM (og andre bulk-modeller) beregne vertikalprofiler av  $T$ ,  $RH$  og  $P$  og dermed beregne M-profiler med Ligning (2.1) og (2.2).

Bulk-modeller basert på MOST er sensitive for variasjoner i atmosfærisk stabilitet, og de empirisk utledede stabilitetsfunksjonene er forskjellige for de ulike bulk-modellene. En av

---

---

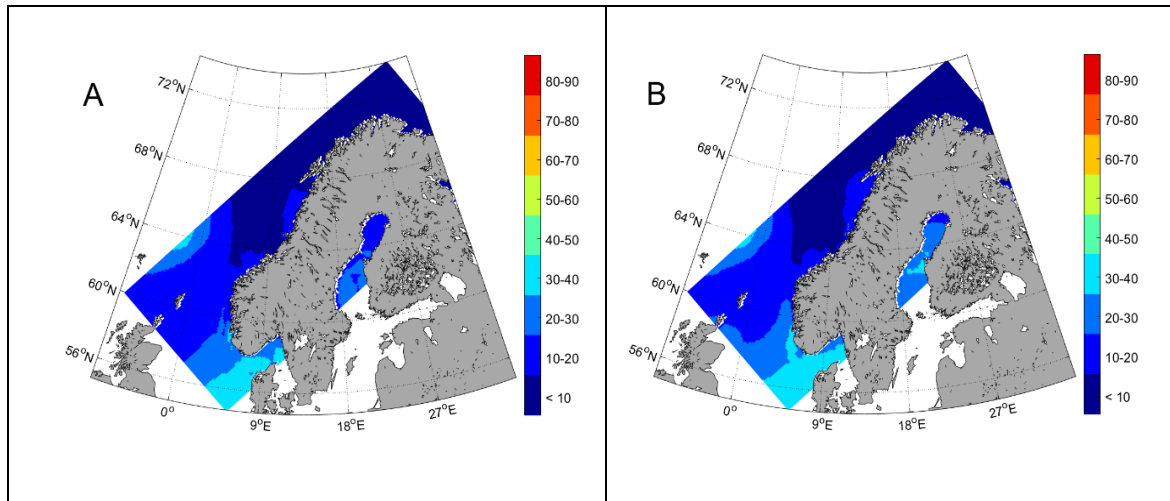
svakhetene til alle slike bulk-modeller er at de kan gi usikre resultater når lufttemperaturen er høyere enn overflatesjøtemperaturen. Forskjellene i temperatur betegnes ofte som *Air–Sea Temperature Difference* (ASTD), altså luft- minus sjøtemperatur. Spesielt når ASTD er positiv og liten, gir små variasjoner i inputparameterne til disse bulk-modellene potensielt store variasjoner i beregnet EDH. Under slike forhold bør man bruke resultatene fra NAVSLaM og andre bulk-modeller med større forsiktighet enn i ustabile forhold, og man bør vurdere å estimere EDH fra M-profilmålinger for å bekrefte/avkrefte resultatene fra NAVSLaM.

## 5 Resultater og diskusjon

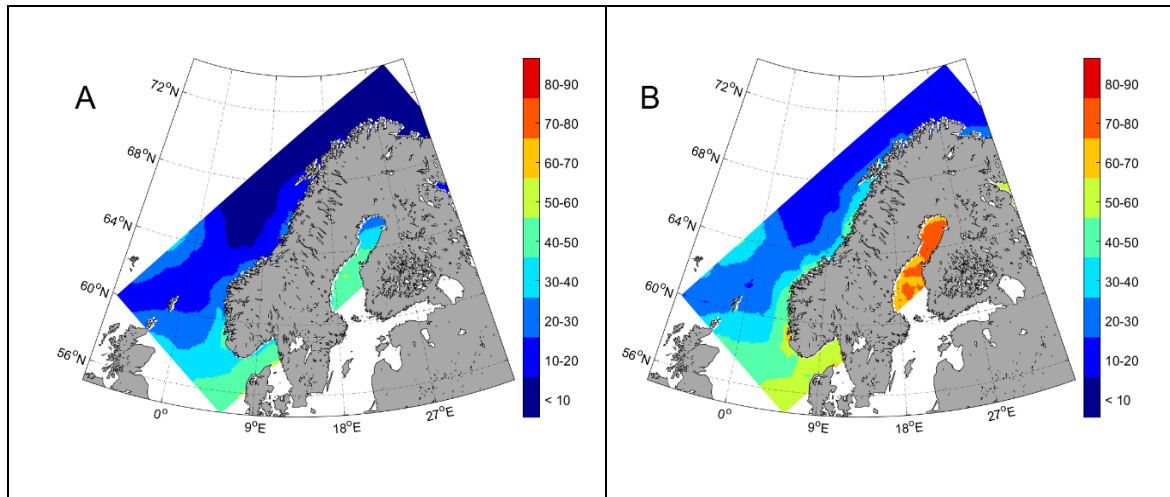
I dette kapittelet presenterer vi månedlige verdier for prosentvis fordeling av  $ASTD > 0$ , median og variasjon av EDH. I tillegg viser vi noen eksempler på fordeling av EDH og estimert radarrekkevidde i noen utvalgte geografiske punkter. Bottenviken, havområdet mellom Sverige og Finland ( $62^{\circ}$ – $68^{\circ}$  N,  $17^{\circ}$ – $24^{\circ}$  E), er vist i kartene, men vil ikke bli diskutert i rapporten siden fokuset er norske farvann og omegn.

### 5.1 Air–Sea Temperature Difference (ASTD)

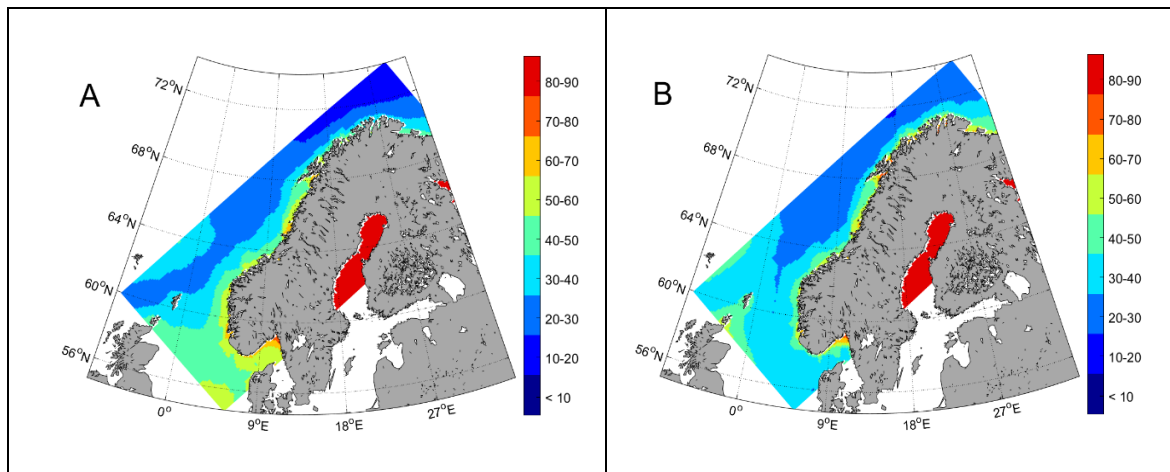
Figur 5.1–Figur 5.6 viser prosentvis fordeling for  $ASTD > 0$  gjennom årets 12 måneder. Det overordnede bildet viser at sannsynligheten for  $ASTD > 0$  er minst i månedene november til februar. I disse månedene ligger sannsynligheten for  $ASTD > 0$  på under 30 %, bortsett fra i Skagerrak og sørlige del av Nordsjøen ( $55^{\circ}$ – $59^{\circ}$  N,  $3^{\circ}$ – $10^{\circ}$  E) hvor sannsynligheten ligger mellom 30–40 % i januar og februar. Områdene med lavest sannsynlighet for  $ASTD > 0$  finner vi i Norskehavet og Barentshavet (fra ca.  $64^{\circ}$  N og nordover). Utover våren og sommeren øker sannsynligheten for  $ASTD > 0$ . Områdene i Skagerrak og sørlige Nordsjøen når høyeste sannsynlighet for  $ASTD > 0$  i april/mai (Figur 5.2 B og Figur 5.3 A), mens områdene i Norskehavet og Barentshavet når sitt maksimum i juli (Figur 5.4 A). Legg også merke til at sannsynligheten for  $ASTD > 0$  er høyere nær kysten enn lenger ute i havet i perioden april til august (Figur 5.2 B–Figur 5.4). Fra september minker sannsynligheten igjen for  $ASTD > 0$  og minkingen skjer raskest i de sørlige og nordlige delene av området (Figur 5.5). Legg merke til at Skagerrak og sørlige Nordsjøen har lavest sannsynlighet for  $ASTD > 0$  i oktober/november (Figur 5.5 B og Figur 5.6 A), mens resten av området når sitt minimum i desember/januar (Figur 5.6 B og Figur 5.1 A). Den lave sannsynligheten for  $ASTD > 0$  i vintermånedene skyldes hovedsakelig at havet har større varmekapasitet enn landmassene. Havet fungerer som et varmereservoar og har dermed generelt høyere temperatur enn omkringliggende luft i denne perioden. Utover våren og sommeren er det motsatt effekt. Havet varmes opp saktere enn lufta og sannsynligheten for  $ASTD > 0$  øker. Særlig er denne effekten framtreddende nær store landmasser hvor varm luft kommer ut over havet.



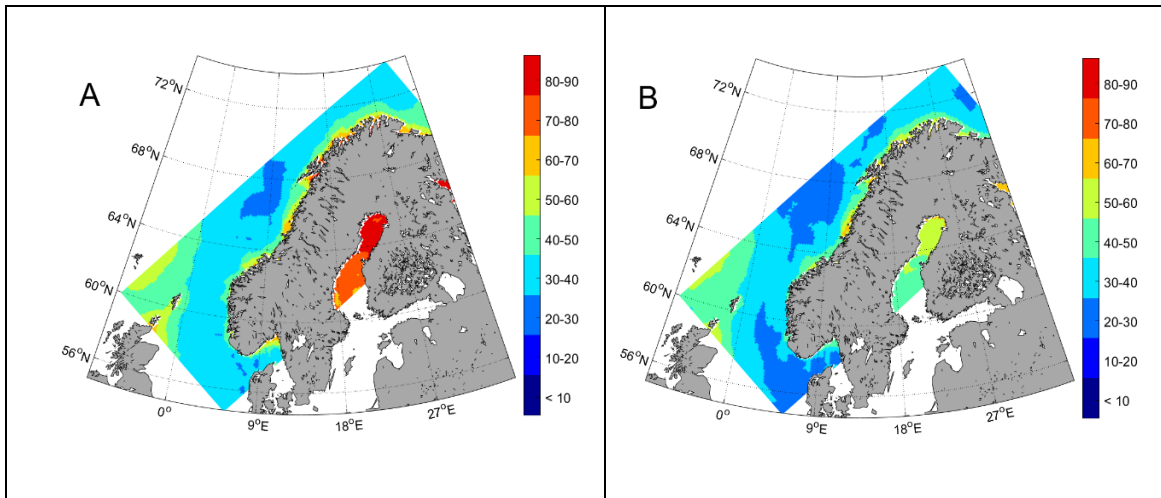
Figur 5.1 Sannsynlighet for ASTD > 0 i A) januar og B) februar.



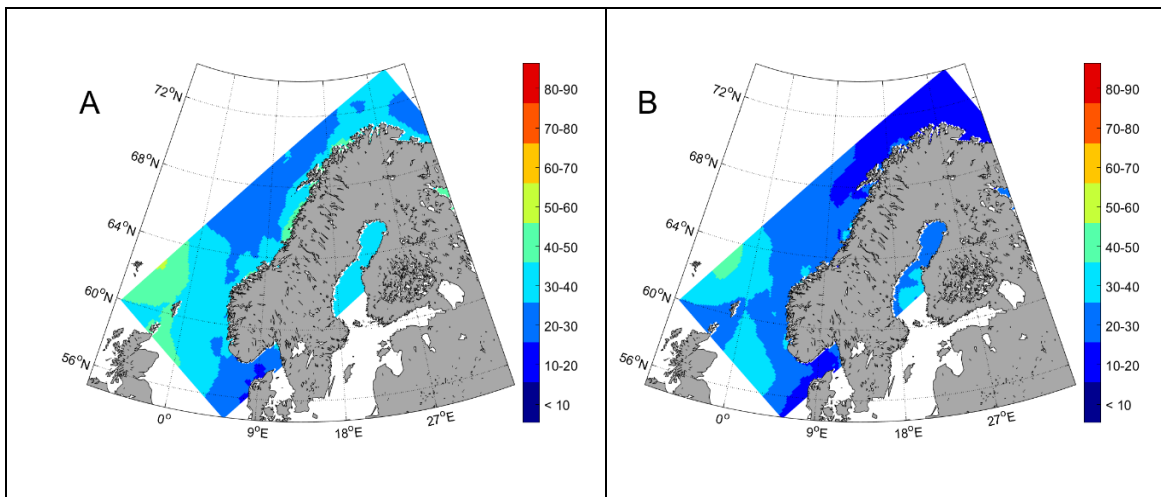
Figur 5.2 Sannsynlighet for ASTD > 0 i A) mars og B) april.



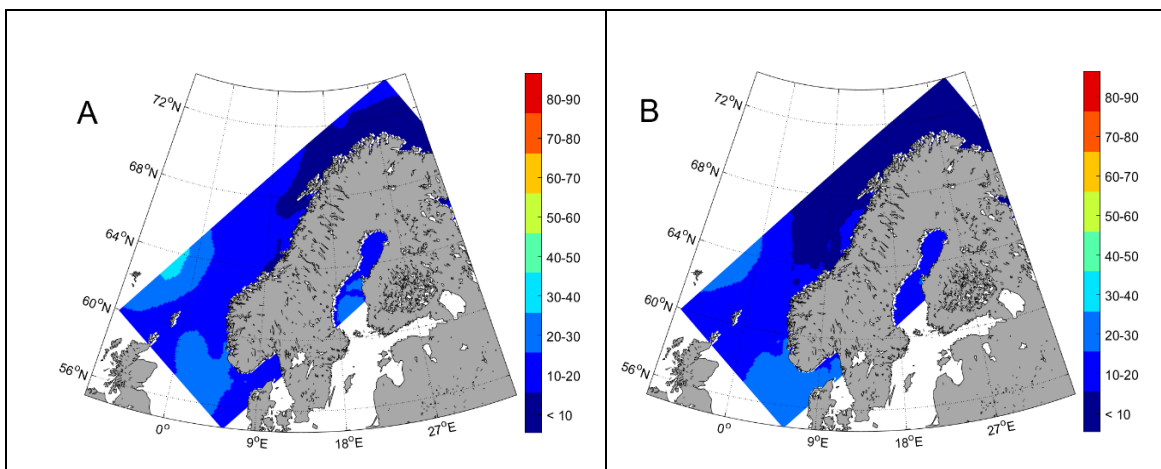
Figur 5.3 Sannsynlighet for ASTD > 0 i A) mai og B) juni.



Figur 5.4 Sannsynlighet for  $ASTD > 0$  i A) juli og B) august.



Figur 5.5 Sannsynlighet for  $ASTD > 0$  i A) september og B) oktober.



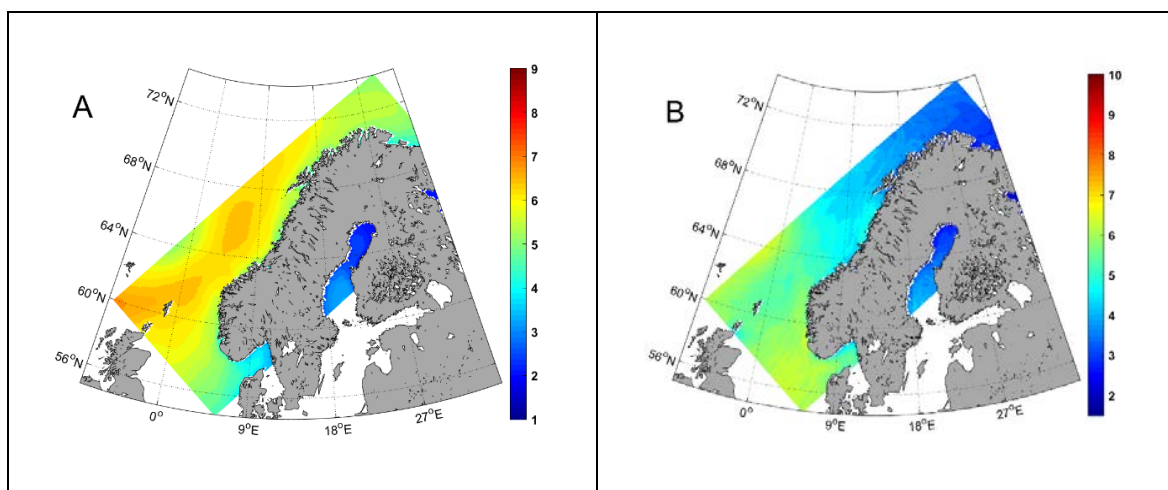
Figur 5.6 Sannsynlighet for  $ASTD > 0$  i A) november og B) desember.

## 5.2 Fordampningsduktthøyde (EDH)

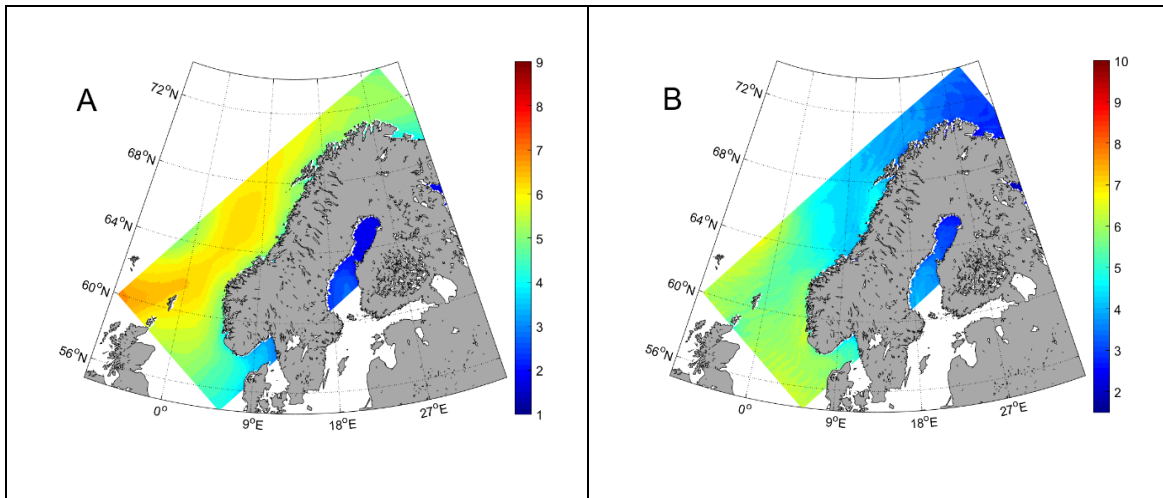
Hvert geografiske punkt i datasettet inneholder rundt 26 000 tidspunkter per måned for alle 36 år. For å redusere regnetiden ble det valgt å gjøre et tilfeldig uttrekk av 3 000 tidspunkter som man beregner EDH fra. Å redusere antallet tidspunkt til 3 000 per måned var tilstrekkelig for å være representativt for en hel måned.

Medianverdiene gjennom året viser at man generelt har høyere EDH i perioden oktober til mars (Figur 5.7 A–Figur 5.9 A og Figur 5.16 A–Figur 5.18 A) enn i perioden april til september (Figur 5.10 A–Figur 5.15 A). Unntaket er for områdene i Skagerrak og sørlige del av Nordsjøen, som har høyeste EDH fra juli til september (Figur 5.13 A–Figur 5.15 A). Man ser også at EDH om høsten øker først nært kysten, for så å bre seg utover i mer åpne havområder. De høyeste EDH-verdiene i Norskehavet i vinterhalvåret ligger på rundt 7 meter, mens de høyeste EDH-verdiene i Skagerrak og Nordsjøen i august (Figur 5.14 A) ligger på rundt 8 meter.

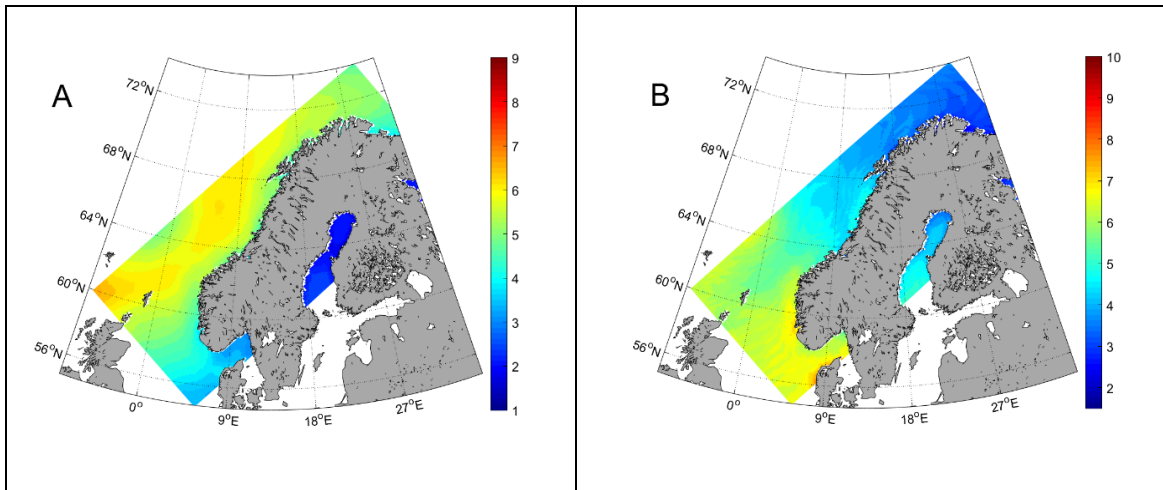
Variasjonen i EDH, som her er definert som forskjellen mellom 90. og 10. persentilen, er lavest i perioden desember til februar (Figur 5.18 B, Figur 5.7 B, Figur 5.8 B). Verdiene ligger mellom 2 og 6 meter, og de laveste verdiene finner man i de nordøstlige delene av området. Fra april (Figur 5.10 B) øker variasjonen betydelig i Skagerrak og langs kysten av Norge opp til omkring 68°N, før den fra mai (Figur 5.11) er høy også i de nordligste kystområdene. Den store variasjonen er til stede kystnært gjennom sommeren fram til september, og variasjonen øker også i hele dekningsområdet i samme periode (Figur 5.12 B og Figur 5.15 B). I Nordsjøen i september er variasjonen mellom 8 og 10 meter. Langs kysten er variasjonen opp imot 22 meter i perioden april til september (merk her at fargeskalaen bare går til 10 meter). Variasjonen langs kysten faller raskt i oktober (Figur 5.16 B) og mest i de nordlige kystområdene, mens variasjonen ikke faller like raskt lenger vekk fra kysten.



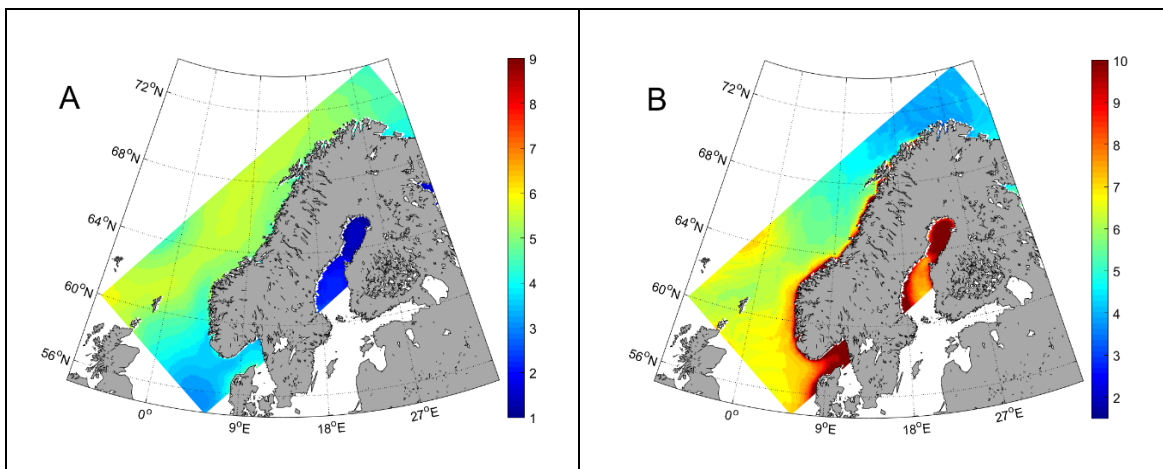
Figur 5.7 Median A) og differanse mellom 90. og 10. persentilen B) for EDH (m) i januar.



Figur 5.8 Median A) og differanse mellom 90. og 10. persentilen B) for EDH (m) i februar.

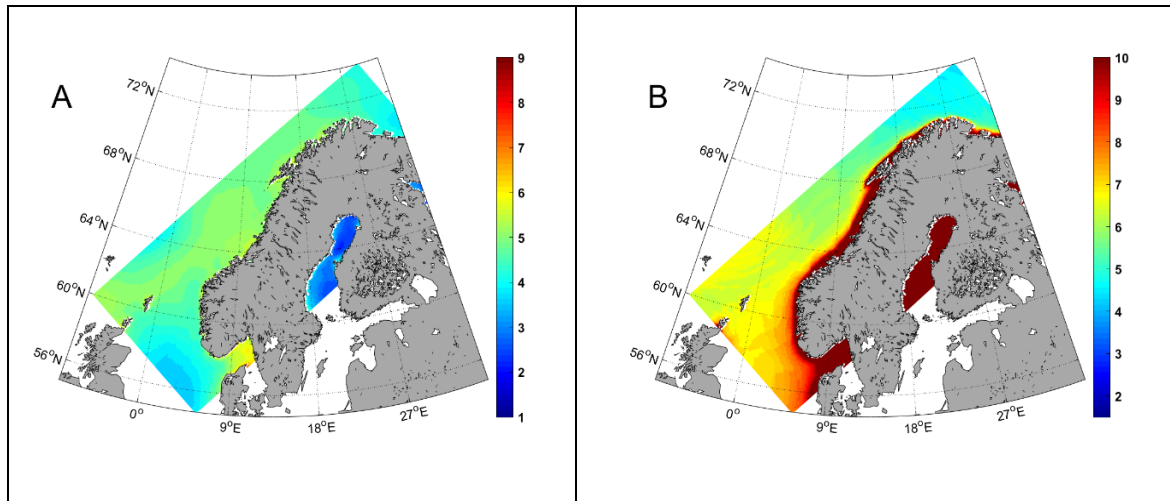


Figur 5.9 Median A) og differanse mellom 90. og 10. persentilen B) for EDH (m) i mars.

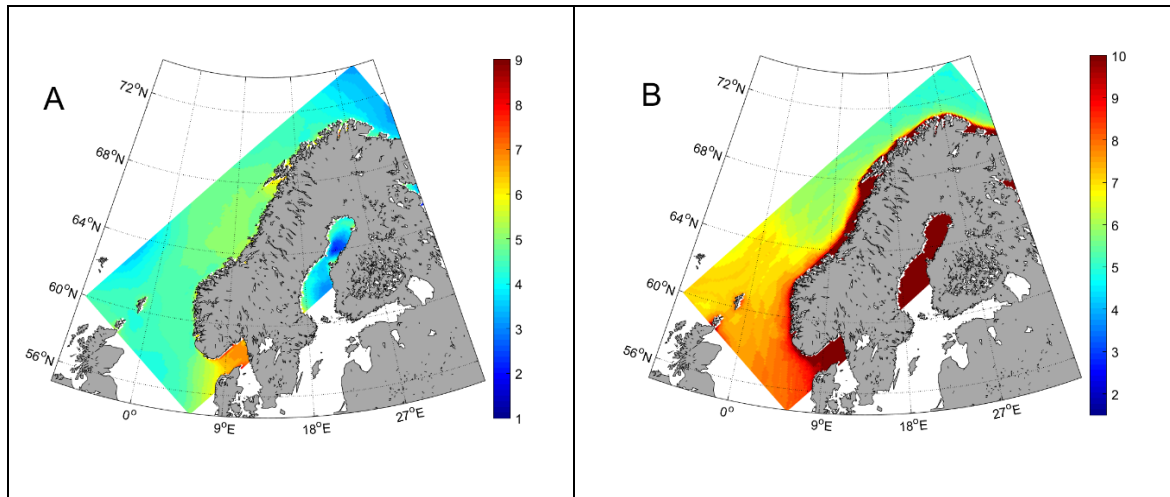


Figur 5.10 Median A) og differanse mellom 90. og 10. persentilen B) for EDH (m) i april.

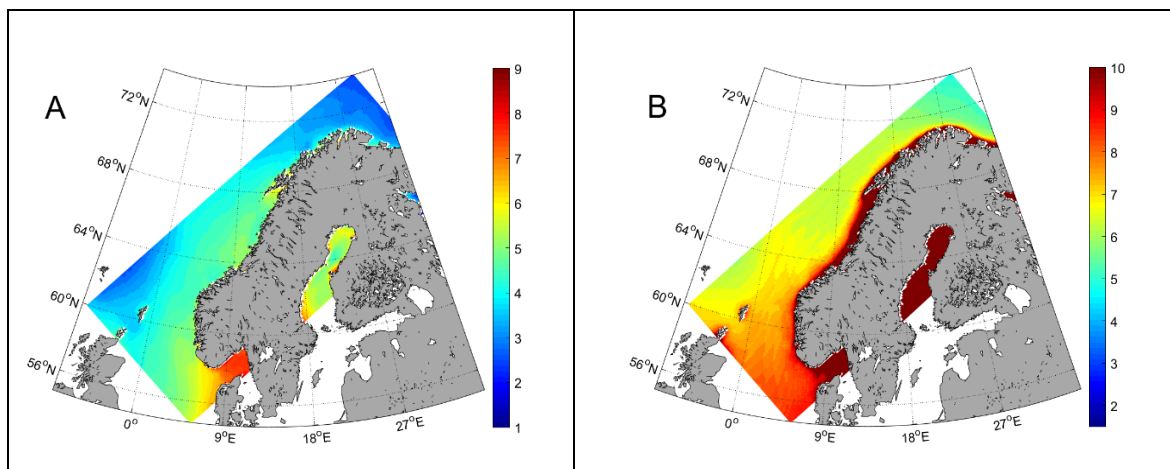




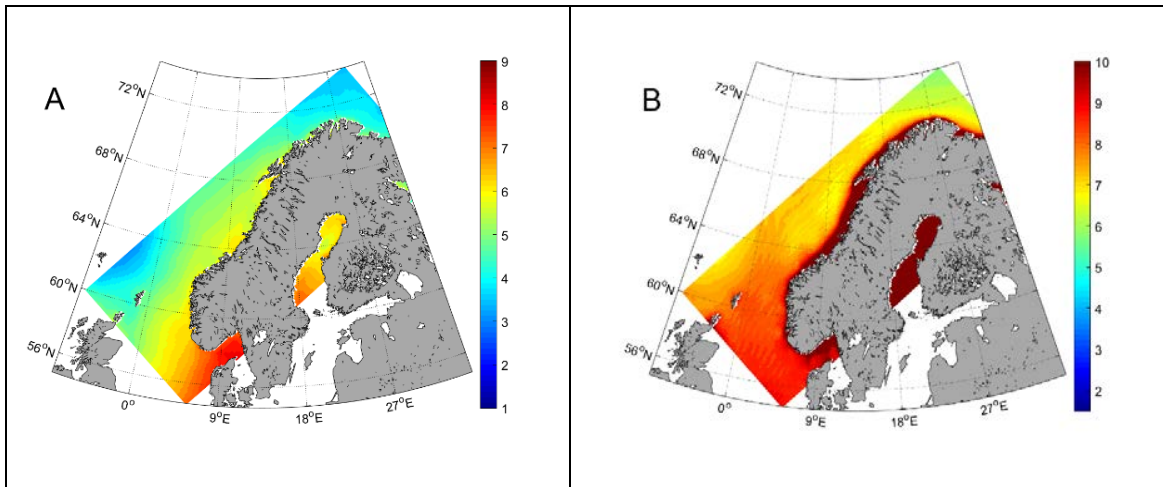
Figur 5.11 Median A) og differanse mellom 90. og 10. persentilen B) for EDH (m) i mai.



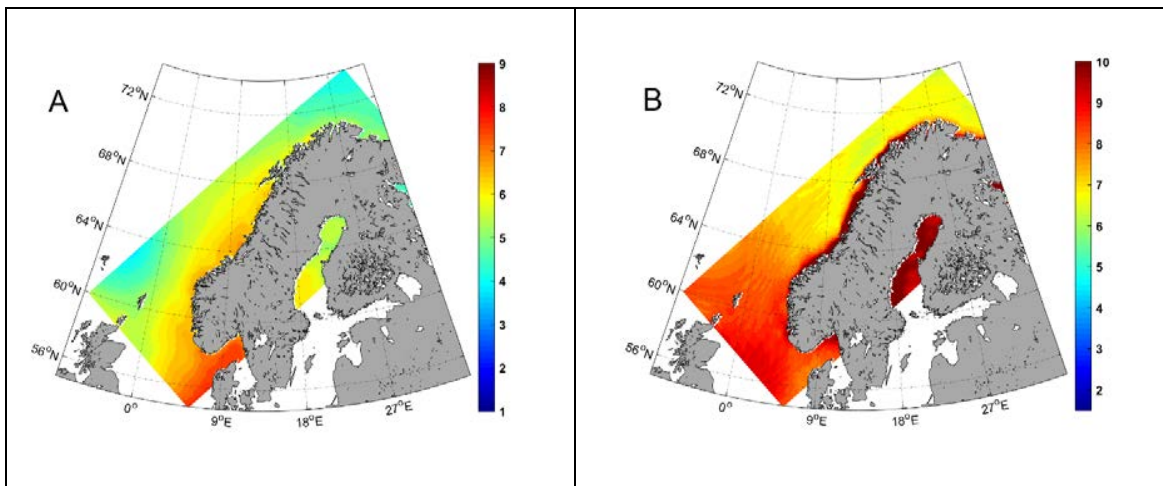
Figur 5.12 Median A) og differanse mellom 90. og 10. persentilen B) for EDH (m) i juni.



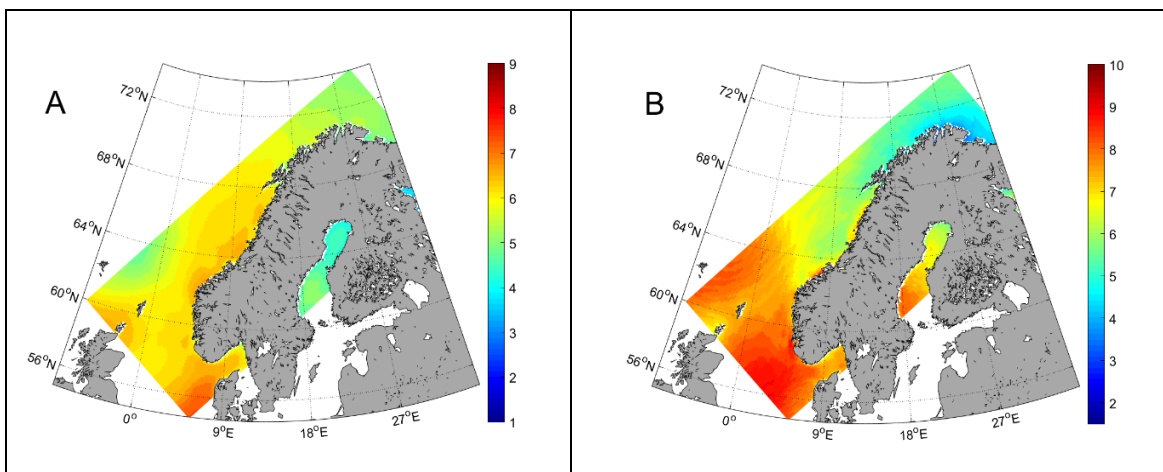
Figur 5.13 Median A) og differanse mellom 90. og 10. persentilen B) for EDH (m) i juli.



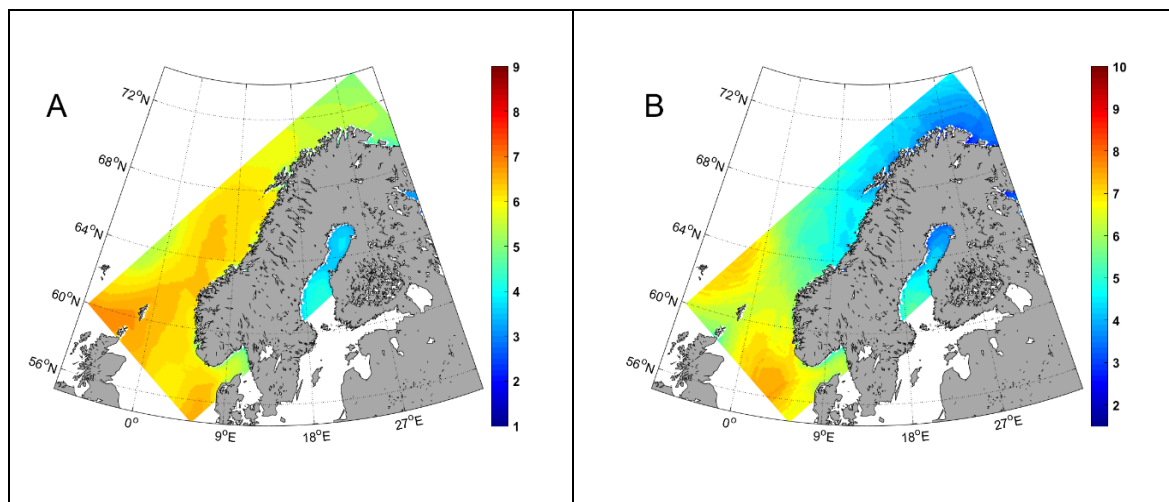
Figur 5.14 Median A) og differanse mellom 90. og 10. persentilen B) for EDH (m) i august.



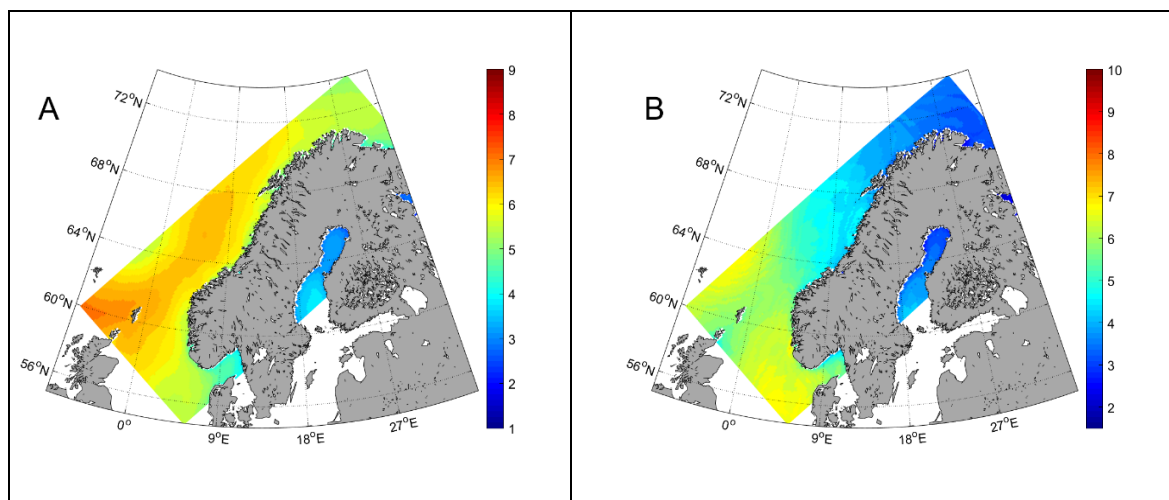
Figur 5.15 Median A) og differanse mellom 90. og 10. persentilen B) for EDH (m) i september.



Figur 5.16 Median A) og differanse mellom 90. og 10. persentilen B) for EDH (m) i oktober.



Figur 5.17 Median A) og differanse mellom 90. og 10. persentilen B) for EDH (m) i november.



Figur 5.18 Median A) og differanse mellom 90. og 10. persentilen B) for EDH (m) i desember.

### 5.3 Eksempler på radarrekkevidde

Klimatologien for EDH som er presentert i denne rapporten, gir mulighet for å estimere medianverdier og variasjon i radarrekkevidde. Vi presenterer her eksempler på fordeling av radarrekkevidde for hver måned for en radar som opererer i X-bånd. Den estimerte radarrekkevidden er kun ment som et eksempel for å illustrere effekten av endringer i propagasjonsforhold nær havoverflaten, siden den faktiske radarrekkevidden – og påvirkningen av endringene – vil variere fra system til system. Radarparameterne som er brukt, er oppgitt i Tabell 5.1. Advanced Propagation Model (APM) [15] er brukt til å beregne enveis propagasjonstap (PL) for et tilfeldig utvalg av 1 500 M-profiler for to gitte lokasjoner. M-profilene er valgt tilfeldig fra de 3 000 tidspunktene som er brukt i beregningen av EDH i kapittel 5.2. De to lokasjonene, A og B i Figur 5.19, er valgt for å representere henholdsvis åpent hav og kystnært miljø. Vi har valgt terskel for støybegrenset deteksjonsavstand, altså hvor signal-til-støy-forhold antas å være

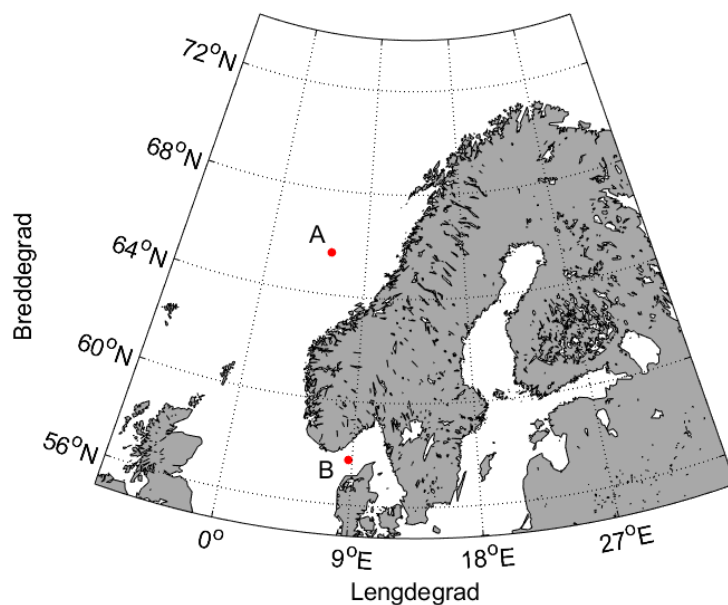
tilstrekkelig for å oppnå deteksjon, til å være den største avstanden hvor enveis propagasjonstap i 4 meters høyde er 140 dB. Valg av andre terskler for propagasjonstap og valg av annen høyde, vil føre til andre rekkevidder. Resultatene som er vist her, er dessuten forenklet siden vi blant annet ikke ser på effekten av clutter, som vil kunne øke ved ductingforhold, eller hvordan radardekningen i høyde er endret som følge av ductlaget. Radarrekkevidde beregnet med standard atmosfære [16] er vist med stiplet linje i Figur 5.20 - Figur 5.31.

<b>Radar-parameter</b>	Frekvens	Antenne-høyde	Antenne-type	Polarisering	Stråle-bredde	Elevasjon
<b>Verdi</b>	9 410 MHz	10 m	Gaussisk	Horisontal	1,3°	0°

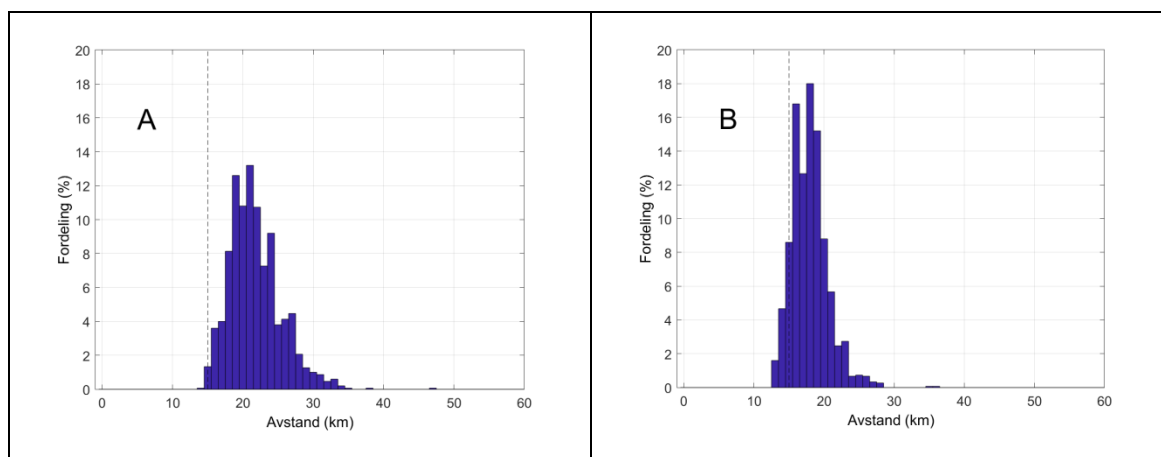
Tabell 5.1 Radarparametre brukt i APM for beregning av propagasjonstap (PL).

For lokasjon A (Figur 5.19) ligger medianen for beregnet radarrekkevidde gjennom året mellom 18,4 og 21,5 km, med størst rekkevidde i desember og januar (Figur 5.31 A og Figur 5.20 A), og kortest rekkevidde mellom mai og juli (Figur 5.24 A–Figur 5.26 A). Variasjonen i beregnet radarrekkevidde innenfor hver måned er også ganske lik gjennom året. Størst variasjon finner man i perioden oktober til januar (Figur 5.29 A–Figur 5.31 A og Figur 5.20), og minst variasjon finner man i perioden mai til juli (Figur 5.24 A–Figur 5.26 A), men forskjellen mellom de to periodene er liten. Median radarrekkevidde med tilhørende 10. og 90. persentiler er oppgitt i Tabell 5.2. Fordelingen av radarrekkevidde ligger for det meste over radarrekkevidde beregnet med standard atmosfære. Dette gjelder gjennom hele året.

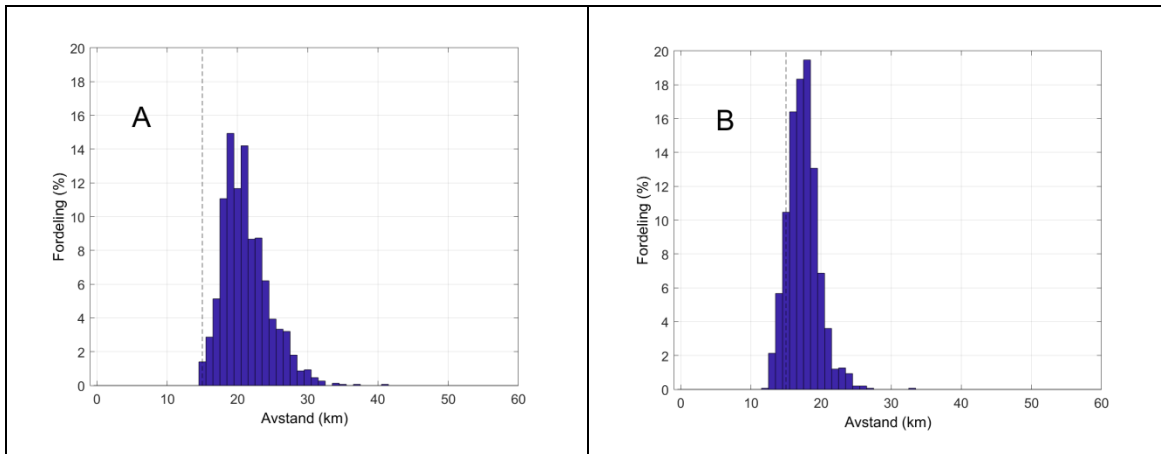
I den kystnære lokasjonen (B) i Figur 5.19 er mønsteret et annet i forhold til i A, både i hvilken periode man finner de høyeste og laveste medianverdiene av beregnet radarrekkevidde, og når variasjonen innenfor hver måned er størst. For lokasjon B finner man de laveste medianverdiene i februar og mars (Figur 5.21 B og Figur 5.22 B) med 17 km. Variasjonen i radarrekkevidde er også lavest i denne perioden. Medianverdien for beregnet radarrekkevidde øker utover sommeren og når sin høyeste verdi i august med 23,7 km (Figur 5.27 B). Fra og med april (Figur 5.23 B) øker variasjonen betydelig og den når toppen i august (Figur 5.27 B) før den avtar fram mot vinteren igjen. Median radarrekkevidde med tilhørende 10. og 90. persentiler er oppgitt i Tabell 5.2. Vi ser også at beregnet radarrekkevidde, både medianverdi og variasjon, som forventet følger mønsteret til EDH presentert i kapittel 5.2. Som for lokasjon A ligger er radarrekkevidden beregnet med standard atmosfære kortere enn radarrekkevidden beregnet med refraktivitetsprofiler fra klimatologien.



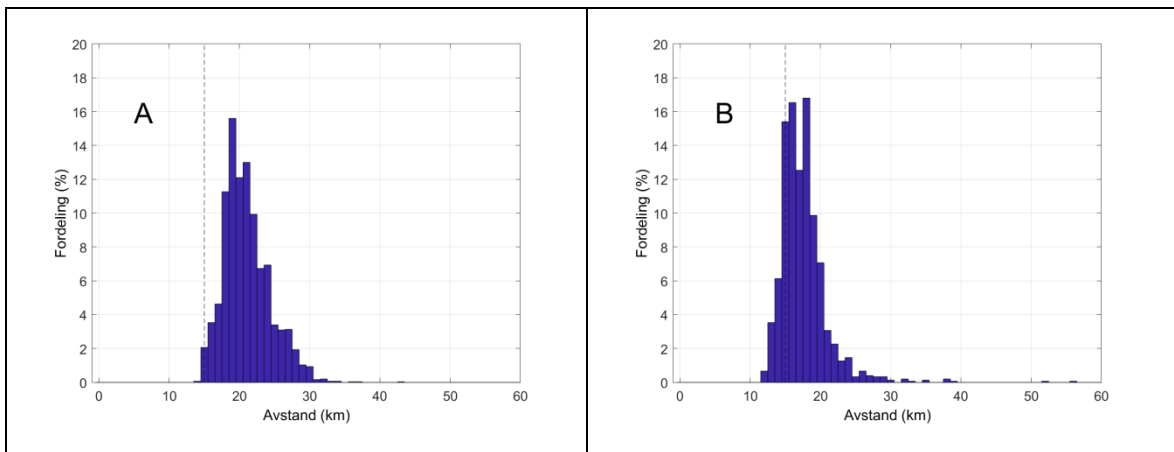
Figur 5.19 Oversiktskart som viser de to lokasjonene det er gjort PL-beregninger for. De to lokasjonene representerer åpent hav (A) og kystnært miljø (B).



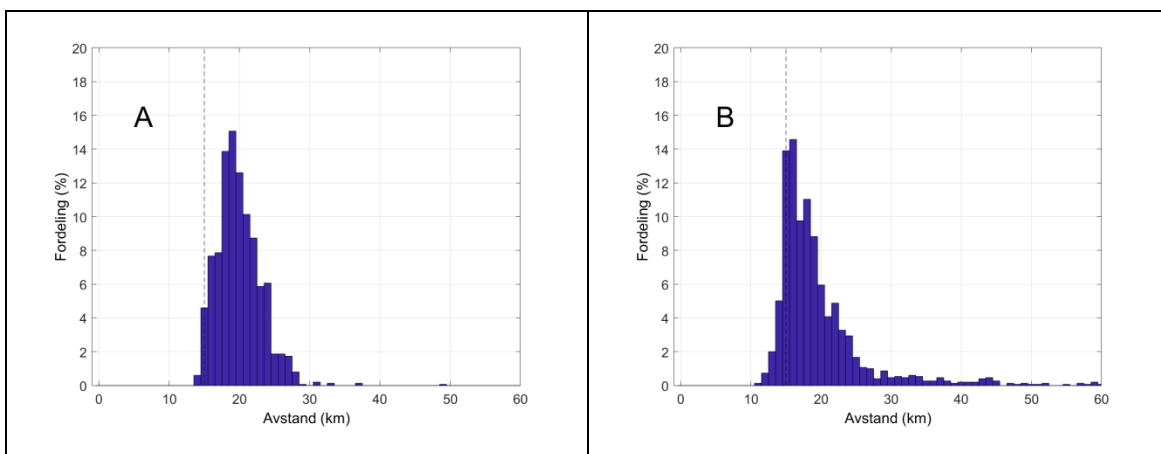
Figur 5.20 Fordeling av beregnet deteksjonsavstand for januar basert på 1 500 tilfeldig utvalgte M-profiler i A) åpent hav og B) kystnært miljø.



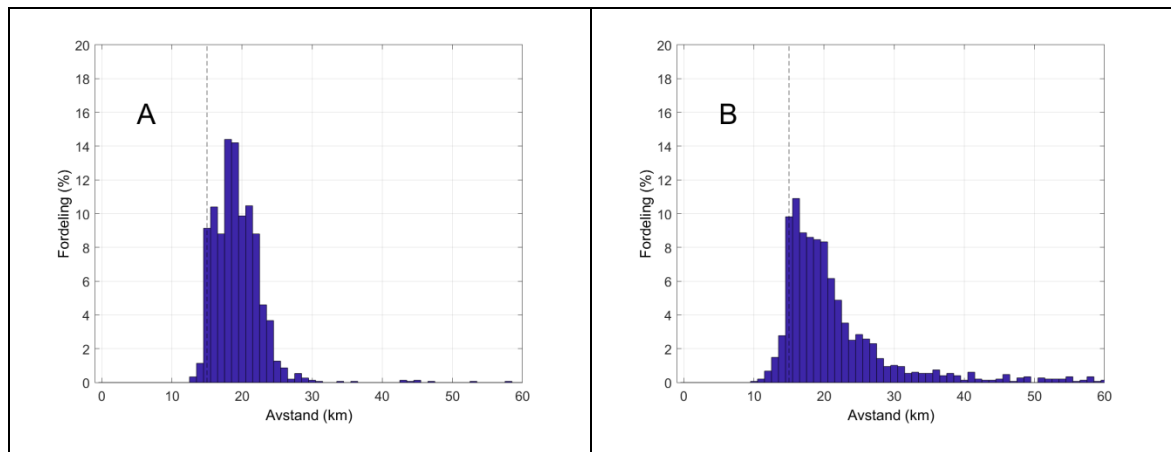
Figur 5.21 Fordeling av beregnet deteksjonsavstand for februar basert på 1 500 tilfeldig utvalgte M-profiler i A) åpent hav og B) kystnært miljø.



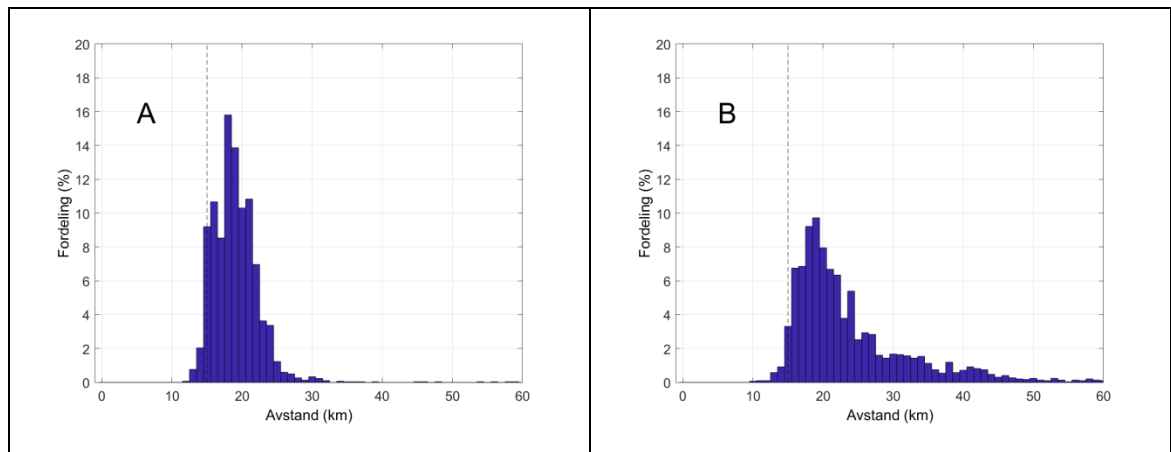
Figur 5.22 Fordeling av beregnet deteksjonsavstand for mars basert på 1 500 tilfeldig utvalgte M-profiler i A) åpent hav og B) kystnært miljø.



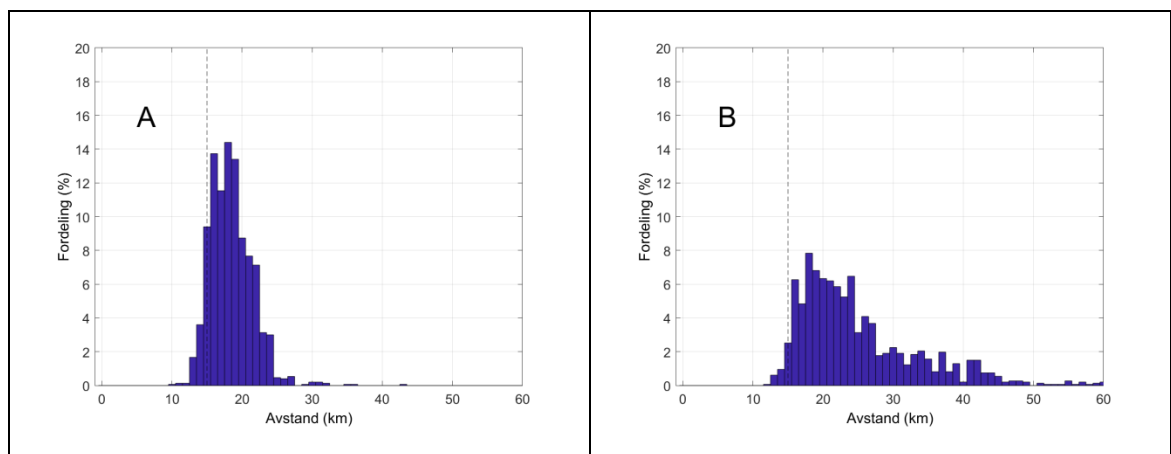
Figur 5.23 Fordeling av beregnet deteksjonsavstand for april basert på 1 500 tilfeldig utvalgte M-profiler i A) åpent hav og B) kystnært miljø.



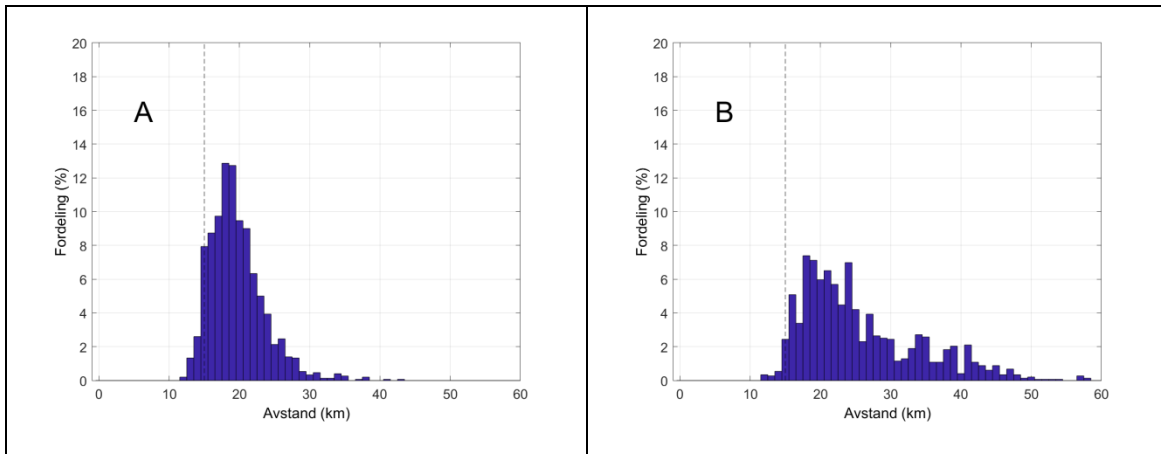
Figur 5.24 Fordeling av beregnet deteksjonsavstand for mai basert på 1 500 tilfeldig utvalgte M-profiler i A) åpent hav og B) kystnært miljø.



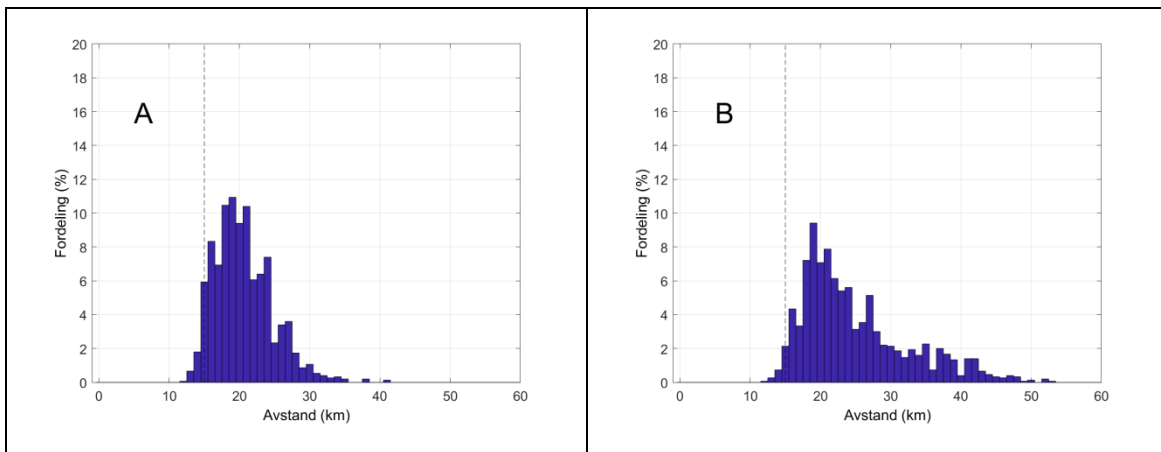
Figur 5.25 Fordeling av beregnet deteksjonsavstand for juni basert på 1 500 tilfeldig utvalgte M-profiler i A) åpent hav og B) kystnært miljø.



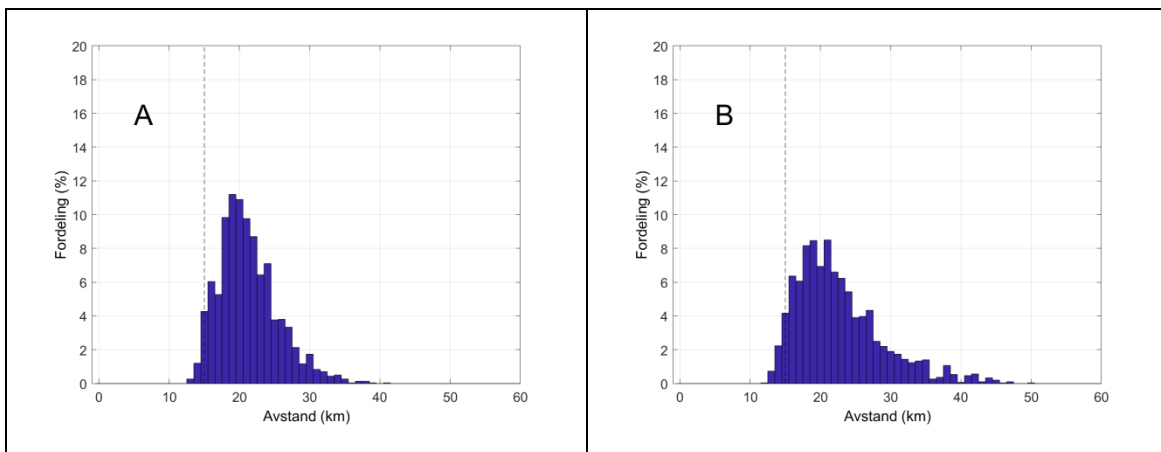
Figur 5.26 Fordeling av beregnet deteksjonsavstand for juli basert på 1 500 tilfeldig utvalgte M-profiler i A) åpent hav og B) kystnært miljø.



Figur 5.27 Fordeling av beregnet deteksjonsavstand for august basert på 1 500 tilfeldig utvalgte M-profiler i A) åpent hav og B) kystnært miljø.

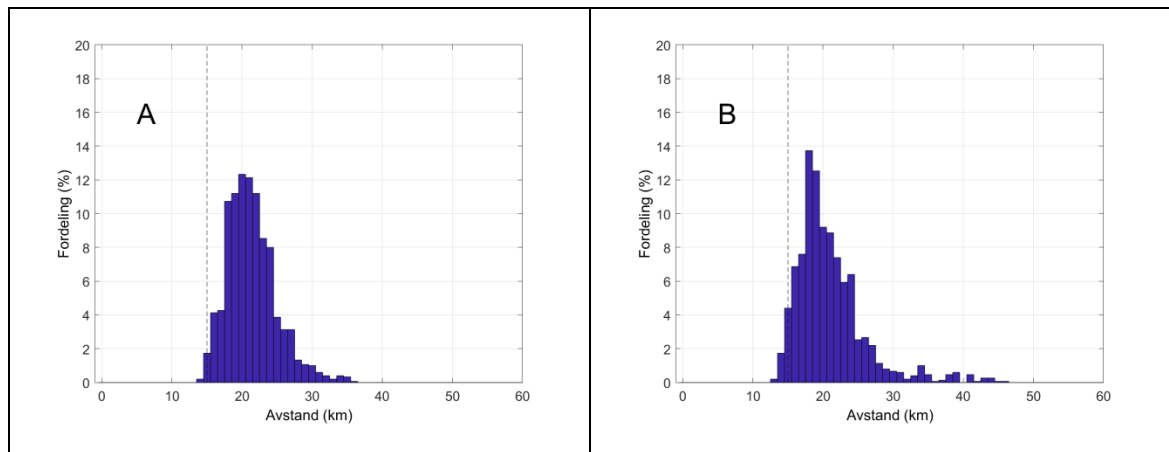


Figur 5.28 Fordeling av beregnet deteksjonsavstand for september basert på 1 500 tilfeldig utvalgte M-profiler i A) åpent hav og B) kystnært miljø.

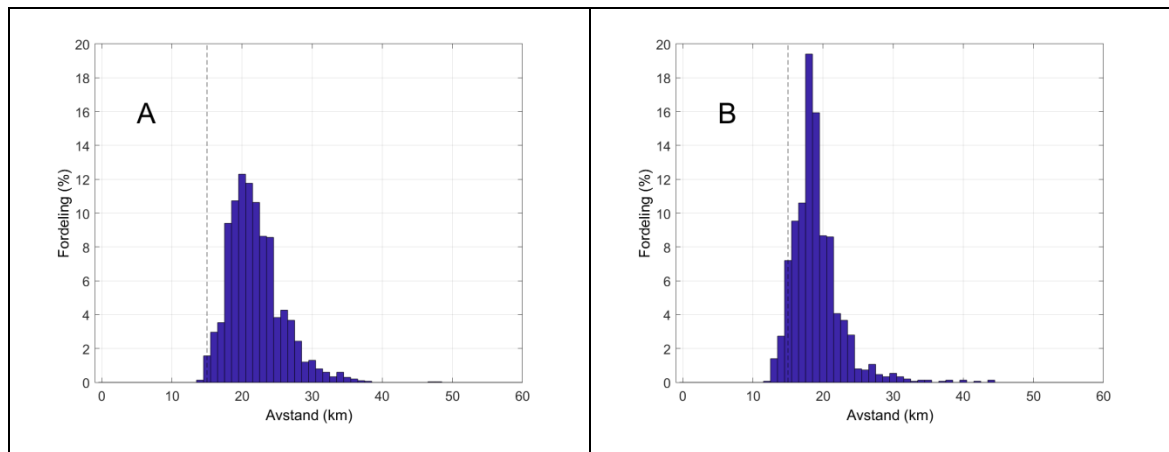


Figur 5.29 Fordeling av beregnet deteksjonsavstand for oktober basert på 1 500 tilfeldig utvalgte M-profiler i A) åpent hav og B) kystnært miljø.





Figur 5.30 Fordeling av beregnet deteksjonsavstand for november basert på 1 500 tilfeldig utvalgte M-profiler i A) åpent hav og B) kystnært miljø.



Figur 5.31 Fordeling av beregnet deteksjonsavstand for desember basert på 1 500 tilfeldig utvalgte M-profiler i A) åpent hav og B) kystnært miljø.

	Beregnet radarrekkevidde [km]					
	Kystnært miljø			Åpent hav		
Måned	Median	10. persentil	90. persentil	Median	10. persentil	90. persentil
<b>Januar</b>	17,8	15,0	21,3	21,3	17,6	26,9
<b>Februar</b>	17,4	14,6	20,1	20,7	17,6	25,9
<b>Mars</b>	17,0	14,4	20,9	20,7	17,4	25,7
<b>April</b>	17,8	14,8	26,8	20,1	16,6	24,9
<b>Mai</b>	19,2	15,2	32,9	19,6	16,0	24,5
<b>Juni</b>	20,9	16,2	38,3	18,8	15,4	22,9
<b>Juli</b>	22,9	16,4	39,2	18,4	15,2	22,5
<b>August</b>	23,7	16,7	39,6	18,8	15,4	23,7
<b>September</b>	22,9	17,2	37,3	19,2	15,4	24,6
<b>Oktober</b>	21,5	16,0	31,1	20,7	16,2	27,1
<b>November</b>	20,5	16,0	28,7	20,7	16,6	26,7
<b>Desember</b>	19,2	15,6	27,2	21,5	17,6	27,1

Tabell 5.2 Oversikt over median radarrekkevidde med tilhørende 10. og 90. persentil gjennom året for åpent hav og kystnært miljø, med utgangspunkt i radarparametere oppgitt i Tabell 5.1 og enveis propagasjonstap på 140 dB.

---

---

## 6 Konklusjon

Oversikt over forventede atmosfæriske propagasjonsforhold i et maritimt operasjonsmiljø er viktig for planlegging av militære operasjoner på sjøen. En slik god og detaljert oversikt for norske farvann har til nå ikke vært tilgjengelig. I denne rapporten har vi presentert klimatologi for medianverdier og variasjon for beregnet fordampningsduktthøyde (EDH) i norske havområder og tilstøtende områder, samt eksempler for hvilken effekt det har på estimert radarrekkevidde for en posisjon i åpent hav og en kystnær posisjon. Det meteorologiske datagrunnlaget er hentet fra re-analyser fra værvarslingsmodellen HIRLAM hos Meteorologisk institutt. Dataene dekker perioden fra 1980 til 2015. Til å beregne EDH har vi benyttet bulk-modellen Naval Atmospheric Vertical Surface Layer Model (NAVSLaM). I rapporten har vi også gitt en oversikt over hvor ofte luft-temperaturen er høyere enn overflatesjøtemperaturen, såkalte stabile forhold. Under slike stabile forhold gir nemlig små variasjoner i inngangsverdiene til NAVSLaM (og andre tilsvarende bulk-modeller) potensielt store variasjoner i beregnet EDH, og resultatene må brukes med større forsiktighet. I slike stabile forhold bør man vurdere å estimere EDH fra utledning av refraktivitetsprofil fra atmosfæriske målinger, for å vurdere gyldigheten av resultatene fra NAVSLaM.

Forhold der lufttemperaturen er høyere enn overflatesjøtemperaturen, forekommer hyppigst i perioden april til juli i kystnære farvann, først i sørlige deler av Norge. Da har man områder som er stabile i 50 til 70 prosent av tiden, og hvor man bør bruke NAVSLaM med større forsiktighet.

Studien viste videre at man har de høyeste EDH-verdiene i åpent hav i desember/januar (6–7 meter) og lavest i juli (3–4 meter). Langs kysten av Norge fant man høyest EDH i september (6–8 meter). Variasjonen i EDH er størst langs kysten av Norge fra april til september, med størst variasjon sør i landet tidlig i perioden og i nordlige deler av landet i slutten av perioden. Variasjonene er til dels betydelig større langs kysten enn i åpent hav. I åpent hav er variasjonen størst i august/september.

En radars rekkevidde vil kunne variere sterkt med de atmosfæriske propagasjonsforholdene. For å illustrere effekten dette kan ha, har vi vist eksempler på fordeling av beregnet radarrekkevidde for to posisjoner for en radar som opererer i X-båndet. Posisjonene er valgt for å representere åpent hav og kystnært miljø. For åpent hav viste resultatene at medianverdiene for estimert radarrekkevidde varierte mellom 18,4 km (juli) og 21,5 km (desember). For den kystnære posisjonen varierte beregnet radarrekkevidde mellom 17 km (mars) og 23,7 km (august). Variasjonen i radarrekkevidde innenfor hver måned endret seg lite gjennom året i åpent hav. På den kystnære lokasjonen var variasjonen liten i perioden desember til mars, mens den økte betydelig utover våren og sommeren, og hadde en topp i august. Det er også verdt å merke seg at fordelingen av radarrekkevidde stort sett ligger over radarrekkevidde beregnet med standard atmosfære.

For at Forsvaret skal få best mulig nytte av resultatene i arbeidet, bør klimatologien for ASTD og EDH implementeres i Sjøforsvarets taktiske publikasjon nr. 40 (STP-40). En annen ting som kan være aktuelt for videre arbeider, er å se på forskjeller mellom dag og natt. Spesielt i

---

områder hvor døgntemperaturen i luften varierer mye, vil dette kunne ha effekt på beregnet EDH.

---

---

## Forkortelser og akronymer

APM	Advanced Propagation Model
ASTD	Air–Sea Temperature Difference
EDH	Evaporation Duct Height
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model
MOST	Monin-Obukhov Similarity Theory
NAVSLaM	Navy Atmospheric Vertical Layer Model
PL	Propagation Loss
STP	Sjøforsvarets Taktiske Publikasjon

---

---

## Referanser

- [1] H. V. Hitney, J. H. Richter, R. A. Pappert, K. D. Anderson, and G. B. Baumgartner, "Tropospheric radio propagation assessment," *Proceedings of the IEEE*, vol. 73, pp. 265-283, 1985.
- [2] P. A. Frederickson, "Further improvements and validation for the navy atmospheric vertical surface layer model (NAVSLaM)," in *2015 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, 2015, pp. 242-242.
- [3] M. M. Meltzer, P. Østenstad, A. Hesby, G. Nonsvik, and B. Sagsveen, "Measuring refractivity profiles in the marine environment using radiosondes launched with a pneumatic line thrower," in *2015 European Radar Conference (EuRAD)*, 2015, pp. 61-64.
- [4] M. Reistad, Ø. Breivik, H. Haakenstad, O. J. Aarnes, B. R. Furevik, and J. R. Bidlot, "A high-resolution hindcast of wind and waves for the North Sea, the Norwegian Sea, and the Barents Sea," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 116, 2011.
- [5] M. Reistad, H. Haakenstad, B. Furevik, and J. Haugen, "NORA10-Final report 2015," *The atmospheric part. Norwegian DeepWater Programme-report*, 2015.
- [6] M. M. Meltzer and P. Østenstad, "Inntrykk fra symposiet "Bridging the gap between the development and operational deployment of naval tactical decision aids" (SET-244), 31. oktober til 02. november 2017 i Den Helder," FFI Reiserapport 17/17070, 2017.
- [7] P. Østenstad and M. M. Meltzer, "Evaporation Duct Height Climatology for Norwegian Waters Using Hindcast Data," 2017.
- [8] P. Østenstad, "Radardekning med ulike refraktivitetsprofiler i et maritimt miljø," *Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)*, 2008.
- [9] S. M. Babin, G. S. Young, and J. A. Carton, "A new model of the oceanic evaporation duct," *Journal of applied meteorology*, vol. 36, pp. 193-204, 1997.
- [10] MATLAB, *version 9.4.0 (R2018a)*: The MathWorks Inc., 2018.
- [11] A. Monin and A. Obukhov, "Basic regularity in turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere, USSR," *Acad. Sci. Geophy. Inst*, 1954.
- [12] R. Paulus, "Practical application of an evaporation duct model," *Radio science*, vol. 20, pp. 887-896, 1985.
- [13] R. A. Paulus, "Specification for Evaporation Duct Height Calculations," Naval Ocean Systems Center, Technical Document 15961989.
- [14] P. Frederickson, "Validation Test Report for the Navy Atmospheric Vertical Layer Model (NAVSLaM) CSCI Version 1.1," 16 January 2015.
- [15] A. E. Barrios, "Considerations in the development of the advanced propagation model (APM) for US Navy applications," in *2003 Proceedings of the International Conference on Radar (IEEE Cat. No. 03EX695)*, 2003, pp. 77-82.
- [16] K. E. OLSEN, "RADARDEKNINGSSIMULATOR-FYSIKK."

## About FFI

The Norwegian Defence Research Establishment (FFI) was founded 11th of April 1946. It is organised as an administrative agency subordinate to the Ministry of Defence.

### FFI's MISSION

FFI is the prime institution responsible for defence related research in Norway. Its principal mission is to carry out research and development to meet the requirements of the Armed Forces. FFI has the role of chief adviser to the political and military leadership. In particular, the institute shall focus on aspects of the development in science and technology that can influence our security policy or defence planning.

### FFI's VISION

FFI turns knowledge and ideas into an efficient defence.

### FFI's CHARACTERISTICS

Creative, daring, broad-minded and responsible.

## Om FFI

Forsvarets forskningsinstitutt ble etablert 11. april 1946. Instituttet er organisert som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter underlagt Forsvarsdepartementet.

### FFIs FORMÅL

Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som kan påvirke forutsetningene for sikkerhetspolitikken eller forsvarsplanleggingen.

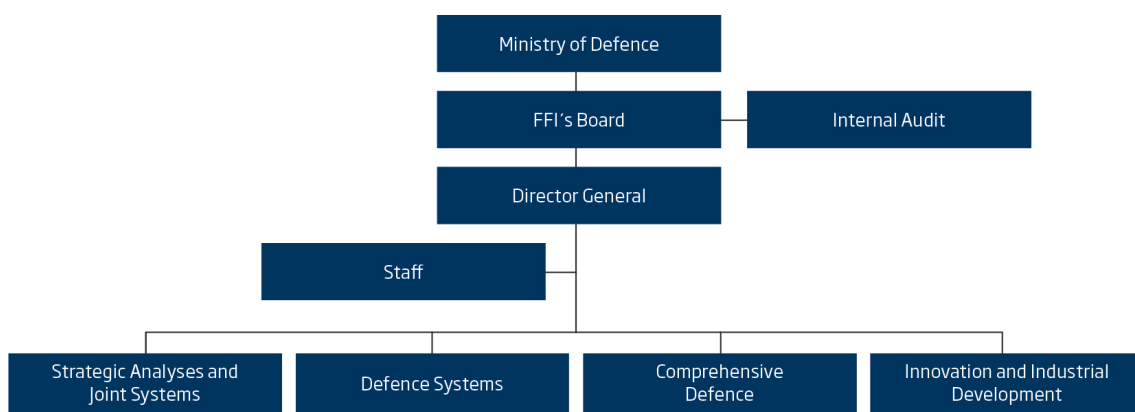
### FFIs VISJON

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

### FFIs VERDIER

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.

## FFI's organisation



**Forsvarets forskningsinstitutt**  
Postboks 25  
2027 Kjeller

Besøksadresse:  
Instituttveien 20  
2007 Kjeller

Telefon: 63 80 70 00  
Telefaks: 63 80 71 15  
Epost: [ffi@ffi.no](mailto:ffi@ffi.no)

**Norwegian Defence Research Establishment (FFI)**  
P.O. Box 25  
NO-2027 Kjeller

Office address:  
Instituttveien 20  
N-2007 Kjeller

Telephone: +47 63 80 70 00  
Telefax: +47 63 80 71 15  
Email: [ffi@ffi.no](mailto:ffi@ffi.no)