



FOI MEMO

Projekt/Project Sidnr/Page no
Atmosfärseffekter för elektromagnetisk vågutbredning 25–27 1 (5)

Projektnummer/Project no Uppdragsgivare/Client
E51588 Försvarsmakten

FoT-område
Sensorer och signaturanpassning

Författare/Author
Lars Norin
Mattias Rahm
Niklas Wellander

Datum/Date Memo nummer/Number
2025-11-13 FOI Memo 9046

Delresultat under 2025 för ”Atmosfärseffekter för elektromagnetisk vågutbredning 25-27”

Titel/Title

Delresultat under 2025 för ”Atmosfärs effekter för elektromagnetisk vågutbredning 25-27”

Memo nummer/Number

FOI Memo 9046

1 Introduktion

Detta arbete har gjorts inom Försvarmaktens samlingsbeställning för forskning och teknikutveckling inom *Sensorer och signaturanpassning FOI 25 (AT.9220425)*. Memot redovisar delresultat för 2025 som producerats i projektet *Atmosfärs effekter för elektromagnetisk vågutbredning 25–27*. Projektet studerar hur varierande atmosfärstillstånd påverkar vågutbredning för radar och elektrooptiska/infraröda (EO/IR) system. Atmosfärens egenskaper varierar kontinuerligt både i rum och i tid. Bättre kunskap om denna variation och bättre modeller för att modellera både variationen och vågutbredningen i atmosfären kan användas i taktiska beslutsstöd för att bedöma egna spanings- och vapensensorers tillgänglighet och för att bedöma hotsensorers räckvidd under aktuella eller förväntade atmosfärsförhållanden.

Projektet har tre forskningsfrågor som studeras under perioden 2025-2027:

- Hur varierar atmosfärens vågutbredningsförhållanden över tid (timmar, dygn, månader, årstider) i Sverige och i Östersjöområdet?
- För hur lång tid är prognoser av atmosfärens elektromagnetiska egenskaper (radar och EO) baserade till exempel på numeriska vädermodeller användbara?
- Hur modellerar man vågutbredning för radar och EO-system för att nå bästa användbarhet i spelsimuleringar, i planering av uppdrag, och i taktiska beslutsstöd?

2 Delresultat 2025

2.1 Radar

I juni 2025 placerades en hörnreflektor ut på stranden av Högby fyr, Öland, riktad mot en väderradar vid Hemse på Gotland. Avsikten är att se om det går att få ytterligare information om anomal vågutbredning genom att placera ut reflektorer med känd radarmålarea.

I augusti 2025 installerades en mikrovågslänk mellan Kalix/Storön och Hailuoto/Marjaniemi i Finland. Antennerna är lågt monterade (7 respektive 5 m över havsytan) för att registrera när det förekommer avdunsningsledskikt över Bottenviken. Avståndet mellan antennerna är 100 km. Systemet delfinansierades av FMV genom beställningen Basplatta. Under några dagar i september 2025 hade mikrovågslänken kontakt över Bottenviken vilket endast kan ske vid anomala atmosfärsförhållanden.

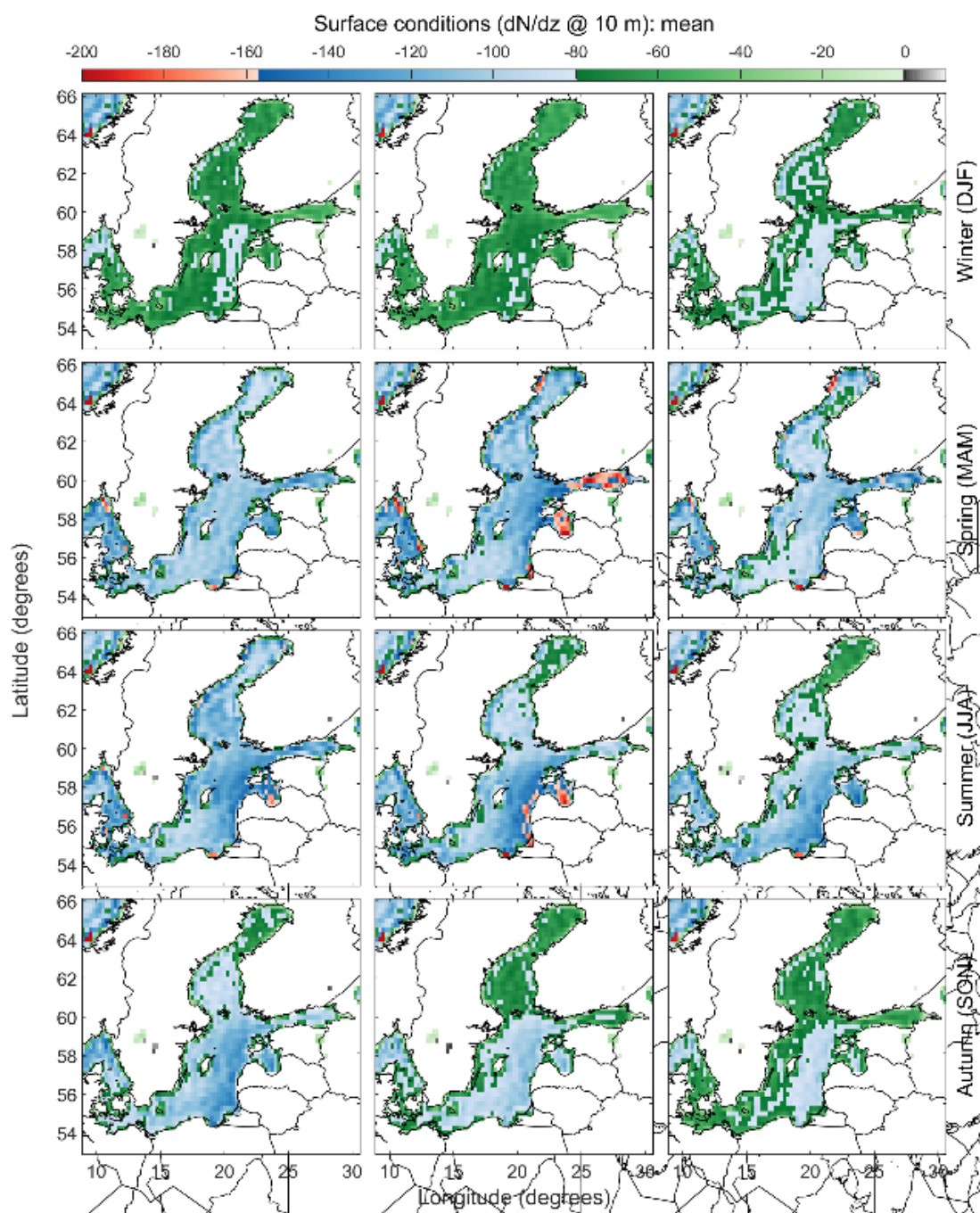
Analys påbörjades av historiska väderdata (ERA5) för att se hur ett varmare klimat eventuellt påverkar förekomsten av ledskikt över Östersjön. Väderdata med en timmes tidsupplösning finns tillgängliga från 1940 fram till idag och fylls kontinuerligt på. Figur 1 visar vilka atmosfärsförhållanden som har rått i medeltal under de senaste 10 åren på 10 meters höjd över havsytan. Det framgår till exempel att övernormala vågutbredningsförhållanden eller ledskikt råder i stora delar av Östersjön under vår och sommar. Under höst och vinter är utbredningsförhållandena normala.

Titel/Title

Delresultat under 2025 för "Atmosfärs effekter för elektromagnetisk vågutbredning 25-27"

Memo nummer/Number

FOI Memo 9046



Figur 1: Genomsnittliga utbredningsförhållanden på 10 meters höjd över vattenytan under de senaste 10 åren. Resultaten baseras på återanalysdata från ERA5. Färgskalan visar vertikala derivatan av refraktiviteten (N). Gråskala visar undernormala förhållanden, grönt visar normalatmosfär, blått övernormala förhållanden och rött visar ledskikt.

2.2 EO/IR

Under våren 2025 utvecklades en metod för att med hjälp av paneler med olika temperaturer mäta effektiv transmission med en passiv infraröd sensor. Metoden testades i ett fältförsök i augusti 2025. Mätdata utvärderas mot beräkningar baserade på både lokala vädermätningar och väderprognoser.

Titel/Title

Delresultat under 2025 för ”Atmosfärs effekter för elektromagnetisk vågutbredning 25-27”

Memo nummer/Number

FOI Memo 9046

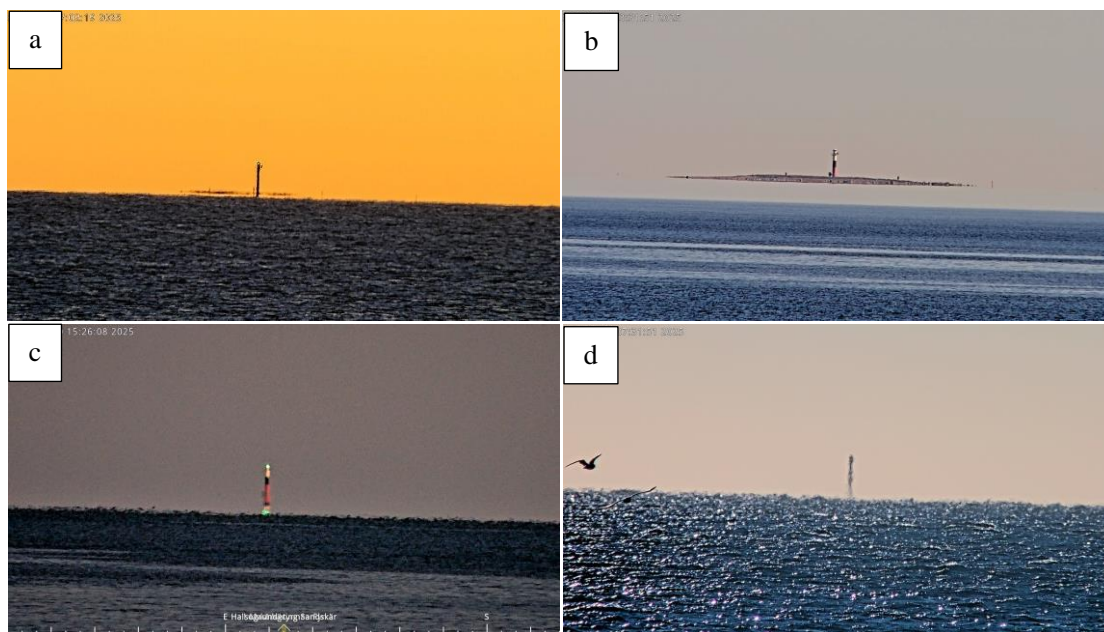
En vidareutveckling av metoden som bygger på reflektion från optiska hörnkuber är under utformning, och testas för närvarande i det visuella bandet.

Under 2025 slutfördes en jämförelse mellan långtidsmätningar av optisk turbulens i Karlskrona och en turbulensmodell baserad på numeriska väderprognoser. Resultaten presenterades på SPIE konferensen Sensors+Imaging i Madrid.¹

POLSIG är en FOI-utvecklad programvara för att modellera objekts temperaturer som funktion av solinstrålning och omgivande atmosfär. Projektet har anpassat POLSIG till att kunna använda numeriska väderprognoser som indata. Målet är en modell som kan beskriva både temperatur hos objekt och vågutbredning i atmosfären som funktion av numeriska väderprognoser. Modellen utvärderas mot mätdata, från det generiska objektet CUBI, som insamlades under fältförsök i augusti 2024 och februari 2025.

Under hösten 2025 fortsatte samarbetet med att utveckla ett instrument för att *in-situ* kunna mäta optisk spridning i fallande snö. En ny studentgrupp vid Luleå tekniska universitet fortsatte arbetet där den förra slutade 2024.

I augusti 2025 installerades en PTZ-kamera (eng. Pan-Tilt-Zoom) på Storön utanför Kalix. Kameran registrerar fotografier av mål i havet utanför Storön. Syftet med kamerainstallationen är att generera dataunderlag till modeller för beräkning av optiska ledskikt. Exempel på bilder från kameran visas i Figur 2.



Figur 2: Exempel på bilder av fyren Lutskärsgrund som ligger ungefär 12 km från kameran på Kalix/Storön. I a) och b) framträder fyren som en hägring. I c) ses en spegling av fyrens överdel i ett yttnära atmosfärsskikt och i d) ses fyren genom en signifikant turbulent atmosfär.

¹ Brattgård D. and Rahm M., “Evaluation of near-surface turbulence predictions in a coastal region”, Proc. SPIE Vol 13669 (2025).

Titel/Title
Delresultat under 2025 för ”Atmosfärs effekter för elektromagnetisk vågutbredning 25-27”

Memo nummer/Number
FOI Memo 9046

3 Samverkan

Under 2025 har samarbete i liten skala inletts med Uppsala universitet och TU Braunschweig för utredning om eventuell inverkan av vakar från vindkraftsparker.

KTH har haft en examensarbetare där projektet bidragit med inriktning av arbetet². Exjobbet studerade den paraboliska vågekvationen för att beräkna elektromagnetisk vågutbredning i troposfären. För att undvika en stor beräkningsdomän kan ett så kallat perfekt matchat lager (PML, eng. perfectly matched layer) användas. En central del i examensarbete var att jämföra olika implementeringsmetoder för att lösa den paraboliska vågekvationen med ett PML. Projektet planerar att fortsätta samverkan med KTH med exjobb som bygger vidare på de metoder som implementerades. Ett nytt exjobb planeras att genomföras under vårterminen 2026.

Inom samarbetet med FFI och FMI, avtalat under ICE-PPR Ducting, har en AIS-mottagare monterats på Uppsala universitets meteorologimast på Östergarnsholm. Data skall användas för att detektera anomala vågutbredningsförhållanden och skall korreleras med väderdata insamlade i samma mast.

FOI tecknade ett avtal med SMHI för installation av mikrovågslänk och kamera på den mareograf som SMHI har vid mätstation Kalix/Storön.

Ytterligare väderradardata har levererats från SMHI. Projektet har nu radardata från alla väderradarer från 2000 till och med sista augusti 2025. Ensemble av numeriska väderprognoser har beställts och även levererats. Det pågår en dialog med SMHI om möjligheter att installera temperatur- och luftfuktighetsgivare vid SMHI:s mätstation vid Kalix/Storön.

Väderradardata skall bland annat användas för utvärdering av frågan om en utplacerad hörnreflektor vid Högby fyr på Ölands östkust ger tydligare reflex av radarpulser vid övernormal vågutbredning.

Dialog och process pågår hos FMTIS för inplacering av AIS-mottagare och mikrovågslänkar i existerande bestånd av master hos Försvarmakten.

FMV T&E Vidse har kontaktat projektet om möjlighet till en utbildningsinsats rörande atmosfärs effekter på deras mätsystem (både optiska- och radiovåglängder). Dialog om upplägg pågår.

² <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1990579&dswid=4362>