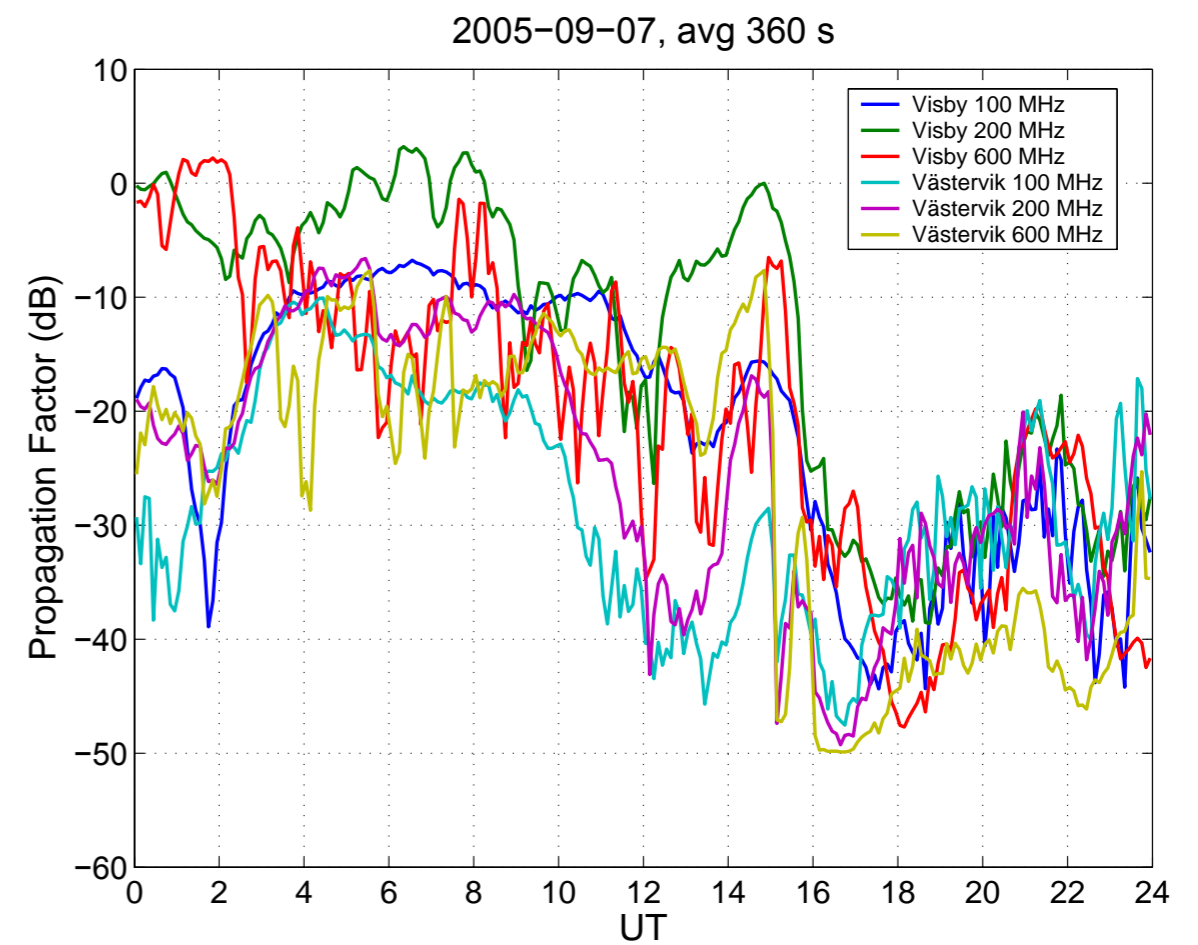


K. OVE S. GUSTAFSSON , GUNNAR ERIKSSON,
PETER HOLM , ROLF PERSSON, LENNART THANING,
PONTUS VON SCHOENBERG, ÅSA WAERN



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1250 anställda varav ungefär 900 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

K. Ove S. Gustafsson , Gunnar Eriksson, Peter Holm , Rolf Persson, Lennart
Thaning, Pontus von Schoenberg, Åsa Waern

Slutrapport för projektet Verifiering av vågutbredningsmodeller

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--2149--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig och vilseledning	
	Månad, år December 2006	Projektnummer E3063
	Delområde 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
	Delområde 2	
Författare/redaktör K. Ove S. Gustafsson Åsa Waern Gunnar Eriksson Peter Holm Rolf Persson Lennart Thaning Pontus von Schoenberg	Projektledare Ove Gustafsson	
	Godkänd av Ove Steinvall	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Slutrapport för projektet Verifiering av vågutbredningsmodeller		
Sammanfattning <p>Projektet 'Verifiering av vågutbredningsmodeller', finansierat av Försvarsmakten, har genomförts under perioden 2004-2006. Arbetet har genomförts med hjälp av meteorologiska, radio/radar och elektrooptiska sensorer, modeller och metoder, samt genom samarbete med internationella grupper inom EDA projektet "Duct mapping improvement based on atmospheric data fusion for naval purpose".</p> <p>Målsättningen för projektet är att utföra en inledande verifiering av modeller för vågutbredning inom områdena radio/radar samt elektrooptik genom jämförelse med uppmätt vågutbredning över hav, kust och öar. Projektet har studerat modeller och metoder för prediktering av ledskikt samt dess effekt på vågutbredning inom radio/radar-området , specifikt LBM.</p> <p>Vår bedömning är att väderprognosmodellerna inte kommer att kunna ersätta metoder byggda på in situ mätningar (LBM) under en överskådlig framtid. Därför finns det skäl att se över och, baserat på erfarenheter från 'Duct Mapping'-projektet, förbättra delar i LBM.</p> <p>Alternativa metoder för att bestämma refraktionen och därmed förekomsten av ledskikt där radar eller radiosignaler analyseras med inversa metoder har studerats. Metoder av den typen kommer att implementeras på testsystem, inom fortsättningen av det internationella samarbetet, dock utan Svensk medverkan.</p> <p>En optisk metod, med lidar, att bestämma refraktionen föreslogs och testades. De analyserade resultaten från lidarmätningarna av refraktionen visar god överensstämmelse med beräknade värden, speciellt för små vinklar och korta avstånd.</p>		
Nyckelord LBM, ledskikt, turbulens, brytningsindex, aerosoler, meteorologi, bulkmodeller, Radar, radio, IR, laser, lidar, atmosfärstransmission		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 48 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--2149--SE	Report type User report
	Programme Areas 6. Electronic Warfare and deceptive measures	
	Month year December 2006	Project no. E3063
	Subcategories 61 Electronic Warfare including Electromagnetic Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) K. Ove S. Gustafsson Åsa Waern Gunnar Eriksson Peter Holm Rolf Persson Lennart Thaning Pontus von Schoenberg	Project manager	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Final report Verification of wavepropagation models		
Abstract <p>The project 'Verifiering av vågutbredningsmodeller', financed by the Swedish Armed Forces, has been carried through during 2004-2006. The work has been using meteorological radar, radio and electro optical sensors, models and methods. The project has participate within an international cooperation through the EDA project "Duct mapping improvement based on atmospheric data fusion for naval purpose".</p> <p>The project has aimed too initiate a verification of propagation models for radio/radar and optical waves through comparison with measurements of wave propagation over sea, coastal and small islands. The project studied models and methods of prediction of ducts and its influence on the wave propagation within the domain of radio/radar, especially the LBM model.</p> <p>The conclusion is that numerical weather forecast models do not replace methods using in situ measurements (as for instance LBM) in the foreseeable future. Therefore there are reasons, out of experiences from 'Duct mapping...', to improve parts of the LBM system.</p> <p>Alternative methods to determine the modified refraction and through that judge the presence of ducts, by retrieving the parameters from measured radar or radio signals, has been studied. Such method will be implemented on test radar within the international cooperation, however Sweden will not participate.</p> <p>An optical method to measure refraction index using Lidar has been suggested and tested. The analysed results of the lidar measurements of the refraction index show good agreement with calculated values, especially for small angles and short distances (few km).</p>		
Keywords LBM, duct, turbulence, refractive index, aerosols, meteorologi, bulk models, radar, radio, laser, lidar, IR transmission		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 48 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	7
1.1	Ledsikt	7
2	Projektbeskrivning.....	11
2.1	Inledning.....	11
2.2	Mätning av refraktionen för optiska våglängder	12
2.2.1	Horisontella mätningar med lidar	14
2.2.2	Lidarsystemet	14
2.2.3	Mätningar av strålavböjning.....	15
2.2.4	Analys.....	17
2.2.5	Resultat	18
2.2.6	Aerosolmätningar i lutande banor	21
2.2.7	Polarisationseffekter	21
2.2.8	Mätningar med enkelskott i tre vinklar strax över vattenytan.....	21
2.2.9	Diskussion och förslag	22
2.3	Turbulensmätningar.....	22
2.3.1	Semiempirisk modell för C_n^2	24
2.4	Vågutbredningsmätningar bortom radiohorisonten över hav.....	27
2.4.1	Försöksuppställning och utrustning.....	27
2.4.2	Registrering av meteorologiska data	29
2.4.3	Signalstyrkeregistreringar.....	30
2.4.4	Dataanalys	30
2.4.5	Resultat av vågutbredningsmätningarna.....	30
2.5	Användning av GPS för att bestämma refraktionen.....	31
2.5.1	Slutsatser från arbetet	32
2.6	Raketsondering	33
2.6.1	Slutsatser.....	34
3	Internationellt samarbete 'Duct Mapping'	35
4	Diskussion kring operativa verktyget LBM	37
4.1	LBM	37
4.2	LBM idag.....	37
4.3	Utvärderingen 1989	38
4.4	Jämförelser med andra bulkmodeller	39
4.5	Jämförelse med mätdata	40
4.6	Förslag till fortsatt utveckling av LBM	41
4.7	Slutsatser och tankar om framtida utveckling av LBM.....	41
5	Slutsatser.....	43
6	Förslag på fortsatt arbete och rekommendationer	44
7	Förkortningar	45
8	Referenser.....	46

1 Inledning

Försvarsmaktsprojektet 'Verifiering av vågutbredningsmodeller' har genomförts under perioden 2004-2006. Projektet är en direkt fortsättning av ett tidigare projekt som heter 'Vågutbredningsanalys för radio, radar och elektrooptiska system' som genomfördes under 2001-2003, se referens [1] och [2]. Ursprunget till dessa studier ligger i det operativa systemet för bestämning av förekomst av ledsikt till havs som kallas Lokal Brytningsindex Modul - LBM. Detta system utvecklades under 1980 talet och verifierades i slutet av det årtiondet och början av 1990-talet, se [24-28]. LBM har validerats av FM i duellförsök och dessa visade att användningen av LBM ger en fördel i duellen. Utvecklingen av teorier och modeller för marina gränsskiktet fortsatte under 1990-talet vilket utgjorde motiv för att igen studera marina gränsskiktmodeller (MBL) och speciellt studera LBM samt att delta i det internationella samarbetet 'Duct Mapping'.

Målsättningen för projektet är att utföra en inledande verifiering av modeller för vågutbredning inom områdena radio/radar samt elektrooptik genom jämförelse med uppmätt vågutbredning över hav, kust och öar. Detta genomförs med hjälp av meteorologiska, radio/radar och elektrooptiska sensorer, meteorologiska modeller samt genom samarbete med internationella grupper inom EDA (Europeiska Försvarsbyrån, organ inom Europeiska unionen) projektet "Duct mapping improvement based on atmospheric data fusion for naval purpose" (SOCRATE Contract N°03/RFP 1.19/005), samarbetet kallas fortsättningsvis 'Duct Mapping'. I målsättningen ingår även att prova alternativt utveckla metod(-er) för bestämning av meteorologiska parametrar och systemräckvidder på distans med hjälp av laserradar.

Denna rapport redovisar delar av det arbete som genomförts inom projektet. För att få en fullödigare rapportering hänvisas till de i referenserna angivna rapporterna samt till kommande rapportering av det ej helt avslutade internationella samarbetet 'Duct Mapping', se referens [29].

Det internationella projektet kommer att avslutas under 2006, alternativt i början av 2007, efter tre års arbete. Det finns förslag på ett nytt projekt, som kommer att ta tillvara dessa erhållna resultat och som troligtvis kommer att utvidga studien till att gälla även optiska våglängder (speciellt IR-området) men även koncentrera sig mer på beslutstödsfunktioner för marinen. Det nya förslaget har arbetsnamnet 'ENVIRONMENT PICTURE FOR PREDICTION OF NAVAL SYSTEMS PERFORMANCES' förkortning EPNAV.

Denna rapportens första kapitel innehåller inledning samt ett kort stycke om ledsikt. I kapitel 2 beskrivs projektets delar, som inte genomförts inom 'Duct Mapping', kortfattat. I kapitel 3 ges en mycket kort beskrivning av 'Duct Mapping'. Beskrivning av arbetet som genomförts kommer att ges i en separat rapport, se [29]. En diskussion genomförs i kapitel 4 där utvecklingen och jämförelsen mellan LBM och andra metoder att bestämma förekomsten av ledsikt behandlas. Slutsatser av arbetet sammanfattas i kapitel 5. I kapitel 6 ges förslag till fortsatt arbete och rekommendationer inom området. I kapitel 7 ges några av beteckningarna som används i rapporten samt i kapitel 8 ges referenslistan.

1.1 Ledskikt

Utbredningen av radiostrålning genom atmosfären påverkas av den vertikala profilen för brytningsindex i atmosfären, som i sin tur är beroende av de vertikala profilerna för

lufttemperatur, luftfuktighet samt lufttryck. Brytningsindex för elektromagnetiska vågor betecknas vanligen med n , speciellt för radiofrekvenser definieras refraktivitet som $N = (n-1) \cdot 10^6$ och den modifierade refraktiviteten $M = N + 0,157z$, där z avser höjden över havet, se [1] och [2]. Vid speciella förhållanden kan den vertikala profilen hos den modifierade refraktionen visa väldefinierade minimum på en eller flera höjder. På dessa höjder kommer för dessa minimum en horisontellt emitterad radiostrålning utbreddas parallellt med jordens yta.

Det marina gränsskiktet är den del av atmosfären som ligger närmast havsytan. Det ständigt pågående energiflödet mellan luften och havet gör att detta luftskikt, som vanligtvis har en tjocklek på några tiotals meter, ofta har starka gradienter gällande vind, temperatur och luftfuktighet. Detta kan resultera i starka gradienter hos luftens brytningsindex, refraktivitet. Speciellt när luftfuktigheten minskar snabbt med höjden leder detta till bildande av ledskikt för elektromagnetisk (EM) strålning som kan leda till att EM strålning når långt bortom radiohorisonten.

Prognoser om förhållanden hos den vertikala fördelningen av den modifierade refraktiviteten kan skapas med hjälp av s.k. mikrometeorologiska bulkmodeller för det lägsta skiktet närmast havsytan, se referens [1] och dess referenser. Dessa bulkmodeller baserar sig på vertikala profiler hos temperatur, luftfuktighet och vindhastighet som utgår från motsvarande parametrar mätta på en definierad höjd över vattenytan samt ytvattentemperaturen.

Refraktiviteten kan skrivas som funktion av tryck, temperatur och vattenångas partialtryck i luften enligt:

$$N = E \frac{P}{T} + F \cdot \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

där konstanterna är $E=77,6$ K/hPa och $F=3,73 \cdot 10^5$ K²/hPa samt vattenångas partialtryck kan approximativt skrivas som $e \approx f_r \cdot p_{vs}$ med den mättade vattenångastrycket betecknat med p_{vs} (hPa) och den relativa luftfuktigheten f_r (%). Vattenångas mättnadtryck, p_{vs} , skrivs som

$$p_{vs} = A \exp \left[B \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{T} \right) + D \cdot \ln \left(\frac{C}{T} \right) \right] \quad (2)$$

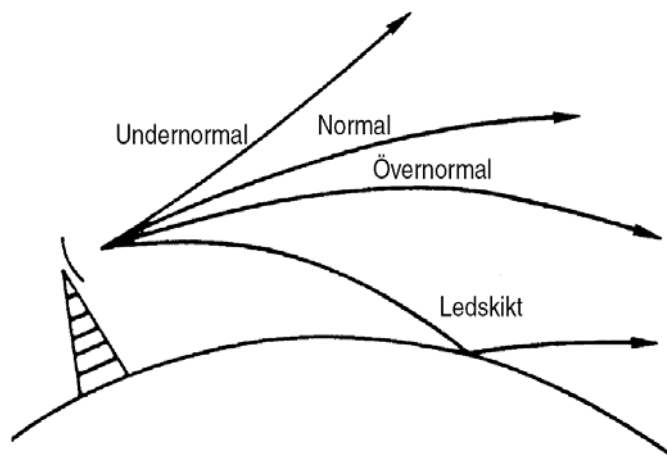
där $A=6.112$ hPa, $B=6816$ K, $C=273,15$ K och $D=5,1309$.

Beroende på storleken hos gradienten av den modifierade refraktiviteten, M , kommer EM strålningen påverkas olika. Effekten hos radar- och radiostrålningens vågutbredning i ledskikt brukar delas upp i fyra kategorier: sub-refraktivitet, standard, super-refraktivitet och fångning (trapping) beroende på utbredningsförhållanden.

- undernormal utbredning, ger försvagad radarräckvidd
- standard, ger normal radarutbredning
- övernormal utbredning, ger förstärkt radarräckvidd
- fångning (trapping), ledskikt

Undernormal utbredning, även kallad sub-refraktivitet, innebär att strålningen böjer ner mot jorden mindre än vid normalatmosfär, strålningen når inte så långt i atmosfären utan försvinner. Normalutbredning, standard atmosfär, uppträder då lufttemperaturen

avtar med 0,65 °C/100m. Övernormal utbredning, även kallad super-refraktivitet, innebär att strålningen böjds ned mer än vid normalatmosfär och därför följer jordens krökning och stannar längre i atmosfären. Ledskikt (engelskans duct) innebär att strålningen reflekteras mellan ett lager och havsytan (ibland kan strålningen fångas mellan två lager).



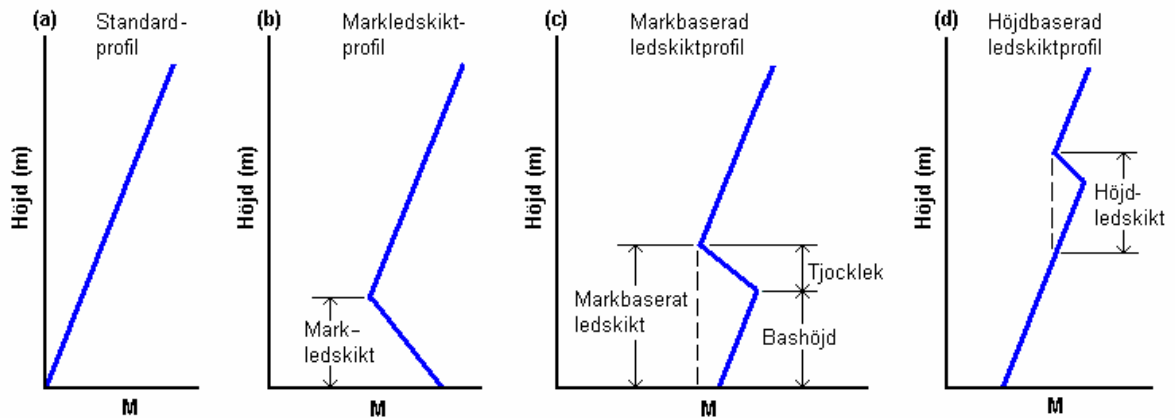
Figur 1.1: Utbredningsförhållanden för radar/radio vågor i atmosfären.

I tabell 1.1 anges värden på höjdgradienten för refraktiviteten samt för den modifierade refraktiviteten för effekten på strålningen vid olika utbredningsförhållanden i gränsskiktet.

Tabell 1.1: Gradienterna för refraktivitet och modifierade refraktiviteten vid olika utbrednings effekter (modifierade refraktiviteten relativt platt jord approximationen).

Utbredningsförhållanden	N-gradienten (N/km)	M-gradienten (M/km)
Fångning (Trapping)	$dN/dz \leq -157$	$dM/dz \leq 0$
Övernormal (Super-refractive)	$157 < dN/dz \leq -79$	$0 < dM/dz \leq 78$
Standard	$-79 < dN/dz \leq 0$	$78 < dM/dz \leq 157$
undernormal (Sub-refractive)	$dN/dz > 0$	$dM/dz > 157$

Ledskikt kan delas in i fyra kategorier beroende på de meteorologiska förhållandena: avdunstningsledskikt, strålningsledskikt, subsidens (inversions) ledskikt och advektionsledskikt. Det är också vanligt att dela upp ledskikten beroende på vilken höjd översidan och undersidan av ledskiktet har, detta då det har betydelse för effekten som ledskiktet har på vågutbredningen. I figur 1.2 visas indelningen som funktion av höjden av ledskikt.



Figur 1.2: Modifierade refraktiviteten som funktion av höjden för (a) standard atmosfär, (b) markledskikt (typiskt 0 - 40m), (c) markbaserade ledskikt (typiskt 40 - 1000m) och (d) höjyledskikt.

Markledskikt beror på spärrskikt vid havsytan och förekommer som avdunstningsledskikt på höjderna 0 - 40 m eller advektionsledskikt 40 - ca 200 m. Avdunstningsledskikt är tunna ytbaserade ledskikt som kan förekomma över stora områden, flera hundra km, ute till havs där vattentemperaturen och meteorologin varierar långsamt. Medeltjockleken hos avdunstningsledskikt är 5-6 m kring nordiska farvatten medan de i Persiska viken kan vara över 20 m. Advektionsledskikt kan bestå under flera veckor och förekommer i norra Europa vid högtrycks (anticyklon) subsidens. Advektionsledskikt förekommer ofta nära kusten där växelverkan mellan land och hav gör att dessa förhållanden visar på tydliga variationer under dygnet med starka ledskikt under tidig kväll. Advektionsledskikt kan sträcka sig flera hundra km från kusten.

Markbaserade ledskikt uppträder då spärrskikt bildas en bit över havsytan men på sådant sätt att inversionens lägsta M-värdet är lägre än M-värdet vid havsytan. Detta gör att strålningen böjs ner mot havsytan och reflekteras i den.

Höjyledskikt är spärrskikt så högt och med en sådan begränsning i djupet att skiktet inte når havsytan, M-värdet vid havsytan är lägre än inversionens lägsta M-värde. Det leder till att EM-strålning reflekteras i skiktets övre och nedre gräns och därför inte når ner till havsytan. Skiktet påverkar främst sändare som befinner sig i skiktet, exempelvis påverkas flygplansradar. Typiska meteorologiska förhållanden är subsidensinversioner vid högtryck som kan sträcka sig över stora områden, 500 - 1000 km, och finnas kvar under flera veckor.

2 Projektbeskrivning

Inledningsvis ges en kort beskrivning av olika aktiviteter som genomförts inom projektet. Därefter följer några delkapitel som beskriver ett antal av de aktiviteter som dels krävt något större insatser samt dels aktiviteter som inte kommer att räknas in i 'Duct Mapping' aktiviteterna.

2.1 Inledning

Inom projektet genomfördes under perioden 2004 - 2006 ca 75-tal raketsoneringar från fartyget HMS Ägir tillsammans med FM och FMV, vid Landsort på Öja samt från FGS Helmsand i samband med DuMEx experimentet. Huvuddelen av raketsoneringarna genomfördes från HMS Ägir av Marinens personal, varefter data från sonderingen samt LBM-systemet ombord sändes för analys av FOI inom projektet. Sonderingarna vid Öja och på FGS Helmsand genomfördes helt av FOI.

Nya indatafunktioner som använder meteorologiska mesoskaliga prognosmodeller (MM5) samt raketsondsdata i LBM-systemet, har tagits fram och användes för analyser av raketsoneringar. Data från HIRLAM 1D och HIRLAM 22 för aktuella platser hämtades från SMHI.

Betydelsen av mesoskaliga modellers noggrannhet för predikteringen av ledskikt har analyserats för HIRLAM 1D samt HIRLAM 22.

Propageringsmetoderna APM och FDPE överfördes till MatLab-skript för att underlätta test och jämförelser med LBM vid raketsoneringar.

FOI har inom projektet deltagit i det internationella projektet 'Duct Mapping' med rapporter, analyser och deltagit i det experiment 'Duct Mapping', se kapitel 3 samt referens [29]. FOI har inom projektet ansvarat för ett arbetspaket 3 (WP3) 'Duct parameter retrieval from RF signal for duct prediction'. FOI har deltagit vid samtliga arbetsmöten, två tillfällen varje år, som genomförts inom 'Duct Mapping'.

FOI har genomfört en delstudie 'Inversa metoder', där inversa metoder för att bestämma brytningsindex i atmosfären utifrån uppmätta signalnivåer har studerats. Inom delstudien genomfördes mätningar av radiosignaler under mer än tre månader mellan Muskö och Gotland samt jämförelser med meteorologiska prognoser, försöken beskrivs i kapitel 2.4. Detta arbetet ingår som en del av arbetspaket 3 (WP3) inom 'Duct Mapping'.

Under 2005 genomfördes ett tredagars arbetsmöte med det internationella projektet 'Duct Mapping' i slutet av maj i Linköping där FOI stod som arrangör för mötet.

Jämförelser mellan olika propageringsmodeller som använder bulkmodeller för prediktering av ledskikt har genomförts inom 'Duct Mapping' projektet.

En ny metod att med lidar bestämma atmosfärens egenskaper, specifikt atmosfärens brytningsindex strax ovan havsytan, har testats inom projektet. Mätningar genomfördes vid fältförsök med horisontellt riktad lidar med avsikt att mäta räckvidd hos laserstråle som funktion av utbredningsriktning. Två mätkampanjer genomfördes vid Flatvarp, Gryts skärgård, för att testa och utvärdera metoden. Ytterligare information finns i kapitel 2.2 samt i de referenser som anges där. Vid jämförelser mellan de uppmätta räckvidderna och räckvidder simulerade för specifika atmosfäregenskaper kan brytningsindexegenskaperna strax ovan vattenytan bestämmas. I analysen användes simuleringsprogrammet EOSTAR från TNO.

Polarisationens effekt på de returnerade svaren från de horisontella lidarmätningarna vid Flatvarp studerades. Signalen hos svaren visade sig nästan oberoende av polarisationsriktningen. Viss skillnad noterades, se [23], men det kan dock inte uteslutas att denna lilla skillnad kan ha andra orsaker. Det tycktes som om absorptionen hos laserstrålning som i mycket flacka vinklar träffade vattenytan inte påverkas av polarisationen.

Aerosolmätningar för lutande banor över havet genomfördes med lidarutrustningen vid fältförsöken i Flatvarp. Den vid tillfället homogena atmosfären visade inga aerosolskikt.

Turbulensmätningar strax ovan vattenytan, ca 1,5 m, genomfördes under två försöksperioder vid Äggskär i Stockholms skärgård. Dessa testergenomfördes för att skapa underlag för test av enkla turbulensmodeller och även för att verifiera simuleringsmodeller, se kapitel 2.3.

En speciell utredning om möjligheten att använda GPS för att bestämma atmosfärens brytningsindex som funktion av höjden för stillastående och rörliga utrustningar genomfördes. I kapitel 2.5 samt i referens [31] ges djupare beskrivning av arbetet.

Ett projektarbete genomfördes för att skapa ett simuleringsprogram för att beräkna inverkan av atmosfärsturbulens på laserpropagering. Simuleringsprogrammet kan även ta med inverkan av vibrationer hos laserplattformen vid exempelvis beräkning av sannolikheten för signalöverföring eller laserutpekning, se referens [36].

Ett projektarbete genomfördes med en student från Ecoles Militaires de Saint-Cyr Coëtquidan, Guer, Frankrike, där jämförande studier av ultraljudsanemometer och scintillometer vid bestämning av turbulensnivå i atmosfären för strålning inom det optiska området inleddes, se referens [37].

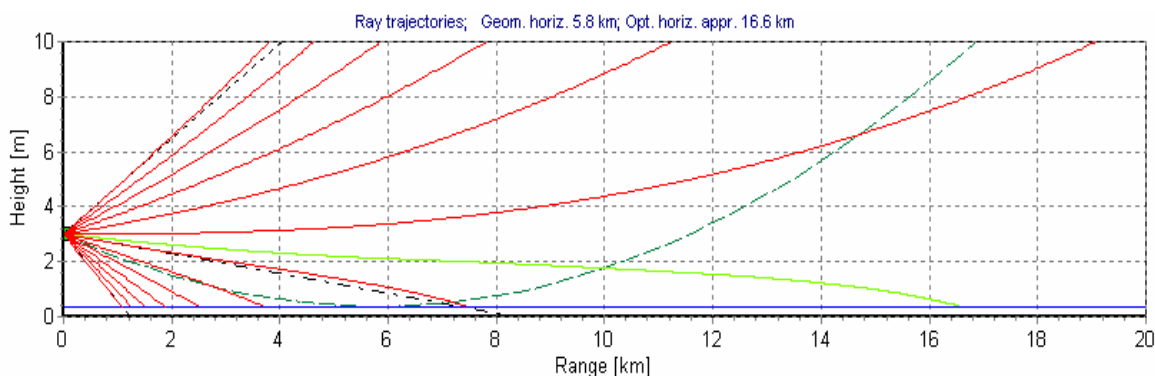
2.2 Mätning av refraktionen för optiska våglängder

Optiska systems prestanda mot mål på låg höjd till havs och speciellt den operativa räckvidden beror starkt av den vertikala brytningsindexprofilen. Luftens brytningsindex beror av temperatur, tryck och fuktighet. För optiska system är temperaturen den viktigaste parametern och brytningsindexprofilen kopplas därför till temperaturprofilen. I gränsskiktet närmast vattenytan är temperaturprofilen relaterad till parametern ASTD (Air to Sea Temperature Difference), som signifikant påverkar den optiska utbredningen. Förhållanden med kallt vatten och varmare luft (positiv ASTD) ger situationer med s.k. superrefraktion, vilket innebär att nära horisontella strålar böjs ner mot vattenytan mer än de skulle gjort i normalatmosfär. Detta innebär att optiska sensorer får längre räckvidd än vid neutrala förhållanden. I det motsatta fallet med varmt vatten och kall luft (negativ ASTD) kan subrefraktion uppträda vilket innebär att strålar böjs nedåt något mindre än strålar gör i normalatmosfär och att räckvidden därmed blir sämre än i neutrala situationer.

Den normala metoden för att bestämma brytningsindexprofilen, och kanske den enklaste, är att mäta temperaturprofilen. Det kan emellertid vara svårt, speciellt ombord på ett fartyg, att mäta upp en profil som innebär ostörda atmosfäriska förhållanden. De horisontella variationerna av temperaturen kan också vara kraftiga. Vågutbredningseffekterna beror på variationer i brytningsindexprofilen längs hela sträckan och inte enbart på en plats.

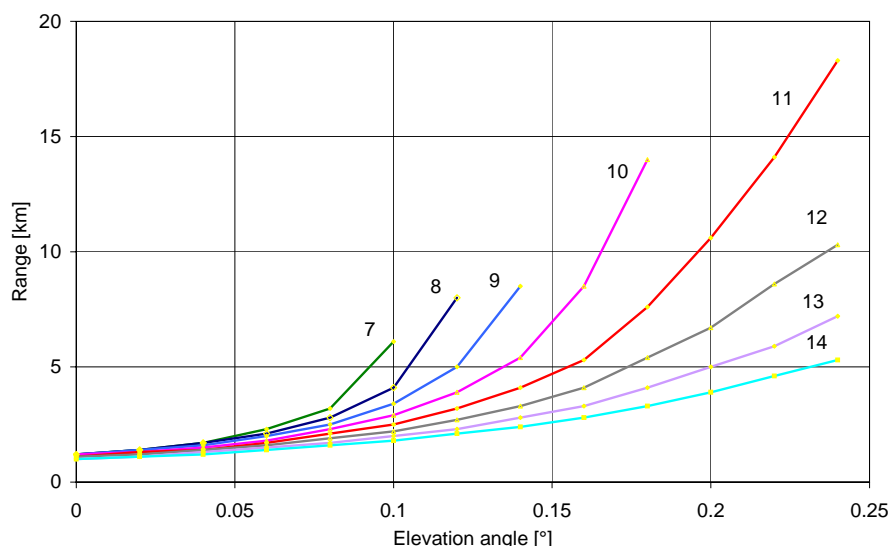
I detta avsnitt föreslås en metod som innebär att en lidar används för att mäta upp atmosfärens egenskaper och extrahera information om brytningsindexprofilen. Resultat från mätningar avsedda att testa metoden presenteras.

Beräkning av strålbånar kan genomföras relativt enkelt med numeriska program, som löser en differentialekvation baserad på Snells lag för kontinuerligt varierande medier. Sfärisk geometri används vanligen, eftersom jordytan och speciellt havsytan är i stort sett sfärisk. Det svåra problemet ligger i att bestämma temperaturprofilen. Program för strålbåneberäkning, som ingår t.ex. EOSTAR [21], utnyttjar olika algoritmer för att beräkna brytningsindex med bl.a. ASTD som indata. Figur 2.2.1 visar strålbånar (röda kurvor) beräknade med EOSTAR i olika vinklar över en vattenyta från en punkt på 3,0 m höjd över havsytan. I simuleringen definierades optik med en aperturvinkel på 0,24 milliradianer.



Figur 2.2.1: Kurvor över beräknad strålgång från 3 m höjd med hjälp av programmet EOSTAR.

Vid beräkningarna har följande värden använts: Relativ fuktighet 85 %, vindhastighet 5 m/s, lufttemperatur 8,0 °C och ytvattentemperatur 6,0 °C. Den optiska horisonten märks ut av den ljusgröna kurvan och var i detta fall 16,6 km. Blå horisontell linje illustrerar beräknad våghöjd. Grön streckad kurva markerar den geometriska horisonten, som blir en krökt linje i detta diagram, som plottats med "plan jord". Om strålbånornas avstånd till skärning med vattenytan plottas som funktion av elevationsvinkeln fås ett diagram liknande figur 2.2.2, där den svarta kurvan är baserad på värden från samma beräkning som figur 2.2.1. Beräkningar har gjorts för lufttemperaturer mellan 7 och 14 °C i steg om 1°, och därmed för ASTD-värden mellan 1 och 8 °C.



Figur 2.2.2: Avstånd som funktion av elevationsvinkel från EOSTAR för 8 olika temperaturer.

2.2.1 Horisontella mätningar med lidar

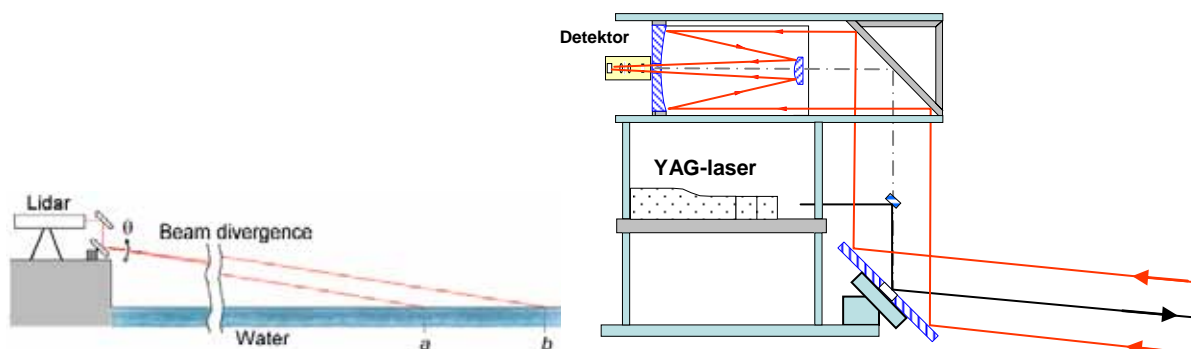
Lidarns princip kan i korthet beskrivas på följande sätt: Laserstrålning i korta pulser skickas ut i atmosfären i en tunn stråle (laserlob). Strålningen sprids i molekyler och aerosolpartiklar. En viss del sprids tillbaka och detekteras i en mottagare som är placerad intill lasern. Den bakåtspridda strålningen når mottagaren med en viss tidsfördröjning som är proportionell mot avståndet till de spridande partiklarna. Detektorsignalen som vanligen kallas lidarsvaret innehåller information av fördelningen av spridande partiklar utmed lidarlobens sträcka. Lidarsvaret digitaliseras och överförs till en dator för analys. Principen för de refraktionsförsök som beskrivs i detta avsnitt illustreras i figur 2.2.3.

En lidar med ett spegelvridsystem som kan rikta både sändare och mottagare placeras strax över vattenytan t.ex. på en kaj eller på ett fartyg. Det senare fordrar troligen speciella arrangemang för stabilisering av lidarloben. Loben riktas nästan horisontellt ut över vattenytan och styrs inom en smal vertikal sektor. Detta kan illustreras av figur 2.2.1 om man tänker sig de röda linjerna som centralstrålar från lidarns optik. Vinkelsteget mellan dessa kurvor är i samma storleksordning som vridningen av lidarns inriktning i elevationsled. Uppmätta lidarsvar från elastisk spridning i molekyler och aerosolpartiklar lagras för ett antal elevationsvinklar i små steg. För vinklar under en viss gräns som motsvarar den optiska horisonten, träffar loben vattenytan. Avståndet till denna skärningspunkt kan avläsas i lidarsvaret som lagras tillsammans med aktuell vinkel för analys. Den refraktionsindex-profil som är aktuell vid mättillfället kan sedan tas fram genom att jämföra uppmätta avstånd och vinklar med motsvarande värden från beräkningar med hjälp av en strålbanelmodell.

2.2.2 Lidarsystemet

Lidarsystemet byggdes ursprungligen för mätning av aerosoler med vertikal sondering bl.a. inom EARLINET projektet [22]. Lasern som ingår i systemet består av en pulsad Nd:YAG laser från Quantel. Denna är försedd med en enhet som genererar tredje övertonen vid 355 nm inom UV. Lidarsystemet är koaxiellt, vilket betyder att laserstrålen sänds ut längs mottagarens centrala optiska axel. Vid de mätningar över

vattenytan som beskrivs i detta avsnitt har lidarn kompletterats med ett spegelvidsystem som samtidigt kan rikta laserloben och mottagarloben i små steg i önskad riktning med upplösningen 1/100 grad, se figur 2.2.3. Beträffande tekniska data, se referens [23].

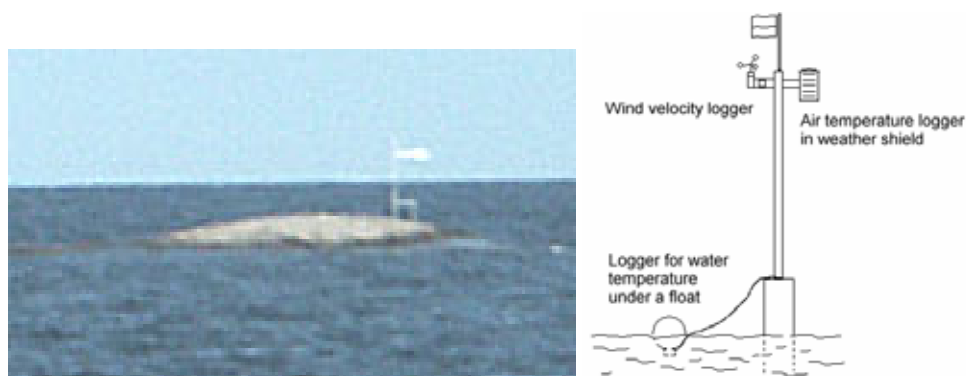


Figur 2.2.3: Lidarns mätprincip till vänster samt lidar arrangemang för horisontell sondering till höger i bilden.

2.2.3 Mätningar av strålvböjning

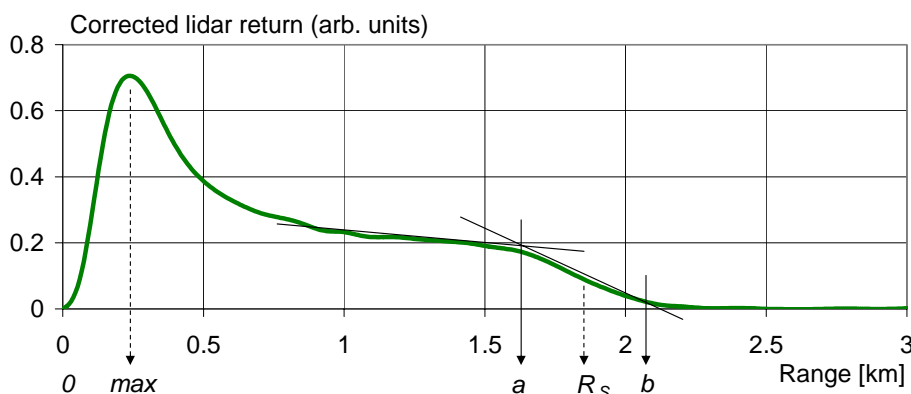
Mätningar utfördes under två dagar i maj 2003 och en längre period maj/juni 2004 i Flatvarp, som är en liten hamn på ostkusten nära gränsen mellan Småland och Östergötland. Mätningarna 2003 har rapporterats i en FOI-rapport [1], medan mätningarna under 2004 som mest utförligt rapporterats i ett FOI Memo [23].

Lidarutrustningen placerades nära vattnet med optikens centralaxel 3 m över vattenytan. Höjden varierade med vattenståndet. En tillräckligt stor sektor med fritt vatten ut över Bottenhavet utan klippor eller andra hinder kunde användas för lidarsondering. Ett litet grund med en klippa som stack upp några dm strax bredvid mätsektorn kunde användas som vinkelreferens. Andra året placerades ett stativ med en referenstavla på 3 m över vattenytan på grundet. Några hundra meter från land placerades en boj försedd med utrustning för mätning av luft- och vattentemperatur. Bojen kompletterades 2004 för mätning av vindhastighet. Sensorernas höjd över vattenytan var 1,5 m. Mätutrustningen var försedd med enhet för lagring av periodernas mätvärden



Figur 2.2.4: Referenstavla monterat på ett grund t. v. samt skiss över mätboj t. h.

I figur 2.2.5 visas ett exempel på ett lagrat lidarsvar bestående av medelvärdet av 600 enskilda svar. Svaret har avståndskorrigerats genom att varje punkt $P(r)$ multiplicerats med r^2 , men troligen pga. mätnadseffekter i detektorn har svaret ett maximum vid omkring 250 m för att sedan avta. Detta har emellertid ingen eller obetydlig påverkan vid dessa mätningar.



Figur 2.2.5: Avståndskorrigerat lidarsvar.

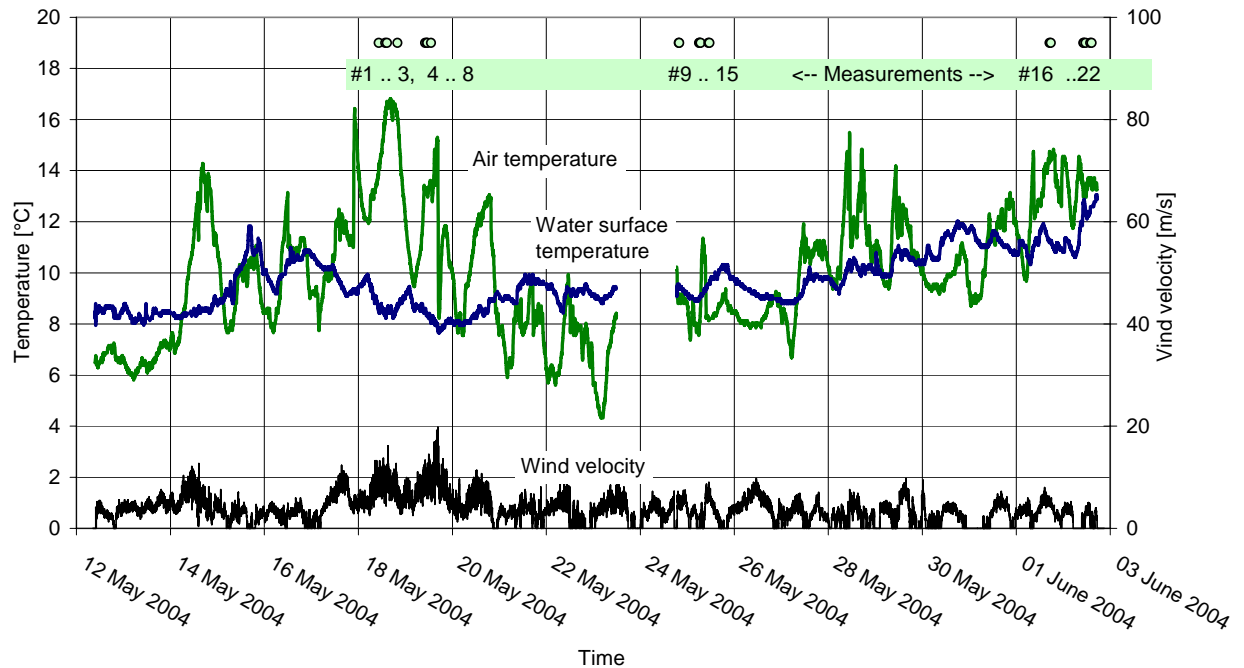
Vid avståndsintervallet mellan a och b (se figurer 2.2.3 och 2.2.5) träffar laserstrålen vattenytan i gradvis ökande omfattning och svaret minskar till nära noll vid b . Avståndet R_S beräknas som medelvärdet av a och b . Det antas representera avståndet där strålens centrum når vattenytan. Speciellt för långa avstånd ökar osäkerheten i bestämningen av R_S -värdet starkt beroende på brus och ytvågor.

Mätningarna 2003 utfördes under två dagar 20 - 21 maj [1]. Vädret varierade kraftigt mellan klart med solsken och molnigt med regnskurar. Lidarsonderingar genomfördes vid nio tillfällen. Vid varje tillfälle utfördes mätning i ca tio vinklar. För varje vinkel har medelvärdesbildats 600 lidarsvar.

Inför mätkampanjen 2004 förbättrades utrustningen på ett antal punkter och rutinerna vid mätningarna sågs över:

- Laserns stråldivergens minskades från 0,4 till 0,1 milliradianer med hjälp av en strålexpanderare.
- En polarisationsvridande komponent installerades för att göra det möjligt att justera polarisationen i laserstrålen från horisontell till vertikal.
- Ett referensmål bestående av en målad plåtskiva monterades på grundet på ca 1 km avstånd. Höjden över vattenytan anpassades till att vara samma som centrum hos lidars optik.
- En väderstation placerades nära vattnet. Den mätte och lagrade temperatur, relativ fuktighet, vindhastighet och riktning, nederbörd och lufttryck.
- Bojen kompletterades med sensor och lagringsenhet för vindhastighet.
- Luft- och ytvattentemperatur mättes i hamnen nära lidarn.
- Vattennivån mättes manuellt inför varje mätning.
- Spegelns vinkel på det fjärrstyrda vridbordet avlästes och protokollfördes manuellt för att minska onoggrannheten pga. hysteres och missade stegkommandon.

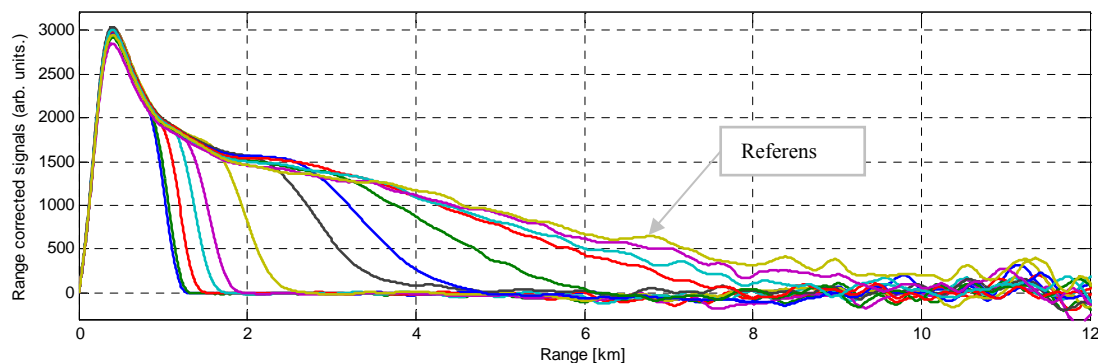
Ett tjugotal mätningar genomfördes 2004. Prov nr 1 – 18 och 21 innehöll mätning av refraktionen, prov nr 19 enkelskottsmätningar och nr 20 kartering av aerosoler i luften i sneda banor. I prov nr 22 genomfördes prov med olika polarisationer.



Figur 2.2.6: Luft- och ytvattentemperatur och vindhastighet mätt i bojen. Lidarmätningar i prov 1 – 22 utfördes vid markerade tillfällen.

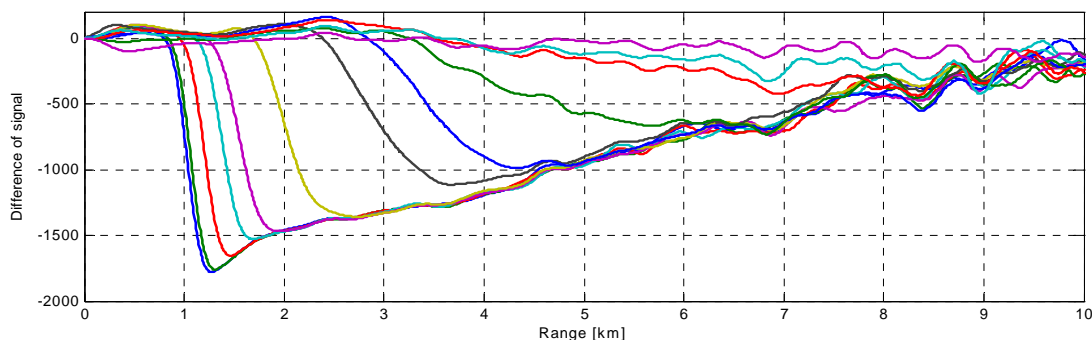
2.2.4 Analys

De lagrade lidarsvaren har analyserats för att bestämma värdena på avstånden R_S där lidarlobens centrum enligt figurer 2.2.1 och 2.2.4 skär vattenytan. I figur 2.2.7 ges lidarsvar från prov nummer 9, där svaren från ett antal mätningar med olika elevationsvinklar visas. Följande metod har använts vid utvärderingen: En komplett mätserie bestående av ca 10 st. lidarsvar representerande olika elevationsvinklar analyseras. Ett svar som är mätt strax över vattenytan (samma höjd som referensmålet) används som referens. Detta svar (indikeras i figur 2.2.7) skall inte vara påverkat av några returerna från vattenytan utan enbart från aerosoler och molekyler i atmosfären.



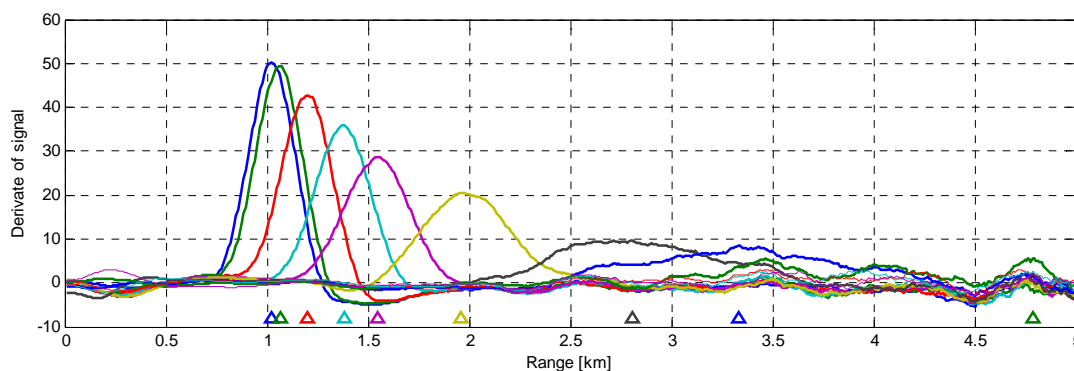
Figur 2.2.7: Lidarsvar från prov nr. 9.

Svaren från övriga vinklar subtraheras från referenssvaret och en ny serie data bestående av skillnadssvaren skapas, se figur 2.2.8. Dessa utjämnas med hjälp av ett spatialt filter för att reducera bruset. Inom intervallet a till b där lidarloben skär vattenytan, ökar skillnadssvaret från en låg nivå till en påtagligt högre. Denna uppgång som kan representeras av derivatan har ett maximum ungefär på avståndet där lidarloben skär vattenytan. Avståndet för maximala derivatan kan därför anses motsvara avståndet R_S .



Figur 2.2.8: Kurvor med skillnadssvaren från prov nr 9.

I figur 2.2.9 visas de deriverade skillnadssvaren. Avstånden R_S , som motsvarar derivatornas maximum är markerade vid avståndsskalan i figuren med respektive kurvas färg.



Figur 2.2.9: Deriverade skillnadssvar. Avstånden R_S är markerade från prov nr 9.

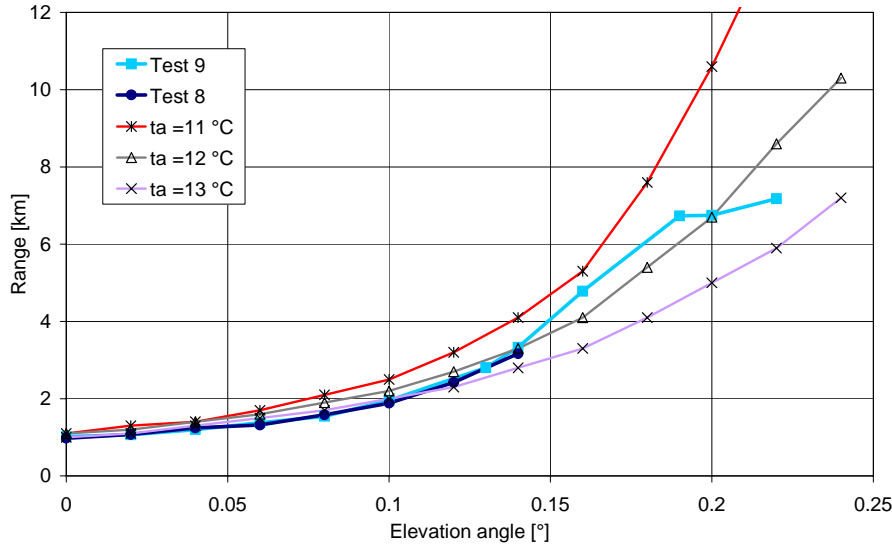
Med R_S -värdena plottade kontra motsvarande värde på elevationsvinkeln från lidarsonderingar skapas ett diagram som är karaktäristiskt för rådande strålbaneutbredning och beror på brytningsindexprofilen i atmosfären. Genom jämförelse med motsvarande kurvor beräknade med hjälp av en strålböjningsmodell, kan man få information om atmosfärens brytningsindex-profil. Se exempel i figurerna 2.2.10 – 2.2.13 där uppmätta värden från lidarn enligt denna analysmetod plottats tillsammans med beräknade med hjälp av EOSTAR för vädret som rådde vid de aktuella mätillfällena enligt uppmätta värden i bojen.

2.2.5 Resultat

Nio prov genomfördes under fältförsöket 2003 and 22 prov under 2004. Avsikten med experimentet 2003 var mer eller mindre att testa den inversa metoden med refraktionsmätningar med lidar och under 2004 att genomföra med ett förbättrat mätsystem under olika väderförhållanden, t.ex. positiv och negativ ASTD (för att få situationer med såväl superrefraktion som subrefraktion), mätningar med olika polarisation hos laserstrålen och med bättre stöd från mätningar av väderdata.

På det hela taget var vädersituationen olämplig för mätningar under den begränsade mätperioden 2003. Resultat från två mätningar (prov nummer 8 och 9) visas i figur 2.2.10. Eftersom vädret växlade under dagen med flera regnskurar fick mätningarna utföras när det var möjligt. Mellan skurarna sken solen. Vid tidpunkten för mätningarna steg temperaturen uppmätt i bojen drastiskt och det är svårt att knyta någon viss registrerad temperatur till tidpunkten, har flera strålbaneberäkningar för olika rimliga

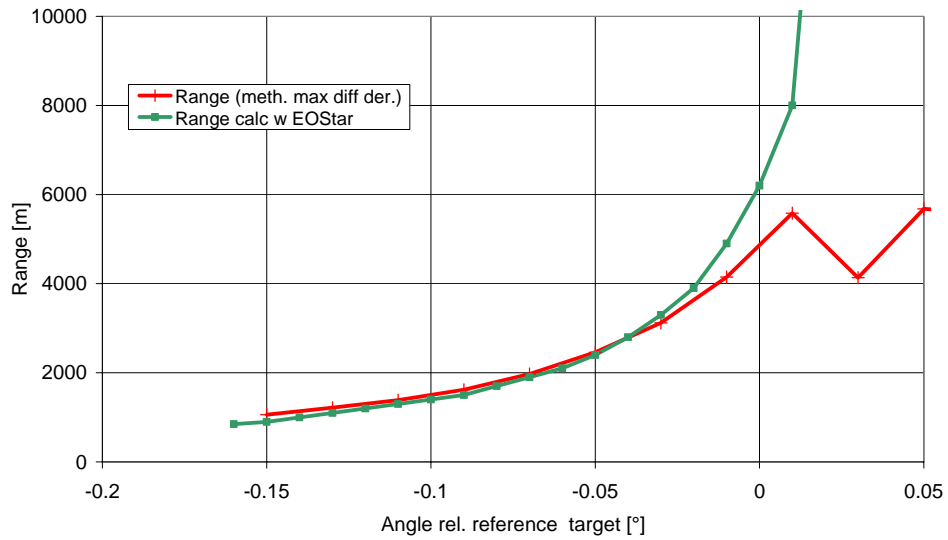
temperaturer utförts. Resultaten från prov 8 och 9 är plottade i figur 2.2.10 tillsammans med beräknade värden från EOSTAR för tre olika lufttemperaturer, 11, 12 och 13 °C som motsvarar värden som mättes i bojen vid tiden för proven. Det framgår att överensstämmelsen mellan värden från lidarmätningarna och beräknade värden för temperaturen 12 °C är god.



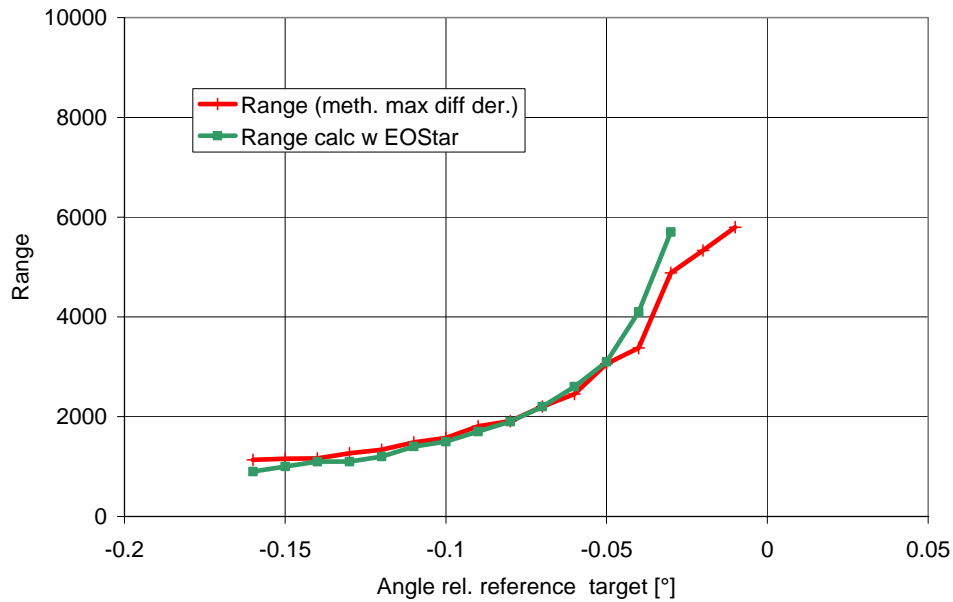
Figur 2.2.10: Jämförelser mellan avstånd för olika elevationsvinklar mätta med lidarn i prov 8 och 9 år 2003 och beräknade med EOSTAR.

Fältförsöket 2004 genomfördes mellan den 10 maj och den 2 juni. Avsikten var att genomföra mätningar vid ett antal olika vädersituationer under perioden. Ambitionen var framförallt att fånga situationer med både positiv och negativ ASTD. En annan fördel var att kunna lämna mätutrustningen under dagar med olämpligt väder, t.ex. regn. Tre mätperioder med lämpligt väder under de fyra veckorna i maj och början av juni innehöll situationer med ASTD-värden mellan -1 och +8 °C, men ingen situation med uttalat negativa värden.

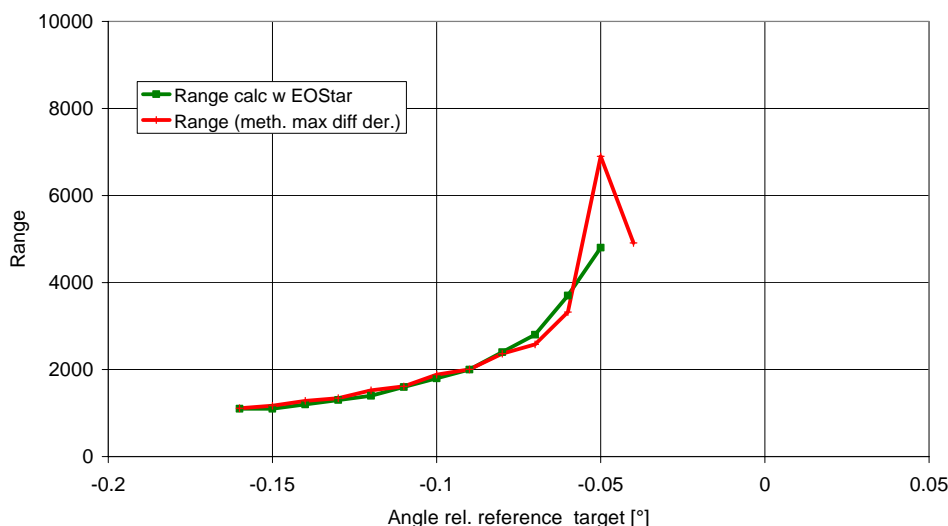
Figur 2.2.11 visar en situation med relativt hög positiv ASTD (+ 8 °C), figur 2.2.12 visar en situation med mindre påtaglig positiv ASTD och figur 2.2.13 en situation med närmast neutrala förhållanden (ASTD = + 0.5 °C).



Figur 2.2.11: Avstånd som funktion av elevationsvinkel. Provn nr 3, 2004. ASTD = +8 °C.



Figur 2.2.12: Avstånd som funktion av elevationsvinkel. Provn nr 16, 2004. ASTD = +3 C°.



Figur 2.2.13: Avstånd som funktion av elevationsvinkel. Prov nr 18, 2004. ASTD = +0,5 °C.

2.2.6 Aerosolmätningar i lutande banor

En lidar försett ett system för inriktning av loben i olika vinklar, såsom det beskrivna, kan även användas till aerosolmätningar för att exempelvis kartlägga den vertikala fördelningen (profilen) av aerosolparametrar. Extinktionskoefficienten är speciellt intressant. Profiler av denna parameter kan användas för att beräkna räckvidden hos optiska sensorer i sneda banor från fartyg. Under mätkampanjen i Flatvarp mättes ett antal lidarsvar i sneda vinklar 0° till 25° över horisonten i steg om 1°. Data avståndskorrigerades och plottades med falska färger i ett diagram. Eftersom aerosolfördelningen i luften vid mättillfället var homogen, visade diagrammet inga skikt e.d. Det utelämnas i denna rapport men finns med i FOI Memo enligt [23].

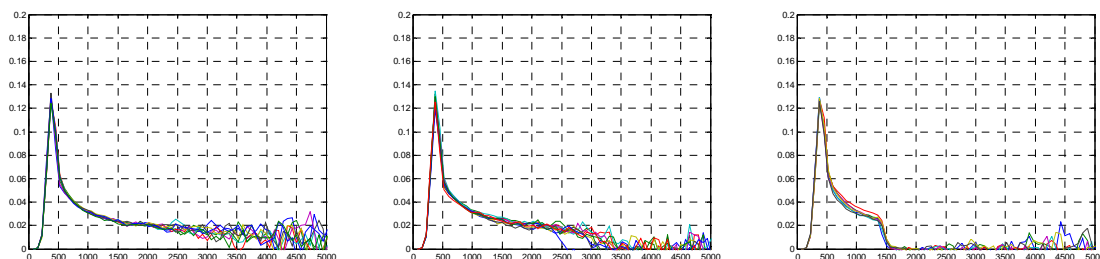
2.2.7 Polarisationseffekter

Med syftet att studera effekterna av olika polarisation i lidarloben, uppmättes lidarsvar med både vertikal och horisontell polarisation. Mottagarens känslighet var oberoende av utsänd polarisation. Både svar från enkelskott och medelvärdesbildade svar från 300 skott analyserades. Mätningarna av strålvbøjning 2003 utfördes med horisontell polarisation, medan mätningarna 2004 huvudsakligen utnyttjade vertikal polarisation.

Skillnader mellan de två polarisationerna kunde konstateras, speciellt uppvisades olika mycket brus i signalen på avståndet för skärning av vattenytan. En anledning till skillnader i bruset kan vara att bakåtspridningen i små droppar strax över vattenytan är mindre med horisontell polarisation. Det går inte att dra någon säker slutsats från det begränsade antalet mätningar som utförts. I FOI Memo [23] redovisas mätningarna och effekterna mer utförligt.

2.2.8 Mätningar med enkelskott i tre vinklar strax över vattenytan.

För att söka finna ut hur strålningen från laserloben sprids då strålningen når vattenytan med vågor, små vattendroppar och aerosoler, gjordes tre prov med vardera ca tio enkelskott i olika vinklar mot vattenytan. Vinklarna relativt referensmålet var -0.04, -0.1 och -0.15 °. Proven utfördes med vertikal polarisation. Diagrammen i figur 2.2.14 visar svaren från de tre mätriktningarna.



Figur 2.2.14: Lidarsvar från enkelskott i vinklarna -0.04 , -0.1 and -0.15 ° relativt horisonten.

2.2.9 Diskussion och förslag

De analyserade resultaten från refraktionsmätningarna med lidar visar ganska god överensstämmelse med beräknade värden med hjälp av EOSTAR-modellen, speciellt för små vinklar och korta avstånd. För större värden på avstånd och elevationsvinkel är avvikelserna större, men fortfarande inom hyfsade gränser. En förklaring till avvikelserna kan vara att fel uppträder på långa avstånd beroende på laserlobens relativt stora diameter och den lilla infallsvinkeln mot vattenytan. Vattenvågor kan spela roll och även horisontella temperatur-variationer.

Resultaten från proven verkar lovande. Experimenten visar relativt bra överensstämmelse mellan lidarns och modellens resultat. Skäl till avvikelser kan ha varit vågor och horisontella temperaturvariationer. Spegelvidsystemets upplösning var alltför grov ($1/100$ grad) och alltför osäker i avläsning (verklig vinkel $\pm 1/100$ grad). Detta skulle kunna avhjälpas med ett spegelvidsystem med finare steglängd och mer tillförlitlig kontroll och avläsning.

En modifiering som förberetts men inte provats är att installera en Ramancell för att generera strålning vid $1.54 \mu\text{m}$. En lidar vid den våglängden skulle vara ögonsäker och även lämplig för bestämning av extinktionskoefficienten. Prov ombord ett fartyg har diskuterats, men skulle innebära andra problem att lösa, till exempel stabiliseringen av lidarsystemet.

En intressant observation var att vi inte såg någon stark "spik" från spridning i vattenytan, inte ens vid mätningar av enkelskott. En slutsats är att det inte sprids någon stark strålning tillbaka från vattenytan.

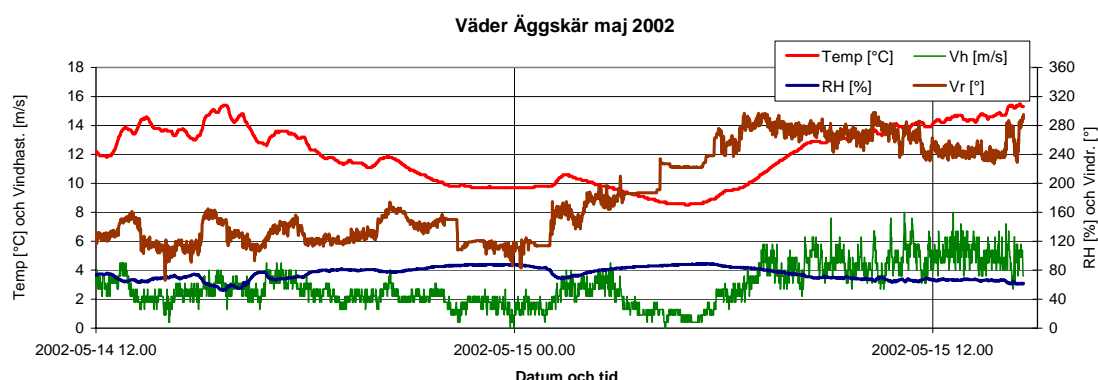
2.3 Turbulensmätningar

Försöken genomfördes under mitten av maj under två år, 2002 och 2005, vid marinens anläggningar utanför Berga i Stockholms södra skärgård. Samma mätsträcka för scintillationsmätningarna användes under båda åren. Den gick mellan Bergholmen (sändare) och Lilla Äggskär (mottagare) och var 1 km lång. Höjden över vattenytan var 2 m.



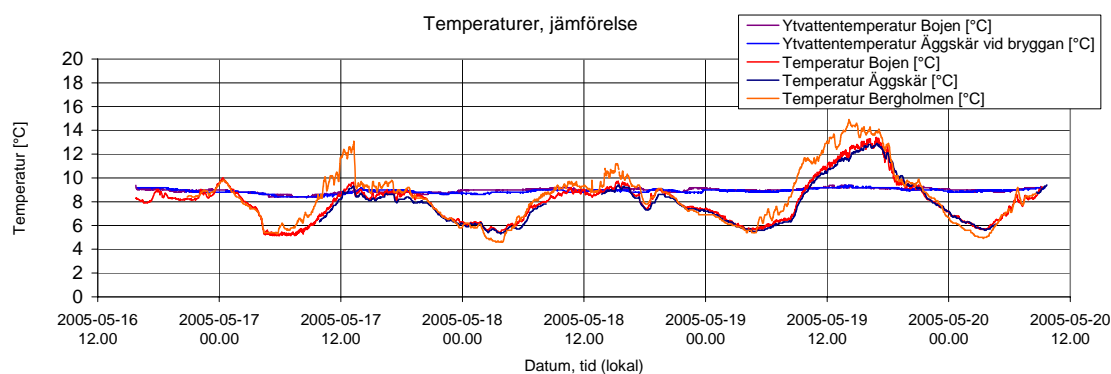
Figur 2.3.1: Försöksområdet utanför Berga, bilden t.v., samt mätsträckan sedd från sändarsidan.

Vid försöket 2002 provades scintillometern BLS 900 under drygt ett dygn samtidigt som vädret registrerades i en väderstation nära vattnet på Äggskär. Ytvattentemperaturen mättes för hand med en enkel termometer som doppades i vattnet bredvid bryggan vid några tillfällen per dag. Temperaturen låg på ca 11 °C vid avläsningarna. Figur 2.3.2 visar väderdata uppmätta under drygt ett dygn på Äggskär. Med lufttemperaturen minskad 11 °C fås ungefärliga ASTD-värden för perioden. Som synes uppträdde situationer med såväl positiva som negativa ASTD-värden (lägst ca – 3,4 och högst ca + 5,2 °C).



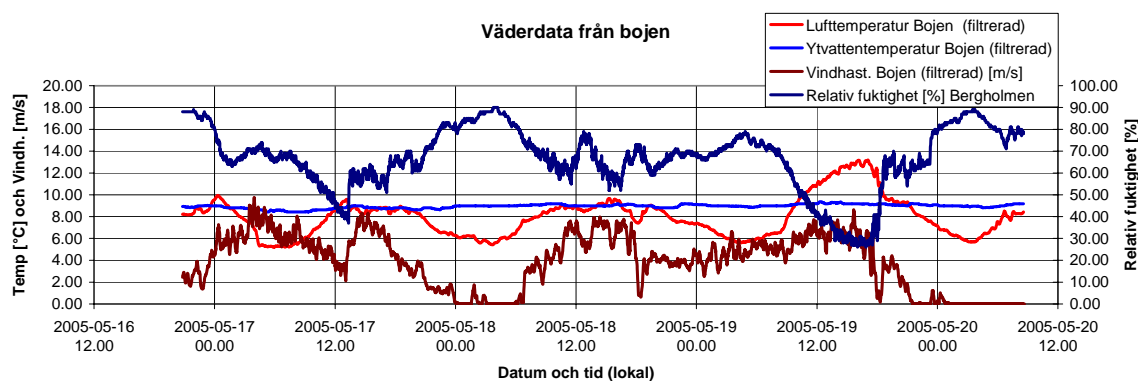
Figur 2.3.2: Väderdata uppmätta på Äggskär under drygt ett dygn

Inför försöket 2005 hade scintillometern bytts ut mot en större variant, typ BLS 2000, som klarar att mäta över en längre sträcka. Samma väderstation som 2002 användes och den placerades på samma ställe som då. Dessutom placerades en mindre väderstation i mätsträckans andra ändpunkt på Bergholmen. Bredvid mätsträckan sattes en mätte och loggade vindhastighet, luft- och ytvattentemperatur på 1,5 m höjd över vattenytan. En akustisk anemometer som mätte vinden i tre dimensioner placerades bredvid väderstationen på Äggskär. Avsikten var att jämföra turbulenta luft rörelser mätta med punktinstrument och med optisk turbulens mätt med scintillometern. Denna jämförelse kunde inte göras eftersom inte rådata sparades på i datorn, berodde på att fel programvara användes av misstag.



Figur 2.3.3: Temperaturer uppmätta inom försöksområdet på tre ställen.

Bredvid mottagaren placerades en väderstation. Under andra året placerades dessutom en väderstation på Bergholmen och en boj med en mindre väderstation i vattnen mellan öarna. Figur 2.3.3 visar temperaturer mätta på de tre ställena under de nästan fyra dygnet. (ASTD-värden mellan $-3,6$ och $+3,6$ °C).



Figur 2.3.4: Luft- och ytvattentemperatur och vindhastighet uppmätta i bojen samt relativ fuktighet uppmätt på Bergholmen, 2005.

Vi uppmärksammar den utmärka stöttningen från personalen på Berga vid försöken, Mats Nyberg och Andreas Carlsson bör nämnas speciellt.

2.3.1 Semiempirisk modell för C_n^2 .

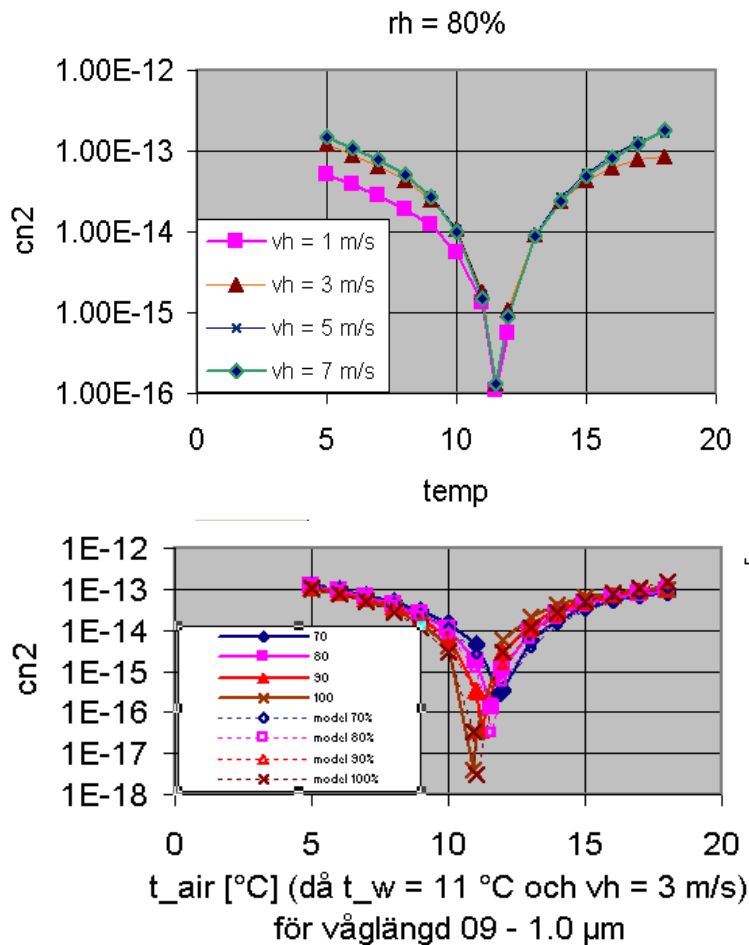
En semiempirisk numerisk modell för strukturkonstanten för brytningsindexvariationer, C_n^2 , (ibland även kallad den optiska turbulensen) togs fram med hjälp av upprepade beräkningar med EOSTAR, se referens [21]. Modellen utgår från $ASTD$, RH och U_a värden från mättes med väderstationen under försöket 2002. Två delmodeller skapades med följande parametrar och begränsning:

$C_n^2 = f(t_a, RH)$ där $t_a = 5, 6 \dots 18$ °C, $RH = 70, 80 \dots 100$ %, $t_s = 11$ °C och $U_a = 3$ m/s och

$C_n^2 = f(t_a, U_a)$ där $t_a = 5, 6 \dots 18$ °C, $U_a = 0.5, 1, 3, 5, 7, 10$ m/s, $t_s = 11$ °C, $RH = 80$ %

Där t_a är lufttemperaturen, t_s är lufttemperaturen, U_a är vindhastigheten och RH är relativa luftfuktigheten. Värdena på använda luft- och ytvattentemperaturer ger $ASTD$ -värden mellan -6 och $+7$ °C. Modellen är endast provad med dessa $ASTD$ -värden, $RH 70$

– 100 % och vindhastigheten 0.5 – 10 m/s. Övriga parametrar som indata till EOSTAR var $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$, $h = 2 \text{ m}$ och $R = 1.1 \text{ km}$. I figur 2.3.5 syns resultatet från modellerna i två diagram. I den övre figuren varierar C_n^2 med vindhastigheten och i den undre varierar luftfuktigheten.



Figur 2.3.5: Resultat från modellen för varierande vindhastighet (överst) respektive luftfuktighet (undre delbild).

Modellen har implementerats i ett MATLAB-script enligt tabell 2.3.6. Detta kan anropas direkt i MATLAB kommandofönster.

```
function y = cn2(t_a, t_w, rh, vh);
% semiempirisk modell för cn2
% Indata: t_a lufttemperatur i °C
%      t_w ytvattentemperatur i °C
%      rh relativ luftfuktighet i %
%      vh vindhastighet i m/s
% Utdata: cn2
%
%y = cn2(ta, tw, rh, vh);
```

% konstanter

$c1 = 3e-3$; $c2 = 0.07$; $c3 = 0.52$; $c4 = 1e-3$;

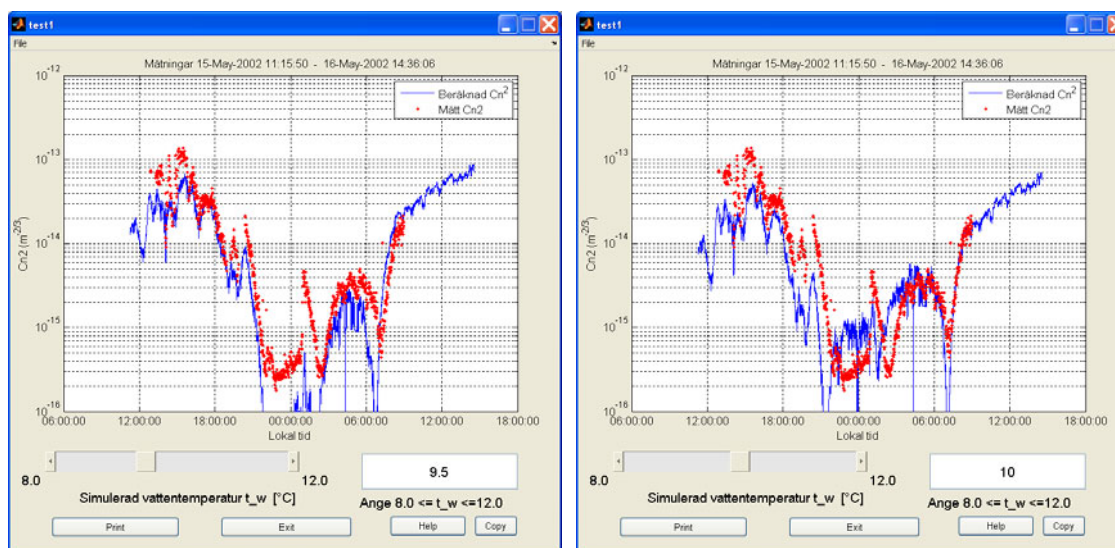
$c5 = 3e-15$; $c6 = 0.03$; $c7 = 3e-018$;

$$y = (c1*vh.^3 - c2*vh.^2 + c3*vh + c4) .* (c5*((t_a-t_w)-(100-rh)*c6).^2 + c7*exp((abs(90-rh)+(90-rh))/20));$$

Figur 2.3.6: Skript över Matlab-funktion för beräkning av C_n^2 .

Ett GUI har tagits fram, se figur 2.3.7, som gör det enkelt att anpassa konstanter som ingår i modellen till uppmätta turbulensvärden. I detta kan man variera ytvattentemperaturen (som ej mättes upp över öppet vatten) mellan 8 och 12 °C. Av figur 2.3.7 framgår att bästa anpassningen fås mellan 9,5 och 10 °C.

Ingångsvärden till modellen hämtas från uppmätta väderdata från väderstationen. Konstant värde för ytvattentemperaturen tas från inmatningsfältet i GUI't. I figur 2.3.7 visar röda punktkurvor uppmätta värden och blå heldragna kurvor beräknade värden enligt modellen.



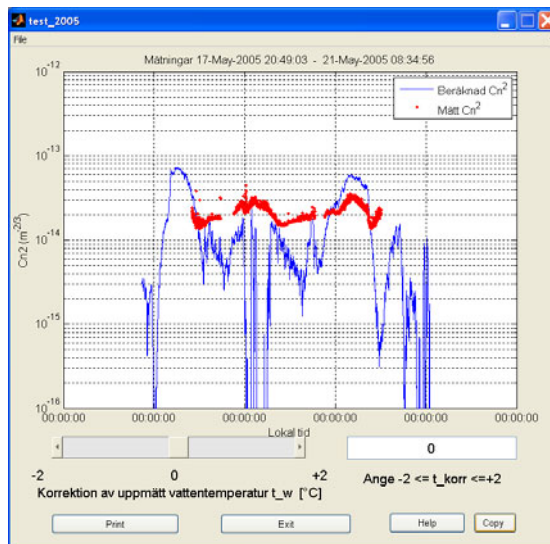
Figur 2.3.7: Prov med två temperaturer som visar bra överensstämmelse.

Modell testades också mot uppmätta värden på strukturfunktionen för brytningsindex, C_n^2 , från 2005 års mätningar. Detta år mättes vindhastighet, luft- och ytvattentemperatur i bojen medan värdena för luftfuktigheten hämtades från väderstationen på Äggskär. Vindhastigheten och temperaturen mättes på en relativt låg höjd, relativt det tidigare försöket.

Anpassningen av de uppmätta C_n^2 modellerade värdena visade stora skillnader. Detta trots att ytvattentemperaturen varierades ytterligare med upp till ± 2 °C.

Jämförelser mellan de uppmätta C_n^2 -värdena, mellan mätningarna 2004 och 2005, visade på en markant olikhet. Under första året varierade de uppmätta värdena över 3 tiopotenser (mellan $2 \cdot 10^{-16}$ och $1.5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^{2/3}$). Under de två dygnens mätningar under 2005 har mätserien av C_n^2 en variation av en faktor ca 3 (mellan $1,2 \cdot 10^{-14}$ och $4,5 \cdot 10^{-14}$).

$m^{2/3}$) och dessutom en helt annan karaktär än första året. Väderförhållandena var likartade med ASTD-värden, relativ fuktighet och vindhastighet inom samma intervall. Under första året användes en mindre typ av scintillometer än under 2005. Scintillometrarna skall i sig ha överlappande funktionsområden och skall kunna användas båda två för denna relativt korta sträckan.



Figur 2.3.9: Prov av modellen med väderdata och scintillationsdata från 2005 års mätningar.

Kontroll beräkningar med EOSTAR visade även dålig överensstämmelse, för mätdata från 2005. Kontroller av mätutrustningen, uppställningen och mätsituationen har inte givit någon uppenbar förklaring till dessa resultat.

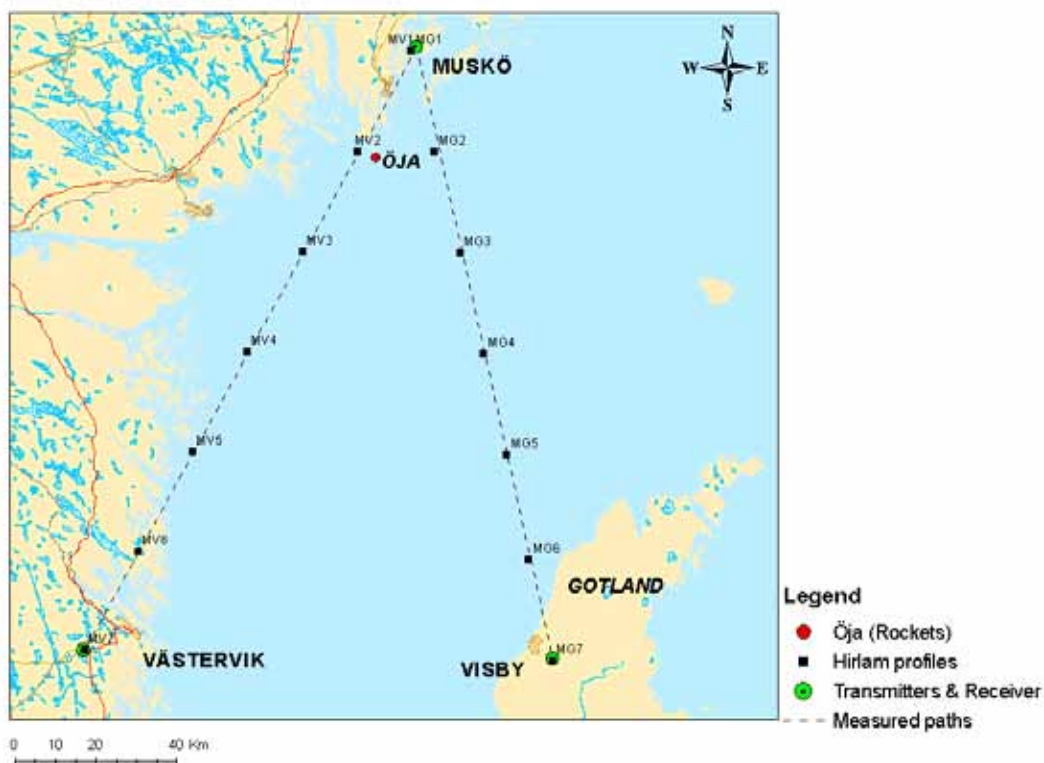
2.4 Vågutbredningsmätningar bortom radiohorisonten över hav

Under sommaren 2005 genomfördes ett vågutbredningsexperiment för att studera hur transmissionen av radiosignaler bortom horisonten varierar med olika meteorologiska förhållanden. Mätningarna skedde över två olika mätsträckor i Östersjön med en gemensam mottagningsstation på Muskö, och vid tre olika radiofrekvenser inom VHF- och UHF-området. Det fanns två syften med detta experiment. Det första var att samla in statistik över utbredningsförhållandena över en längre tidsperiod. Det andra syftet var erhålla mätdata för att kunna undersöka möjligheterna att extrahera information om den vertikala brytningsindexprofilens utseende med hjälp av inversa metoder och data från samtidiga transmissionsmätningar vid olika frekvenser.

Utbredningsexperimentet utfördes under två tidsperioder. Den första perioden varade mellan 2005-05-18 (1630 UTC) och 2005-05-23 (1100 UTC). Den andra perioden, som utgjorde huvuddelen av experimentet, började 2005-07-01 (1630 UTC) och varade fram till 2005-10-06 (1000 UTC); dock med ett avbrott mellan 2005-07-16 (0700 UTC) och 2005-07-22 (1000 UTC) på grund av ett tekniskt fel i mätsystemet.

2.4.1 Försöksuppställning och utrustning

Utbredningsförhållandena mättes samtidigt längs två mätsträckor med en längd av 156 respektive 171 km. Mottagarplatsen, som var gemensam för de båda sträckorna, var belägen på Muskö. Antennhöjden vid mottagaren var 63 m över havet (möh), vilket motsvarade en markhöjd på 45 möh och en masthöjd på 18 m.



Figur 2.4.1: Översikt över mätområdet. Kartan visar att de två utbredningssträckorna Visby—Muskö och Västervik—Muskö till största del ligger över hav. Utbredningssträckan Västervik—Muskö är kustnära, vilket innebär att refraktionsindex längs denna sträcka är mer påverkad av luft som rör sig från land ut över hav.

Som sändare utnyttjades de två FM-TV-radiostationerna i Visby och Västervik, där signalkällorna utgjordes av tre stycken FM-modulerade ljudsändare vid var och en av stationerna. För den lägsta frekvensen (kring 100 MHz) användes rundradiosändare i FM-bandet och det för de två högre frekvenserna (vid ungefär 200 och 600 MHz) utnyttjades ljudkanalerna på två analoga TV-sändare. Frekvens, uteffekt och antennhöjd för var och en av de använda sändarna framgår av tabell 2.4.1. Antennendiagrammen för sändarantennerna är rundstrålande i horisontalplanet medan strålningsdiagrammen i vertikal ledd, på grund av antennerna stora vertikala utsträckning, är mycket smala.

Mottagarantennen utgjordes av en horisontalpolariserad Rohde & Schwartz HL023 A1 logperiodisk antenn med en antennvinst på ungefär 7 dB. Antennen var monterad 18 meter över marken och inriktad mot Visby eftersom denna sträcka ansågs vara huvudmätsträcka i detta experiment. Förlusten i antennvinst i riktning mot Västervik var ungefär 5 dB för samtliga av de använda frekvenserna. Antennvinster och kabelförluster för samtliga mätfrekvenser framgår av tabell 2.4.2. Under den första mätperioden i maj användes en Rohde & Schwartz EB200 mätmottagare, medan det för den senare perioden användes en Rohde & Schwartz ESMB. Prestanda för dessa mottagare (inom det använda frekvensområdet) är mycket lika. Den största skillnaden ligger i att mottagartypen EB200 saknar en effektivvärdesdetektor (RMS-detektor). Mätmottagarna var anslutna till en styrdator som kontrollerade frekvensbyten och samlade in mätdata.

Mottagarbandbredden var 120 kHz och mottagarnas brusfaktorer var mindre än 14 respektive 12 dB för EB200 respektive ESMB.

Tabell 2.4.1: Data för de använda sändarna.

Visby (98 möh)			Västervik (90 möh)		
Frekvens (MHz)	Antennhöjd (m)	Effekt (EIRP) (kW)	Frekvens (MHz)	Antennhöjd (m)	Effekt (EIRP) (kW)
97.2	182 – 207	60	96.0	249 – 274	60
208.75	210 – 223	2.25	187.75	278 – 291	2.25
660.75	238 – 259	37.5	652.75	310 – 328	37.5

Tabell 2.4.2: Data för mottagaren vid de olika mätfrekvenserna.

Visby			Västervik		
Frekvens (MHz)	Antennvinst (dB)	Kabelförlust (dB)	Frekvens (MHz)	Antennvinst (dB)	Kabelförlust (dB)
97.2	6.9	2.0	96.0	1.9	2.0
208.75	7.2	3.0	187.75	2.0	3.0
660.75	7.5	6.0	652.75	2.5	6.0

Trots att sändarantennhöjderna är stora ligger båda sändarna avsevärt bortom horisonten sett från mottagarantennen. Utbredningsdämpningen för utbredning över en sfärisk jordyta (relativt utbredning i fritt rum), under förhållanden motsvarande standardatmosfär, är för sträckan Visby—Muskö 39.1, 41.9 och 50.0 dB vid 97.2, 208.75 respektive 660.75 MHz. För sträckan Västervik—Muskö är motsvarande utbredningsdämpningar 41.6, 45.3 och 56.4 dB, vid 96.0, 187.75 respektive 652.75 MHz.

2.4.2 Registrering av meteorologiska data

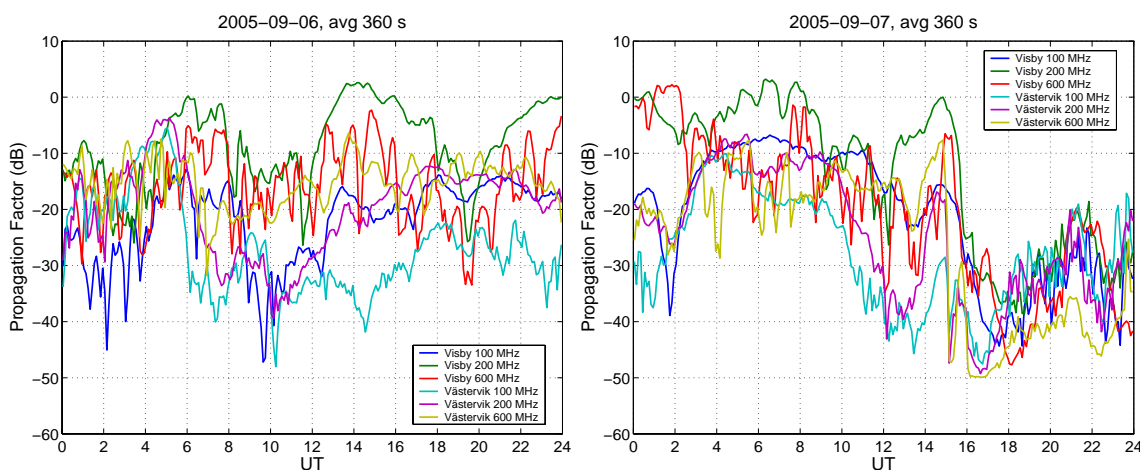
Under utbredningsmätningarna samlades meteorologiska data in, både i form av direkta observationer samt data baserade på den numeriska vädermodellen HIRLAM. Brytningsindexprofiler från hirlamdata beräknades för var sjätte timma för de 13 positionerna som visas i figur 2.4.1. Under mätperioden genomfördes två mätserier med raketsonder. Under dessa raketmätningar registrerades meteorologiska data från en lokal väderstation och en boj, samt från reguljära sonderingar med radiosonder på Visby flygplats.

Den första serien av raketsonderingar genomfördes mellan den 17 – 19 maj 2005. På grund av att raketmätningarna skulle koordineras med ett annat försök genomfördes vid denna tidpunkt de flesta av raketuppskjutningarna från ett område nordväst om och inte söder om Muskö, vilket hade legat mer i området för utbredningsmätningarna. Ett begränsat antal raketer sköts dock upp från fartyget HMS Ägir söder om Muskö. På grund av tekniska problem med raketerna kom bara ett fåtal av dessa uppskjutningar att ge användbara resultat.

Den andra perioden av raketsonderingar skedde den 6 – 8 september 2005 från ön Öja som ligger i närheten av de båda mätsträckorna. Under denna tidsperiod sköts totalt 12 stycken raketer upp och alla fungerade enligt förväntan.

2.4.3 Signalstyrkeregistreringar

Samplingen av den mottagna signalstyrkan skedde på något olika sätt för de två olika mottagare som användes under mätperiodens olika delar. För båda mottagarna mättes signalstyrkan för de olika frekvenserna sekventiellt, men eftersom EB200-mottagaren inte var utrustad med en rms-detektor samplades istället dess så kallade ”fast detektor” med så hög samplingsfrekvens som möjligt och ett RMS värde hos signalstyrkan beräknades från 100 konsekutiva sampel. Detta förfarande medförde dock att hastigheten i avsökningen av de olika mätfrekvenserna begränsades till 8 sekunder för en cykel med de 6 frekvenserna. För ESMB-mottagaren, som hade en inbyggd rms-detektor, kunde de sex frekvenserna avsökas på en tid av 0.2 s, med en integrationstid i detektorn på 10 ms. För att reducera mängden insamlat data, men ändå erhålla visst data med hög tidsupplösning för analys av fädningsstatistik, användes två olika samplings scheman vid mätningarna med ESMB-mottagaren. Därför mättes de tre första minuterna av varje hel timma med en samplingstakt (period) på 0.25 s (över alla frekvenser), och resten av tiden mättes med en samplingsperiod på 5 s.



Figur 2.4.2: Uppmätt utbredningsfaktor för mätsträckorna Visby—Muskö och Västervik—Muskö. Resultaten är för de två dagarna 2005-09-06 och 2005-09-07.

Under de fem mätdagarna under maj lagrades alla data lokalt i styrdatorn medan insamlat data under resten av mätningarna automatiskt överfördes från styrdatorn med hjälp av ftp en gång per dygn.

2.4.4 Dataanalys

I efterbearbetningen av data omvandlades de registrerade fältstyrkorna till transmissionsförlust genom att beakta utsänd effekt, antennvinst och kabelförlust för respektive frekvens. För att underlätta jämförelser mellan de olika frekvenserna omvandlades transmissionsförlusten också till utbredningsfaktor. Utbredningsfaktorn är förhållandet mellan aktuell (uppmätt) fältstyrka och fältstyrkan för utbredning i fritt rum för motsvarande avstånd. I figur 2.4.2 visas den uppmätta utbredningsfaktorn för två dagar.

2.4.5 Resultat av vågutbredningsmätningarna

Ett syfte med mätningarna var att undersöka möjligheterna att extrahera information om den vertikala brytningsindexprofilens utseende med hjälp av inversa metoder och data

från transmissionsmätningar vid olika frekvenser. Detta har gjorts och är redovisat i WP 3 [10], där erhållna brytningsindexprofiler från utbredningsmätningarna jämförs med profiler erhållna från raketsonderingar. Resultatet av detta visar på att det är möjligt att extrahera information om den vertikala brytningsindexprofilen med hjälp av inversa metoder, förutsatt att relevanta transmissionsmätningar finns att tillgå vid några olika frekvenser.

2.5 Användning av GPS för att bestämma refraktionen

Sondering, exempelvis raketsondering, ger en god vertikal upplösning men sämre upplösning spatalt, horisontalt, och temporalt. Raketuppskjutningar kan även öka risken för upptäckt eller uppfattas som fientliga i konfliktområden. GPS skulle kunna vara en ersättning eller ett komplement till sonderingsmetoder vid estimering av brytningsindex. En av fördelarna jämfört med sonderingsmetoder är möjligheten till en avsevärt bättre tidsupplösning. GPS-tekniken är dessutom attraktiv då den är en helt passiv teknik vid mätning av luftens vatteninnehåll och därmed brytningsindex.

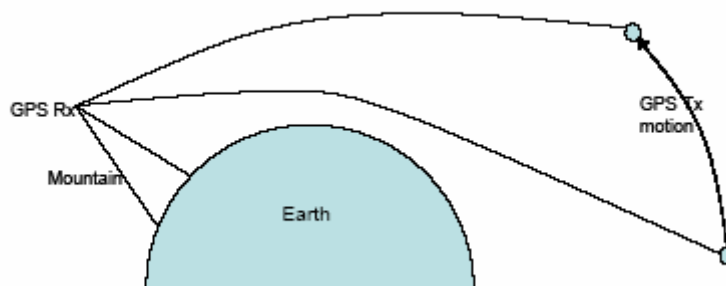
Möjligheten att använda GPS för att uppskatta brytningsindex från rörliga plattformar studerades i en förstudie. Estimering av brytningsindex med GPS kan göras med flera skilda metoder, två av dessa har behandlats i förstudien, se [31]. En tredje metod studerades inom arbetspaketet WP3 i projektet ”Duct Matting”, se [10]. I en tidigare fas av vågutbredningsstudierna har behandlat ytterligare en metod, interferensmetoden se referens [32].

Interferensmetod bygger på att mäta ankomstriktning på signalerna från satelliterna. Ankomstriktningen avgörs av hur mycket signalen, på grund av atmosfären, har brutits av från den raka linje mellan satellit och mottagare. Denna lilla skillnad i ankomstriktning från den raka linjen har i sin tur ett samband med brytningsindex i atmosfären. Ankomstriktningen kan mätas genom att studera det interferensmönster som bildas av den direkta signalen och den som reflekterats i havsytan. Möjligheter och problem med denna metod beskrivs kort i [32].

Signalfördröjningsmetoden som studerades i förstudien, se rapport [31], bygger på att estimeras den del av signalfördröjningen som orsakas av atmosfären. Fördröjningen kan sedan användas för att uttala sig om brytningsindex. Denna metod ligger närmare det sätt som systemet används vid positioneringstillämpningar. Fördröjningen av signalerna vid passagen genom atmosfären är i positioneringshänseende enbart ett felbidrag som man försöker kompensera för, men fördröjningen kan även användas för att uttala sig om brytningsindex. En hel del arbete har lagts ner på att använda GPS vid studier av atmosfären, speciellt de senaste åren. Bland annat i [33] och [34] visas resultat på hur innehållet av vattenånga i de nedre delarna av atmosfären har estimerats med hjälp av GPS. Den totala zenit fördröjningen i troposfären mäts idag rutinmässigt från ett antal fasta GPS-stationer i världen. Däremot har väldigt lite resultat presenterats angående mätning av zenit fördröjningen eller andra atmosfärssegenskaper med rörliga GPS-mottagare.

En tredje metod behandlas i det 3:e arbetspaketet i det internationella samarbetetsprojektet ‘Duct Mapping’, se [10] och [29]. Genom att mäta förändringen hos GPS signalens fas från satelliter som ligger mycket långt nere nära horisonten med en GPS mottagare på ett berg eller i ett flygplan kan den sammanvägda förändringen av signalens gångtid omräknas till total vattenpelare som signalen passerar. Metoden kallas okultationsmetoden eftersom mätningen görs när satelliten är på väg att försvinna

under horisonten eller komma upp från horisonten, se figur 2.5.1. Den låga vinkeln gör det möjligt att bestämma modifierade refraktiviteten med en typ av invers metod.



Figur 2.5.1: Skiss för att illustrera mätprincipen för ockultaionsmetoden.

Arbetet vid Onsala rymdlaboratorium, Chalmers tekniska högskola har visat på möjligheten att använda GPS-teknik för att mäta integrerade luftfuktigheten som funktion av plats och tid. Dessutom har man också visat på möjligheten att mäta brytningsindex i tre dimensioner. Detta kan genomföras med data från ett nät av GPS-mottagare som samlas in och databehandlas med s.k. tomografiska metoder. Det nät som användes för att testa metoden och utveckla beräkningsprogrammen byggde på GPS-mottagare spridda ut över Göteborg med flera km avstånd från varandra. Avståndet mellan de olika GPS-mottagarna och enskilda satelliters signalfördröjning beräknas och jämförs med avståndet mellan satelliten och mottagarna. Noggrannheten hos satellitpositionerna, som finns att tillgå i GPS-signalen är inte tillräckligt bra utan efterbearbetade satellitpositioner måste användas. Detta ger en fördröjning från mätning av signaler till att brytningsindex erhålls som kan uppgå till nästan ett dygn.

Positionen hos GPS-mottagarna behöver vara bättre bestämt än felet hos satellitpositionen med efterbearbetning. Fördröjningen i GPS-signalen beroende på gaserna troposfären är i av storleksordning 2,5-25 m beroende på elevationsvinkel, ca 10 % av den fördröjningen är beroende på fuktigheten i troposfären. Då variationen hos luftfuktigheten skall monitoreras bör bråkdelen av denna vägskillnad uppskattas. IGS hävdar att satellitbanorna kan predikteras med 10 cm osäkerhet. Positionen hos GPS-mottagaren måste alltså vara bestämd med bättre noggrannhet än dessa värden. Detta resulterar exempelvis i att monteringen av GPS-mottagaren på fartyg måste göras med eftertanke för att antenn positionen inte skall störs av exempelvis fartygsrullningen.

2.5.1 Slutsatser från arbetet

Arbetet visar att GPS kan användas för att mäta luftfuktigheten i troposfären, både zenitvattenmängden liksom den tredimensionella luftfuktigheten.

Metoden för bestämning av satellitpositionen bör förbättras för att metoden skall kunna leverera aktuella data, helst i nästan realtid.

Studien visade att metoden har svårigheter att använda differentiell GPS samt att det krävs en utveckling av metoden för att använda rörliga GPS-mottagare. Användningen av rörliga GPS mottagare är för applikationer, där brytningsindexbestämningen ingår, det mest intressant men också mest krävande utvecklingsmässigt.

Rapporten visar att arbetet med att söka grundförutsättningarna för att använda GPS-tekniken för förbättring av atmosfärsdata bör fortsätta. Vid detta arbete, som bara

bedrivits under två månader, konstaterades att verksamheten borde fortsätta och innefatta både teoretiska som experimentella studier.

2.6 Raketsondering

Raketsondering är den beteckning som vi har använt inom projektet och vars engelska motvarighet (rocket soundings) används internationellt för att beteckna sondering med hjälp av raketuppskjutna sonder. Dessa sonder faller ner mot marken eller havsytan i en fallskärm, efter det att själva sonden skjutits ut från ”bärraketen”. Dessa raketer är av samma storlek som hobbyraketer av kommersiell typ. Det betyder att de är ca 0,7 m långa och några cm i diameter. Raketsonderingarna beskrivs i referens [1] och [3]. Hanteringen av raketsonder uppfattas som enklare än hanteringen av ballongsonder, även om det är pyroteknisk utrustning.

Inom projektet planerades ett antal raketsonderingar med hjälp av FM's provfartyg HMS Ägir. Dessa prov skulle genomföras; dels intermittent vid tillfällen då HMS Ägir hade andra uppgifter, men hade möjlighet genomföra raketsondering utan att störa övrig verksamhet, utdraget över året för att få statistik från olika årstider och förhållanden; dels vid samordnade kampanjer gemensamt med FM och FMV. Under perioden genomfördes 75 raketsonderingar vid olika tillfällen. Dessa sonderingar genomfördes inte enbart från HMS Ägir utan även i samband med fältförsök inom projektet ”Duct mapping” från fartyget Helmsand och inom forskningsprojektet från Landsort, Öja. Dessa sonderingar genomfördes med två huvudsakliga målsättningar; dels för att samla atmosfärsprofilsdata från farvatten kring Sverige i samband med tester och prov; dels att samla in statistik över profiler i samma farvatten.

De raketsonderingar som genomfördes innan detta projekt startade redovisades tillsammans med erfarenheter från test av IR-instrument för att bestämma ytvattentemperaturen, se referens [3]. I tabell 2.6.1 ges antalet raketsonderingar genomförda under perioden. I tabellen anges antalet raketsonderingar genomförda vid DuMEx-försöken, vid Kielbukten i Tyskland, separat. Raketsonderingen vid DuMEx-försöken genomfördes av FOI personal.

Tabell 2.6.1: Antalet raketsonderingar genomförda inom projekttiden.

År	Totalt antal sonderingar	Lyckade sonderingar	Felaktiga	Kommentar
2004	34	28	6 ^a	2 st felaktiga/gamla batterier, 1 st radiofel
2005	16	6	10	4 st felaktig fallskärm (kort falltid) 2 st radiofel
DuMEx	25	20	5	3 st radiofel 2 sensor eller raketfel
Totalt under perioden	75	54	21	

a/ de i kommentaren ej inräknade felaktiga raketsonderna hade fel på antingen raketdelen eller sensorn men handhavandefel kan inte uteslutas .

Den pågående insamlingen av raketsonderingar som genomfördes av HMS Ägir fram till sommaren 2005 avbröts med någon veckas varsel då fartyget fick nya uppgifter. Det

gjorde att inga mer raketsonderingar genomfördes från fartyget under resten av 2005 eller 2006. Den då planerade andra delen av en kampanj med raketsonderingar samtidigt med radiosignalmätningar på Muskö, av publika radio- och TV-sändare vid Visby och Västervik, fick planeras om till att genomföra raketsonderingar från Landsort, Öja. Ett antal raketsonderingar genomfördes inom ett par dagars tidsintervall, beroende problem vid upprättande av raketskjutningsplatsen samt på grund av kostnadsskäl. De genomförda raketsonderingarna visade dock sig vara mycket värdefulla för analysen av radiosignalmätningarna. De genomförda radiosignalmätningarna beskrivs i kapitel 2.4 se dessutom referenserna [10], [29] och [35].

2.6.1 Slutsatser

Raketsonderingarna har givit för projektet mycket viktiga data och användbar information. Alla sonderingar har inte analyserats, beroende på resursbrist, dock har delar av materialet använts både vid egna analyser av atmosfärsegenskaper och vid analyser inom det internationella projektet 'Duct Mapping'.

Antalet felaktiga raketsonder är dock oacceptabelt stort för att räknas som en tillförlitlig mätmetod. Felen kan räknas både till handhavandefel och till fel på utrustningen. Det måste dock påpekas att några av felen berodde på att batterierna i sensorn var för gamla. Batterierna byttes i några av sensorerna vilket gjorde att vi kunde fortsätta skjuta upp gamla raketsonder, de som var kvar vid tillfället. Felprocenten hos raketsonder med utbytt batteri var dock högre än andelen fel som uppträdde med färskare raketer och sensorer.

Vid DuMEx-försöken genomfördes raketsonderingen i nära anslutning till ballongsondering, även kallad radiosonderingar. Detta kan vara en förklaring till de många radiofel som uppträdde, då dessa radiosonder använder samma frekvensband för sina väderdata överföringar som raketsonderna.

Analysen av de enskilda raketsonderingarna har huvudsakligen genomförts i samband med analyser av de försök de ingick i. En slutlig sammanställning av statistiken från raketsonderingarna har inte genomförts fullt ut.

3 Internationellt samarbete 'Duct Mapping'

Predikteringen av radar och radio prestanda för många operationella system för exempelvis kustövervakning, radar på militära fartyg, ubåtsjakt (ASW – anti-submarine warfare) och patrullerande flygövervakning etc, är som all annan verksamhet beroende av meteorologiska förhållanden vid tillfället. Det internationella samarbetet "Duct Mapping Improvement based on atmospheric data fusion for naval purpose" har från svensk sida genomförts inom projektet 'Verifiering av vågutbredningsmodeller'. Projektet 'Duct Mapping' har adresserat problematiken med predikteringen av propagering av radio och radarstrålning över havet vid atmosfärsförhållanden som leder till ledskikt.

Det existerade vid projektets start ett antal metoder för att beräkna anomalier i propageringsförhållanden, speciellt för marina förhållanden. Det fanns även ett antal metoder att bestämma systemräckvidder för elektromagnetiska system vid ledskiktsförhållanden. Det saknades dock tillförlitliga och noggranna indata och metoder att samla data för att ge beräkningsmetoderna möjlighet att leverera robusta och noggranna utdata.

Huvudmålsättningen hos det internationella samarbetet har varit att förbättra metoder för att kartlägga ledskikt inom 3D över stora områden (för sträckor på några hundra kilometer).

I samarbetet deltog 11 laboratorier, företag eller institutioner från fem länder, se tabell 3.1. Samarbetet styrdes av kontraktet "Socrate Contract No 03/RTP 1.19/005 DUCT MAPPING" mellan Western European Union (WEU) representerad av WEAO Research Cell och THALES AIR DEFENCE S.A. (TAD), daterat 23 oktober 2003. Kontraktet har senare överförts, i samma form och med samma intentioner, till EDA (Ad Hoc B project SBD2006/02) i februari 2006.

Huvudkontraktet mellan WEU och TAD styr det totala arbetet i princip och till rutiner. Det finns dessutom i det kontraktet en beskrivning av tre underkontrakt (sub-kontrakt) med namngivna institutioner samt hur mycket pengar dessa kontrakt kommer att hantera. De tre underkontrakten skrevs med MeteoFrance, Qinetiq och CCLRC (Rutherford Appelton Laboratory). Huvudkontraktet inklusive underkontrakt gällde 982,16 k€, varav 646,86 k€ skulle gå till de tre underkontrakten. Huvudkontraktet styrde, inte i pengar räknat, de övriga gruppernas insatser och förslaget som styrde arbetet innehöll en budget för övriga delar utom CELAR och SHOM på 1677,82 k€. Detta skulle ge en total budget, förutom SHOM och CELAR andelar (vilka är betydande men svåra att uppskatta utifrån), på 2659,98 k€.

Lista på ingående arbetspaket (WP - workpackage): (i fri översättningen från engelska)

- WP1: Översikt över operationella krav
- WP2: Faktiska sensorer för ledskiktsbestämning (prediction/nowcasting)
- WP3: Inversa metoder för att bestämma ledskikts parametrar från signaler inom radio- frekvensområdet.
- WP4: Förbättring av databaser över ledskikt mha klimatologisk verikalsondering
- WP5: Kvalitativa korrelationer mellan mänskliga väderobservationer och ledskikts karaktärisering
- WP6: Realiserbarhetsbedömning

- WP7: Projektledning

Tabell 3.1: Deltagande företag, laboratorier eller institutioner.

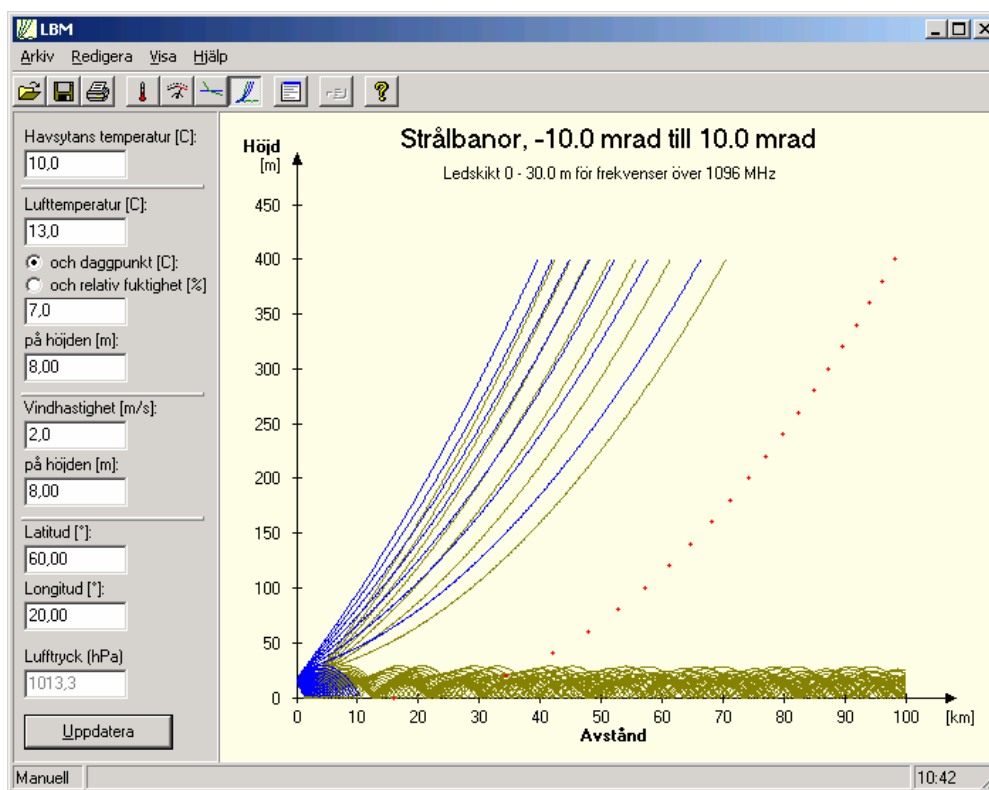
THALES AIR DEFENCE (TAD)	SLIE in SOCRATE contract (France).
Meteo France (MF)	sub-contractor to TAD in SOCRATE contract (France).
QINETIQ (QQ)	sub-contractor to TAD in SOCRATE contract (UK).
CCLRC / Rutherford Appleton Laboratory (RAL)	sub-contractor to TAD in SOCRATE contract (UK).
Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)	input provider via Management Group (FR government laboratory)
Centre Electronique de l' Armement (CELAR), one of the technical centres of Délégation générale de l' Armement (DGA)	input provider via Management Group (FR government laboratory).
Defence Science and Technology Laboratory (DSTL)	input provider via Management Group (UK government laboratory).
Meteo Office for UK (MET OFFICE)	input provider via Management Group (UK government laboratory).
TNO Physics and Electronics Laboratory (TNO-FEL)	input provider via Management Group (NL research institute).
Swedish Defence Research Agency (FOI)	input provider via Management Group (SE government laboratory).
Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik (FWG)	input provider via Management Group (GE government laboratory).

Data och resultat från det internationella samarbetet är inte öppet och därför redovisas arbetet i en speciell rapport, se referens [29], när projektet avslutats och de interna rapporterna från projektet levererats. Några av resultaten från 'Duct Mapping' tas upp i diskussionen i kapitel 4.

4 Diskussion kring operativa verktyget LBM

4.1 LBM

Lokal brytningsindexmodell (LBM) är ett dator- och sensorsystem för marinens fartyg som utvecklats vid FOI på uppdrag av FMV, se [1, 2, 24, 25, 26]. Systemet var utvärderat [27] och klart för driftsättning 1989 och används idag på ett 15 tal av marinens fartyg. LBM-systemet har förbättrats sedan starten framförallt med modernare sensorer och ett Windowsbaserat datagränssnitt. Beräkningarna i LBM och visualiseringen av resultat är i stort sätt oförändrat. LBM mäter och gör radarberäkningar kontinuerligt och har visat sig vara ett kraftfullt verktyg för att få en uppskattning över aktuella ledskiktsförhållanden. Arbetet med projektet 'Duct Mapping' har gett nya insikter i hur ett system som LBM kan användas och förbättras med dagens teknik och kunnande, några av dessa aspekter kommer belysas i detta kapitel.



Figur 4.1: Användargränssnitt för mjukvaran i LBM-systemet

4.2 LBM idag

LBM använder sig av sensorer för lufttemperatur, vattentemperatur, luftfuktighet och vindhastighet för att göra en automatisk beräkning av aktuella radarförhållanden. En radar är starkt påverkad av de väderförhållanden som råder och framförallt av vertikala gradienter i lufttemperatur och luftfuktighet. LBM gör en beräkning av den vertikala profilen för temperatur och fuktighet enligt så kallad gränsskiktsmeteorologi, därefter sker radarberäkningar och visualisering av resultat. LBM-systemet består av en dator med LBM-mjukvara (se användargränssnittet i Figur 4.1) samt sensorer för temperatur i

luft och vatten samt luftfuktighet, dess mätvärdesomvandlare och ett USB-gränssnitt mellan omvandlare och dator. LBM hämtar automatiskt värdena från sensorerna till beräkningarna och ger direkt resultat i form av strålbågar, beräknad ledskiktshöjd m.m. Vissa av marinens fartyg har LBM integrerat i det centrala ledningssystemet idag. Idag har LBM även stöd för automatisk inhämtning även av vindhastighet vilket tidigare fick matas in manuellt. Huruvida detta är implementerat på marinens fartyg är i nuläget oklart. LBM-systemet finns beskrivet i FOI-rapporten ”Programmet LBM, en användarhandledning” [28] som både är ger en beskrivning av vad användaren behöver känna till för att dra rätt slutsatser utifrån resultatet från beräkningarna och information över LBM-systemet med sensoröversikt, inkoppling och underhåll.

4.3 Utvärderingen 1989

År 1987 startade en utvärdering av det då nyligen utvecklade LBM-systemet. Försök med mätningar och jämförelse med verklighetens radarbilder utfördes ombord på marinens fartyg under 1987 och 1988. I 75% av de testade fallen ansågs LBM ge ett rättvisande resultat. Största orsaker till felkällor var problem med mätinstrumenten och horisontella variationer i ledskiktsförhållanden. Idag har man nya sensorer som är mer pålitliga varvid man eliminerat en stor felkälla, framförallt gällande fuktigheten då man tidigare behövde hålla en strumpa fuktig på ena temperatursensorn till fuktmätaren. Än har man inte gjort någon utvärdering av de nya sensorerna och LBM-systemet idag.

Gällande horisontella variationer så utgår LBM i sin utformning från lokala mätningar ombord på fartyget varvid horisontella variationer ej kan uppskattas. LBM är samtidigt ett redskap som blir kraftfullare ju mer användaren lär sig använda, följa och tolka resultatet. Följer man LBM under gång kan man få en uppskattning av horisontella variationer om man exempelvis går från ett område med ledskikt till ett område med normal utbredning. Man skulle kunna lägga till funktioner i LBM som varnar för förändringar i radarutbrednings-förhållandena och därmed inkludera en del av problemet med att inte kunna beskriva horisontella variationer.

Horisontella variationer är även en detalj som en meteorolog skulle kunna informera fartygsbefäl om. Det är inte utrett vilken hjälp meteorologer idag ger gällande radarutbredning men någon form av prognoser för radarutbredning görs. I en kommunikation mellan meteorolog och fartyg kan säkert dessa prognoser ge information om horisontella skillnader såväl som förändringar i väderläget som har bäring på radarutbredningen. Det förutsätter att meteorologen har kunskap om hur dessa prognoser används och hur vädret styr radarutbredningen. Dessutom kan man tänka sig att meteorologen kan använda sig av de aktuella fartygsmätningar LBM gör till att ytterligare förbättra underlaget till prognos och vägledning. Icke ytbaserade ledskikt så kallade höjyledskikt är också någonting som LBM inte klarar av att visa men en radarmeteorolog skulle kunna ge information om dessa. En analys av speciella numeriska regionala och eller mesoskaliga numeriska vädermodelldata som postprocessats med väderdata från LBM-systemet för att hitta förekomst av höjyledskikt av en meteorolog skulle kunna vara en lösning.

Gränsskiktmeteorologin som ligger till grund för brytningsindexberäkningarna i LBM har vid vissa känsliga lägen temperatur- och fuktighetsförhållanden där små förändringar i exempelvis luftfuktighet ger stora förändringar i ledskiktsförhållanden. Det krävs av operatören av LBM att han är väl insatt i hur känslig LBM är för mätfel m.m. så att han kan analysera situationen och vidta åtgärder om man får orimliga värden. Man skulle kunna förbättra rutinerna i LBM som varnar när systemet befinner

sig i ett känsligt läge. Framförallt när skillnader sensorvärden som ligger inom det enskilda instrumentets felmarginal skulle kunna ge stora förändringar i radarutbredningen.

Övriga svaga punkter som framkom i utvärderingen:

- Radarvågors utbredning begränsas även av nederbörd och till del av moln vilket inte LBM kan beskriva
- LBM är sämre på att prediktera undernormal utbredning än övernormal
- Kvaliteten och noggrannheten på mätningarna är viktig, vattentemp, lufttemp, luftfuktighet och vindhastighet. Speciellt i vissa lägen då små felmätningar kan orsaka stora fel.
- I LBM antas att teorin som gäller för hur temperaturen varierar med höjden även gäller för fuktigheten. Eftersom luftfuktigheten har så stor betydelse för utbredningen av strålning borde antagande, som inte är verifierat på ett vetenskapligt tillfredsställande sätt, jämföras med tester och mätningar.
- Några modellantaganden kan i vissa lägen vara kritiska för resultatet. Till exempel antags vattentemperaturen på ca 1,6 m djup vara samma som lufttemperaturen vid vattenytan vid någon fartygsinstallation.

4.4 Jämförelser med andra bulkmodeller

I delprojekten WP2.2 och WP2.3 i det internationella projektet 'Duct Mapping', [5 och 6] görs en jämförelse mellan flera bulkmodeller, utöver LBM, BATTAGLIA (GB, ursprungsland är Australien), PIRAM (Frankrike) och TARMOS (Holland). Alla modellerna är av samma typ, dvs. de utnyttjar similaritetsteori för att uppskatta temperaturens och fuktighetens variation med höjden och ur dessa profiler beräknas hur brytningsindex förändras med höjden. Skillnader finns dock bland annat i vilka profilfunktioner som används och hur till exempel luftfuktigheten bestäms nära vattenytan.

En relativt svag punkt i similaritetsteorin är profilfunktioner för fuktighet, som är dåligt kända. Samtidigt är den vertikala variationen av fuktigheten (som bestäms genom valet av profilfunktion) av största betydelse för hur brytningsindex varierar.

Jämförelsen görs så att höjderna på markbaserade ledskikt beräknas med samma indata (temperaturdifferensen mellan luft och vattenyta, luftfuktighet och vindhastighet) för de olika modellerna och sedan jämförs. Det är relativa jämförelser mellan modellerna och inte någon jämförelse med uppmätta ledskiktsdata.

Resultaten visar att i instabila situationer (vattnet är varmare än luften) är skillnaderna mycket små – LBM tillsammans med BATTALIA ger i de flesta fall några meter högre värden än övriga modeller. I neutrala situationer (kraftig vind och/eller små temperaturskillnader mellan luft och vatten) upprepas samma mönster, men med större skillnader i de beräknade höjderna (5-10 m). I stabila situationer är skillnaderna mellan modellresultaten som störst (flera tiotals, upptill ca 100m). I dessa situationer ger LBM oftast det högsta värdet.

Eftersom jämförelsen är relativ går det inte att avgöra vilken modell som är bäst ("har mest rätt"). Nedan har argument som talar emot och för LBM samlats.

Argument som talar för att LBM kan ge för stora värden på ledskiktshöjden, speciellt i instabila situationer:

- LBM utnyttjar profilmfunktioner som gäller för det s.k. ytskiktet, ända upp till 400 m höjd. Ytskiktet är knappast högre än 100-150 m i instabila och neutrala och avsevärt lägre i stabila situationer då det ofta endast är några 10-tal meter. LBM kan i stabila situationer beräkna värden på ledskiktshöjden som helt klart ligger utanför giltigheten för den teori som används.
- LBM utnyttjar antagandet att luftens relativa fuktighet är 100 % strax ovanför vattenytan. Detta är överskattning ovan för saltvatten, försumbar i Östersjön, men eventuellt av viss betydelse i saltare hav, t.ex. Medelhavet. En överskattning av luftfuktigheten nära vattenytan kan genererar för höga ledskikthöjder, men ingen noggrann kvantitativ undersökning har gjorts.

Argument som talar för att LBM inte ger för stora värden på ledskiktshöjden, speciellt i stabila situationer:

- I jämförelsen som refereras här ger flertalet modeller under stabila förhållanden, ledskiktshöjder som är klart lägre än de som beräknas med LBM. I flera fall är dessa beräknade höjder 10 m och lägre, samtidigt som LBM ger värden väl över 30m. Eftersom det inte finns några mätningar går det inte att avgöra vilken modell som har rätt och vilken som har fel, men erfarenheter från verklig användning och mätkampanjer visar under stabila förhållanden genereras ofta ledskikt som når ovanför radarhöjd. Det går alltså inte att utesluta att några av modellerna beräknar allt för låga värden och att resultaten från LBM, utgör ett bättre beslutsunderlag i många situationer.
- I anslutning till punkten ovan om att ytskiktsteori, extrapolerad till höjder ovanför sitt giltighetsområde eventuellt kan resultera i alltför höga ledskikt, kan man argumentera att så länge ledskiktet når ovanför radarhöjd ger ett alltför stort, modellberäknat värde, ändå ett bra beslutsunderlag, eftersom kunskapen att radarn befinner sig i ett ledskikt, är av största vikt. Detta innebär att så länge ytskiktet når ovanför radarhöjden, är extrapolationen till alltför höga höjder, mindre allvarliga.

4.5 Jämförelse med mätdata

En mätkampanj genomfördes inom 'Duct Mapping', som kallades DuMEx, under april 2005 i Kielbukten. En översikt över mätkampanjen samt några resultat ges i rapporten från arbetspaket WP2.6, se referens [9]. Under kampanjen gjordes vertikalprofilmätningar av temperatur och fuktighet såväl med raket och ballongsonderingar som med mätningar upp till 15,5 m höjd på bojar och fartyg. Med hjälp av dessa mätningar kan man avgöra huruvida ett ytbaserat ledskikt existerar eller inte, även om den exakta höjden ofta inte går att fastställa. Under mätkampanjen rådde hela tiden förhållanden med kallt vatten och relativt sett, varm luft vilket betyder stabil skiktning. Vid analysen av 23 olika mättillfällen kunde två typer av stabila situationer identifieras: 1) Stabila lägen där luftens daggpunktstemperatur avtar med höjden närmast havsytan samt 2) Mycket stabila lägen där daggpunktstemperaturen ökar med höjden närmast havsytan. I situationer av typ 1) uppstod alltid "markbaserade" ledskikt, medan sådana i situationer av typ 2) praktiskt taget aldrig genererades. Analysen visade också att LBM alltid indikerade ledskikt i situationer av typ 1), men aldrig i situationer av typ 2). Detta tillsammans med det faktum att numeriska prognosmodeller i ca 50% av typ 2

situationerna indikerade ytbaserade ledskikt ledde till slutsatsen att bulkmodeller av typ LBM behövs som komplement till numeriska prognosmodeller.

4.6 Förslag till fortsatt utveckling av LBM

- Se över och förbättra den meteorologiska gränsskiktsteori som används, speciellt:
 - Gilltighet ovanför 30-40 meter.
 - Fuktighetens variation med höjden.
- Se över och förbättra antaganden:
 - 100% relativ luftfuktighet vid vattenytan.
 - Salthaltens betydelse.
 - Vattentemperatur på ca 1,6 m djup antas vara samma som lufttemperaturen närmast vattenytan.
- Se över LBMs giltighet och funktion utanför Östersjön, t.ex. för Medelhavet där fartyg med LBM idag opererar.
- Varningsutskriftorna i LBM bör ses över och förbättras för att ge användaren bättre stöd vid tolkning av resultatet.
- Anpassa varje installation av LBM till respektive fartygs egna radarparametrar (frekvenser, höjd etc).
- Genomföra en utvärdering av LBM-systemet idag eftersom nya sensorer och ny mjukvara har implementerats sedan utvärderingen 1989.
- Se över och värdera möjligheter till mer avancerade radarberäkningar, exempelvis risk för målupptäckt och räckviddsberäkningar där hänsyn tas till signaldämpning (förslagsvis genom PE-beräkningsmetoder).
- Visualisera resultatet med ett tydligt användarperspektiv dvs. med beräkningar baserade på aktuell radar- och måltyp.
- Räckviddsberäkning som använder en databas med olika radartyper och målegenskaper (med möjlighet att uppdatera dessa för nya hot områden etc).
- Utveckla system där LBM-data används tillsammans med meteorologiska metoder för att bestämma M-profiler för att detektera höjdedskikt.

4.7 Slutsatser och tankar om framtida utveckling av LBM

LBM är till sin utformning ett relativt enkelt men kraftfullt verktyg för att få en uppfattning av nuläget för radarvågornas beteende. 'Duct Mapping' har visat att bulkmodeller av typ LBM ännu inte går att ersätta med andra system t.ex. numeriska väderprognoser. Vår bedömning är att väderprognosmodellerna inte kommer att kunna ersätta metoder byggda på in situ mätningar (LBM) under en överskådlig framtid. Därför finns det skäl att se över och, baserat på erfarenheter från 'Duct Mapping'-projektet, förbättra delar i LBM, se kapitel 4.6.

En långsiktig utveckling av LBM bör vara att koppla data från LBM med meteorologiska beräkningsmodeller av regional- eller mesoskalig-typ för att skapa M-profiler som täcker hela gränsskiktet (beroende på tid av dygnet, årstid och väder ca 1000-2000 m). Detta för att LBM-systemet skall kunna upptäcka och eventuellt följa risken för höjdedskikt. De meteorologiska modellerna kan utformas för att täcka en angiven plats eller ett område. Metoden ger exempelvis möjligheten att prediktera M-profilen, därmed även ledskikt, för området på motsvarande sätt som görs för flygplatser.

Ytterligare utveckling av LBM är att koppla en invers metod för att bestämma M-profilen som funktion av riktning och avstånd, exempelvis genom att använda radarns

sjöklottersignal. Detta ger möjligheten att få aktuell ledskiktsinformation med horisontell variation kring fartyget.

Operatörsgränssnittet kan ytterligare förbättras genom att lägga till funktioner i LBM som exempelvis varnar för förändringar i radarutbredningsförhållandena. Därmed inkluderas en del av problemet med att inte kunna beskriva horisontella variationer.

Meteorologiska prognoser alternativt radarsignalen från sjöklotter tillsammans med inversa beräkningsmetoder är andra sätt att ge information om horisontella variationer hos refraktivitet (och därmed information om ledskikt) såväl som förändringar i väderläget som har bäring på radarutbredningen. Det förutsätter en större uppgradering av LBM-systemet samt mera koppling till stödfunktioner som meteorologfunktioner. Exempel på funktion är ledskiktsprognoser beräknade utifrån numeriska väderprognoser men detta kräver kunskap om hur dessa används och hur vädret styr radarutbredningen. Dessutom kan man tänka sig att meteorologen kan använda sig av de aktuella fartygsmätningar LBM gör till att ytterligare förbättra underlaget till prognos och vägledning

Icke ytbaserade ledskikt så kallade höjdledskikt är också någonting som LBM inte klarar av att visa. En analys av speciella numeriska regionala och/eller mesoskaliga numeriska vädermodelldata som postprocessats med väderdata från LBM-systemet skulle kunna vara en lösning för att hitta förekomst av höjdledskikt.

5 Slutsatser

Projektet 'Verifiering av vågutbredningsmodeller' har genomfört de arbeten som planerats innefattande delstudier av gränsskiktsmodeller och propageringsmodeller i LBM samt närliggande delstudier med målsättning att testa och verifiera delsystem. Studien har dessutom undersökt för LBM och för dess funktion viktiga frågor utifrån olika synvinklar och metoder.

Det europeiska samarbetet har fungerat mycket gott. Ett stort kontaktnät har utvecklats med de grupper samt personer som varit aktiva i arbete med MBL modeller i Europa. Detta samarbete kommer att fortsätta inom EU, men i dagsläget dock utan Sveriges medverkan.

LBM är till sin utformning ett relativt enkelt men kraftfullt verktyg för att få en uppfattning av nuläget för radarvågornas beteende. 'Duct Mapping' har visat att bulkmodeller av typ LBM ännu inte går att ersätta med andra system t.ex. numeriska väderprognoser. Vår bedömning är att väderprognosmodellerna inte kommer att kunna ersätta metoder byggda på in situ mätningar (LBM) under en överskådlig framtid. Därför finns det skäl att se över och, baserat på erfarenheter från 'Duct Mapping'-projektet, förbättra delar i LBM.

Det internationella samarbetet gav möjlighet att ta del av och jämföra LBM med de främsta europeiska MBL modellerna på området. Vid jämförelse av de europeiska modellerna kunde två olika grupper identifieras avseende predikteringen av ledskiktshöjden. De två modellerna LBM och Battaglia gav generellt sett högre ledskiktspredikteringar medan en andra grupp, PIRAM och TARMOS, gav mer realistiska ledskiktsvärden vid stabila vädersituationer. En förklaring till detta kan vara att utvecklingen av alla jämförda modeller startade ungefär samtidigt men medan utvecklingen av de två första avslutades så fortsatte utvecklingen av PIRAM och TARMOS. I analysarbetet har även de främsta amerikanska modellerna använts.

Den största felkällan vid ledskiktsbestämningen är inverkan av brus eller fel i väderparametrar, speciellt de som används i modellberäkningar för att bestämma luftfuktigheten. Höjdprofilen för luftfuktigheten är svår att bestämma med hög rumslig noggrannhet och dess inverkan på ledskiktshöjden och utbredningsmönstret är stort. Projektet har studerat denna frågeställning samt har testat flera metoder för att minska felen och därför föreslås vidare arbete inom området. Speciellt viktig är en utvärdering av de för LBM-systemet nya vädersensorerna.

En optisk metod, med lidar, för att bestämma refraktionen föreslogs och testades. De analyserade resultaten från lidarmätningarna av refraktionen visar god överensstämmelse med beräknade värden, EOSTAR-modellen, speciellt för små vinklar och korta avstånd. Lidartester med olika linjärpolariserat laserljus visade påtagliga skillnader. Speciellt uppvisades olika mycket brus i signalen på det avstånd där lidarstrålen skar genom vattenytan. Projektet föreslår ett fortsatt arbete med denna typ av system, vilket bör kombineras i s.k. multifunktionslaser.

6 Förslag på fortsatt arbete och rekommendationer

Ledsiktigt har en stor påverkan på både radio- och radarsystem och vetskap om förekomst av ledsiktigt kan användas vid taktiska beslut. T.ex. kan ledsikten fungera som vågledare och utöka räckvidden för radio och radar men den kan också skapa hål i radartäckningen. Ledsikten kan också utnyttjas för att öka effekten av t.ex. aktiv störning, men dessa taktiska beslut bygger på kännedom om ledsikten och dess storlek och utbredningsriktning.

LBM är utvecklat för att prediktera ledsiktigt i svenska förhållanden men sannolikheten att systemet kommer att användas i internationella miljöer är stor. Eftersom bland annat salthalten är högre i internationella miljöer så är det av intresse att undersöka LBMs förmåga att prediktera ledsiktigt i dessa miljöer.

LBM baserar sina predikteringar på sensorinformation av lufttemperatur, vattentemperatur, luftfuktighet och vindhastighet. För att öka noggrannheten i beräkningarna kan systemet kompletteras med information från andra system. Ett exempel är skattning av brytningsindexprofilen genom att använda inversa beräkningsmetoder. Tekniken som bl.a. studerades inom ramen för Duct Mapping visade sig ha potential att uppskatta brytningsindexprofilen. Flera olika metoder kan användas och de mest utvecklade är med hjälp av radarklotter, lyssna av radiosignaler och GPS-signaler. Metoderna är så pass intressanta att ytterligare studier bör genomföras.

En långsiktig utveckling av LBM bör vara att koppla data från LBM med meteorologiska beräkningsmodeller av regional- eller mesoskalig-typ för att skapa M-profiler som täcker hela gränsskiktet (beroende på tid av dygnet, årstid och väder ca 1000-2000 m). Detta för att LBM-systemet skall kunna upptäcka och eventuellt följa risken för höjdedskikt. De meteorologiska modellerna kan utformas för att täcka en angiven plats eller ett område. Metoden ger exempelvis möjligheten att prediktera M-profilen, därmed även ledsiktigt, för området på motsvarande sätt som görs för flygplatser.

7 Förkortningar

ASTD – Air surface temperature difference (skillnaden mellan luft- och ytvatten-temperaturen)

APM – Advanced Propagation Model, amerikansk utbredningsmodell som ingår i AREPS.

AREPS – Advanced Refractive Effects Prediction.

C_n^2 - strukturkonstanten för brytningsindex variationer

EDA – Europeiska försvarsbyrån, ett organ inom Europeiska unionen

EM – elektromagnetisk

FDPE – Finita Differensmetoden att lösa den Paraboliska Ekvationen

MBL - Marine Boundary Layers, marina gränsskikt

M – Modifierad brytningsmodul

LBM - Lokal Brytningsindex Modul

PE – parabolisk ekvation alternativt parabolisk ekvationsteknik

8 Referenser

1. Gustafsson, O., G. Eriksson, P. Holm, A. Hågård, E. Karlsson, M. Nordstrand, R. Persson, P. v. Schoenberg, and Å. Waern, 2003: *Slutrapport för projektet Vågutbredningsanalys för radio, radar, och elektrooptiska system*. FOI Användarrapport FOI.R--0985--SE, 40 pp.
2. Gustafsson, K. O. S., A. Hågård, E. Karlsson, and R. Persson, 2002: *Vågutbredningsanalys för elektrooptiska system*. FOI Användarrapport FOI-R- -0513- -SE, 79 pp.
3. Gustafsson, K. O. S., E. Karlsson, and M. Nordstrand, 2005: *Prov av instrument för mätning av ytvattentemperatur samt raketsondsmätning av temperatur och luftfuktighet*. FOI rapport, FOI--R--1615--SE, 28 pp.
4. Heemskerk H. J. M. (ed), (2005) *WP 2.1. Final Report: Review of available sensors and data*. DUCT MAPPING, TAD/JRS/PBPEG-02/05, 25 Jan 2005.
5. Periard C. (ed), (2005) *WP 2.2. Final Report: Review of Meteorological and Marine Boundary Layer models*. DUCT MAPPING, TAD/JRS/PBPEG-04/05, 20 Jan 2005.
6. Agnew J. L. (ed), (2006) *WP 2.3. Final Report: Overall sensitivity analysis*. DUCT MAPPING, TAD/JRS/PBPEG-083/06, 04 Apr 2006.
7. Millington S. (ed), (2006) *WP 2.4. Final Report: Feasibility of 4D refractivity structure mapping*. DUCT MAPPING, TAD/JRS/PBPEG-275/05, 28 Jan 2006.
8. Heemskerk H. J. M. (ed), (2006) *WP 2.5. Final Report* TAD/JRS/PBPEG-0/05
9. Förster J. (ed), (2006) *WP 2.6. Final: Validation experiment DuMEx 2005*. Report DUCT MAPPING, TAD/JRS/PBPEG-105/06. 24 Aug 2006.
10. Waern Å. (ed), (2006) *WP 3. Final Report: Duct parameter retrieval from RF signal for duct prediction*. DUCT MAPPING, TAD/JRS/PBPEG-087/06, 07 Jul 2006
11. Periard C. (ed), (2005) *WP 5. Final Report: Qualitative correlation between human weather observation and duct characteristics*. DUCT MAPPING, TAD/JRS/PBPEG-277/05, 10 Nov 2005.
12. Agnew J. L. (ed), (2006) *WP 4. Final Report: Vertical sounding climatology for duct database improvement*. DUCT MAPPING, TAD/JRS/PBPEG-004/06, 05 Jan 2006.
13. Bean B.R., J.D. Horn and A.M. Ozanich, (1960) "*Climatic charts and data of the radio refractive index for the United States and the World.*" NBS Monograph No. 22, Supt. of Documents, US Govt. Printing Office, Washington DC, 20402, USA.
14. Bean B.R., B.A. Cahoon, C.A. Samson and G.D. Thayer, (1966) "*A World Atlas of Atmospheric Radio Refractivity*", ESSA Monograph 1.
15. Ortenburger L.N., (1977) "*Radiosonde Data Analysis II*", GTE/Sylvania Incorporated, contract MDA-904-76-C-0233.
16. Patterson W.L., (1987) "*Historical Electromagnetic Propagation Condition Database Description*", NOSC Technical Document 1149.

17. Craig K.H. and T.G. Hayton, (1994) "*Climatic mapping of refractivity parameters from radiosonde data*", AGARD Conf. on Propagation Assessment in Coastal Environments, Germany, AGARD-CP-567, pp 43.1–12.
18. COST 235 Final Report, (1996) "*Radiowave propagation effects on next generation fixed-services terrestrial telecommunications systems*", European Commission, EUR 16992.
19. Lystad S.L., (1995) "*Bibliography of radiosondes*", Report No. 02/95 Klima, The Norwegian Meteorological Institute.
20. NCCOSC, RDT&E Division Technical Document 2648, (1994) "*Engineer's Refractive Effects Prediction System*", San Diego, California.
21. Kunz G. J., M. M. Moerman, A. M. J. van Eijk, S. P. Doss-Hammel and D. Tsintikidis: (2003) *EOSTAR: an electro optical sensor performance model for predicting atmospheric refraction, turbulence and transmission in the marine surface layer*, SPIE Vol. 5237 paper 13.
22. Bösenberg J., A. Ansmann, J. M. Baldasano, D. Balis, C. Böckmann, B. Calpini, A. Chaikovsky, P. Flamant, A. Hågård, V. Mitev, A. Papayannis, J. Pelon, D. Resendes, J. Schneider, N. Spinelli, T. Trickl, G. Vaughan, G. Visconti, M. Wiegner: (2001) *EARLINET: A European Aerosol Research Lidar Network*, in *Advances in Laser Remote Sensing*, Eds: A. Dabas, C. Loth and J. Pelon, Edition: Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, ISBN 2-7302-0798-8, pp. 155-158, 2001.
23. Persson Rolf, Gustafsson Ove: (2004) *Refraction measurements with lidar at sea - experiments in 2003 and 2004*. FOI Memo 1089, November 2004.
24. Karlsson Edvard, Ann-Charlotte Nilsson, Melker Nordstrand: (1988) *Lokal Brytningsindexmodell på fartyg, Beskrivning av beräkningsmetodik och mätsystem*. FOA Rapport E40037, ISSN 0281-9945, December 1988.
25. Ladell Lars: (1989), *Strålbaneberäkningar och Radarräckvidd*, FOA rapport C 30557-3.5, November 1989, ISSN 0347-3708.
26. Wetter Erik och Sune Westman: (2000) *Programkomponent till lokal brytningsindexmodell för fartyg, Gränssnittsbeskrivning av lbm32.dll, version 2.1*. FOA-R--00-01581-616--SE, ISSN 1104-9154, Augusti 2000.
27. Karlsson Edvard, Ann-Charlotte Nilsson, Melker Nordstrand, Hans Renström, Peter Caspersson, Lars Ladell, Allan Moberg: (1989) *Utvärdering av Lokal Brytningsindexmodell på fartyg*. FOA Rapport E40038, ISSN 0281-9945, December 1988.
28. Hopfgarten Anna, Melker Nordstrand, Pontus von Schoenberg, Sune Westman: (2004) *Programmet LBM, En användarhandledning – Ett stöd för bedömning av radarräckvidd hos marinens fartyg*. FOI-R--1236--SE, Maj 2004.
29. Gustafsson Ove, Eriksson Gunnar, Holm Peter, Persson Rolf, Thaning Lennart, von Schoenberg Pontus, Waern Åsa: (2007) *Slutrapport internationella samarbetet 'Duct Mapping'*, Kommando FOI rapport.
30. Holm Peter Lundborg, Waern Åsa: (2003) *Parabolic equation technique in vegetation and urban environments*. FOI-R--1050--SE, December 2003.

31. Malmström Johan: (2004) *Förstudie: Användning av GPS för att estimera brytningsindex i atmosfären*. FOI-R--1160--SE, Januari 2004.
32. Eriksson G., Rundgren M., Karlsson E. och Asp B.: (2001) *Vågutbredningsanalys för radio och radar. Förstudie*. FOI-R--0099--SE, Juni 2001.
33. Bengtsson L. et al.: (2003) *The use of GPS measurements for water vapor determination*. Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 84(no. 9):1249–1258, 2003.
34. Dick G., Gendt G., and Reigber C.: (2001) *First experience with near real-time water vapor estimation in a German GPS network*. Journal of Atmospheric and Solar- Terrestrial Physics, Vol. 63(no. 12):1295–1304, August 2001.
35. Gustafsson Ove K. S., Eriksson Gunnar, Holm Peter, Waern Åsa, Schoenberg Pontus von, Thaning Lennart, Nordstrand Melker and Persson Rolf: (2006) *The use of measured RF power signals to evaluate feasibility of inverse methods to retrieve refractivity parameters*. SPIE konferens Remote sensing 2006, Stockholm, SPIE 6360-1.
36. Hermansson Malin (2004) *Computer simulation of laser beam propagation through turbulent atmosphere in a marine environment*. Umeå university, Master Sciences in physical Engineering program thesis, Umeå.
37. Renoul François (2004) *Measurement of Turbulence and comparison between an ultrasonic anemometer and a scintillometer*. Examensarbete för skolan Ecoles Militaires de Saint-Cyr Coëtquidan, Guer, Frankrike.