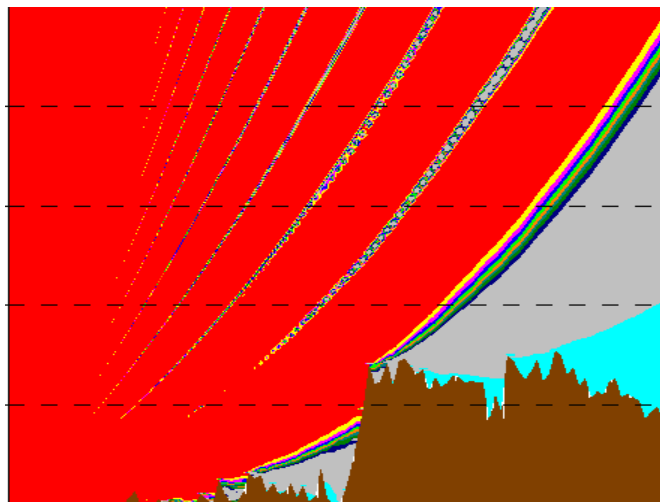


Vågutbredningsanalys för radio och radar.

Förstudie.



Edvard Karlsson, Börje Asp, Gunnar Eriksson och Marcus Rundgren

NBC-Skydd
901 82 Umeå

Ledningssystemteknik
Box 1165, 581 11 Linköping

Innehåll	Sida
1 Inledning	6
1.1 Historisk bakgrund.....	6
1.2 Betydelsen av vågutbredningsanalys för framtida marina system.....	7
2 Meteorologi och atmosfärens brytningsindex.....	8
2.1 Samband mellan brytningsindex och meteorologiska variabler	9
2.2 Krav på meteorologiska parametrar.....	10
2.3 Konventionella sensorer för temperatur och fuktighet.....	12
2.4 Refraktometer	13
2.5 Vindmätare.....	14
2.6 Fjärrmätning med passiva radiometrar eller Lidar.....	14
2.7 Fjärrmätning av brytningsindexprofil med hjälp av radiosignaler	15
2.7.1 Användning av för ändamålet speciella sändare	16
2.7.2 Användning av radar och markekon.....	18
2.7.3 Användning av radar och ekon från havsytan	18
2.7.4 Användning av befintliga radiosändare.....	20
2.7.5 Användning av GPS-satelliter	21
2.8 Meteorologiska modeller.....	22
2.8.1 Bulkmodeller.....	22
2.8.2 Mesoskaliga meteorologiska modeller	24
2.9 Förutsättningar för ledskikt över Östersjön.....	26
2.9.1 Avdunsningsledskikt och advektionsledskikt	26
2.9.2 Ledskikt orsakade av subsidensinversioner.....	28
3 Radio- och radarutbredningsmodeller för troposfären.....	35
3.1 Vågledarteori - modteori.....	35
3.2 Geometrisk optik (Raytrace).....	35
3.3 Paraboliska vågekvationer, PE.....	36
3.4 Beräkningsprogram baserade på ren PE-teknik.....	39
3.4.1 Electromagnetic Parabolic Equation, EMPE.....	39
3.4.2 Tropospheric Electromagnetic Parabolic Equation Routine, TEMPER.....	39
3.4.3 Parabolic Equation model for Personal Computer, PEPC	39
3.4.4 Terrain Parabolic Equation Model, TPPE.....	39
3.4.5 PC Parabolic Equation Model, PCPEM.....	40
3.4.6 Finite Difference Parabolic Equation Model, FDPEM	40
3.5 Beräkningsprogram baserade på en kombination av tekniker, hybridmodeller	40
3.5.1 Radio Physical Optics, RPO.....	41
3.5.2 Hybridized Terrain Parabolic Equation Model, TERPEM.....	41
3.5.3 Advanced Propagation Model, APM	43
3.6 Utvecklingstrender för PE-modeller	45
3.7 Vågutbredningsprogram för olika scenarier.....	46
3.8 Metoder för beräkning av transmissionsförlust och sannolikhet för målupptäckt.....	46
3.9 Felkällor i vågutbredningsprogram	47

4	Beslutstödssystem och operativa system	47
4.1	<i>Environmental Electromagnetic Modelling System, EEMS</i>	48
4.2	<i>Tropospheric Refractive Effects Prediction System, TREPS</i>	48
4.3	<i>Integrated Refractive Effects Prediction System, IREPS</i>	48
4.4	<i>Radio Propagation Over Terrain, RPOT</i>	48
4.5	<i>Advanced Refractive Effects Prediction System, AREPS</i>	49
4.6	<i>SEAWASP</i>	55
4.7	<i>De svenska systemen LBM och MUP</i>	55
5	Vågutbredningsberäkningar med AREPS och LBM	58
5.1	<i>Översättning av brytningsindexprofiler från LBM till AREPS</i>	58
5.2	<i>Transmissionsförlust och sannolikhet för målupptäckt över hav</i>	58
5.2.1	Typfall 1	60
5.2.2	Typfall 2	61
5.2.3	Typfall 3	62
5.2.4	Typfall 4	63
5.2.5	Typfall 5	64
5.2.6	Typfall 6-9	65
5.3	<i>Radarräckvidd i skärgårdsmiljö</i>	66
5.4	<i>Inverkan av skikt på högre höjd än vad LBM kan upptäcka</i>	67
5.5	<i>Vindens inverkan på beräkningar till havs</i>	68
6	Slutsatser och förslag	69
6.1	<i>Allmänt</i>	69
6.2	<i>Förslag till fortsatt verksamhet - systemgenerationen bortom dagens LBM</i>	70
6.2.1	Sensorer	71
6.2.2	Meteorologiska modeller	71
6.2.3	Vågutbredningsmodeller	72
7	Referenser	72

1 Inledning

Atmosfärens brytningsindex spelar en avgörande roll för funktion och prestanda hos radio- och radarsystem som opererar inom mikrovågsområdet. Sedan slutet av 1980-talet finns i den svenska marinen ett system kallat LBM, lokal brytningsindexmodell. Systemet beräknar förväntad inverkan på räckvidden, främst för radar, utgående från på fartyget lokalt uppmätta väderdata.

Här presenterad förstudie, inriktad mot radio och radar, har genomförts vid avdelningarna för NBC-skydd (Umeå) och Ledningssystemteknik (Linköping). Första delen av studien genomfördes på uppdrag av FMV och slutfasen inom FoT-projektet Vågutbredningsanalys. Syftet med studien har dels varit att uppdatera kunskaperna om mätsystem och modellberäkningar som stöd för pågående nyanskaffning av LBM och dels kartlägga nya metoder för vågutbredningsanalys med bäring mot radio- och radarapplikationer i det nystartade forskningsprojektet. Föreliggande rapport är en uppdatering av rapporten för FMV [Karlsson mfl, 2000] med ett vidare perspektiv och mindre fokusering på LBM. Rapporten innehåller också ett helt nytt avsnitt ”2.9 Förutsättningar för ledskikt över Östersjön”. Arbetet omfattar litteraturstudier, deltagande i konferenser, studiebesök, utvärdering av vissa prov samt test av tillgängliga nya datormodeller. Endast vågutbredningens beroende av atmosfärens brytningsindex har studerats, det vill säga effekter av nederbörd, moln eller dimma behandlas inte.

Rapporten vänder sig främst till specialister rörande vågutbredning för radio och radar vid FMV, FOI, FRA och HKV. Förutom inledningskapitlet innehåller rapporten fyra huvuddelar som delvis kan läsas var för sig. Kapitel 2 behandlar atmosfärens brytningsindex och samband med meteorologi, kapitel 3-4 vågutbredningsmodeller och beslutstödssystem baserade på vågutbredningsanalys, kapitel 5 ger beräkningsexempel som visar möjlig framtida vidareutveckling och kapitel 6 ger slutsatser och förslag.

1.1 Historisk bakgrund

Sverige och dåvarande FOA bidrog tidigt under 1960- och 1970-talen till utveckling av teorierna för utbredning av radio- och radarvågor i atmosfären [Wickerts, 1963, Eklund m. fl., 1969]. Samband mellan meteorologiska variabler och brytningsindex fastställdes och olika typer av fenomen som övernormal utbredning och ledskiktsutbredning studerades med hjälp av specialmätningar. De meteorologiska modellerna var då inte tillräckligt avancerade för att förutsäga och analysera vågutbredningsförhållanden. Under 1980-talet utvecklades dock de meteorologiska ”bulkmodellerna” så att det blev möjligt att beräkna ”avdunsningsledskikt” närmast havsytan med hjälp av mätning av lufttemperatur, luftfuktighet, vindhastighet och vattenytans temperatur ombord på fartyg. Avdunsningsledskikten beror främst på den stora vertikala fuktighetsgradienten närmast havsytan. LBM-systemet, som utvecklades av FOA på uppdrag av Militära Vädertjänsten och infördes av FMV på vissa svenska fartyg i slutet av 1980-talet, bygger på den metoden. US Navy och Nato gick dock ett steg längre och kombinerade bulkmetoden med ballong- eller flygmätningar upp till ca 1000 m. Beräkningen av radio- och radarutbredning gjordes då främst med radarhorisontekvationen och strålbanor. Under 1990-talet har dock mer avancerade vågutbredningsmodeller som bygger på den paraboliska vågekvationen (PE) utvecklats av US Navy och Nato. Detta ger möjlighet till beräkning av dämpning och sannolikhet för måluptäckt samt att ta hänsyn till horisontella gradienter i brytningsindex och terräng. Under 1990-talet har också nya mätmöjligheter med

till exempel raketsonder och fjärranalys tillkommit och nya meteorologiska modeller har utvecklats, som kan ge möjlighet att beräkna hur brytningsindex varierar i tid och rum.

1.2 Betydelsen av vågutbredningsanalys för framtida marina system

Dagens LBM-system finns bara på ett fåtal fartyg. Systemet är inte integrerat i fartygets ledningssystem och innehåller ingen direkt koppling till radarsystem och målegenskaper. LBM tar hänsyn till brytningseffekter i den lägre delen av troposfären (refraktion), men kan inte beräkna dämpning och spridning. Vidare ger systemet, som namnet antyder, bara en lokal bild av brytningsindex. De i systemet ingående modellerna förutsätter öppet hav vilket gör funktionen tveksam utmed kusten och i skärgårdsmiljö.

Trots sin enkelhet och alla de här ovan uppräknade bristerna har dock systemet åtskilliga gånger visat på styrkan av att ha tillgång till ett beslutsstödssystem för radar som kan beräkna refraktion baserat på information om brytningsindex. Vid övningar har tillgång till LBM många gånger varit skillnaden mellan vinst och förlust. En mer detaljerad beskrivning av styrkor och svagheter hos LBM ges i kapitel 4.7.

Dagens modeller och metoder i LBM ger värdefull information om utbredningsförhållandena, men ingen direkt information om signalstyrka och från målet reflekterad energi och ingen tydlig beskrivning av nedre gränsen för de frekvenser som påverkas. Med hjälp av moderna vågutbredningsmodeller skulle informationen om brytningsindexförhållandena i framtiden även kunna användas till beräkning av frekvensberoende effekter, dämpning, spridning och signalstyrka och därmed sannolikhet för målupptäckt, radartäckning för specifika radarstationer och täckningsområden för kommunikations- och signalspaningssystem.

Ett framtida system bör integreras i ledningssystemet och bland annat ge underlag för egen taktik, tolkning av signalspaningsresultat, användning av motmedel samt bedömning av de egna respektive en motståndares möjligheter att upptäcka mål. Detta måste kunna ske såväl ute på öppet hav såväl som utmed kusterna och i skärgårdsmiljö. Inhämtning av väderdata måste ske automatiskt och på så sätt att en global bild (höjd, avstånd, azimuth) av brytningsindexsituationen kan erhållas.

Vidare skall framtida system kunna utnyttja denna väderinformation inte bara för bestämning av radarräckvidd utan även för liknade uppgifter för radiokommunikation samt för elektrooptiska och akustiska system, och därmed bli en viktig komponent för att uppnå ”Dominant Battlespace Awareness (DBA)”. Med detta följer nya och större möjligheter att anpassa stridsteknik och taktiskt uppträdande till aktuell vädersituation.

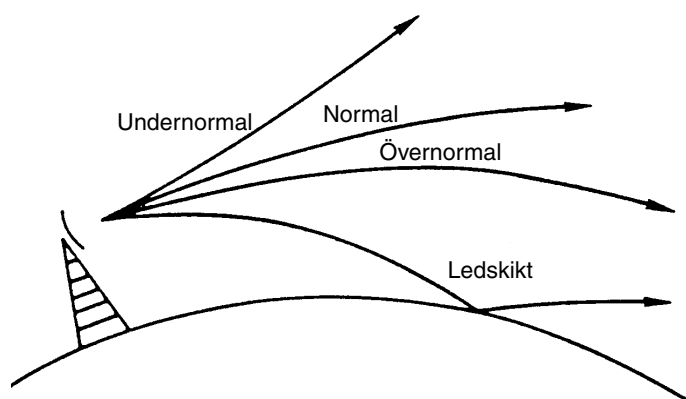
Beslutsstödsfunktionerna måste så långt som möjligt vara automatiska samt anpassade till operatörens kunnande och trötthetsnivå. Vid internationella operationer är dessutom behovet av ett förbättrat beslutsstöd särskilt stort.

Ovanstående resonemang har förts utifrån ett marint perspektiv. Givetvis gäller motsvarande i hög grad för markbundna operationer även om troposfärbetingelserna är något annorlunda än för hav. Projekt Vågutbredningsanalys fokuserar i ett inledande skede på marina scenarier men avsikten är att projektet så småningom skall omfatta alla typer av scenarier.

2 Meteorologi och atmosfärens brytningsindex

Radio- och radarvågor i atmosfären påverkas genom brytning (refraktion), absorption och spridning. Omfattningen av atmosfärens inverkan bestäms av lufttryck, lufttemperatur och luftfuktighet. Det marina gränsskiktet är den del av atmosfären som sträcker sig från havsytan till en höjd som kan variera från tjugo till flera hundra meter. Eftersom havsytan lätt kan anta en annan temperatur än luften, kan stora vertikala temperatur- och fuktighetsgradienter förekomma i gränsskiktet. Detta kan ge stora refraktionseffekter (brytning) på grund av vertikala och horisontella gradienter i atmosfärens brytningsindex orsakade av variationerna i lufttryck, luftens temperatur och halt av vattenånga. Temperaturens inverkan är en densitetseffekt, medan vattenångans inverkan främst beror på vattenmolekylens dipoleffekt, dvs vattenmolekylen uppträder som en elektrisk dipol och svänger i takt med strålningens frekvens. De vertikala gradienterna över hav är normalt större än de horisontella, varför det ibland är tillräckligt att bestämma brytningsindex som en funktion av höjden för att kunna beräkna vågutbredningsförhållandena. Horisontella skillnader i den vertikala variationen av brytningsindex kan dock ha mycket stor betydelse, exempelvis vid en kustlinje eller där vatten-temperaturen varierar horisontellt som till exempel i Östersjön.

Olika typiska utbredningsförhållanden för radar/radio framgår av figur 1. *Normalutbredning* förekommer i en standardatmosfär, där temperaturen avtar med $0.65^{\circ}\text{ C}/100\text{ m}$ och relativa fuktigheten är ungefär konstant. När temperaturen ökar med höjden och fuktigheten minskar



Figur 1 Utbredningsförhållanden.

med höjden kan *övernörmal räckvidd* eller *ledskikt* förekomma. Vid ledskikt kan till exempel mycket långa räckvidder uppstå, genom att radio/radarstrålar bryts ned mot och reflekteras vid havsytan. På en viss höjd över marken kan då samtidigt förekomma "radarskugga" med kort räckvidd genom att radarenergien fångas i ledskiktet. Om både lufttemperaturen och luftfuktighet ökar med höjden uppstår *undernormal utbredning*, vilket innebär att strålar kröks uppåt.

Transmissionsdämpning på grund av gaser i atmosfären och olika former av nederbörd har i regel större betydelse endast vid frekvenser över 10 GHz. Frekvensbanden runt 22, 60 och 183 GHz brukar ofta benämnas absorptionsband. Mellan 30 och 40 GHz och mellan 90 och 100 GHz finns områden med lägre atmosfärsdämpning (fönster). Beroende på tillämpningsområde är både absorptionsbanden och atmosfärsfönstren intressanta ur radar- och kommunikationssynpunkt.

Gasdämpningen orsakas av syre- och vattenångaabsorption. Syre har ett brett absorptionsband runt 60 GHz, isolerade absorptionslinjer nära 119 GHz samt vid flera frekvenser över 300 GHz. Vattenånga däremot har en svag absorptionslinje nära 22 GHz och flera starka linjer vid 183 GHz och däröver (långt upp i det infraröda området). Frekvensen, styrkan och formen hos dessa spektrallinjer innehåller information om typen och tätheten hos de gaser som finns vid olika höjder i atmosfären. På grund av den höga specifika dämpningen i dessa dämpningstoppas kommer inte utbredningen nämnvärt att påverkas av troposfäranomalier. Dämpningen från vattenånga och syre kan betraktas som en grunddämpning till vilken dämpning på grund av olika former av nederbörd adderas.

Troposfärspridning orsakas av småskaliga, snabba oregelbundenheter eller diskontinuiteter i troposfärens brytningsindex. Denna diffusa spridning (troposcatter) uppträder ständigt även om andra fenomen såsom troposfärrefraktion (brytning/reflektion) tidvis ger det dominerande bidraget till den mottagna signalen. Troposfärens heterogena sammansättning inom den av de båda antennloberna bildade gemensamma volymen möjliggör att signaler kan tas emot långt bortom horisonten, speciellt inom VHF/UHF (30-3000 MHz). Den mottagna signalen är vid troposfärspridning sammansatt av en mängd små bidrag från slumpmässigt fördelade turbulenselement inom denna volym. Genom att turbulenselementen rör sig med vinden varierar utbredningssträckan och fasläget mellan de olika bidragen ständigt. Det ger upphov till att signalstyrkan fluktuerar (fädrar) och detta är en begränsande faktor bland annat vid troposcatterförbindelser. Pålitliga förbindelser via troposcatter kräver antenner med hög antennförstärkning och hög uteffekt (i kW-klassen) och typiska förbindelseavstånd inom UHF-området är 250 till 350 km.

2.1 Samband mellan brytningsindex och meteorologiska variabler

Brytningsindex beror på lufttryck, lufttemperatur och luftfuktighet enligt följande approximativa ekvation [Bean och Dutton, 1966];

$$N = \frac{77,6P}{T} + \frac{3,73 \times 10^5 E}{T^2} \quad (1)$$

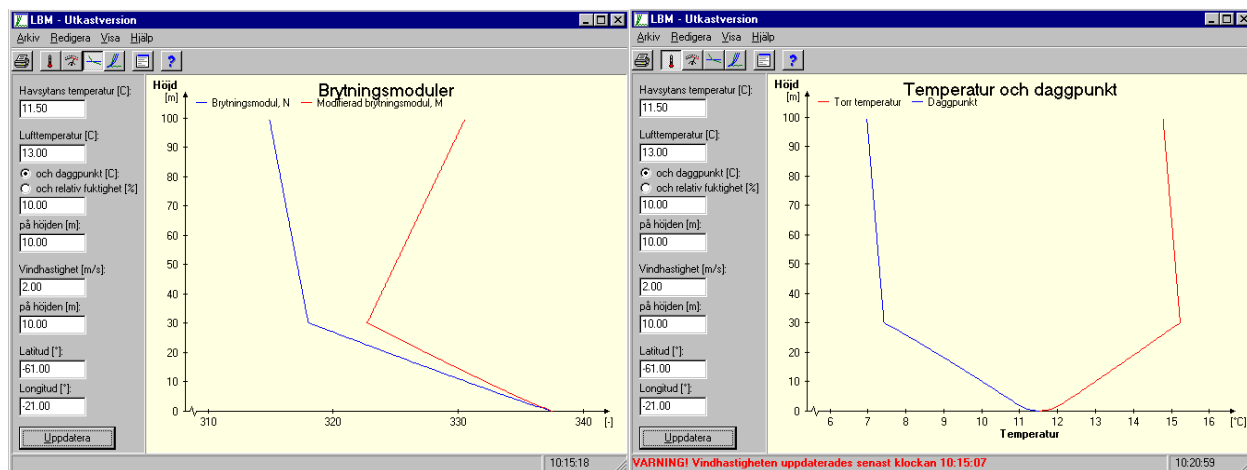
Där N är en brytningsmodul = $(n-1) \times 10^6$, n är brytningsindex, P är totalt lufttryck (hPa), E är vattenångans tryck (hPa) och T är lufttemperatur i K. Ekvationen är korrekt inom 0.5% för atmosfärstryck mellan 200 och 1100 hPa, lufttemperaturer mellan 240 och 310K och vattenångetryck mindre än 30 hPa. Frekvensområdet anges lite olika i litteraturen beroende på källan. Generellt kan dock sägas att formeln gäller för frekvenser mellan ca 30 MHz och 20 GHz [Forand, 1996]. Om man undantar absorptionsbanden (exempelvis frekvenser runt 22 och 60 GHz) är formeln giltig ända upp till 100 GHz (vissa källor anger upp till 1000 GHz). Under 30 MHz är det i allmänhet inte intressant att känna troposfärens brytningsindex. Troposfäreffekter blir på grund av den långa våglängden mycket sällsynta och svaga och det är i stället andra vågutbredningsmekanismer som dominerar. På kortvåg är det bland annat jonosfärens (70-1000 km) brytningsindex, styrt av bland annat solstrålningen som ger de största atmosfärs effekterna.

Eftersom lufttrycket varierar mycket regelbundet med höjden enligt hydrostatiska grundekvationen kan effekten av lufttryck beräknas teoretiskt och lufttryckmätningar är normalt inte nödvändiga. Lufttemperatur och luftfuktighet är därför de variabler som är

viktigast att mäta/bestämma. För att underlätta vågutbredningsanalysen utnyttjas ofta en annan modifierad brytningsmodul M, som medger att jordytan betraktas som en plan yta:

$$M = N + 0.157 \cdot z \quad (2)$$

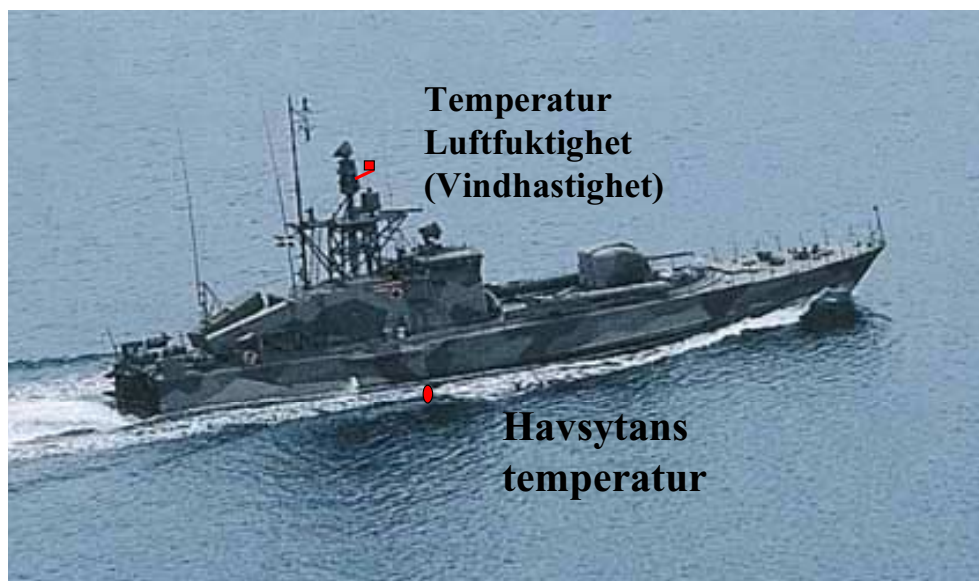
där z är höjden över havet i meter. Ledskiktsutbredning förekommer när M minskar med höjden. Ett exempel på brytningsmoduler samt temperatur och fuktighet given som daggpunkt vid ledskiktsutbredning framgår av figur 2.



Figur 2 Exempel på brytningsmodul N (blå), modifierad brytningsmodul M (röd) samt temperatur (röd) och daggpunkt (blå) vid ledskikt mellan 0-30 m enligt beräkningar med LBM. I detta exempel antar LBM standardatmosfär över 30 m.

2.2 Krav på meteorologiska parametrar

För att beräkna avdunstningsledskikt på låg höjd över hav används ofta bulkmodeller (se vidare kapitel 2.8). Indata för dessa är mätdata tagna på ca 10 m höjd över havsytan samt även vid havsytan, se figur 3. För att få ett tillfredställande resultat från beräkningen krävs en datanoggrannhet enligt tabell 1 [Goldhirsh och Dockery, 1995, Karlsson m. fl. 1988].



Figur 3 Fartyg med sensorer för bulkmodellberäkningar.

Parameter	Noggrannhet
Lufttemperatur	0.3° C
Ytvattentemperatur	0.3- 0.5° C
Relativt fuktighet	2 %
Vindhastighet	10-20 %

Tabell 1 Krav på bulkmätningar för avdunstningsledskikt.

Ytvattentemperatur bör mätas maximalt 10 cm under ytan (kylvattenintag på djup > 1m är klart olämpligt). När den vertikala profilen av brytningsindex bestäms, är det absoluta värdet inte lika viktigt som gradienten. *Paulus* [1989] har specificerat krav på radiosondsensorer enligt tabell 2, vilka ger 1-2 N-enheters upplösning för brytningsindexmodulen.

Parameter	Absolut noggrannhet	Upplösning	Mätområde
Lufttemperatur	0.5° C	0.1° C	-10-40° C
Luftfuktighet	5 %	1%	20-100%
Luftryck	3 hPa	0.5 hPa	850-1050 hPa

Tabell 2 Krav på radiosondsensorer.

En upplösning på 0.5 hPa för luftryck motsvar 4 m i höjd. Radiosondballonger bör stiga med 200-300 m/minut (3,3-5 m/s) för att ge tillräcklig ventilerings av sensorerna. Långsammare stighastighet ger högre upplösning men kan ge för dålig ventilation. Fuktsensorn i Vaisala RS-80 radiosond har tidskonstant 1 s för 6 m/s och ca 1,5 s mellan mätningarna [*Richter*, 1994], vilket leder till 5-10 m vertikal upplösning vid stighastigheter 200-300 m/min. Om en refraktometer används bör den ha en absolut noggrannhet på ± 2 N-enheter.

Vad är rimligt att eftersträva när det gäller vertikal-, horisontal- och tidsupplösning beträffande de data som ger brytningsindexprofilen? *Goldhirsh och Dockery* [1995] redovisade på ICAP 95 krav på upplösning hos brytningsindexprofilen, såväl i höjd, avstånd och tid. Även om man i denna artikel mycket tydligt påpekar att redovisade slutsatser inte är allmängiltiga utan endast avser de fall man studerat ger dessa resultat en fingervisning om storleksordningen. I studien ingår mätdata från USA:s västkust vid frekvenserna 1, 3 och 10 GHz och man har använt vågutbredningsprogrammet TEMPER för jämförelser. Man fann att i höjddled krävdes en upplösning runt 7 m eller bättre för att hålla prediktionsfelet på en acceptabel nivå. I avståndsled behövdes en uppdatering ungefär var 15:e km och för tidsskalan anger man ett behov mellan individuella mätningar till en halvtimma-timma. Vidare anger man, som väntat, att man genom att använda en enda (lokalt) uppmätt profil och sedan anta likformighet utmed sträckan kan få en dramatisk försämring av tillförlitligheten på prediktionen. Man hävdar dock, lite motsägelsefullt, att i avsaknad av mätningar av brytningsindexprofilen i avståndsled är det bättre att anta likformighet utmed sträckan än att göra predikteringar som inte förlitar sig på realtidsmätningar.

Inverkan av regn, snö och dimma föreligger främst för radarfrekvenser. Regn kan till exempel ge upphov till ren dämpning men även till radarklotter. I denna förstudie tas dock inte detta ämne upp till diskussion.

2.3 Konventionella sensorer för temperatur och fuktighet

För punktmätningar av temperatur finns billiga och bra sensorer i form av PT100 resistanstermometrar med normalt ca $\pm 0.1^\circ \text{C}$ noggrannhet. Gränssättande för mätningarna är strålningsskyddets funktion och störningar från mätplattform (fartyg, flygplan etc.). Ofta kombineras instrument för lufttemperatur och luftfuktighet. Luftfuktighet är dock generellt svårare att mäta än lufttemperatur. En automatisk psykrometer [Thies Clima, 1984] för mätning av lufttemperatur och luftfuktighet, som använts för LBM, är noggrann men dyr och fordrar regelbunden tillsyn. En utvärdering [Karlsson och Larsson, 2000] visar dock att strålningsskyddet har brister och att psykrometern ej heller fungerar bra vid temperaturer under 0°C . I samma utvärdering jämfördes också två av Vaisalas sensorer för lufttemperatur och luftfuktighet. Fuktsensorn i dessa (Humicap) består av en fuktabsorberande polymer, vars kapacitans ändras med fuktigheten. HMP 243 [Vaisala, 1996] fungerade bäst genom att den har en funktion för att eliminera kondens på fuktsensorn genom uppvärmning. En tendens att visa för låg fuktighet vid höga fuktigheter förekommer dock hos HMP 243. Kalibreringsförfarandet kan dock anpassas för höga fuktigheter. Rotronic Instrument Corp. har en fuktsensor med filter, som påstås behålla kalibrering inom $\pm 2\%$ relativ fuktighet under 1 år ombord på fartyg [Rowland m. fl., 1996].

Instrument för mätning av indata för att bestämma så kallade avdunstningsledskikt bör placeras 6 m eller högre över vattenytan för att undvika inflytande från vågor [Paulus, 1989, Richter, 1994]. För att undvika risken för varm luft från soluppvärmda ytor/värmeutsläpp eller turbulensstörda profiler bör förhållanden mellan mät höjd över påverkade yta och påverkande ytas längd vara > 0.2 . Större fartyg, tex. hangarfartyg [Rowland m. fl., 1996], kan ha två mätmaster (babord och styrbord) och man väljer sedan minst störd mätpunkt beroende på vindriktning och fartygets rörelse. Sensorerna som måste placeras innanför skrovet med lufttillförsel via ett rör (som på korvett Visby), kan få problem att visa rättvisande värden. Särskild utprovning fordras för sådana installationer.

Mätning av lufttemperatur, luftfuktighet och vattentemperatur på öar ger sällan representativa värden för öppet hav, även om öarna är små, på grund av soluppvärmning av marken och grunda vatten. Däremot kan bojmätningar ge bra värden. Användning av bojar, med mätning av vattentemperatur samt lufttemperatur, luftfuktighet och vind ibland på flera nivåer upp till 7 m höjd, rapporteras från flera långvariga försökskampanjer se tex. [Kerans m. fl., 2000, Burk and Thompson, 1995, Dion och Gardenal, 1999]. Bojmätningar har också använts för beräkning av statistik över förekomst av avdunstningsledskikt. Permanent utplacerade bojar skulle också kunna användas operativt för att ge information om horisontella variationer av avdunstningsledskikt.

Det enklaste sättet att mäta vattenytans temperatur är ofta att placera en "ficka" med en PT100 resistanstermometer i en spol- eller kylvattenledning. En förutsättning för bra resultat är dock att vattenintaget sker från ostört vatten och ej från för stort djup. Vid utprovning av LBM på robotbåt [Karlsson m. fl., 1988] användes en spolvattenledning med vattenintag på ca 1 m djup. Större intagsdjup än 1 m bör undvikas pga. de temperaturgradienter i vattnet som uppstår speciellt vid svag vind och soligt väder. På HMS Orion prövas mätning av vattenytans temperatur med Pt100 resistanstermometer i en inbuktande "ficka" på utsidan av skrovet ca 0.5 m under vattenlinjen. En preliminär utvärdering pekar på acceptabel noggrannhet. Ett sätt att mäta vattenytans temperatur (1 cm under ytan) samt lufttemperatur och luftfuktighet omedelbart ovanför havsytan (2 cm) är att använda en flytsond för engångsbruk, varvid data sänds med radio till mottagare på fartyg [Rowland m. fl., 1996]. Med sådana mätningar kan

man använda lufttemperatur och luftfuktighet på 2 cm för beräkning av brytningsindexprofilen i modeller som LBM och liknade och behöver inte göra antagandet att luften antar vattentemperatur och 100 % relativ fuktighet vid havsytan.

Vertikalsonderingar av atmosfären kan göras med ballongsond, raketsond eller helikopter. Vaisalas ballongradiosondsystem RS 80 rekommenderas av US Navy [Richter, 1994]. En nackdel anges vara att markvärdena kan vara påverkade av lokal uppvärmning på fartyget samt att mätcykeln (ca 1.5 sek) kan ge en för grov upplösning. Dessa nackdelar kan undvikas med en liten raketsond, som går upp till 800 m höjd och sedan faller med fallskärm med 2 m/s. Sådana raketsonder har använts/prövats av US Navy med bra resultat [Rowland och Babin, 1987]. Data kan erhållas ned till ca 5 m över havsytan med 3 m upplösning. Sonden och telemetriutrustning är kommersiellt tillgänglig från Air Inc. Boulder Colorado USA. Raketen kan tillverkas av hobby raketkomponenter och av Flight System Inc., Raytown, Mo. USA. Förbrukningsmaterielkostnaderna för en sonduppskjutning är 160 \$. Om man kan återfinna och återanvända raket + sond kostar dock en uppskjutning endast 10 \$. Det meningsfulla att mäta temperatur- och fuktighetsprofiler med ballongsonder/raketsonder till strax ovanför havsytan har dock ifrågasatts pga. den variabilitet som orsakas av turbulens [Richter, 1994]. Medelvärden för 1 minut eller mer anses behövas. Modeller som LBM, baserade på medelvärden i en punkt ca 10 meter över vattenytan plus havsytans temperatur, anses ge mer tillförlitliga värden.

Temperatur och fuktgivare i helikopter har använts av US Navy i forskningssyfte för att verifiera radarutbredningsmodeller [Rowland och Babin, 1987]. Om sensorerna placeras mellan helikopterns medar och flygning sker med en horisontell hastighet över 30 m s⁻¹ och en vertikalhastighet på 1.5-3 m s⁻¹ (både uppåt nedåt) kan störningar på mätvärdena från helikopter och rotor undvikas. Med samplingsfrekvens på 2 Hz erhålls en vertikal upplösning på 0.75-1.5 m. Temperatursensorn var en termistor med 0.5 s responstid och fuktsensorn "Viz premium carbon-film humidity element" också med 0.5 s responstid (vid 25° C).

2.4 Refraktometer

Refraktometer är ett instrument som med hjälp av en resonansfrekvens i en mikrovågskavitet direkt kan bestämma luftens brytningsindex [Richter, 1994]. Refraktometer används operationellt i US Navy's E-2C övervakningsflygplan. I forskningssammanhang användas den i helikopter. På grund av hög vikt (och hög kostnad) används den dock ej som engångsinstrument i ballong/raketsonderingar. En svensk refraktometer byggdes av FOA och användes i forskningssyfte på 60-70-talet monterad på flygplan A32 Lansen. Att ta fram detta instrument var, åtminstone på 60-70-talet, förenat med stora kostnader. Huvudkomponenten, mikrovågskaviteten, tillverkas av ett material som har en lämplig temperaturutvidgningskoefficient. Den är därför (oftast) utförd i invar och tillverkningen är ganska besvärlig. De gamla kaviteterna skulle eventuellt kunna användas för att bygga en modern refraktometer. För de övriga komponenter som behövs för att bygga en refraktometer har teknikutvecklingen varit mycket stark. Det som förr krävde många diskreta komponenter går idag att göra med ett fåtal billiga standardkretsar. Dessutom är (mikrovågs)komponenterna mer stryktåliga idag. Även med modern komponentteknik är dock tillverkning av en komplett refraktometer förenat med relativt höga kostnader vilket medför att det i allmänhet är mer optimalt att bestämma brytningsindex med hjälp av mätningar av lufttemperatur och luftfuktighet.

2.5 Vindmätare

Många kommersiella sensorer uppfyller de krav som gäller för LBM och liknade bulkmodeller, under förutsättning att korrigering är gjord för fartygets rörelse och sensorn är placerad så att störningar från luftströmning runt fartyget undviks. Störst problem vid korrigering för fartygets rörelse uppstår vid svag vind och hög fart.

2.6 Fjärrmätning med passiva radiometrar eller Lidar

Havsyntans temperatur kan mätas med passiv IR-radiometer. US Navy har sådana sensorer på vissa fartyg [Rowland m. fl., 1996]. Kostnaden blir betydligt högre än vid mätning av vatten-temperaturen med Pt100 resistanstermometrar. Instrumentet måste kunna kompenseras för oönskad reflektion av himmelstrålning (IR) från havsyntan [Paulus, 1989]. En jämförelse mellan IR-instrumentets värde mätt från 6 m över vattenytan och direkt uppmätt vatten-temperatur på 2.5 cm djup under en 5 minuters period visade på +1.0 - -0.5° C skillnad [Mayer och Rowland, 1990]. IR-instrumentets temperatur var högre vid stabil skiktning och lägre vid instabil skiktning. Skillnaderna bedöms bero på oönskad reflektion av himmelstrålning. Olsen [1989] beskriver ett handburet IR-instrument tillverkat av Everest Interscience Inc, för mätning av havsyntans temperatur. Instrumentet är lätt att använda och kan automatiskt korrigera för himmelstrålningen med hjälp av en uppåtriktad sensor. Lufttemperaturen mäts också med en guldöverdragen termistor. Om instrumentet hålls i skugga, mätningen sker i riktning från solen och lutningsvinkeln är 45-90° C, erhålls bra resultat. Kalibrering före och efter försök till havs visade på 0.1-0.2° C avvikelser från ett referensvattenbad.

Havsyntans temperatur kan också mätas med passiv IR-radiometer från satellit vid klart väder. Erhållna absolutvärden är dock osäkra, medan differensen mellan olika platser har en osäkerhet på ca 0.5° C [Andersson och Lundquist, 2000]. Sammanställning av mätningar av havsyntans temperatur baserat på underlag från fartyg (färjor, satelliter) ingår rutinmässigt i SMHI:s verksamhet som underlag för ytvattentemperaturkartor och dessa uppgifter kan erhållas från SMHI två ggr per vecka.

Vertikalprofiler av lufttemperatur och luftfuktighet kan bestämmas på två huvudsätt med fjärrmätmetoder: (1) Passiv mätning av strålning från atmosfären inom IR eller mikrovågområdet, (2) Aktiv metod med Lidar. De passiva radiometermetoderna klarar ofta att bestämma de stora dragen för temperatur och fuktighet med vertikalupplösning på några hundra meter. Däremot klarar metoderna inte att bestämma specifik fuktighet med den vertikala upplösning på ca 10 m som fordras för att detaljerat bestämma ledsikt och analysera vågutbredningsförhållanden [Richter, 1994]. Temperaturprofiler kan ofta bestämmas med lite bättre upplösning än profiler för specifik fuktighet. Exempel på ett passivt instrument är GB-HIS (ground-based high resolution interferometer sounder), som är en IR-baserad radiometer som verkar inom 3.3-18.2 µm området [Davidson och Wash, 1995]. "Meteorological temperature profiler" (MTP-5) är ett kommersiellt scannande instrument som använder 5 mm våglängd (60 GHz). Vertikal upplösning är 50-100 m och noggrannheten 0.5° C. Ett annat scannande instrument som använder 5 mm våglängd beskrivs av Westwater m. fl. [1998]. Instrumentet kan mäta differenser mellan lufttemperatur och havsyntans temperatur samt temperaturprofiler.

Satellitbaserad mätning har också problemet att den vertikala upplösningen inte är tillräcklig. Indirekta metoder med satellitbaserad radiometer (AVHRR) i kombination med förenklade modellantaganden om det marina atmosfäriska gränsskiktet har prövats för att bestämma gränsskiktshöjd och ledsiktshöjd [Davidson och Wash, 1995]. Slutsatsen är att enbart

passiva metoder inte kan bestämma brytningsindexförhållanden med tillräcklig noggrannhet. Viss information erhålls dock som kan kombineras med andra metoder ("datafusion").

Två Lidartekniker kan användas för att bestämma vertikalprofiler, nämligen "differential absorption lidar" (DIAL) och "Raman" Lidar [Richter, 1994]. DIAL tekniken baseras på mätning av återspridd signal vid två olika vågtal, ett med hög absorption och ett med låg absorption. Kvoten mellan dessa signaler kan sedan användas för att bestämma mängd vattenånga eller temperatur. För att bestämma mängd vattenånga används vattenångans egna absorptionsband vid tex. ca 720 nm och för temperatur används syrets absorptionsband vid tex. ca 760 nm [Bösenberg, 1998]. Wulfmeyer och Bösenberg, 1998] visar att DIAL kan klara ett absolut mätfel för vattenånga som är $< 5 \%$ med 75 m upplösning vid en samplingstid lika med 1 minut mellan ca 200 m och 2000 m höjd. Högre upplösning ger större mätfel medan längre samplingstid kan minska felet något. För att klara mätning under 200 m pågår försök med nya konstruktioner av mottagaren i Lidarsystemet.

Raman Lidar utnyttjar en förskjutning av våglängden i det ljus som återsprids av luftens olika molekyler. Förhållandet mellan den signal som återsprids av vattenånga vid tex. 532 nm [Richter, 1994] och signalen från kvävgas är approximativt proportionell mot atmosfärens halt av vattenånga. Liksom DIAL tekniken har Raman tekniken svårt att mäta under ca 200 m, men nyligen framkomna uppgifter pekar på att man kan nå en undre mäthöjd på ca 60 m [Wulfmeyer och Bösenberg, 1998]. Raman tekniken fordrar väsentligt högre effekt jämfört med DIAL tekniken och ger större problem med solljus under dagtid, vilket leder till större fel dagtid än för DIAL tekniken. Agnew m. fl. [2000] påstår, utan att visa det, att Raman Lidar inom UV-området (355 nm) kan ge hög upplösning vid bestämning av temperatur- och fuktighetsprofiler upp till 2000 m höjd. Till skillnad mot DIAL fordrar Raman Lidar kalibrering mot tex. radiosondmätningar.

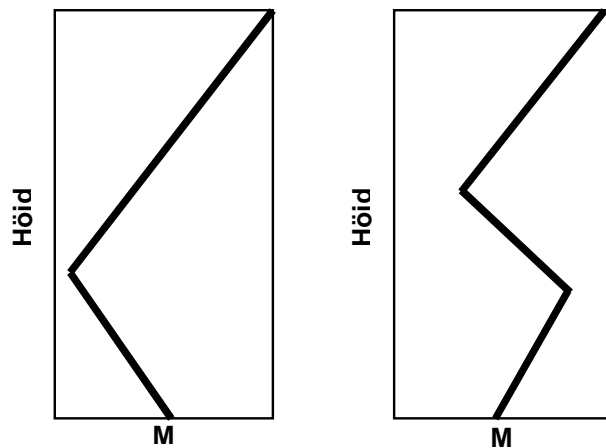
Kommersiella Lidarsystem för bestämning av vertikalprofiler av temperatur och vattenånga finns dock inte tillgängliga i dag främst pga. att solljus och moln ger låg noggrannhet, samt på grund av risk för ögonskador.

2.7 Fjärrmätning av brytningsindexprofil med hjälp av radiosignaler

Atmosfärens brytningsindexprofil kan bestämmas genom att observera hur radiovågor från kända sändare utbreder sig. Det kan vara sändare anordnade speciellt för detta ändamål, eller sändare för helt andra tillämpningar. Exempel på det senare kan till exempel vara GPS-, TV- eller radiosändare, men även den egna radarn ombord på ett fartyg kan användas för detta ändamål. När det gäller användning av radar studerar man vanligtvis radarekon från havsytan (sjöklatter) eller ekon från land. De senare kan antingen vara ekon från enskilda objekt eller från en skrovlig markyta (markklatter). En fördel med att använda egen fartygsradar och sjöekon, jämfört med att mäta på andra sändare, är att man på ett enkelt sätt kan hämta information från olika avstånd. Hur mycket den extra informationen är värd i förhållande till de extra obekanta, i form av okända spridningstvärsnitt som eventuellt måste lösas ut, är något som måste undersökas närmare. Att mäta på andra sändare kan, i mån av tillgång på sändare, ge värdefull information från många frekvenser inom ett brett spektrum.

Vid bestämmandet av brytningsindexprofiler från observerade radiosignaler handlar det i de flesta fall om att lösa ett så kallat inverst vågutbredningsproblem, det vill säga att med hjälp av en modell för radiovågornas utbredningen bestämma vilka inparametrar som gör att den modellerade vågutbredningen bäst överensstämmer med observerade data. I ett icke inverst problem utgår man istället från givna inparametrar och beräknar den resulterande vågut-

bredningen. Vid lösningen av det inversa problemet behöver oftast ett mycket stort antal beräkningar utföras med vågutbredningsmodellen över de tänkbara parameter-kombinationerna. För att minska parameterrummets storlek antas ofta enkla modeller för brytningsindexprofilens utseende. De vanligaste ansatserna är att använda en bilinjär eller trilinjär brytningsindexprofil, se figur 4. Den trilinjära profilen kan beskrivas fullständigt med fem parametrar. En svårighet med inversa problem är att de i de flesta fall inte existerar en entydig lösning, utan man får försöka finna den mest sannolika lösningen givet sina observationer.



Figur 4 Bilinjär (tv) och trilinjär (th) profil.

Ett exempel på en mera avancerad parametrisering utgör SEOF (shifted empirical orthogonal functions) [Rogers, 1997b; Rogers, 1998]. Här skapas en uppsättning ortogonala basfunktioner utifrån en stor mängd uppmätta brytningsindexprofiler. En godtycklig brytningsindexprofil kan sedan approximativt beskrivas som en linjärkombination av dessa basfunktioner. Graden av approximation kan väljas genom antalet termer som tas med. Rogers visar att man redan med mycket få parametrar kan erhålla ett mycket bra resultat vid jämförelse mellan uppmätt och predikterad vågutbredning. Parametrisering med SEOF vid lösning av det inversa problemet (bestämning av brytningsindexprofil givet uppmätt vågutbredning) har dock inte givit lika goda resultat vid jämförelse med trilinjär profil [Rogers, 1997b; Gerstoft m.fl., 2000].

2.7.1 Användning av för ändamålet speciella sändare

En metod för bestämma den vertikala brytningsindexprofilen genom mätning av tidsfördröjningen mellan en sändande masterstation och ett antal mottagarstationer placerade på olika höjd har presenterats av Hitney [2000]. Sträckorna väljs så att elevationsvinkeln mellan masterstationen och de olika mottagarna varierar mellan 0.4 och 4 grader. På så vis kommer brytningseffekterna att bli minimala trots att mätsignalerna passerar genom atmosfären under relativt flack vinkel för bästa känslighet för tidsfördröjningar. Atmosfären antas vara horisontellt homogent skiktad. Samtliga stationer behöver vara fast förankrade på land för att den fysiska gångvägsskillnaden skall vara konstant. Mätssystemet behöver kunna mäta den elektromagnetiska gångvägsskillnaden med en noggrannhet på 1 cm för att få en upplösning motsvarande 1 N-enhet vid en mätsträcka på 10 km. Masterstationens sändare antas var en typ av GPS-sändare och mottagarna fasmätande GPS-mottagare.

Teorin bakom principen är följande: Låt x_i och z_i vara avståndet respektive och höjden för den i :e mottagarstationen i förhållande till masterstationen. Antag att $z_i > z_{i-1}$. Elevationsvinkeln från masterstationen till mottagaren blir då $\alpha_i = \arctan(z_i / x_i)$. Om dl får beteckna den differentiella fysiska gångvägen blir skillnaden mellan elektromagnetisk och fysisk gångväg

$$\Delta_i = \int_{z=z_0}^{z=z_i} n(z) dl - \int_{z=z_0}^{z=z_i} dl = \int_{z_0}^{z_i} [1 + 10^{-6} N(z) - 1] \frac{dz}{\sin \alpha_i} = 10^{-6} \int_{z_0}^{z_i} N(z) \frac{dz}{\sin \alpha_i}, \quad (3)$$

där n och N är brytningsindex respektive refraktivitet. Eftersom α_i är konstant längs den i :e sträckan gäller att

$$\begin{aligned} \Delta_i \sin \alpha_i &= 10^{-6} \int_{z_0}^{z_i} N(z) dz = 10^{-6} \int_{z_0}^{z_{i-1}} N(z) dz + 10^{-6} \int_{z_{i-1}}^{z_i} N(z) dz \\ &= \Delta_{i-1} \sin \alpha_{i-1} + 10^{-6} \int_{z_{i-1}}^{z_i} N(z) dz, \end{aligned} \quad (4)$$

varför

$$\int_{z_{i-1}}^{z_i} N(z) dz = 10^6 [\Delta_i \sin \alpha_i - \Delta_{i-1} \sin \alpha_{i-1}]. \quad (5)$$

Medelvärde för refraktiviteten över skiktet mellan z_{i-1} och z_i kan därför approximeras med

$$\bar{N}_i = \frac{10^6}{z_i - z_{i-1}} [\Delta_i \sin \alpha_i - \Delta_{i-1} \sin \alpha_{i-1}]. \quad (6)$$

I det exempel som Hitney presenterar simuleringsresultat för antas att masterstationen är placerad vid havsytans nivå och att 10 mottagarstationer placerats ut med 100 meters höjdskillnad mellan varje. Systemet skulle därigenom kunna finna eleverade skikt upp till 1000 meters höjd. I simuleringarna utgår Hitney från verkliga brytningsindexprofiler uppmätta med radiosonder. Gångvägsskillnaderna till de 10 mottagarna beräknas utifrån de verkliga brytningsindexprofilerna med den upplösning som dessa har, med antagande om linjär variation mellan samplen. Dessa beräknade gångvägsskillnader justerades med ett ± 1 cm slumpmässigt fel innan inversionsalgoritmen applicerades. I majoriteten av fallen rapporteras metoden ha identifierat förekommande ledskikt och lyckats ge en representativ beskrivning av den ursprungliga profilen med 100 meters upplösning.

Den beskrivna principen får anses intressant, men kräver att topografin vid kusten kan erbjuda mätplatser på lämpliga höjder. Att bygga upp stora nät av sändare och mottagare längs kusterna kan nog bli ganska kostsamt. Svårigheten att få information om brytningsindexprofilen ute till havs med denna teknik gör den troligen mindre intressant för de tillämpningar som diskuteras i denna rapport.

2.7.2 Användning av radar och markekon

En liknande teknik som den med speciella sändare och mottagare beskriven ovan [Hitney. 2000], men som bygger på användandet av en radarstation för att göra tidsmätningarna, har visats av *Fabry m. fl.* [1996]. I detta fall var det i första hand refraktiviteten närmast markytan som studerades genom att göra fasmätningar på markekon. Om markekon från olika höjd finns tillgängliga kan tekniken i princip utvecklas till att mäta brytningsindexprofilen. Tekniken ställer mycket stora krav på markekons fasstabilitet, varför dessa måste väljas ut med mycket stor omsorg. Svårigheterna med att finna lämpliga objekt att mäta på och kravet på fasstabilitet utesluter med största sannolikhet detta angreppssätt vid mätningar från fartyg.

Ett annat angreppssätt, som inte är baserat på fasmätningar, har presenterats av *Barrios* [2000]. Här mäts i stället enbart den returnerade effekten från en skrovlig markyta. Utifrån den mottagna effekten beräknas vilken utbredningsfaktor som för tillfället råder mellan radarstationen och det aktuella objektet. Genom att den studerade ytan har viss utsträckning i avstånd erhålls ett antal olika utbredningsfaktorer som funktion av avståndet. Viss kännedom om den studerade ytans lutning i förhållande till den infallande radarsignalen och ytans relativa radartvårsnitt krävs för att kunna beräkna utbredningsfaktorerna. Med hjälp av en modell för vågutbredningen bestäms därefter brytningsindexprofilens parametrar (trilinjär modell) så att bästa möjliga överensstämmelse uppnås mellan modellens utbredningsfaktorer och de som uppmätts från det mottagna markekona. Försök med två olika modeller för vågutbredningen presenteras i artikeln; i det ena fallet används en modell baserad på paraboliska ekvationer och i det andra en raytrace modell.

2.7.3 Användning av radar och ekon från havsytan

En av svårigheterna vid användning av sjöklotter är att vattenytans relativa spridningstvårsnitt c° varierar med sjöstillståndet och därför oftast måste betraktas som en okänd parameter. Spridningstvårsnittet kan också uppvisa avsevärda variationer med avstånd på grund av vind och strömningsförhållanden. Möjligheten att använda radarekon från havsytan för skaffa information om atmosfärens brytningsindexstruktur har undersökts i ett antal arbeten. Till exempel har *Krolik och Tabrikian* [1997] presenterat en metod för att samtidigt bestämma brytningsindexprofilen och de okända, och med avståndet varierande, spridningstvårsnittet. För detta ändamål har man tagit fram en MAP-estimator (maximum a posteriori). Metoden bygger på att de okända tvårsnittet c° kan beskrivas som en första ordningens Markovprocess. Algoritmen kan kortfattat beskrivas enligt följande: För varje hypotetisk brytningsindexprofil bestäms den följd av c° som ger den bästa överensstämmelsen med uppmätta ekon. Den brytningsindexprofil som ger den allra bästa överensstämmelsen utgör sedan lösningen på problemet. Optimeringen över de okända tvårsnittet kan ske med den beräkningseffektiva Viterbialgoritmen. Beräkning av utbredningsfaktorerna för de olika hypotetiska brytningsindexprofilerna sker med hjälp av en PE-metod. Resultat från jämförelse mellan uppmätta brytningsindexprofiler och beräkningar baserade på radarmätningar med SPANDAR (Space Range Radar) vid 2.85 GHz visar på hyggliga resultat [*Krolik m.fl.* 2000]. Vid dessa jämförelser fanns ett markbaserat ledskikt på ungefär 40 meters höjd. En trilinjär brytningsindexprofil ansattes med en okänd övre gränshöjd, okänt ΔM och ett okänt första ordningens avståndsberoende för skiktets bashöjd. Radartvårsnittet antogs vara konstanta inom intervall på 6 km, men antogs kunna variera med ± 4 dB mellan intervallen.

Försök med att med hjälp av radarekon mäta höjden på avdunstningsskikt har också nyligen rapporterats [*Rogers m.fl.*, 2000]. Det är sedan tidigare känt att bakåtspridningen från en ojämn havsytta (sjöklotter) uppvisar ett avståndsavtagande som är starkt kopplat till

avdunstningsskiktets höjd. Den presenterade metoden utnyttjar detta faktum för att ur uppmätta avståndsp profiler över mottagen effekt beräkna avdunstningsskiktets höjd. Beräkningen sker under antagande om att radartvärnsnittet (RCS) är okänt men konstant över det mätta området. Eventuella variationer kommer därigenom in som en störning. För att minska inverkan från lokala variationer sker medelvärdesbilning över en sektor i azimutled. Principen för bestämningen kan beskrivas enligt följande. Från radarekvationen fås att mottagen klottereffekt P_c från avståndet r i förhållande till klottereffekten från avståndet r_0 kan skrivas

$$\frac{P_c(r)}{P_c(r_0)} = \frac{f(\varepsilon, r)^4}{f(\varepsilon, r_0)^4} \frac{A_c(r)}{A_c(r_0)} \frac{\sigma^\circ(r)}{\sigma^\circ(r_0)} \frac{r_0^4}{r^4}, \quad (7)$$

där $f(\varepsilon, r)$ är utbredningsfaktorn (som inkluderar effekterna av såväl antenndiagrammet som omgivningen ε), $A_c(r)$ är den belysta ytan och σ° är sjöklottrets spridningstvärnsnitt. Genom att alla bestrykningsvinklar ψ (mätt mot havsytan) ligger mellan 0° och 1° kan man utnyttja att

$$\frac{A_c(r)}{A_c(r_0)} = \frac{r \cos(\psi(r_0))}{r_0 \cos(\psi(r))} \cong \frac{r}{r_0}. \quad (8)$$

Vidare antas att $\sigma^\circ = \psi^k \cdot \sigma_\varepsilon^\circ$, det vill säga att spridningstvärnsnittet kan separeras i en vinkelberoende faktor och en rent miljöberoende komponent, samt att ε i utbredningsfaktorerna helt bestäms av avdunstningsskiktets höjd δ . Värdet på potensen k är omdebatterad i litteraturen, men anses ligga i intervallet 0 till 4. I den refererade artikeln görs beräkningarna för både dessa ytterlighetsvärden. Med dessa förenklingar kan den mottagna klottereffekten för avståndet r relaterad till effekten för avståndet r_0 uttryckas i decibel enligt

$$\begin{aligned} \Delta P_c(r, r_0, \delta) &= [P_c(r, \delta)]_{\text{dB}} - [P_c(r_0, \delta)]_{\text{dB}} \\ &= 10 \log_{10} \left[\frac{f(\delta, r)^4}{f(\delta, r_0)^4} \frac{r_0^4}{r^4} \right] + k 10 \log_{10} \left[\frac{\psi(r, \delta)}{\psi(r_0, \delta)} \right] + 10 \log_{10} \left[\frac{r}{r_0} \right] + 10 \log_{10} \left[\frac{\sigma_\varepsilon^\circ(r)}{\sigma_\varepsilon^\circ(r_0)} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

I brist på kunskap om den rumsliga variationen hos σ_ε° antas att väntevärdet är oberoende av avståndet.

De använda analysavstånden som använts vid inversionen från mätningarna har bestämts utifrån värden på signalbrusförhållandet (SNR) hos den mottagna signalen. Det minsta avståndet valdes motsvarande ett SNR på 40 dB och största avståndet valdes vid 10 dB. Bestämningen av avdunstningsskiktets höjd δ sker genom att beräkna utbredningsfaktorerna längs den mätta avståndspprofilen för en mängd hypotetiska brytningsindexprofiler för olika värden på höjden δ med hjälp av en PE-metod. De genererade brytningsindexprofilerna används också som indata till ett strålbprogram för att beräkna bestrykningsvinklarna vid havsytan. Vid dessa beräkningar används en modell för neutral atmosfär enligt Jeske. Fördelen med denna modell är att profilen bestäms entydigt av parametern δ . Utifrån dessa beräkningar beräknas därefter estimaten $\Delta \hat{P}_c(r, r_0, \delta)$. Detta estimat jämför med motsvarande uppmätta

värden och det ϵ som ger bästa överensstämmelse över alla analyserade avstånd antas vara avdunstningsskiktets höjd.

I de begränsade experiment där den beskrivna metoden testats har de uppvisade resultaten varit ganska goda. För testerna har dock en mycket kraftig S-bands radar använts med en pulseffekt på 91.4 dBm och en antennvinst på 52.8 dB (60 ft diameter). För att studera vilka prestandaförsämringar som skulle erhållas för en antenn med diametern 10 ft har man justerat trösklarna som bestämmer det analyserade området i motsvarande grad. Resultaten från dessa tester visar att metoden fortfarande gav acceptabla resultat, utom i de fall vindstyrkan var under 2-4 m/s. Detta visar att radarns känslighet kommer att avgöra under vilka sjötilstånd metoden kan tänkas vara användbar.

2.7.4 Användning av befintliga radiosändare

Genom att mäta den mottagna signalen från ett antal kända sändare på olika frekvenser samtidigt fås en ganska god möjlighet att beräkna den aktuella brytningsindexprofilen [Rogers, 1996a; Rogers, 1997a]. Principen bygger på att anpassa parametrarna (i huvudsak en parametriserad brytningsindexprofil) i en vågutbredningsmodell så att bästa möjliga överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta värden erhålles för den aktuella utbredningsgeometrin. Man kan dock förvänta sig att lösningen till det icke-linjära inversa problemet kommer att vara mångtydigt. I stället för att låta inversionsproceduren beräkna ett enda "bästa" estimat av brytningsindexparametrarna är det oftast önskvärt att få veta sannolikheterna för enskilda estimat över hela parameterrummet. I allmänhet är tyvärr inte tillräckligt känt kring sannolikheterna för felen i inversionsprocessen för att ett verkligt likelihood-estimat skall kunna bestämmas. Felen antas därför vara gaussfördelade och kovariansmatrisen beräknas a posteriori från observerade tidsserier. Rogers [1996a] använder termen relativ likelihood för att beskriva hur troliga de olika parameterestimaten är i förhållande till varandra givet uppmätta utbredningsfaktorer.

Rogers [1997a] beskriver försök med att tillämpa likelihood-estimat för att beräkna brytningsindexprofilen utifrån mätningar från VOCAR (Variability of Coastal Atmospheric Refractivity Experiment). I dessa mätningar mättes utbredningsfaktorerna vid frekvenserna 143.09, 262.85 och 374.95 MHz vid utbredning längs en 132.6 km lång sträcka över hav. Antennhöjderna var 18.4 respektive 30.5 meter, vilket medförde att utbredningsfaktorerna för samtliga frekvenser var omkring -50 dB vid normalatmosfär. Det marina atmosfärgränsskiktet beskrivs med en modell med tre parametrar. Två av dessa, det eleverade skiktets bashöjd h och ΔM , tas fram med den inversa metoden medan den tredje, det eleverade skiktets tjocklek d , antas vara en stokastisk variabel. Inverkan från skiktets tjocklek kommer med genom att medelvärdesbilda de beräknade utbredningsfaktorerna över de antagna värderummet för d för varje uppsättning av h och ΔM . En matris med utbredningsfaktorer beräknas utifrån de två parametrarna som skall inverteras för samtliga frekvenser med vågutbredningsprogrammet RPO (en hybrid PE-modell). Likelihood-beräkningar utförs för hela parameterrummet och medelestimat av h och ΔM beräknas från erhållna fördelningar. De estimerade parametrarna visar i allmänhet god överensstämmelse med radiosondmätningar gjorda under VOCAR mätningarna. Den presenterade metoden uppvisar vissa problem vid svaga eleverade skikt och vid förekomst av multipla skikt. Det senare är helt naturligt eftersom multipla skikt inte estimeras med den trilinear ansatsen för brytningsindexprofilen.

Ett experiment för att med samma angreppssätt som ovan beskrivits samtidigt bestämma avdunstningsskiktets höjd och eventuell förekomst av eleverade skikt från fjärranalys med radiosignaler i mikrovågsområdet rapporteras av Rogers [1996a]. I detta fall studerades

utbredningen strax bortom horisonten för en 27.7 km sträcka över hav med sändar- och mottagarantennerna på ca 9 respektive 11 meters höjd över havsytan. De frekvenser som användes var: 3.0, 5.6, 10.5 och 16.0 GHz. Vid analysen ansattes en horisontellt homogen troposfärmodell där den vertikala strukturen beskrevs med två parametrar: avdunstningsskiktets höjd δ för neutrala förhållanden, samt bashöjden h för ett eleverat skikt. För frekvensen 3.0 GHz är utbredningsfaktorn en entydig funktion av avdunstningsskiktets höjd för värden på δ mellan 0 och 40 meter, medan den för högre frekvenser blir mångtydig. Studier av det eleverade skiktets inverkan på utbredningen för olika värden på bashöjden h och ΔM visar att för höjder under 60 meter antar utbredningsfaktorn minst värden motsvarande frirumsutbredning. För skikthöjder över ca 110 meter är utbredningsfaktorn nära värden för normalatmosfär. I området mellan 60 och 110 meter uppvisar skillnaden mellan höga och låga frekvenser inget större beroende av ΔM , varför frekvensdiversiteten inte tillför så mycket information. Det antogs därför osannolikt att både h och ΔM skulle kunna skattas från utbredningsmätningarna varför ett konstant ΔM ansattes.

Parameterrummet diskretiserades och utbredningsfaktorer beräknades för alla punkter i parameterrummet med en PE-metod. Avdunstningsskiktet och det eleverade skiktet beskrevs med 19 höjder vardera och antogs kunna anta värdena $\{1, 3, \dots, 39\}$ meter, respektive $\{20, 30, \dots, 200\}$ meter. Det eleverade skiktet antogs ha en derivata på -2 M/m i området ovanför dess bashöjd och en fix tjocklek på 10 meter, vilket ger ett ΔM på -20 M-enheter. Över denna höjd antogs normalatmosfär. För den aktuella geometrin och de använda frekvenserna kan man enligt diskussionen tidigare förvänta sig att lösningen till det inversa problemet kommer att vara mångtydigt. Rogers ger exempel på resultat från likelihood-estimat, i form av dubbeltydighetsytor för parametrarna δ och h , för två helt skilda utbredningssituationer. I det ena fallet bestäms den dominerande utbredningsmoden av ett avdunstningsskikt och i det andra fallet av ett eleverat skikt. Estimatet för avdunstningsskiktet är ganska entydigt medan det för det eleverade skiktet finns flera troliga kombinationer av δ och h som motsvarar de uppmätta utbredningsfaktorerna. I det senare exemplet var utbredningsfaktorerna "mättade" (frirumsnivå eller högre) för samtliga frekvenser och exemplet visar på fördelarna med att använda likelihood-estimat i jämförelse med rena parameterestimat. Från studier av tidserier av estimaten och jämförelser med bulkmodeller (Jeske och LKB) drar Rogers slutsatsen att under förhållanden då avdunstningsskikt utgör den dominerande utbredningsmoden är de estimerade höjderna δ tillförlitliga. Han slår också fast att den testade fjärranalysmetoden är tillförlitlig när det gäller att indikera frånvaron av markbaserade eleverade ledskikt.

Exempel på framgångsrik kombination av fjärranalys med hjälp av radiosignaler och mesoskaliga modeller har redovisats [Rogers *m.fl.*, 1996b]. I de exempel som ges har resultaten från fjärranalysen främst bidragit till att finna eleverade och markbaserade ledskikt, något som den mesoskaliga modellen i vissa fall hade svårt med.

2.7.5 Användning av GPS-satelliter

Möjligheten att bestämma atmosfärens brytningsindexprofil genom att mäta på radiosignaler utsända från en satellit finns också beskriven i litteraturen [Hitney, 1978], [Anderson, 1982]. Principen för denna mätteknik bygger på att studera interferensmönstret mellan den direkta signalen och en signal reflekterad i havsytan från en satellit som passerar horisonten. Förutsättningarna för att utnyttja tekniken finns genom den relativt goda tillgången på GPS-satelliter, som alla sänder på samma frekvens. För en mottagare som befinner sig vid ekvatorn kommer riktningarna för satelliternas upp och nedgång att vara likformigt fördelade runt horisonten. När mottagaren närmar sig någon av polerna kommer färre och färre upp och

nedgångar att ligga i riktning mot polen. Även denna metod för att bestämma brytningsindexprofilen är en invers metod. Det betyder att det uppmätta interferensmönstret från en satellit jämförs med interferensmönster beräknade med hjälp av en vågutbredningsmodell från en familj av antagna brytningsindexprofiler.

Vågutbredningsmodellen som används för dessa beräkningar måste vara anpassad för de mycket osymmetriska geometrier som uppkommer genom att sändaren befinner sig i en satellitbana på ungefär 1000 km höjd, och mottagaren på en höjd av endast några få meter. Modeller baserade på paraboliska ekvationer (PE) är mycket användbara för att beräkna inverkan av olika brytningsindexstrukturer men kan inte utan vidare användas för dessa geometrier. Det beräknade fältet vid någon höjd där inverkan från troposfäranomalier upphört måste på något sätt extrapoleras till satellitbanans höjd. Detta kan t.ex. ske med en hybridmetod där PE-lösningen extrapoleras, antingen med hjälp av ray-tracing [Hitney, 1993], eller med en horisontell PE-metod [Levy, 1995]. En PE-modell som utvidgar den horisontella PE-lösningen till satellithöjder med hjälp av Hankelfunktioner, och därigenom undviker successiva konforma avbildningar, har nyligen presenterats av Levy och Anderson [2000].

De krav som ställs på en GPS-mottagare som skall användas vid denna typ av mätningar är i vissa avseenden mycket strängare än vad som är fallet vid den normala mätsituationen för positionsbestämning. Genom att mätningen av satellitsignalen sker vid en mycket låg elevationsvinkel kommer den mottagna signalen att vara förhållandevis svag. Mottagaren skall helst inte tappa synkroniseringen i interferensmönstrets miniman och måste snabbt kunna synkronisera vid låga signalbrusförhållanden. Studier av hur vissa kommersiella fasmätande GPS-mottagare för geodetiska tillämpningar uppför sig vid låga elevationsvinklar [Anderson, 1994a, 1994b] visar att olika mottagare reagerar mycket olika under dessa förhållanden. Mottagarna visade sig ofta tappa synkroniseringen i fädningsminiman när satelliten befann sig kring horisonten. Genom att mottagarna måste vara synkroniserade för att rapportera mottaget signalbrusförhållande tappas därigenom viktig information om minimas lägen. Ett problem vid val av mottagare är att tillverkarnas specifikationer nästan uteslutande är relaterade till mottagarnas geodetisk förmåga.

I de arbeten som redovisats [Anderson, 1982] har man visat på möjligheten att bestämma förekomsten av eleverade skikt som antingen bildar markbaserade eller eleverade ledskikt. Möjligheten att bestämma höjden, eller brytningsindexprofilen, för avdunstningsskikt med hjälp av mätningar på satellitsignaler får anses som mycket begränsad. Orsaken är svårigheten att få tillförlitliga mätsignaler vid de låga elevationsvinklar som bär information om dessa skikts brytningsindexstruktur.

2.8 Meteorologiska modeller

2.8.1 Bulkmodeller

De så kallade bulkmodellerna kan beräkna temperatur och fuktighet mellan havsytan och ca 100 m höjd (ibland endast 30 m) med hjälp av uppmätt ytvattentemperatur samt lufttemperatur, luftfuktighet och vindhastighet på ca 10 m höjd på fartyg, se figur 3. LBM är ett exempel på tillämpning där en bulkmodell används. Förbättringar av bulkmodellerna har föreslagits. I äldre bulkmodeller används ofta gaskonstanten för torr luft vid beräkning av temperaturprofil. Numera används dock ibland den så kallade virtuella temperaturen i stället för den sensibla temperaturen för att beskriva luftfuktighetens effekt på gaskonstanten [Rowland m. fl., 1996]. Beräkning av inverkan av havets salthalt på koncentrationen av vattenånga närmast havsytan, varvid maximal fuktighet kan sänkas från 100 % till ca 98 % vid hög salthalt, har ibland börjat tillämpas med bra resultat [Eijk m. fl., 2000, Dion och Gardenal, 1999].

I allmänhet behandlas havsytan som en plan yta med skrovlighetslängden z_0 lika med $\approx 10^{-4}$ m även vid hög vindhastighet, vilket ger en missvisande beskrivning av turbulensens inverkan på temperatur och fuktighetsprofiler. *Eijk m. fl.* [2000] har dock visat att havsvågor och aerosoler från brytande vågor (sea spray) påverkar vertikal fördelningen av temperatur och fuktighet upp till ca 10 m höjd med mindre skarp fuktighetsprofil som följd. För att beräkna dessa effekter föreslår de användning av modellen Sea Cluse, som också används för elektrooptiska (EO) tillämpningar.

I ett omfattande försök - Livorno experimentet 1996 - har *Claverie och Hurtland* [2000] observerat att traditionella bulkmodeller tycks överskatta de vertikala gradienterna nära havsytan. De visar att log-linear profiler, där $M(z)$ tex. är en funktion av $\delta \ln z$ (δ är ledskiktshöjd), kan ge bättre överensstämmelse mellan modellberäknad och uppmätt radarsignal (apparent RCS) efter reflektion i ett mål, än traditionell bulkmodellformulering baserad på similaritetsteorin. I ett annat stort försök – Lorient 1989 – förklarar *Clavrie och Marcel* [2000] skillnader mellan uppmätt och modellberäknad signaldämpning (path loss) med att bulkmodellen PIRAM [*Claverie m. fl.*, 1994] inte tar hänsyn till vågornas inflytande på vertikala gradienter närmast havsytan samt på brister i beräkning av reflektion av 36 GHz signaler över en havsyta med vågor.

Användning av log-linear profiler rapporteras också av *Kerans m. fl.* [2000] där brytningsindex bestämdes med bojobserverationer på flera höjder från havsytan till 7 m och sedan anpassades till en log-linear brytningsindexprofil. *Claverie* [1999] har också diskuterat användning av andra profiler än de som används i traditionella bulkmodeller. *Dion och Gardenal* [1999] har dock visat med data från Lorient- och Toulon experimentet att traditionella bulkmodellerna ger bra resultat vid beräkning av avdunsningsledskikt vid instabil skiktning om rätt värde används för von Karmans konstant (avser troligen 0.35 i stället för ofta använt 0.4) och hänsyn tas till salthaltens inflytande på mätnadsfuktigheten (98 % i stället för 100 %) vid havsytan. Traditionella bulkmodeller visade också bättre resultat vid högre vindhastighet, vilket förklaras med att horisontell homogenitet är oftare uppfylld vid hög vindhastighet än vid låg vindhastighet, vilket motverkar de negativa effekter som kan väntas av havsvågor och sjöspray. *Andersson och Paulus* [2000] visar dock på dålig överensstämmelse mellan uppmätta och modellberäknade utbredningsfaktorer vid situationer med havsvågor och vindhastighet på 8 m s⁻¹, speciellt för höga frekvenser. Orsaken till avvikelserna tror de beror på dålig kunskap om havsvågornas inverkan på den vertikala brytningsindexprofilen. De beskriver ett planerat experiment år 2001 för att mäta och analysera samband mellan brytningsindexprofilen och havsvågor.

Traditionellt baseras bulkmodellerna i allmänhet på Monin-Obukovs similaritetsteori och gäller strikt endast i det så kallade ytskiktet, som omfattar ett ca 50 m tjockt skikt närmast havsytan, ibland mer ibland mindre. Därför begränsas ofta giltigheten till ca 50 m höjd [*Paulus*, 1989]. Ovanför den höjden förutsätts ofta att brytningsindex har bestämts tex. med ballongsondering. Ibland sammanfaller dock avdunsningsledskiktet med markledskikt som skapas pga. att varm, torr luft från ett landområde strömmar ut över ett kallare hav, så kallade ”advektionsledskikt”. Detta kan då leda till markledskikt med översida som är högre än ca 50 m. I den svenska LBM-modellen [*Karlsson m. fl.*, 1988] utsträcks bulkmodellen ibland till flera hundra meters höjd. Den så kallade gränsskiktshöjden för stabil eller neutral skiktning [*Zilitinkevich*, 1972] avgör till vilken höjd bulkmodellen utsträcks. Däröver antas standardatmosfär. Vid utprovning med hjälp av radarobservationer har LBM gett bra resultat i ca 75 % av fallen [*Karlsson m. fl.*,

1989], vilket tyder på att bulkmodeller till en del också fångar advektionsledskikt. I dag finns nyare modeller för beräkning av gränsskiktshöjd [Zilitinkevich, 1996], som skulle kunna införas i LBM. Vid utvärdering av LBM [Karlsson m. fl., 1989] erhöles bättre överensstämmelse mellan observationer och beräknad räckvidd vid övernormal utbredning än vid undernormal utbredning. Antalet fall med undernormal utbredning var dock få. Senare användning av LBM tycks också ge liknade resultat. Orsaken till den sämre överensstämmelse vid undernormal utbredning är oklar.

2.8.2 Mesoskaliga meteorologiska modeller

Dessa är mycket avancerade modeller för geografiska områden med en storlek på tio till några hundratals km. De är ofta av samma typ som används för de mest detaljerade väderprognoserna. Modellerna kräver omfattande indata i form av väderobservationer från många platser. Mesoskaliga modeller körs i rutindrift på ett antal platser (tex. vid Met Office England, US Navy, NCAR USA, ARL USA och SMHI). En avgörande faktor för möjligheten att använda data från denna typ av modeller för vågutbredningsanalys är den vertikala och horisontella upplösningen, samt att indata finns i tillräcklig omfattning för att modellerna skall få bra precision. Horisontell upplösning lika med 1-5 km och vertikal upplösning lika med 10 m torde krävas. Den horisontella upplösningen i existerande modeller varierar mellan 3–20 km och den vertikala mellan 10-ca 100 m. Till skillnad från de relativt enkla 1-dimensionella bulkmodellerna kan de avancerade mesoskaliga modellerna ge 4-dimensionella data (tre rumsdimensioner och en tidsdimension). De kan därför beräkna effekten av horisontella variationer, tex. kusteffekter samt förändringar i tiden. Prognoslängden är i allmänhet maximalt 24-48 timmar. Modellberäkningarna fordrar normalt superdatorkapacitet, tex. körs den svenska modellen på Nationellt SuperdatorCentrum i Linköping. *Schuster m. fl.* [2000] rapporterar dock ett försök med körning på ett cluster av 17 stycken 440/450 MHz Pentium PC, där en 48 timmars prognos tog 6 timmar att beräkna.

Endast ett fåtal undersökningar finns som beskriver användning av mesoskaliga modeller som underlag för beräkning av brytningsindex och vågutbredningsanalys. *Moss och Steel* [1997] har prövat att använda Storbritanniens vädertjänsts (Met Office) mesoskaliga väderprognosmodell som underlag för prognos av radarutbredning i Adriatiska havet sommaren 1994. Modellen har 17 km horisontell upplösning och 11 nivåer under 1500 m höjd med de sex lägsta nivåerna på 0, 10, 40, 100, 190, 300 m höjd. Hyggliga resultat erhöles i en högtryckssituation vid jämförelse mellan ledskikt beräknad med den mesoskaliga modellen och ledskikt beräknade mha radiosonderingar gjorda på ett fartyg. Utjämnings effekter pga. otillräcklig upplösning förekom dock.

Burk och Thompson [1995] beskriver ett annat försök under 12 dagar med US Navy Operational Regional Atmospheric Prediction Systems (NORAP) mesoskaliga modell för att simulera förhållandena under VOCAR experimentets (Variability of Coastal Atmospheric Refractivity) intensiva observationsperiod i södra Kalifornien. Modellen har 20 km horisontell upplösning och 30 vertikala nivåer med 10 m vertikal upplösning på låg höjd. Modellen fångade sjöbriscirkulationen ganska bra. Jämförelse med observationer visar att modellen ofta gav rätt tendenser, men att effekterna tenderade att spridas över för stora områden på grund av dålig horisontell upplösning. Till exempel sprids uppvärmningseffekt på en ö för långt ut över hav och gav kraftigare ledskikt än vad som framgår av radiosonderingar. Det är därför osäkert om modellen kan producera användbara data för radio/radarutbredningsberäkningar.

Seaman m. fl. [2000] har kört en mesoskalig forskningsmodell med högre horisontell upplösning (4 km) för VOCAR experimentet. Den vertikala upplösning var 40 m upp till 1000

m höjd. Ett bibliotek med så kallad "Large Eddy Simulation" (LES) beräknade effekter från turbulens med 1 m vertikal upplösning ger information om småskaliga effekter. Preliminära resultat pekar på bra överensstämmelse med VOCAR observationerna.

Den svenska militära vädertjänstens system för mikrovågutbredningsprognoser (MUP) använder den 2-dimensionella mesoskaliga modellen GIT [Karlsson, 1989, Falk, 1990]. Modellen beräknar vertikalprofiler längs en horisontell sträcka i vindens rörelseriktning. Indata är vertikalprofiler vid startpunkten. Den vertikala upplösningen är 5 m upp till 75 m höjd, 10 m upp till 200 m, 20 m till 400 m och 30 m upp till 1000 m. De horisontella gitterpunkterna väljs manuellt, max 10 punkter kan väljas, varför rimlig upplösning är ca 10-20 km. På grund av tidsödande manuell inmatning av indata har modellen haft begränsad användning under 90-talet. Nu provas dock en halvautomatiskt inmatning [Nordvall, 1999] av radiosonderingsdata från en observationsdatabas med hjälp av Windows och GIS-system. Eftersom modellen är 2-dimensionell kan modellen köras på en PC men det fordras dock flera upprepade körningar för att få bra yttäckning

Henmi [2000] har jämfört resultaten från modellerna MM5 och BFM med väderobservationer vid White Sands Missile Range: Båda modellerna har horisontell upplösning på 3,3 km. Bra resultat erhöles för temperatur, medan övriga variabler gav varierande resultat. Schuster m. fl. [2000] jämför observerade data med modellen RAMS med 3 km horisontell och 50 m vertikal upplösning. Warner m. fl. [2000] beskriver planerad användning av MM5 med horisontell upplösning lika med 1 km. SMHI:s svenska väderprognosmodellen HIRLAM, som körs med 22 km horisontell upplösning och kompletteras med en 1-dimensionell modell med högre vertikal upplösning [Gollvik och Olsson, 1995, Olsson, 1999] skulle kunna tänkas ge indata för radarutbredningsmodeller. Den 1-dimensionella modellen, som drivs med hjälp av advektionseffekter från den fullständiga 3-dimensionella modellen, beräknas för $32 \times 72 = 2304$ gitterpunkter med 22 km horisontell upplösning. Detta ger ett täckningsområde över land samt Östersjön tom Gotland samt västkusten till en linje från Oslo mot SSV. Vertikalt finns 10 gitterpunkter upp till 600 m med de första 5 nivåerna på 12, 36, 63, 96 och 139 m. Startvärden för den 1-dimensionella modellen är vertikalprofiler från den tredimensionella modellen modifierade med data från en mesoskalig analysmodell, Mesan. Speciellt fuktighetsprofilen modifieras med molninformation i Mesan.

De flesta beskrivna mesoskaliga modellerna har fortfarande inte tillräcklig horisontell och vertikal upplösning för att kunna ge bra underlag till vågutbredningsmodeller. En del modeller har dock horisontell upplösning 1-5 km, vilket kan vara tillräckligt i många fall. Den vertikala upplösningen är dock ofta för dålig. För att ge användbara data måste man därför troligen modifiera/anpassa modellernas profiler med hjälp av bulkmodeller och mätningar på eget fartyg och/eller kombinera modellernas data med andra direkta eller indirekta observationsmetoder.

2.9 Förutsättningar för ledskikt över Östersjön

2.9.1 *Avdunstningsledskikt och advektionsledskikt*

Eftersom Östersjön är ett innanhav kan man förvänta sig relativt stor förekomst av både avdunstningsledskikt¹ och advektionsledskikt², speciellt under sommarhalvåret då havet kan vara omgivet av varm, torr luft. Under vinterhalvåret då havet ofta är varmare än luften är advektionsledskikt troligen ovanliga. Låga avdunstningsledskikt med tjocklek < ca 5 m kan däremot förekomma oftare. Statistiska uppgifter om ledskiktsförhållanden över Östersjön är knapphändiga. Vid utvärdering av LBM [Karlsson mfl, 1989] somrarna 1987 och 1988, mha fartygsradar på 15 m höjd, förekom övernormal utbredning³ i 53 % av totalt studerade 147 fall. Medelledskiktshöjden för dessa enligt LBM-modellen var ca 30 m med variationer mellan 3 och 209 m. I dessa uppgifter ingår både avdunstningsledskikt och advektionsledskikt, även om beräkningen av översidan för advektionsledskikten är osäker Normal utbredning⁴ förekom i 42 % och undernormal utbredning⁵ i 5 % av studerade fall. Någon motsvarande undersökning för vinterhalvåret har inte gjorts.

Det kan vara intressant att jämföra förhållandena över Östersjön med några andra områden i världen. Paulus and Anderson [2000] beskriver beräkning av avdunstningsledskikt till havs med hjälp av uppgifter om lufttemperatur, relativ fuktighet, vindhastighet och havsyttans temperatur lagrade vid National Climatic Data Center Nasheville, USA. Beräkningarna presenteras för tre områden (rutor 10° lat x 10° long), dels för Biscaya bukten, dels för två områden utanför USA's östkust. För Biscaya bukten är årsmedelvärdet för ledskiktshöjden 7,8 m med variationer från 0 - 22 m. För USA's östkust mellan 30 - 40° N var årsmedelhöjden för ledskikt 14,4 m med variationer 0-36 m och för USA's östkust mellan 40 - 50° N var årsmedelhöjden för ledskikt 5,1 m med variationer 0-26 m. Det sydliga området utanför USA's östkust påverkas av torr, varm vind från land och varm Golfström med högre ledskikt som följd. Det norra området påverkas av den mycket kalla Labradorströmmen, vilket ofta leder till advektionsdimma och frånvaron av ledskikt när fuktig luft strömmar norrut (27 % av tiden hade ledskikt 0-2 m). I Biscaya bukten är vindarna ofta västliga och förekomsten av frånlandsvind är låg.

Kerans, Kulessa, Hermann and Woods [2000] har sammanställt statistik runt Australiens kust över avdunstningsledskikt baserat på mätning av lufttemperatur, relativ fuktighet, vattentemperatur och vindhastighet på 6 nivåer i 7 m höga bojar. Brytningsmodulprofilen beräknades sedan med minsta kvadratmetod-anpassning och antagande om loglinjär profil. Data för tre områden under 1 månad presenteras. I ekvatorialområdet förkommer de högsta avdunstningsledskikten och den största variationen med medianen för ledskiktshöjd lika med 23 m och variationen 2-40 m. Längre söderut är medianen för ledskiktshöjden lika med 20 m med variationen 10-30 m.

Den slutsats man kan dra av tillgänglig statistik är att torr, varm luft och vind från land ger förutsättningar för höga avdunstningsledskikt eller advektionsledskikt, samt att Östersjön under sommarhalvåret har stor förekomst av relativt kraftiga avdunstningsledskikt eller advektionsledskikt.

¹ Avdunstningsledskikt har tjocklek från 0 m till ca 40m och kan bildas över alla hav. Temperatur, fuktighet och vind avgör tjockleken.

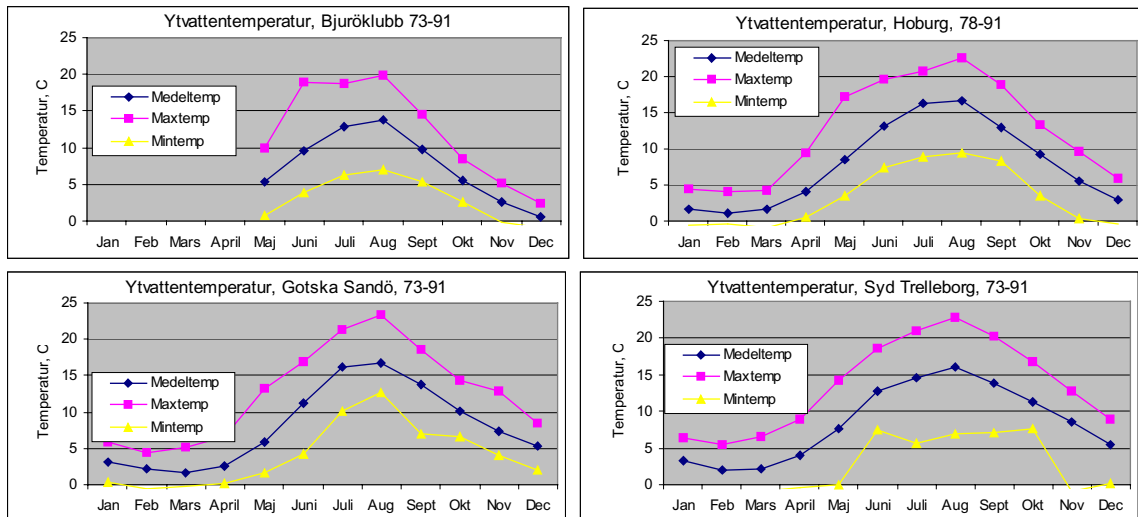
² Advektionsledskikt har tjocklek från ca 20m -ca 200m och bildas när varm, torr luft strömmar (advektas) ut över kallare hav.

³ Övernormal utbredning definieras här som situationer när radarräckvidden ≥ 150 % av räckvidden vid standardatmosfär

⁴ Normal utbredning definieras här som 90-140 % av räckvidden vid standardatmosfär

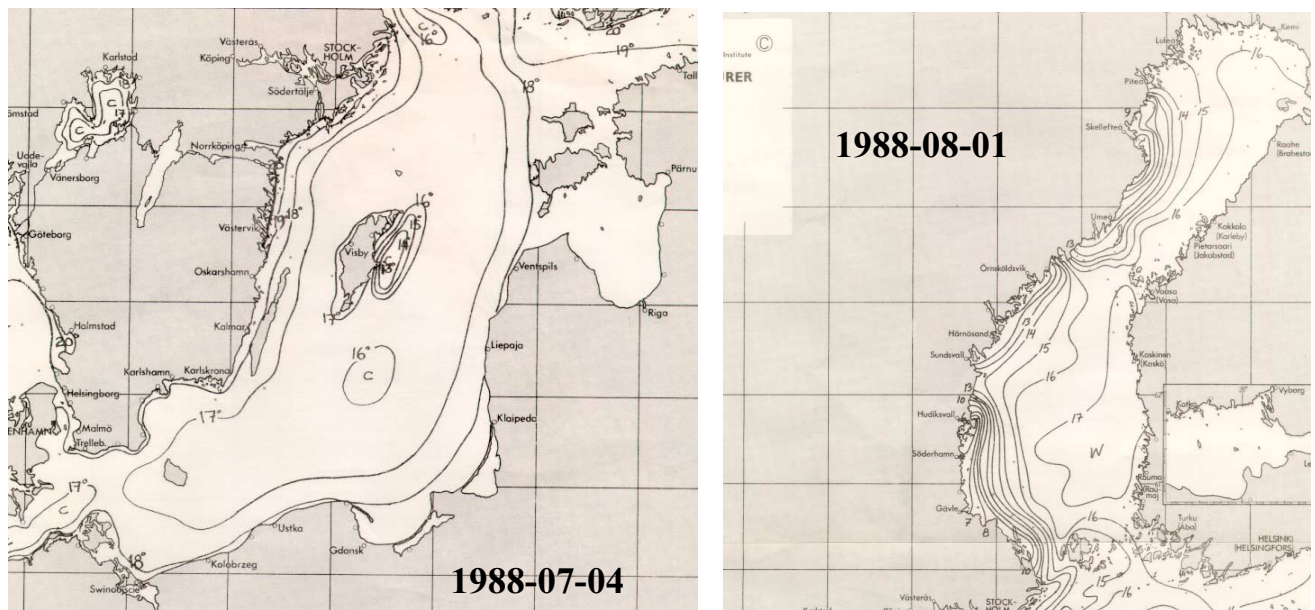
⁵ Undernormal utbredning definieras här som ≤ 80 % av räckvidden vid standardatmosfär

Havsyntans temperatur har stor betydelse för uppkomsten av avdunstningsledskikt och advektionsledskikt, eftersom varm, torr luft över kallare vatten (sk stabil skiktning) är gynnsamt för ledskikt. Samtidigt skall dock inte vattentemperaturen vara för låg, eftersom hög fuktighet närmast havsyntan också fordras för ledskikt. Ytvattentemperaturer på fyra platser i Östersjön och Bottniska viken framgår av figur 5.



Figur 5. Ytvattentemperaturer på fyra platser i Östersjön. Bjuröklubb sydöst om Skellefteå och Hoburg vid Gotlands sydspets är fasta kuststationer, där ytvattentemperaturen mäts på ca 0,5 m djup. Gotska Sandö och Syd Trelleborg är fartygsmätning (bilfärga) med mätdjup 2,5 – 3 m. [Underlag: Jan:Eric Lundqvist SMHI, 2000].

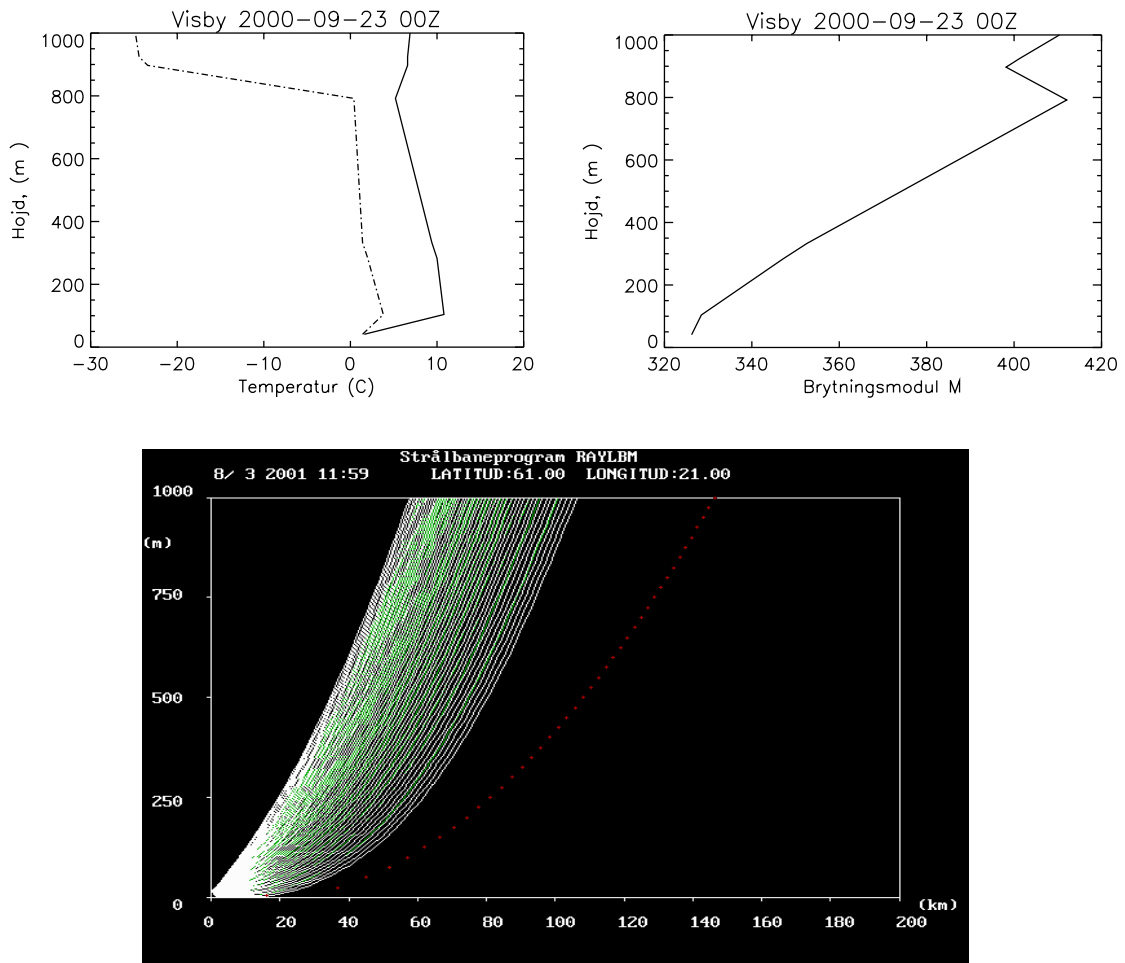
Typiskt är den stora skillnaden mellan max-, medel- och mintemperaturer under sommarhalvåret. En viktig orsak till de låga mintemperaturerna är den kraftiga skiktningen av vattentemperaturer under sommarhalvåret, med varmt ytvatten och betydligt kallare vatten under ca 20 m djup [Kli H, 1975]. Temperaturskillnader på 5-10 °C är inte ovanliga. Vid frånlandsvind kan då det kalla vattnet komma upp till ytan ("upwelling") inom ett större eller mindre område och orsaka stabil skiktning i atmosfären och större sannolikhet för ledskikt, se exempel i figur 6 [SMHI,1988]. Samtidigt ger sådana situationer horisontella variationer av ytvattnets temperatur och därmed också horisontella variationer av atmosfärens brytningsindex varför radio- och radarvågors utbredning kan skilja sig från den som förekommer vid homogena förhållanden. De höga maxtemperaturerna förekommer vid soligt väder och svag vind (högttryck) med liten omblandning av vattnet.



Figur 6 Exempel på "upwelling" som ger låga ytvattentemperaturer i Östersjön och Bottniska viken under sommaren. Till vänster inom ett begränsat område öster Gotland och till höger inom ett stort område längs hela Norrlandskusten. [SMHI, 1988].

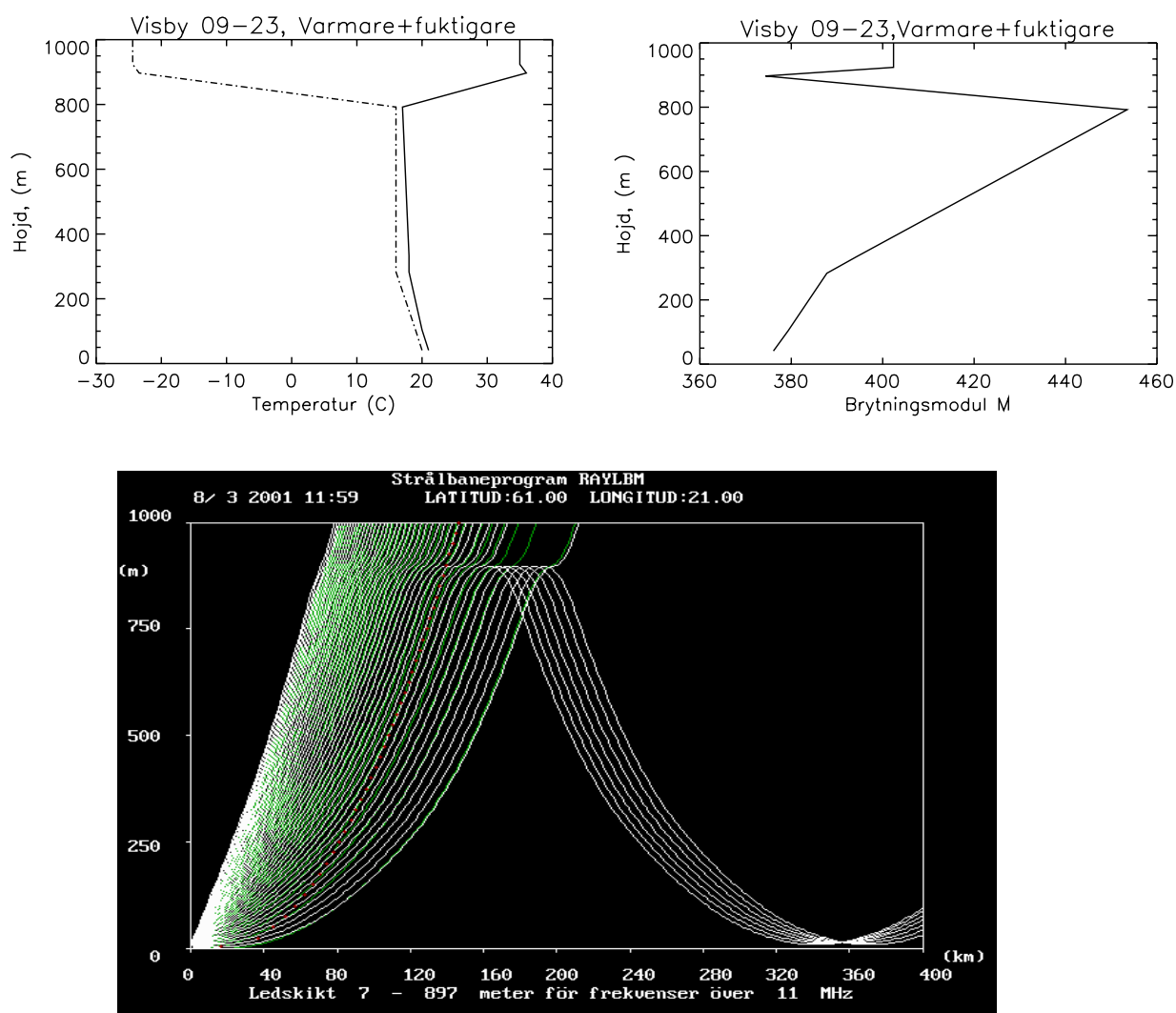
2.9.2 Ledskikt orsakade av subsidensinversioner

Sk subsidensinversioner, som orsakas av nedsjunkande luft i högtryck ger skikt där lufttemperaturen ökar med höjden och luftfuktigheten avtar med höjden. Sådana subsidensinversioner som ligger inom höjdområdet 200 - 1000 m kan ge höjdladskikt eller markbaserade ledskikt som är flera hundra meter tjocka. Höjdladskikten påverkar normalt inte radio- och radarstationer vid havsytan. Däremot ger de markbaserade ledskikten stor inverkan på markbaserade sändare. En förutsättning för markbaserat ledskikt är att subsidensinversionen ligger på relativt låg höjd (ca 200- ca 500 m) eller att luften är mycket varm och fuktig under subsidensinversionen. För att belysa vad som fordras för markbaserade ledskikt presenteras en verkligt radiosondering från Visby samt modifieringar av detta fall. Figur 7 visar radiosonderingen från 2000-09-23 00Z av lufttemperatur och luftfuktighet i Visby samt beräknad brytningsmodul och strålbågar för fartygsbaserad radio/radar. Subsidensinversionen på ca 800 m höjd ger ett höjdladskikt mellan 675 och 900 m, som inte påverkar fartygsbaserad radio/radar.



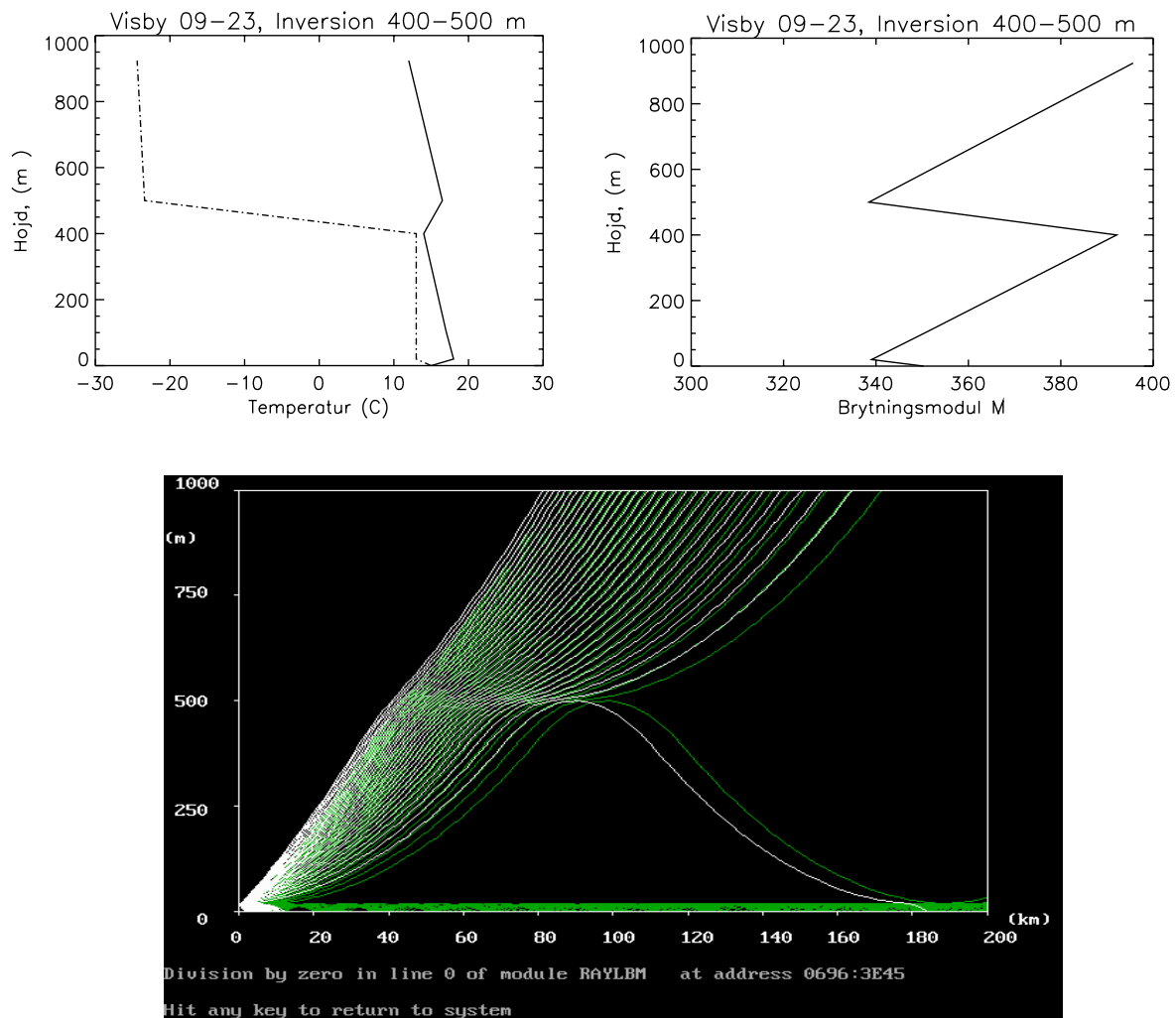
Figur 7. Övre bild till vänster: Radiosondering 2000-09-23 00Z av lufttemperatur (heldragen) och luftfuktighet (daggpunkt streckad) i Visby. Övre bild till höger: Beräknad brytningsmodul som ger höjdlenskikt 675-900 m. Nedre bild: Strålb Manor för fartygsbaserad radio/radar.

För att denna subsidensinversion skall ge ett markbaserat ledskikt fordras mycket varmare och fuktigare luft under inversionen enligt det modifierade fallet i Figur 8. Strålb Manor visar här på kraftigt övernormal utbredning för vissa avstånd. Sådan hög lufttemperatur och luftfuktighet är dock mycket ovanlig över Östersjön, varför markbaserade ledskikt från subsidensinversioner på höjder omkring 800 m måste betraktas som mycket sällsynta.



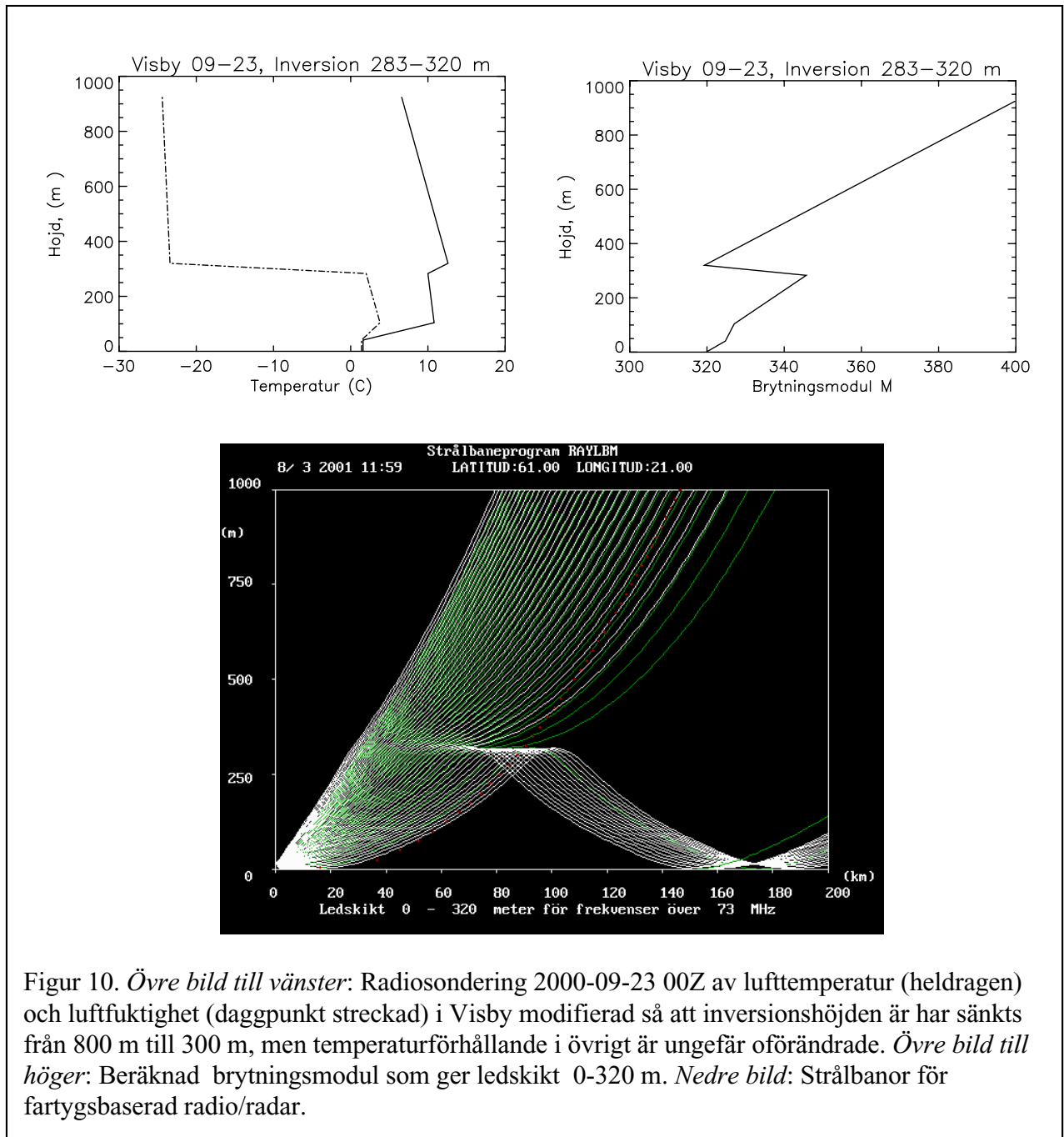
Figur 8. Övre bild till vänster: Radiosondering 2000-09-23 00Z av lufttemperatur (heldragen) och luftfuktighet (daggpunkt streckad) i Visby modifierad så att temperatur och fuktighet är mycket högre men inversionshöjden oförändrad. Övre bild till höger: Beräknad brytningsmodul som ger ledskikt 7-900 m. Nedre bild: Strålbakor för fartygsbaserad radio/radar.

Om inversionen ligger på lägre höjd, tex ca 500m, fordras mindre extrem temperatur och fuktighet under inversionen för att markbaserat ledskikt skall uppkomma, se Figur 9.



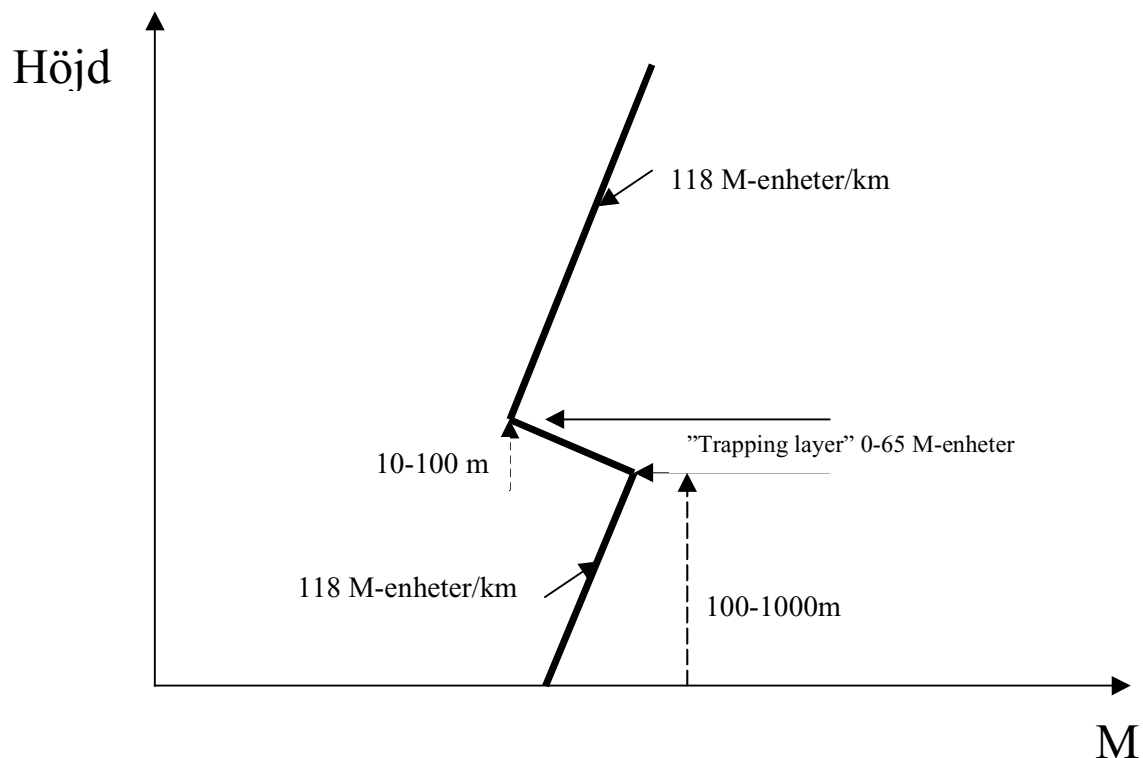
Figur 9. Övre bild till vänster: Radiosondering 2000-09-23 00Z av lufttemperatur (heldragen) och luftfuktighet (dagpunkt streckad) i Visby modifierad så att temperatur och fuktighet är högre och inversionshöjden lägre. Övre bild till höger: Beräknad brytningsmodul som ger ledsikt 0-20 m och 0-500 m. Nedre bild: Strålbånor för fartygsbaserad radio/radar.

Om de ursprungliga temperatur- och fuktighetsförhållandena enligt Figur 7 råder, måste subsidensinversionen sänkas till ca 300 m för att ge markbaserat ledskikt, se Figur 10.



Statistik över inversionshöjder baserad på radiosonderingar på ön Anholt mellan Sverige och Danmark under 1990-1992 [Sempreviva och Gryning, 2000], visar att inversioner vid gränsskiktets översida (250 -1250 m) är vanligt förekommande även i situationer utan högtryck. Under höst och vinter är inversionshöjden lägre än under vår och sommar. Hur ofta temperaturökningen och fuktighetsminskningen i inversionen är tillräcklig för att åstadkomma markbaserade ledskikt framgår dock inte av statistiken.

Som jämförelse till svenska förhållanden presenteras en beskrivning av brytningsindexprofiler för USA-förhållanden orsakade av höjdinversioner under 1000m höjd [Rogers, 1997a]. Profilerna beskrivs med en sk "trilinjär" modell enligt figur 11.



Figur 11. "Trilinjär" modell av modifierad brytningsmodul för USA-förhållanden [Rogers, 1997a]

Även om Rogers' modell inte anger hur ofta olika typer av ledskikt förekommer, kan man indirekt dra vissa slutsatser. T.ex. undersidan till höjdinversionerna som orsakar "trapping layer" ligger enligt modellen mellan 100 och 1000 m. "Trapping layer" är ett koncentrerat skikt med tjocklek 10-100m och ett hopp i brytningsmodulen (M-värdet) på maximalt 65 M-enheter. Ett ledskikts undersida kommer att ligga på den höjd där M-värdet under "trapping layer" har samma värde som M-minimum inom "trapping layer". Den största vertikala utbredning ett ledskikt då kan få enligt modellen är $65/118 \text{ km} + 100 \text{ m} = 650 \text{ m}$. Därav följer också att den högsta översida ett markbaserat ledskikt kan ha är 650 m.

Slutsatsen blir att subsidensinversioner ofta kan ge höjddledskikt. För markbaserat ledskikt fordras dock relativt lågt liggande subsidensinversion eller för svenska förhållande hög temperatur och fuktighet under inversionen. Markbaserade ledskikt med översida över ca 650 m torde vara ovanliga. Dessa förutsättningar begränsar förekomsten av markbaserade ledskikt orsakade av subsidensinversioner i svenska farvatten. Det innebär också att de dominerande ledskikten i Östersjön är avdunstningsledskikt och advektionsledskikt, vilka kan identifieras av

LBM⁶, även om beräkningen av översidan för advektionsledskikten är osäker. I andra klimat med högre temperatur och fuktighet och även förekomst av subtropiska högtryck kan man vänta sig högre förekomst av markbaserade ledskikt från subsidensinversioner, tex i Medelhavet.

⁶ För att identifiera ledskikt orsakade av subsidensinversioner fordras vertikalsondering av atmosfären med tex ballongsond eller raketsond.

3 Radio- och radarutbredningsmodeller för troposfären

Redan för femtio år sedan började US Navy att studera och prediktera inverkan av troposfären på elektromagnetisk vågutbredning. Fram till i början av 1980-talet använde man för praktiska beräkningar geometrisk optik (Raytrace), vågledarteori samt jämn sfärisk jord och diffraktionsmodeller. Var och en av dessa metoder har väldokumenterade svagheter och begränsningar såsom brister i noggrannhet och användbarhet som i sin tur beror på bristande giltighet vid olika frekvenser, diffraktionseffekter, terrängmodellering och restriktioner i komplexiteten hos brytningsindexprofilen. Redan 1946 presenterade *Leontovich och Fock* [1946] de så kallade paraboliska vågekvationerna (PE) men på grund av bland annat svårigheter med att hantera problemet numeriskt dröjde det ca trettio år innan utvecklingen tog fart på allvar. Därefter har PE-modeller dominerat modellsidan för troposfärvågutbredning. Här kommer vi fortsättningsvis endast att avhandla vågledarteori, geometrisk optik samt paraboliska ekvationer.

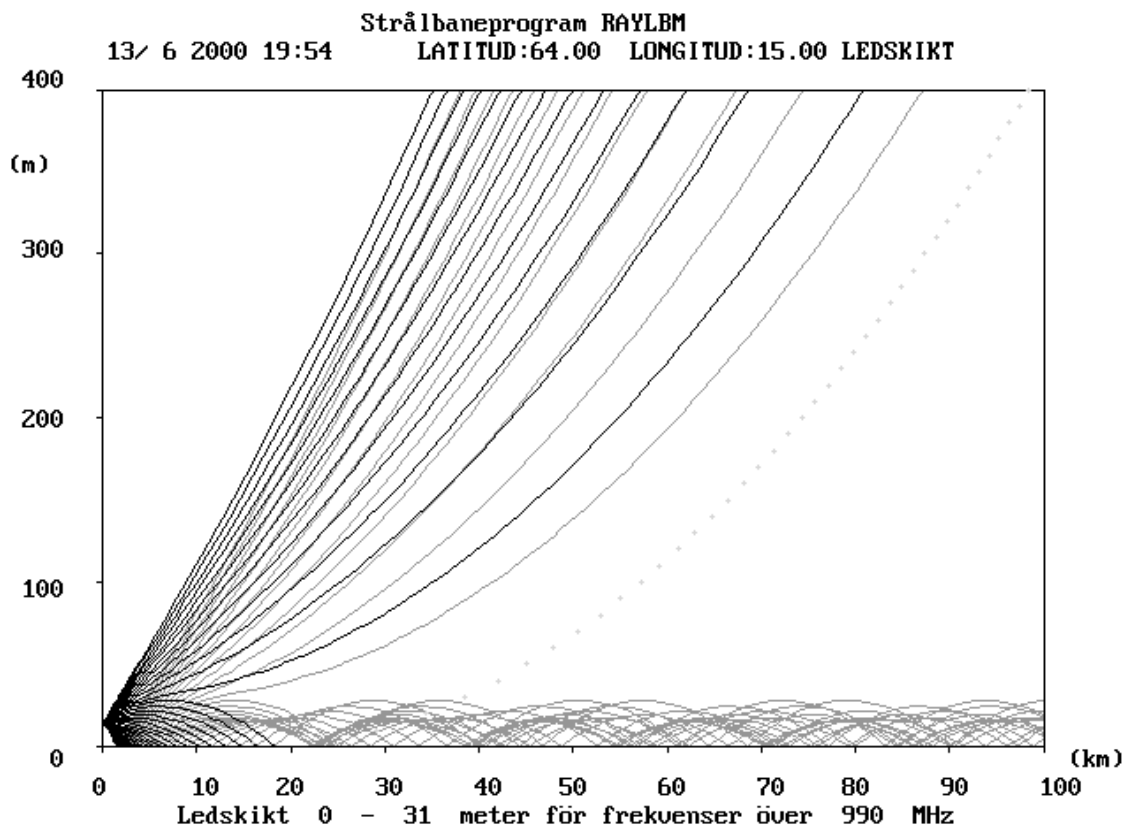
3.1 Vågledarteori - modteori

Den teori som behandlar elektromagnetiska vågors utbredning i vågledare är idag väl genomarbetad och likartade teorier kan tillämpas för de i naturen förekommande "vågledare", det vill säga atmosfäriska skikt, mellan vilka vågor under särskilda förhållanden kan ledas fram. Man representerar då fältet som summan av så kallade vågledarmoder eller elementarvågor. För detta har en speciell teori utvecklats, den så kallade modteorin introducerad av *Watson* [1918]. Vågledarmodeller ger en bra lösning för interferenseffekter och resultatet bygger på en direkt lösning av Maxwells ekvationer. Tyvärr är formalismen ganska komplex och metoderna kräver att atmosfärens brytningsindex är en analytisk funktion av höjden. Så länge som få dominerande moder existerar går det dock att finna effektiva och bra lösningar, exempelvis för utbredning i avdunstningsskikt (antennerna i skiktet). I vissa fall uppstår emellertid numeriska problem. Detta inträffar exempelvis för eleverade skikt, mycket höga frekvenser, på korta avstånd och på avstånd nära horisonten. En annan nackdel är svårigheten att modellera avståndsberoende brytningsindexvariationer. I praktiken har därför denna teknik fått begränsad användning och tekniken har nuförtiden nästan helt ersatts av parabolisk ekvationsteknik. Det bör dock nämnas att tekniken fortfarande används för validering av andra modeller.

3.2 Geometrisk optik (Raytrace)

En klassisk metod att behandla vågutbredningsproblem kommer från optiken där strålar bland annat används för att konstruera fram ett linssystems brytande egenskaper. En sådan strålbetraktelse kan också tillämpas inom mikrovågsområdet. Strålbaneberäkningen baseras på Snells brytningslag där indata är i form av brytningsindex. Ur teoretisk synpunkt är strålbaneberäkningen korrekt endast i gränsfallet då frekvensen går mot oändligheten. Om man är försiktig vid tolkningen av resultaten kan man med framgång använda metoden inom hela radiofrekvensområdet. Metoden har dessutom fördelen att ge en visuell bild av utbredningsförhållandena även om mediet har en komplicerad struktur. I ett strålbandediagram betyder stor täthet av strålar i ett område relativt hög signalstyrka och omvänt brist på strålar låg signalstyrka, se figur 12. En viktig begränsning för metoden är att diffraktionsfenomen ej kan hanteras. Trots att geometrisk optik har stora begränsningar ersätter denna teknik fortfarande i många fall beräkningar med andra mycket mer avancerade metoder. LBM utnyttjar strålbaneberäkning i sin radarberäkningsdel och får anses vara ett gott exempel på användning av denna teknik. Hybridmodeller, se kapitel 3.5, utnyttjar strålbanetekniken i de områden där metoden är

effektiv för att få fram enklare och framförallt snabbare lösningar.



Figur 12 Typisk plott från strålbanedelen i originalversionen av LBM.

3.3 Paraboliska vågekvationer, PE

När *Leontovich och Fock* [1946] presenterade de så kallade paraboliska vågekvationerna (PE) för hantering av diffraktion av radiovågor utmed en krökt jordyta var kunskapen om numeriska lösningsmetoder relativt begränsad. Detta samt avsaknaden av kraftfulla beräkningsdatorer medförde att analytiska lösningar endast utvecklades för enkla, orealistiska, troposfärsituationer och randvärden vid ytan.

Först när *Hardin och Tappert* [1973] introducerade en effektiv numerisk metod att lösa PE tog utvecklingen fart. Ironiskt nog applicerade Tappert metoden till en början på vågutbredning i jonosfären men av olika skäl tvingades han att gå över till vågutbredning under vattenytan. Trots att dessa lösningar blev mycket populära inom hydroakustiken tog det ändå ca 10 år innan man åter blev ovanför vattenytan och började studera PE för elektromagnetisk vågutbredning, främst inom mikrovågsområdet.

Vad är då PE? Man kan säga att paraboliska ekvationer är en approximation till Helmholtz vågekvation där det förutsätts att vågenergin huvudsakligen utbreder sig framåt, i horisontell riktning. Denna approximation har visat sig fungera riktigt bra i radarsammanhang med små bestrykningsvinklar. Metodens principiella styrka ligger i dess numeriska effektivitet. PE har en inneboende förmåga att inkludera effekter av diffraktion över sfärisk jord, troposfäranomali och ytreflektioner. Avancerade PE-modeller kan även hantera mark med varierande elektriska egenskaper, ojämna ytor, komplicerade antenndiagram, kuperad terräng (diffraktion), atmosfärsabsorption och spridningsfenomen.

Paraboliska ekvationer används idag inom;

- Troposfärvågutbredning inklusive oregelbunden terräng (diffraktion)
- Spridning och reflektion från föremål
- Undervattensakustik
- Geofysik
- Vågmodellering (havsvågor)
- Seismisk vågutbredning
- Akustisk vågutbredning
- Optisk vågutbredning

Det finns två populära numeriska metoder för lösning av PE, nämligen;

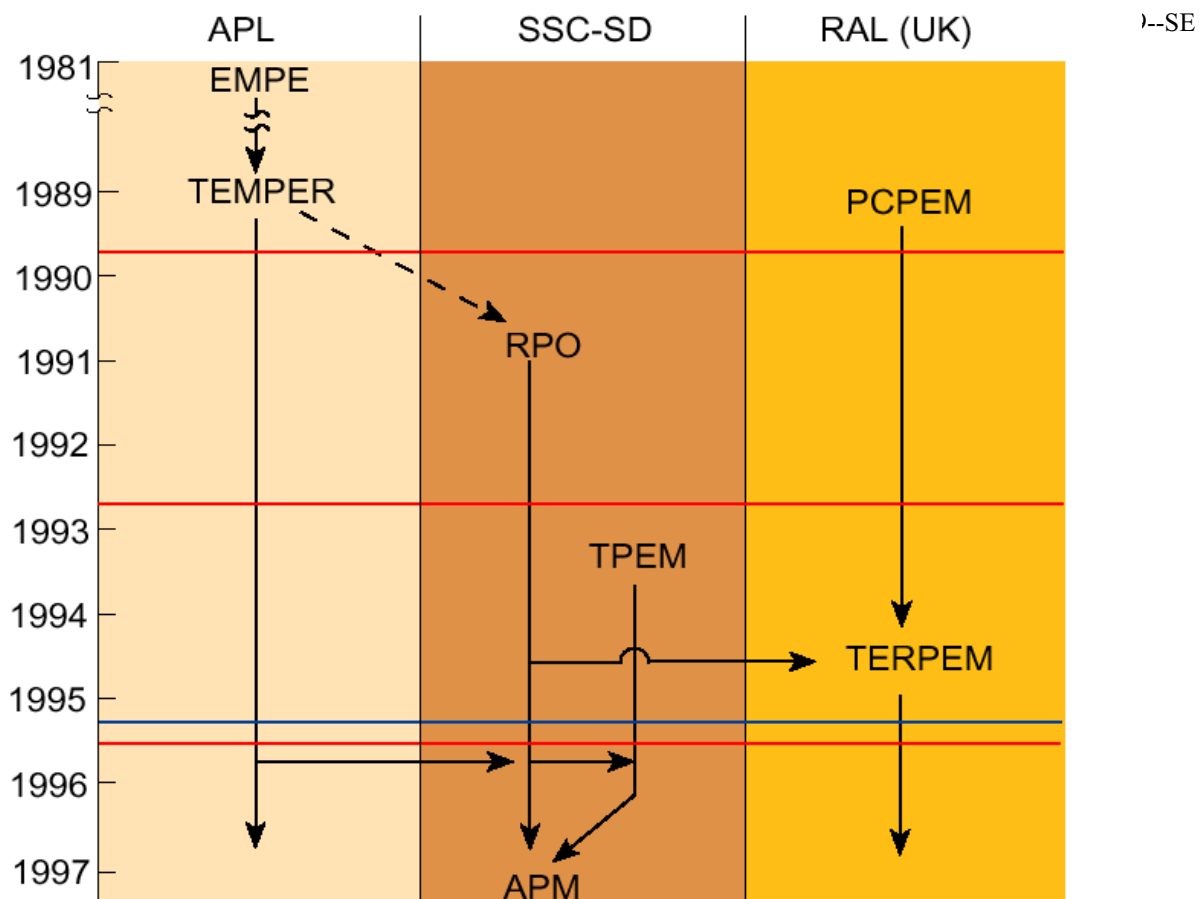
- Fourier split-step (FSS), [*Hardin och Tappert*, 1973]
- Implicit finit differens (IFD), [*Popov*, 1968, *Claerbout* 1976, *Lee et al* , 1981 och 1987]

Den första metoden (FSS) använder en approximativ lösning till PE i fouriertransformdomänen och den andra (IFD) översätter PE till ett system av kopplade differensekvationer som löses med matrisinversion. Generellt gäller att stabiliteten hos FSS medger större avståndssteg än vad som är fallet med IFD men det är enklare att implementera komplicerade randvillkor med IFD. Trots att det finns tillfällen då IFD är att föredra har FSS hittills haft störst framgång och är, framförallt för mikrovågsapplikationer, den klart vanligaste metoden. Debatten kring vilken metod som är bäst antar i vissa fall rent religiösa undertoner.

Under årens lopp har ett flertal PE-modeller utvecklats, se exempel i figur 13 hämtad från *Dockery* [1998]. Främst har detta skett i USA vid SPAWAR (Space and Naval Warfare Systems Command) Systems Center San Diego (tidigare NOSC), Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (APL) samt i viss mån även vid Naval Postgraduate School (NPS) och Naval Reserach Laboratory's Monterey contingent (NRL/Monterey). Utöver dessa organisationer bör Rutherford Appleton Laboratory (RAL) i England nämnas som en av de mest tongivande när det gäller PE-utveckling.

Modellerna har successivt blivit mer robusta och idag är numeriska problem relativt sällsynta om man undantar de fall när nya finesser tillförs. Ett av de största problemen i början var att beräkningstiderna blev mycket långa även för enkla beräkningar över korta sträckor. Man tillgrip därför många, i dag att betrakta som udda, metoder för att klara detta. Bland annat byggde man på RAL, för programmen PCPEM och FDPPEM, se kapitel 3.4, upp en dator baserad på en PC för administration och ett antal (minst en, maximalt åtta) så kallade transputers (instickskort med en transputer på varje). Givetvis blev det en snabb men tyvärr också mycket dyr och komplicerad lösning som snart försvann från marknaden. I dag körs PE-modeller utan större problem med hanterliga exekveringstider på vanliga PC-maskiner (typiskt några sekunder på en 600 MHz PIII). Dock är de flesta PE-modeller minneskrävande.

Mångfalden av PE-program för troposfärvågutbredning har skapat en, om än förhoppningsvis bara tillfällig, förbistring beträffande till exempel ursprung, precision, finesser, möjligheter, validering och verifiering. Generellt sett har de olika modellerna utvecklats för olika applikationer som i sin tur har olika behov beträffande exekveringstid, modellfinesser och noggrannhet. Dessutom har man ibland glömt eller till och med ignorerat vilken applikation modellen utvecklades för, vilket lett till felaktig användning av modellerna.



Figur 13 Utvecklingen av PE-modeller under ca tjugo år. APL = Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, SSC-SD= SPAWAR Systems Center, San Diego, RAL=Rutherford Appleton Laboratory i England. För övriga förkortningar, se kapitel 3.4-3.5

Typiska egenskaper för PE;

- Mark, troposfär och jonosfär kan behandlas samtidigt och med en enda - vanligen tvådimensionell - modell.
- Metoden ger fältet (amplitud och fas) på ett visst avstånd, från marken upp till ett artificiellt inlagt gränsskikt, ett så kallat 'absorptionsskikt'.
- I princip är PE en högfrequensmetod, vågekvationen är giltig endast om observationspunkten befinner sig ett stort antal våglängder från antennen. Används dock mycket långt ner i frekvens.
- Elevationsvinkeln, från antennen, måste normalt vara relativt liten ($< ca 15^\circ$). Detta är inget problem för fartygsradar. I stadsmiljö, skog eller kraftigt kuperad terräng blir det dock problem. Dock finns det numera "vidvinkliga" (upp till $40-45^\circ$) metoder som kan användas.

Kring ämnet paraboliska ekvationer har det skrivits spaltkilometer i olika tidskrifter och otaliga är de konferensbidrag som publicerats. Dock är det först under våren år 2000 som det skrivits en bok i ämnet [Levy, 2000]. Första utgåvan innehåller många fel och resonemangen är i vissa

fall svåra att följa, vilket gör att vi endast rekommenderar denna bok för den med stort intresse av PE-modeller och som dessutom har god allmänkunskap om vågutbredning.

3.4 Beräkningsprogram baserade på ren PE-teknik

Här redovisas några programpaket för troposfärvågutbredning som baseras på PE-modellering.

3.4.1 *Electromagnetic Parabolic Equation, EMPE*

EMPE lanserades av *Ko m. fl.* [1983] vid APL och baserades på existerande programkod av FSS-typ för hydroakustik. Programmet utvecklades snabbt och genomgick omfattande tester inom US Navy och blev på så vis en sorts de facto standard för kommande modeller. EMPE omvandlades dock under 1987 till en licensbelagd kommersiell produkt vars öde vi ej kunnat belägga i denna förstudie.

3.4.2 *Tropospheric Electromagnetic Parabolic Equation Routine, TEMPER*

Under 1988 lanserade APL en forsknings- och utvecklingsversion av EMPE med namnet TEMPER (Tropospheric Electromagnetic Parabolic Equation Routine). TEMPER är APL's avancerade vågutbredningsprogram för stöd till projekt inom US Navy. APL hävdar att denna modellimplementation har minst antal restriktioner beträffande exempelvis antennhöjd, antenndiagram, ytegenskaper med mera, av alla tillgängliga implementationer av PE. En modell, som TEMPER, med mycket avancerade funktioner och hög noggrannhet (men kanske inte alltid så snabb!) benämner man i USA "High fidelity model".

I början användes PE-modeller endast för applikationer över öppet hav. Under slutet av 1980-talet ökade behovet av modeller, både såväl inom US Navy som internationellt, som även kunde användas utmed kusterna (eng. littoral battlespace) eller till och med över land. TEMPER har därför två olika metoder för att representera och hantera terräng.

TEMPER klarar såväl vertikala som horisontella brytningsindexvariationer.

Kod och delmodeller som utvecklas vid APL för TEMPER och som visar sig ge nya eller förbättrade egenskaper överlämnas till SPAWAR för integrering i till exempel TPTEM eller APM (se kommande kapitel). Ett sådant exempel är den så kallade "mixed Fourier transformen" (MFT) som utvecklats av *Kuttler och Dockery* [1991].

3.4.3 *Parabolic Equation model for Personal Computer, PEPC*

Detta program utvecklades gemensamt av dåvarande NOSC och University of Miami (Tappert) under 1989-1990 [*Barrios*, 1992]. Programmet utnyttjade FSS-teknik och innehöll teknik för att enkelt hantera brytningsindexvariationer i avståndsled men hade ingen möjlighet att hantera terräng. Programmet innehöll även en troposcattermodell enligt *Yeh* [1960] och *Rice m. fl.* [1965]. Programmet har inte fått någon spridning utanför NOSC och har fallit för åldersstrecket.

3.4.4 *Terrain Parabolic Equation Model, TPTEM*

Detta är en ren PE-modell baserad på lösning med split-step Fourier transform framtagen av SPAWAR, San Diego. Programmet finns på FOI både som exekverbar fil (32-bit DOS) som i källkod. Programmet underhålls ej längre från SPAWAR och har försvunnit från SPAWAR's web-sida.

TPTEM-modellen är en ren split-step modell som kan hantera terräng (använder dock ej samma metod som TEMPER) och vertikala/horisontella variationer i brytningsindex samt kan även

hantera variationer i markens konduktivitet. Frekvensområdet är som för de flesta PE-modeller 100 MHz till 20 GHz. Maximalt 30 brytningsindexprofiler utmed sträckan kan hanteras och modellen klarar maximalt 300 horisontella nivåer. Terrängprofilen kan innehålla maximalt 1000 höjdpunkter.

Modellen utnyttjar den diskreta mixade Fourier-transform metoden (MFT). Modellen använder även en "numerisk genväg" känd som "boundary shift method" som avsevärt förkortar exekveringstiderna. TPPEM version 1.5 innehåller inga modeller för troposcatter eller för syre- och vattenångaabsorption.

Eftersom TPPEM är en ren PE-modell är man inte begränsad i antennhöjd annat än vad som ges av den maximala transformstorleken. Detta gör modellen användbar exempelvis för flygtillämpningar.

3.4.5 *PC Parabolic Equation Model, PCPEM*

Detta är en mycket tidig PC-baserad (enbart Windows 3.11) implementation av FSS PE där själva PE-beräkningen utfördes av eller flera transputers. Programmet var endast avsett för tillämpningar över hav och klarade inte horisontell variation av brytningsindex. Utvecklingen skedde i ett avknopningsföretag till RAL, Signal Science, startat och ägt av Mireille Levy och Ken Craig. Programpaketet har fallit för åldersstrecket och finns ej längre att tillgå.

3.4.6 *Finite Difference Parabolic Equation Model, FDPPEM*

Även denna implementation togs fram av Signal Science. För ovanlighetens skull utnyttjade man en IFD lösning. Implementationen är PC-baserad (enbart Windows 3.11) även här med beräkningen förlagd till en eller flera transputers. Programmet klarade terräng (indata; profil, markkonstanter och skrovlighet) och horisontell variation av brytningsindex för frekvenser över 30 MHz. Även detta programpaket har fallit för åldersstrecket och finns ej längre att tillgå.

3.5 **Beräkningsprogram baserade på en kombination av tekniker, hybridmodeller**

En del applikationer kräver beräkningar över stora områden, upp till flera hundra kilometer i avstånd och flera kilometer i höjd. Beräkningar mellan rymden (satellit) och jorden i de fall där man måste ta hänsyn till troposfären är extremt krävande. Eftersom exekveringstiden för en ren PE-beräkning beror på frekvens, utbredningsvinklar och täckningsområde blir beräkningarna mycket tidskrävande, för att inte säga orälistiska, för dessa stora områden.

Lyckligtvis finns det två omständigheter som är till vår fördel när det gäller troposfärproblem. För det första minskar troposfärens, vid ytan kraftiga, variation i brytningsindex med höjden och terrängen är ofta begränsad till låga höjder. Över någon km är det ovanligt att anomalier i brytningsindex uppstår. För det andra, eftersom brytningsindex i luft är mycket nära ett är komplexa brytningsfenomen begränsade till små elevationsvinklar relativt horisontalplanet.

På grund av detta är det möjligt att endast utnyttja den kraftfulla, men långsamma, PE-beräkningen, för låga höjder och små elevationssvinklar och komplettera denna med snabbare metoder för att få en helhetslösning över alla höjder och vinklar. Mycket effektiva hybrider av PE och Raytrace-teknik har därför utvecklats med stor framgång. Nyckelord som Horisontell PE (HPE) och Vertikal PE (VPE) är ofta förekommande i dessa sammanhang. Här nedan ges några exempel på hybridmodeller.

Ett givet problem med att dela upp beräkningen i olika regioner (höjd, avstånd) är att det uppstår diskontinuiteter vid övergångarna mellan de olika regionerna. I en hybridmodell uppkommer denna situation mer eller mindre alltid. Om man kan försumma dessa brister beror i hög grad på applikationen. Att i ett automatiskt system kunna hantera denna typ av diskontinuitet är svårt och det enda botemedlet är att förbättra övergångsmekanismerna och de grundmodeller man utnyttjar. Inga av de tester som utförts vid FOI uppvisar dock någon sådan diskontinuitet.

3.5.1 *Radio Physical Optics, RPO*

RPO utvecklad vid SPAWAR är en effektiv stråloptik- och PE-baserad hybridmodell för sträckor endast över hav. Version 1.15 är certifierad och ingår i OAML⁷ som underhålls av CNMOC⁸. Första versionen kom under 1996.

RPO är en sann hybridmodell som utnyttjar styrkan av både stråloptik (RO) och PE-teknik (split-step) för att hantera avståndsberoende vertikala brytningsindexprofiler. En snabb FFT⁹ används för att beräkna sinustransformen i split step-lösningen. I jämförelse med rena split-step PE-modeller är hybridmodellen RPO 25-100 gånger snabbare med ungefär samma noggrannhet som en ren PE-modell. RPO kan med detta dessutom hantera höga elevationsvinklar, något som de flesta PE-metoder normalt ej klarar. En kraftig begränsning är dock att antennen måste vara lägre än 100 m över havet. RPO version 1.15 innehåller även en troposcattermodell och en modell för syre- och vattenångaabsorption. Programmet hanterar maximalt 33 brytningsindexprofiler utmed ytan och 51 vertikala nivåer och är användbart för frekvenser mellan 100 MHz och 20 GHz. Källkod finns tillgänglig på FOI.

3.5.2 *Hybridized Terrain Parabolic Equation Model, TERPEM*

Denna modell [Levy och Craig, 1996] togs fram av RAL på uppdrag av Royal Navy för att ingå i det Brittiska beslutsstödssystemet EEMS (Environmental Electromagnetic Modelling System). Egentligen är detta inte en enskild modell utan ett paket av modeller med ett användargränssnitt för Windows, se figur 14 och 15.

Implementationen bygger på RPO men lider inte av dess begränsning med en maximal antennhöjd på 100 m. Här ingår även en modell för atmosfärsabsorption baserad på Liebe's MPM¹⁰-modell [Liebe m. fl., 1993]. Den så kallade Miller-Brown [Miller m. fl., 1984] modellen för skrovliga ytor (över sjö) ingår och man utnyttjar även MFT-tekniken. Däremot ingår ingen troposcattermodell.

Implementationen är avsedd för frekvensområdet 30 MHz till 100 GHz och klarar både hav och kust (land), höga antenner med godtyckligt antenndiagram samt avståndsberoende brytningsindexprofiler. Som kuriosum kan nämnas att Levy själv anser denna modell vara överlägsen till exempel APM när det gäller uppträdande över terräng, skrovliga ytor eller för höga antenner.

⁷ OAML=Oceanographic and Atmospheric Master Library

⁸ CNMOC=Commander of the Naval Meteorological and Oceanographic Command

⁹ FFT=Fast Fourier Transform

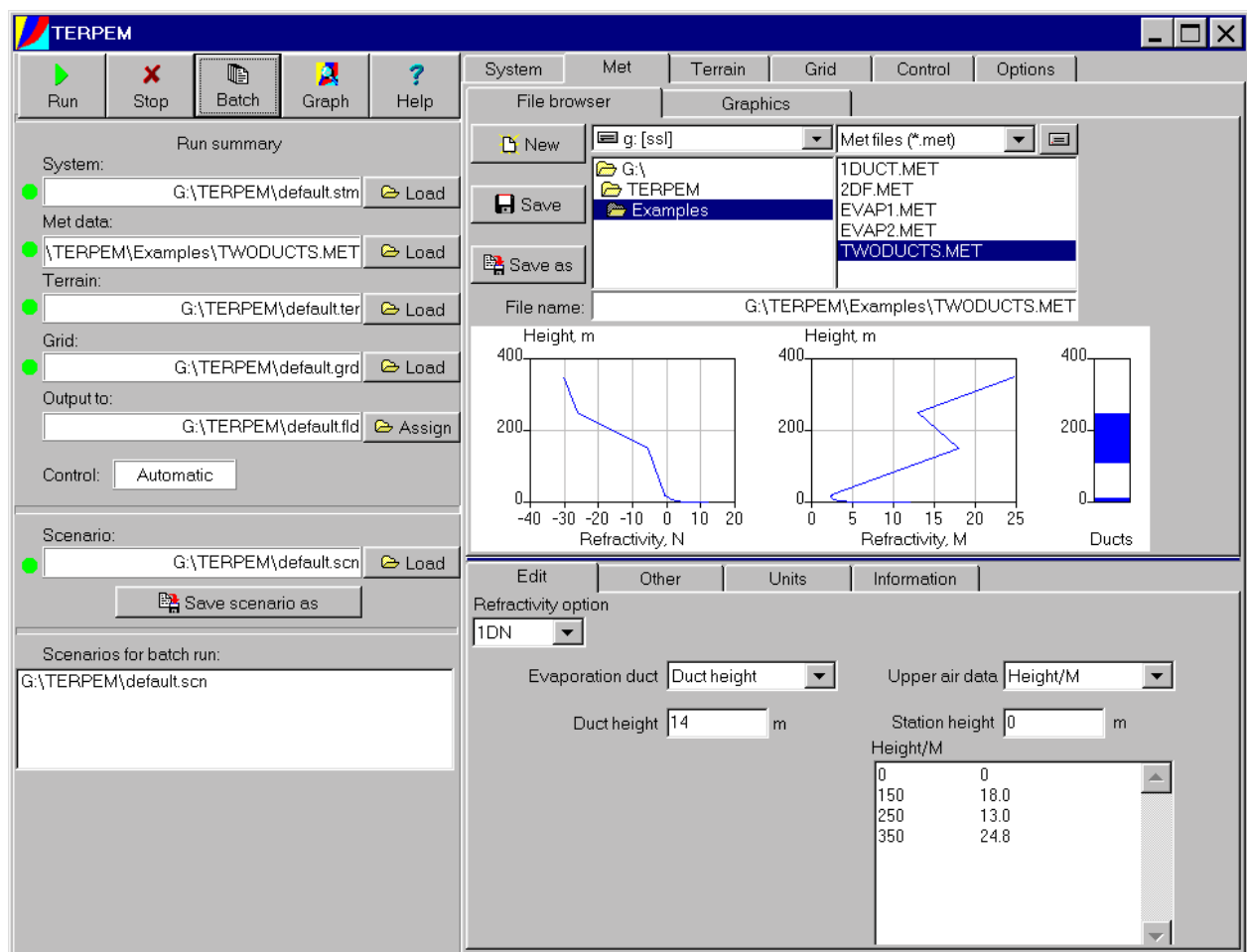
¹⁰ MPM=Millimetre-wave Propagation Model

I paketet ingår;

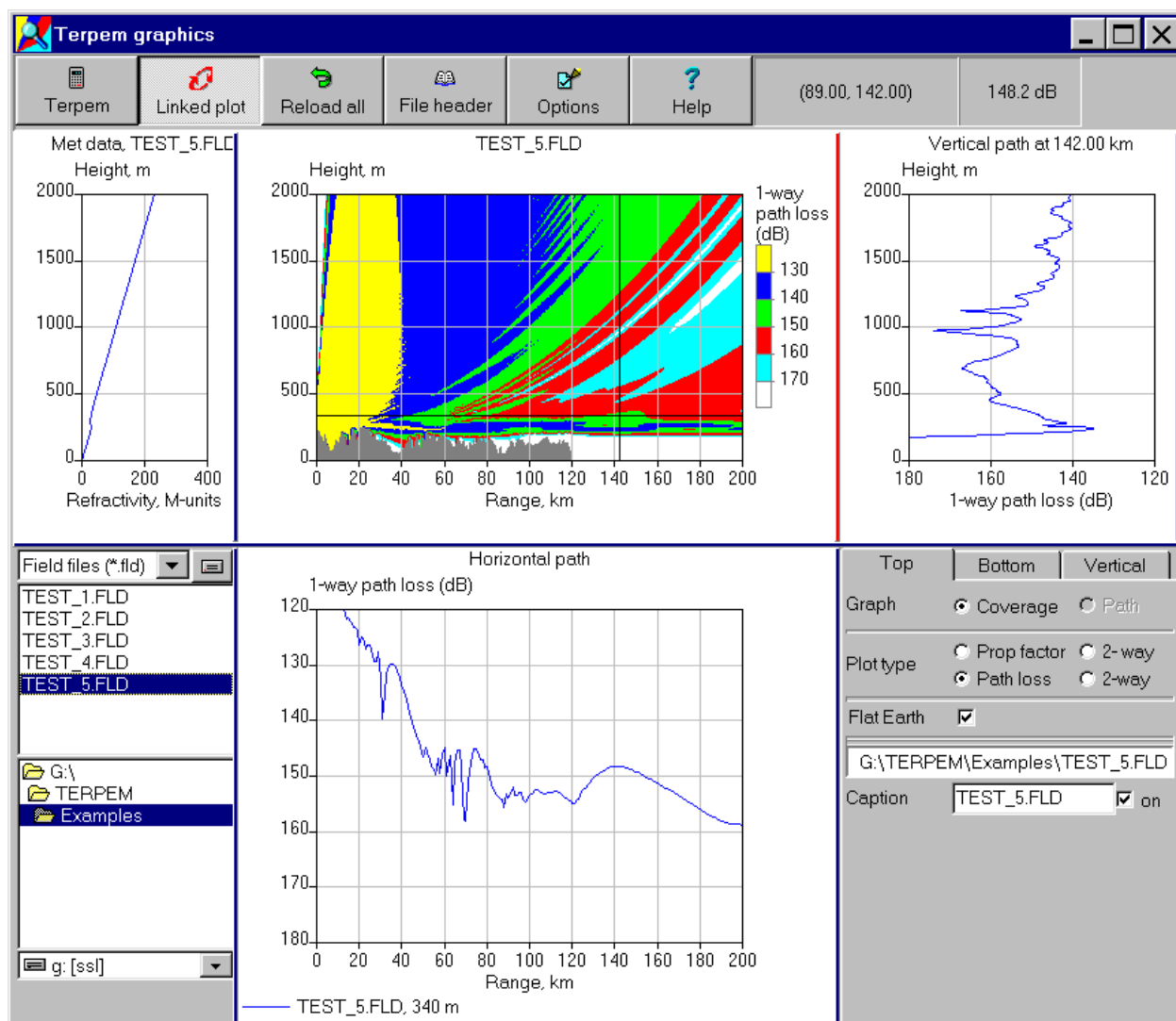
- Grafiskt gränssnitt för inmatning och hantering av ingångsdata
- Meteorologisk modul
- Vågutbredningsberäkningsmodul
- Modul för plottning av täckningsdiagram
- Modul för plottning av transmissionsförlust
- Modul för beräkning av upptäcktssannolikhet för radar

Under utveckling är moduler för klotteranalys, meteorologisk modul med bland annat en global databas med brytningsindexdata samt ett interface för hantering (inläsning, plottning) av olika format av kartdata.

Programpaketet kan köpas från företaget Signal Science i England och finns i drift vid flera civila och statliga organisationer. Kostnaden är £5000 för en licens inkl dokumentation.



Figur 14 Fönster i TERPEM för hantering av ingångsdata.

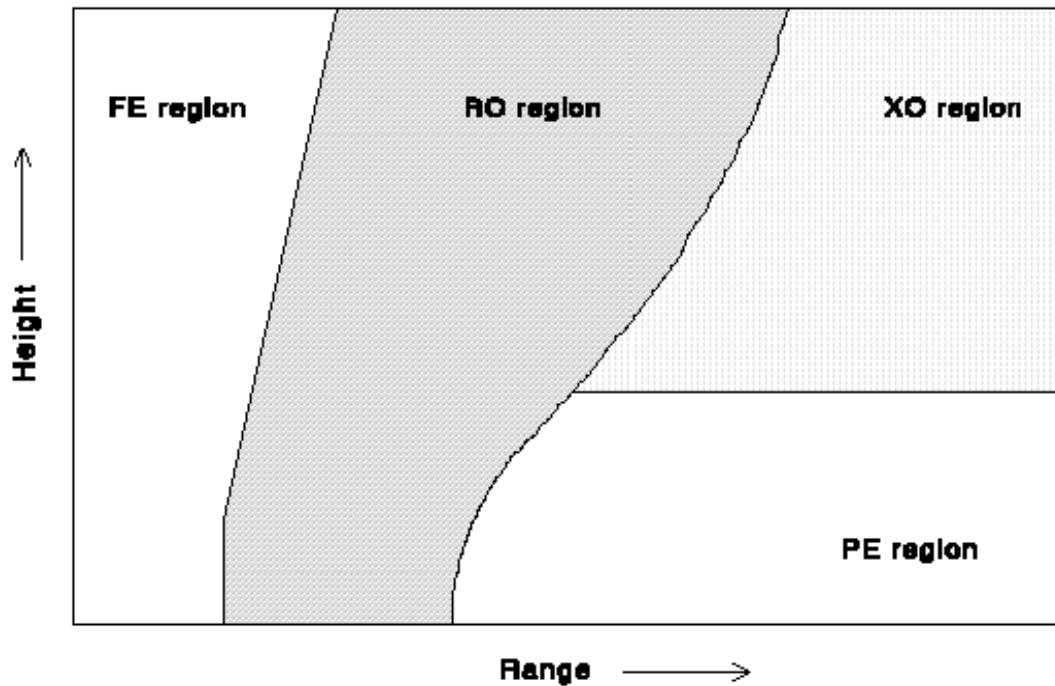


Figur 15 Fönster i TERPEM för visning av beräkningsresultat.

3.5.3 Advanced Propagation Model, APM

Modellen, utvecklad vid SPAWAR, är en avståndsberoende sann hybridmodell som utnyttjar den kombinerade styrkan av både stråloptik (ray optics, RO) och parabolisk ekvationsteknik (PE) för att beräkna transmissionsförlust både i avstånd och höjd. Detta sker genom att man utnyttjar kod från TPPEM tillsammans med kod för RPO-modellen (Radio Physical Optics). Dessa koder har förbättrats på många punkter innan de integrerats i APM.

Atmosfärvolymen delas in i regioner och valet av beräkningsmetod bestäms utgående från dessa regioner, se figur 16. APM använder beräkningsmetoderna flat earth (FE), ray optics (RO), extended optics (XO) och split-step parabolic equation (PE). För antennelevationsvinklar över 5 grader eller för avstånd mindre än 2.5 km används en stråloptikmodell för jämn jord (FE). I detta område korrigeras bara mottagarhöjden för medelrefraktion och jordytans krökning.



Figur 16 Beskrivning av hur APM växlar beräkningsmod som funktion av avstånd och höjd. FE står för Flat Earth (markvågsreflektion över jämn jord), RO står för Ray Optics (stråloptik) och XO står för Extended Optics.

Inom RO-regionen beräknas transmissionsförlusten genom koherent addition av en direkt- och markreflekterad stråle där man utnyttjar brytningsindexprofilen vid sträckans början.

I låghöjdsregionen bortom RO-regionen används en PE-approximation till Helmholtz fullvågsekvation. Modellen baseras på Split-step metoden och utnyttjar den diskreta mixade Fourier-transform metoden (MFT). Denna PE-implementation möjliggör dels användandet av brytningsindexprofiler som varierar med avståndet och dels skiftande terräng (höjd) utmed sträckan. PE-modellen används bara så högt upp i höjd att man får med all terräng och det översta troposfärsiktet.

Området bortom RO-regionen men över PE-regionen definieras som "extended optics region". Inom denna region utnyttjas stråloptikmetoder som använder en startlösning tagen från en PE-beräkning i gränsövergången.

Som för de flesta hybridmodeller gäller även för APM att den inte säkert ger full täckning i alla höjder och avstånd inom ett täckningsområde. Detta förstärks något av att den dessutom arbetar i tre exekveringsmoder.

Aktuell beräkningsmod styrs av de system- och miljödata (ex brytningsindex) som matas in i programmet. Moderna är:

- *Full hybrid:* Ger täckning vid alla höjder inom ett specificerat avstånd förutsatt att sändaren finns på ytan och att de första 2.5 km av marksträckan är plan. Denna metod är särskilt väl lämpad för fartygsbaserade system som opererar i kustbandet och vill kunna spana inåt

land. FE-, RO-, XO- samt PE-metoderna används.

- *Partial hybrid*: Denna mod exekverar endast PE och submodellerna för extended optics om terränghöjden är skild från noll och sändarens höjd över lokal mark är lägre än 100 m. Detta ger täckningsdiagram som saknar täckning för höga vinklar (exempelvis korta sträckor med höga höjder). XO- samt PE-metoderna används.
- *Airborne hybrid*: Denna mod använder split-step PE-modellen (PE) för utbredningsvinklar som är minst fem grader och FE (Flat Earth) för vinklar som är större än vad PE klarar. APM använder denna mod för sändar- och mottagarhöjder över 100 meter (definierat över lokal mark), oavsett terrängens utseende.

De flesta beräkningsfall täcks in med dessa moder, dock inte helt till 100%. Jämfört med RPO är inte modellen begränsad för höjder under 100 m. Antennhöjder under 100 m ger snabb exekvering, för höjder däröver går dock APM över helt i full PE-mod vilket gör den långsammare.

APM innehåller en modell för beräkning av inverkan av skrovliga ytor samt även en troposcattermodell som tillämpas från diffraktionsområdet och bortåt. Dokumentationen är i detta fall inte fullständig men ur källkoden kan man gissa sig till att man använder samma troposcattermodell som i EREPS. Denna modell är en utvecklad version av modellen från Yeh [1960] där man lagt till en så kallad "frequency gain factor" framtagen av Rice *m. fl.* [1965]. I alla delmodeller i APM tillämpas dessutom en modell för syre- och vattenångaabsorption. Denna modell baseras på ITU-R Recommendation 676-1, "Attenuation by Atmospheric Gases in the Frequency Range 1-350 GHz."

APM hanterar både vertikal och horisontal polarisation. SPAWAR anger att programmet inte har några begränsningar beträffande antalet höjdprofiler och antalet steg i dessa. Vidare kan APM hantera både hav och land samt kombinationer av dessa. Terrängprofilen har enligt uppgift inte heller den några begränsningar i storlek och innehåller parvisa data med avstånd (till startpunkten) samt höjden. Dessutom kan marktypen anges genom att ange permittivitet och konduktivitet.

Utvecklingen pågår fortfarande och modellen måste därför betraktas som en prototyp. APM är utvecklad i Fortran under Digital Visual Fortran, numera Compaq. För en kommande svensk programutveckling kan man förmoda att Microsoft Visual C++ kan komma att användas. Utvecklingsmiljöerna är väl integrerade (både Compaq Fortran och Microsoft Visual C++ använder Microsofts Developer Studio) och det finns standardiserade metoder för att koppla ihop de olika programmodulerna med varandra. Av detta skäl förutspås inga speciella problem att integrera APM i ett ersättningssystem för LBM. Detta gäller även det fall när ett sådant system blir en del av fartygets ledningssystem.

APM är, såvitt vi känner till, den enda hybridmodell som publicerats med källkoden publikt tillgänglig (finns att hämta från <http://sunspot.nosc.mil/543/software/index.html>).

3.6 Utvecklingstrender för PE-modeller

För närvarande studeras runt om i världen en mängd olika vågutbredningseffekter som man vill kunna ta hänsyn till i kommande PE-modeller. Här kan nämnas inverkan av terrängbeklädad (gräs, träd med mera), ytvågsbidrag och tredimensionell spridning. Båda de lösningsmetoder vi

tidigare nämnt, FSS och IFD, används med viss favör för FSS. Utöver detta pågår en ständig utveckling för att minska exekveringstiderna och öka noggrannheten.

3.7 Vågutbredningsprogram för olika scenarier

Vilket program (modell) behöver man för att klara förhållandet att vi antar homogena förhållanden utmed en given sträcka (tex. nuvarande LBM)? Detta är det enklaste fallet och vilket program som helst av de tidigare uppräknade är mer eller mindre användbart. Dock kan man anta att enkla Raytrace-program idag har spelat ut sin roll, åtminstone om man enbart använder denna programtyp. Även om detta är ett enkelt utbredningsfall är förmågan att hantera ett stort antal vertikala nivåer i brytningsindexprofilen betydelsefull. Vilken som helst av PE-programmen duger i princip för detta. Även om det är att skjuta lite över målet är det lämpligt att välja antingen en "high fidelity"-implementation såsom TEMPER eller en hybrid, exempelvis APM. TEMPER bör undvikas i tidskritiska sammanhang eftersom den är av "high fidelity"-typ och därmed kräver mer datorkraft än exempelvis APM.

Horisontella gradienter av brytningsindex uppstår till exempel vid kustområden, vid horisontella gradienter i vattentemperaturen och vid kallfronter/varmfronter. För att hantera detta krävs lite mer sofistikerade program och modeller. Dessa bör klara ett stort antal vertikala och horisontella nivåer i brytningsindexprofilen. Jämfört med förhållandena ute på öppet hav kan gradienterna i kust- och skärgårdsområden variera mycket snabbt. Dessutom tillkommer terrängeffekter såsom diffraktion, vegetationsinverkan med mera. Detta ställer speciella krav på de beräkningsmodeller som används. Härvidlag duger endast de modernaste PE-programmen eftersom de äldre har begränsningar i förmågan att hantera flera nivåer, främst i avståndsled. De enda användbara är därför TEMPER, TERPEM och APM. TEMPER bör även här undvikas i tidskritiska sammanhang.

3.8 Metoder för beräkning av transmissionsförlust och sannolikhet för målupptäckt

Med begreppet transmissionsförlust (engelska Path loss) avser man utbredningsmediets (sträckan mellan antennerna) dämpning av den elektromagnetiska vågen med inverkan av antennerna bortskalad. För att beräkna denna förlust krävs som ett minimum kännedom om frekvensen och avståndet (vilket gäller vid fritt rum). I normala fall krävs dock betydligt mer, exempelvis information om hinder, troposfäranomalier med mera.

För beräkning av sannolikheten för målupptäckt (på engelska - Probability of detection P_d) krävs dels information om själva radarsystemet men även hur målet ser ut och beter sig samt givetvis hur atmosfären och land och hav påverkar radarsignalen. De radardata man behöver är i huvudsak;

- Radartyp (ex pulsradar, inkoherent/koherent eller CW)
- Frekvens
- Toppeffekt
- Pulslängd (alt komprimerad pulslängd)
- Brusfaktor
- Systemförluster
- Max instrumenterat avstånd
- Pulsrepetitionsfrekvens
- Sannolikhet för falsklarm
- Antenntyp inkl polarisation
- Antennvinst

- Antennens öppningsvinklar (horisontal och vertikal polarisation)
- Antennelevation
- Antennhöjd
- Rotationshastighet för antennen
- Dessutom behövs i vissa fall några parametrar som beror på vald radartyp

För målet tillkommer;

- Radarmålarea (som funktion av frekvens och polarisation)
- Typ av mål (stabilt eller fluktuerande)
- Sannolikhet för falsklarm

3.9 Felkällor i vågutbredningsprogram

Självklart uppträder det olika fel i resultatet från vågutbredningsberäkningarna. Vissa av dem är lätta att upptäcka men de allra flesta är svåra att upptäcka, även för den som besitter goda kunskaper om vågutbredning. Listan kan göras mycket lång men här nedan har vi försökt att lista de viktigaste felkällorna (dock ej rangordnade);

- Feltolkning av brytningsindexdata.
- Otillräckliga brytningsindexdata.
- Rena implementeringsmissar och buggar.
- Brister i underliggande modeller.
- Brister i överföring från modell till programvara (missuppfattningar, förenklingar av underliggande modell för att klara implementationen).
- Numeriska problem.
- Kompilatorfel och fel i matematiska bibliotek.

Under denna förstudie har som exempel upptäckts flera fel i det programpaket som vi haft tillgång till för studier. Några av felen är harmlösa medan andra medfört att vi ej kunnat redovisa resultat från beräkningarna då tillförlitligheten har kunnat ifrågasättas.

4 Beslutstödssystem och operativa system

Flera taktiska beslutstödssystem har utvecklats runt om i världen. Först tar vi en titt på ett system från Storbritannien och ett från Australien. De flesta systemen i världen är dock utvecklade vid SPAWAR i USA för US Navy's räkning varav några beskrivs nedan. Slutligen tar vi en titt på de svenska systemen LBM och GIT.

Ett problem med de nuvarande presentationsätten är att man förleds att lita för mycket på programmet/modellen. Problemet härrör inte från själva vågutbredningsmodellen utan från brister i indata. De underliggande vågutbredningsmodellerna kan, vid brister i indata, ge avsevärda fel utan att man som operatör direkt lägger märker till det. Följden av detta blir givetvis att misstron till systemet så småningom ökar och att man i värsta fall upphör att använda stödssystemet och därmed går miste om det informationsövertag som ett korrekt fungerande system ger.

Därför behövs metoder som ger beräkningssäkerhet och varningar när indata inte håller tillräcklig kvalitet eller saknas. Sådana metoder saknas för närvarande dock helt. En framtida uppgift måste därför bli att försöka införa metoder som värderar, främst meteorologiska indata

men även resultatet från vågutbrednings- och systemberäkningarna, och varnar för dessa situationer på ett för operatören lättfattligt sätt.

4.1 Environmental Electromagnetic Modelling System, EEMS

Utvecklas av Maritime Warfare Centre (MWC) i England. De olika delarna i EEMS är:

1. TERPEM från Signal Science (RAL)
2. Target Detection Range Software Suite, TDRSS (som består av PRAM, Predator Radar Model och PREDATOR, Predicted Detection Ranges of Airborne Targets in Operational Regimes)
3. Terrain handling, THEEMS
4. High Frequency communication decision aid, HF EEMS
5. Electro-Optical Tactical Decision Aid, EOTDA

Stor osäkerhet råder beträffande projektets status. Enligt flera källor har hela projektet kört fast medan andra talar om att systemet är i demonstrerbart skick! Version 1 av EEMS som kallades Blue-water EEMS bestod av del 1 och 2. Enligt MWC själva kom denna version i operativt bruk under 1997. Version 2 omfattar även delarna 3-5. Enligt planerna skulle denna vara klar - 97/98 men här råder stor osäkerhet.

4.2 Tropospheric Refractive Effects Prediction System, TREPS

Ett programsystem utvecklat av DSTO i Australien och levererat till den Australiensiska marinen i maj -99. Indata hämtas från sensorer ombord samt även ballongsonderingar från fartyget. Utöver detta skickas meteorologisk information (troligen via radio) från marinhögkvarteret. Vilka modeller som ingår är för närvarande okänt.

4.3 Integrated Refractive Effects Prediction System, IREPS

Detta system utvecklades av dåvarande NOSC (Naval Ocean System Center i San Diego, numera SPAWAR) runt 1980 och har använts bland annat ombord på hangarfartyg. Modellerna som används i systemet är relativt enkla för att inte ge för långa beräkningstider. Systemet klarar endast hav och ej horisontell variation av brytningsindex. Genom ett informationsutbyte under slutet av 1980-talet fick FOA tillgång till källkoden. Systemet utvecklades på HP9845 datorer och har sedermera konverterats till PC-miljö (bland annat av FOA). Systemet får idag anses vara föråldrat men finns enligt uppgift fortfarande i operativ drift på några ställen.

Systemet innehåller ingen datainhämtningsdel från sensorer ombord på fartyget. All inmatning av troposfärdata sker manuellt eller via datafiler.

4.4 Radio Propagation Over Terrain, RPOT

Detta system, utvecklat vid SPAWAR, sattes under 1996 för att assistera USA:s sjätte flotta i Adriatiska havet under den fredsbevarande operationen i Bosnien. Systemet körs på PC-plattform under Windows 95. Den interna vågutbredningsmodellen är en kombination av TPPEM och RPO som tillåter avståndsberoende variationer av brytningsindex över terräng eller hav.

RPOT innehåller flera olika taktiska beslutstödssystem och brytningsindexdata kan matas in med flera olika metoder.

Sträckor som innehåller landavsnitt kan utnyttja höjddata från kartdatabaser eller manuellt inmatade höjdprofiler. RPOT stöttar kartformatet DTED¹¹. Nivå 0 av DTED, som har upplösningen 1000 m (i sida), finns att hämta från NIMA (National Imaging and Mapping Agency, USA) via Internet (<http://164.214.2.59/geospatial/products/DTED/dted.html>) för praktiskt taget hela världen.

Vid utvecklingen av RPOT blev det uppenbart att en ny vågutbredningsmodell behövdes som kombinerade det bästa hos RPO och TPEM. RPOT är att betrakta som ett snabbfix för att klara en akut krissituation och som en parentes och finns därför ej längre att tillgå. Dock bildar detta system ramverket för utvecklingen av nästa generation, nämligen AREPS.

4.5 Advanced Refractive Effects Prediction System, AREPS

AREPS är ett nyligen vid SPAWAR utvecklat system som främst skall ersätta det mest använda, men föråldrade systemet, IREPS. Version 1 färdigställdes i slutet av 1999. Fortfarande pågår utvecklingen, nu med version 2.1.x. Om systemet ännu kommit i full operativ drift är dock oklart. AREPS ingår som en del av vad man i USA kallar Tactical Environmental Support System-Next Century, TESS-NC.

Systemet är Windows-baserat och är, lite förenklat, ett grafiskt gränssnitt för vågutbredningsmodellen APM (Advanced Propagation Model). Källkoden för det grafiska gränssnittet är ej publikt tillgänglig men däremot för APM. Systemet innehåller ingen datainhämtningsdel från sensorer ombord på fartyget. All inmatning av troposfärdata sker manuellt eller via datafiler. AREPS-systemet är egentligen flera program, för dagen består det av två program, ett för inmatning av brytningsindexprofiler (Environment), figur 17, och ett program som innehåller stommen för själva beslutstödssystemet (AREPS), figur 18.

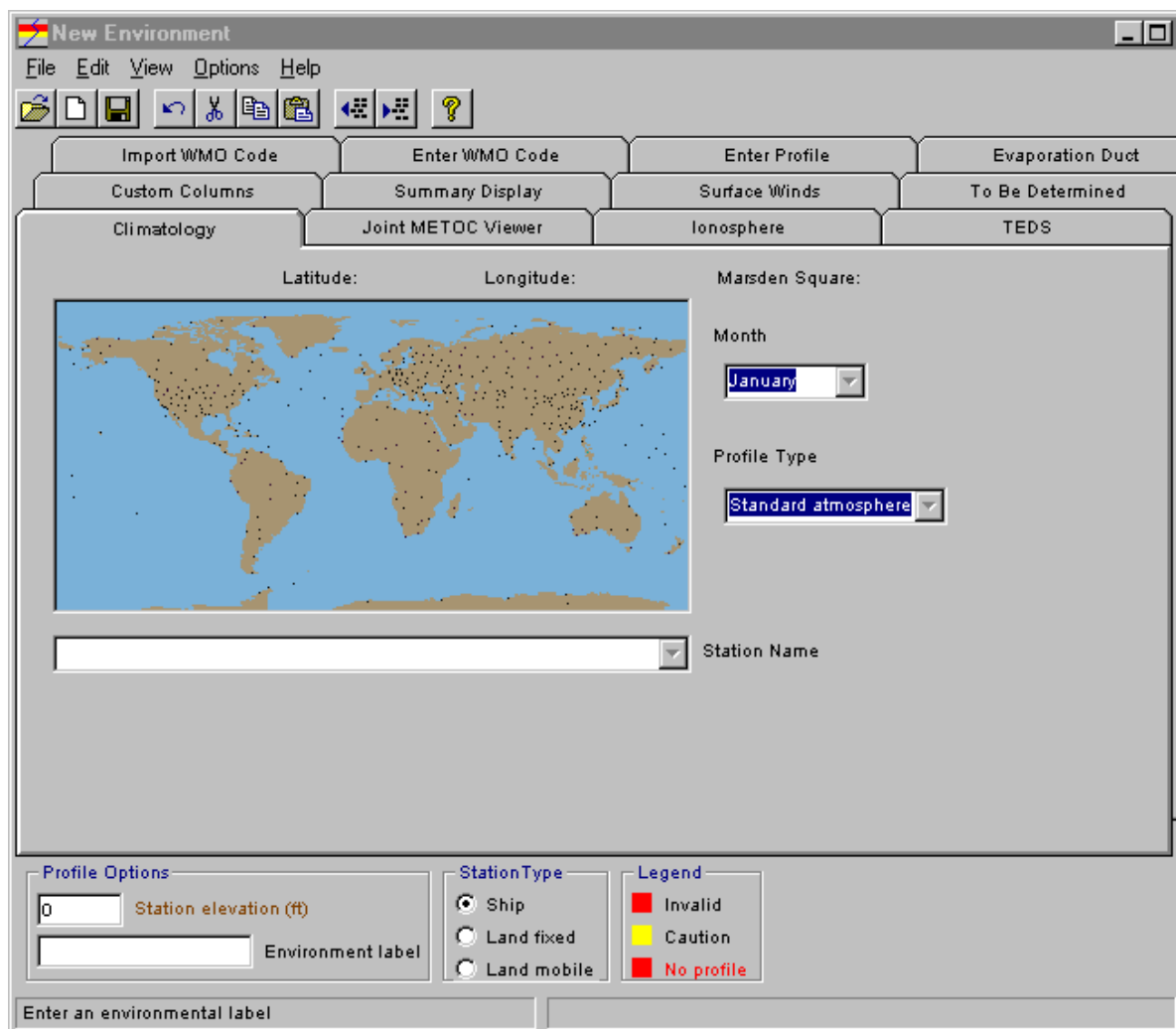
Programmet, i exekverbar form för Windows-miljö (win 9x, NT 4.x och troligen även Windows 2000), finns att hämta på <http://sunspot.nosc.mil/543/software/index.html>. Observera att man måste ändra (tillfälligt, ingen omstart är nödvändig) datorns nationella inställningar till Engelsk mod (amerikansk) för att programmet skall fungera korrekt.

AREPS innehåller flera olika taktiska beslutstödssystem. Dessa är;

- Upptäcktssannolikhet (radar) för marina och flygande farkoster.
- Sårbarhetsanalys för VHF/UHF kommunikation.
- Sårbarhetsanalys för ESM-system¹².
- Samtidig radardetektion och ESM.
- Avståndsberoende strålbaneberäkning.

¹¹ DTED=Digital Terrain Elevation Data

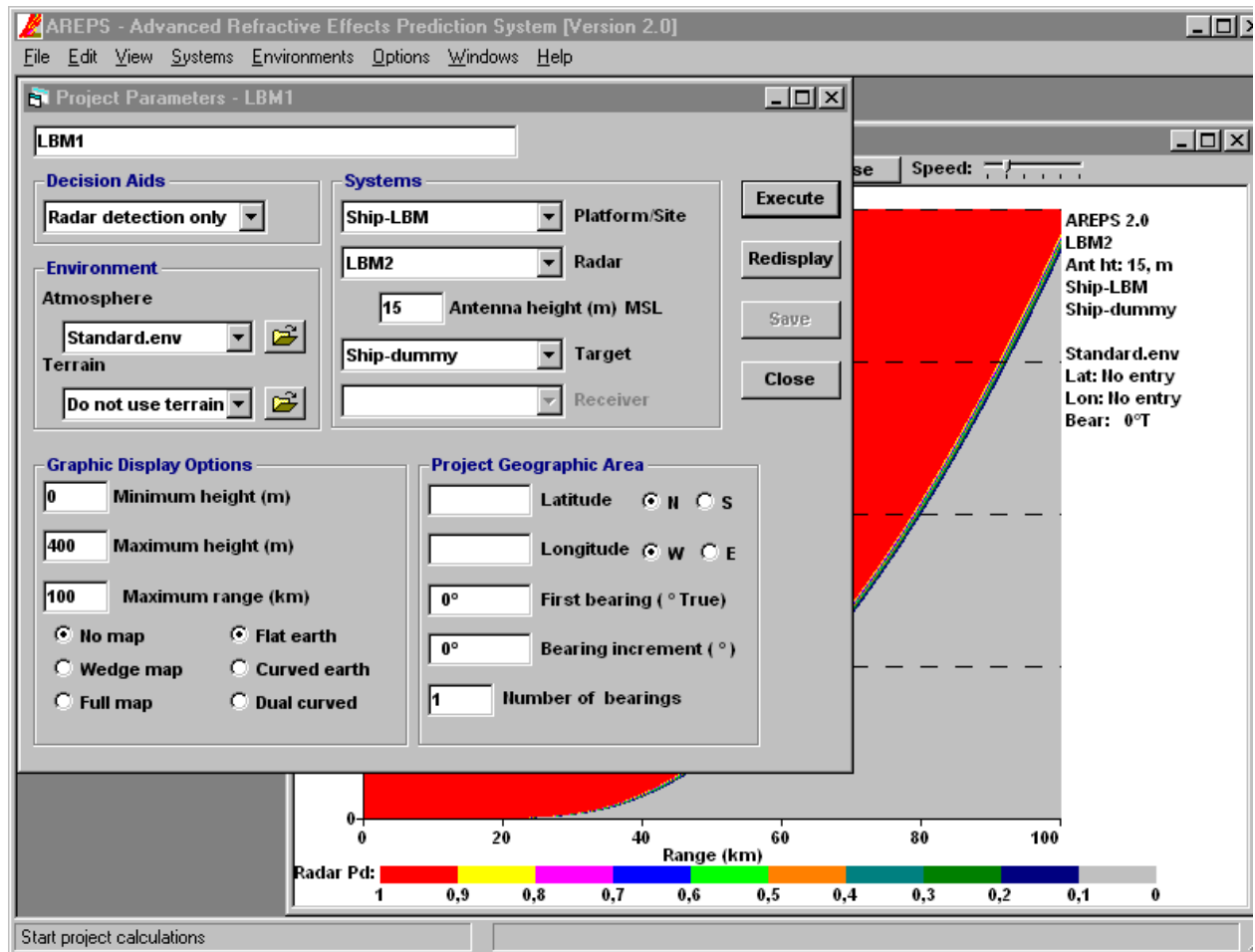
¹² ESM=Electronic Support Measures (taktisk signalspaning och varning).



Figur 17 Programmet ENVIRONMENT i AREPS-sviten. Med detta program skapar man sina brytningsindexprofiler utifrån exempelvis en given (inkluderad) databas, radiosonddata, WMO-koder, egna mätningar med mera.

Samtliga verktyg visar beräkningsresultat som funktion av höjd, avstånd eller bäring. Alla beräkningar utgår från atmosfärsdata erhållna från radiosond eller andra sensorer och dessa data kan uppvisa avståndsberoende variationer. För många av verktygen baseras resultatet dessutom på innehållet i en materieldatabas (radardata, ESM-data m m). För den öppna delen av programmet tillhandahåller SPAWAR endast en mycket enkel databas. Här har man valt att använda Microsoft Access som databasformat och det är därför enkelt, förutsatt att data finns tillgängliga, att bygga upp en egen databas med data för plattformar, mål, radar, ESM-mottagare och kommunikationssystem. Denna uppbyggnad kan alltså ske både internt inne i AREPS eller utanför AREPS-miljön med hjälp av Microsoft Access.

AREPS innehåller idag två delar, en operativ taktisk del samt en forskningsdel. Den operativa delen är mer systeminriktad och avsedd att användas ombord på fartyg och av personal med måttlig kunskap om mediet och vågutbredningsmodeller. Forskningsdelen saknar nästan helt kopplingen till systemen och kräver något större kunskap om mediet och vågutbredning i allmänhet.



Figur 18 En av beslutstödsfunktionerna i AREPS som ger upptäcktssannolikhet för en given radar och för ett givet mål som funktion av höjd och avstånd.

LBM1
Maximum detection range (km) for a 90 percent probability of detection

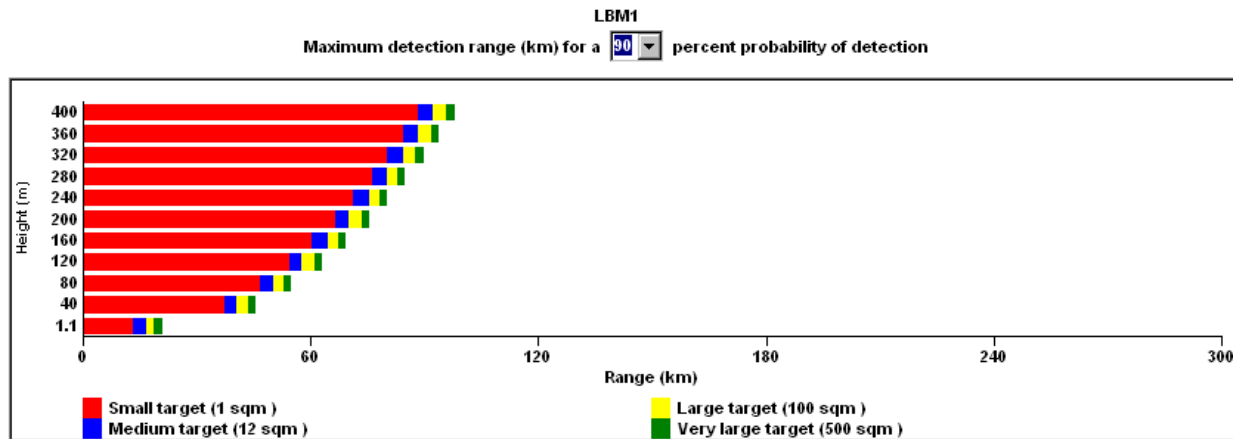
Height (m)	Project Target	Target 2	Target 3	Target 4
	Small target	Medium target	Large target	Very large target
1.1	13.0	16.4	18.4	20.5
10	36.8	40.2	43.0	45.0
80	46.4	49.8	52.5	54.5
120	53.9	57.3	60.7	62.7
160	60.0	64.1	66.8	68.9
200	66.1	69.5	73.0	75.0
240	70.9	75.0	77.7	79.8
280	75.7	79.8	82.5	84.5
320	79.8	83.9	87.3	89.3
360	83.9	88.0	91.4	93.4
400	88.0	92.0	95.5	97.5

Figur 19 Denna tabell, som är en del av beslutsstödsdelen i AREPS, ger maximala detektionsavstånden vid en viss sannolikhet för detektion på olika höjder för upp till fyra olika mål.

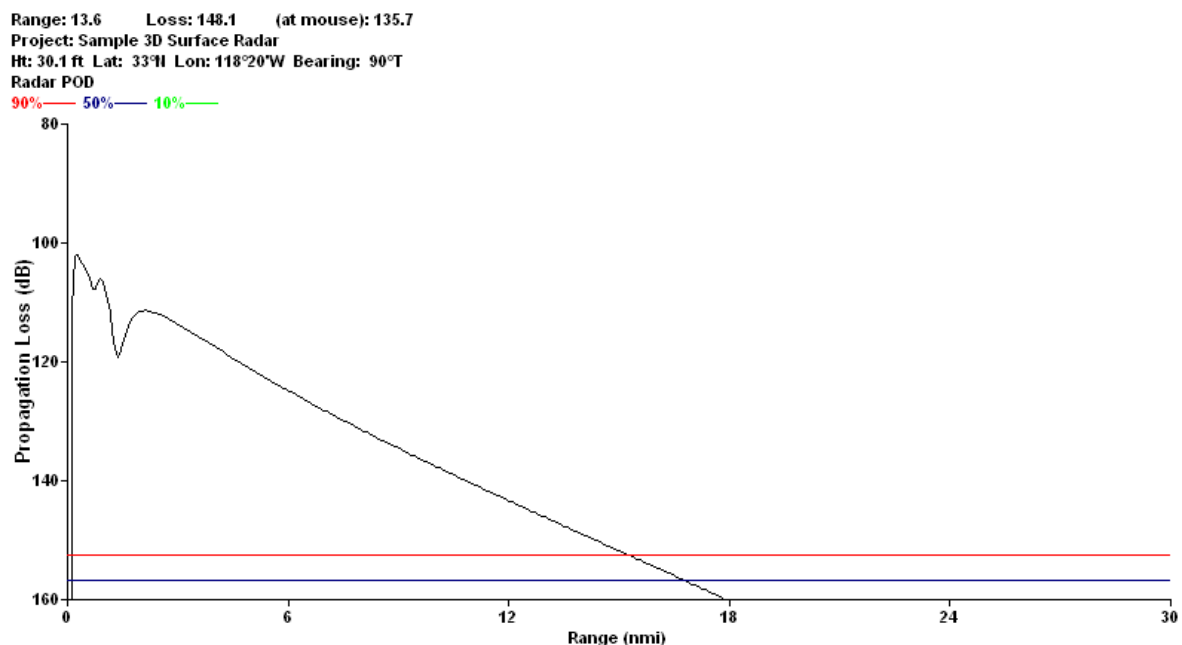
Ett annat exempel på beslutstödsfunktioner i AREPS visas i figur 19 och 20 där maximala detektionsavstånden vid en viss sannolikhet för detektion på olika höjder för upp till fyra olika mål visas. Detta kan visas numeriskt eller i grafform.

Även transmissionsförlust alternativt signalbrusförhållande för en viss given radar kan plottas som funktion av avstånd och höjd, se figur 21 och 22.

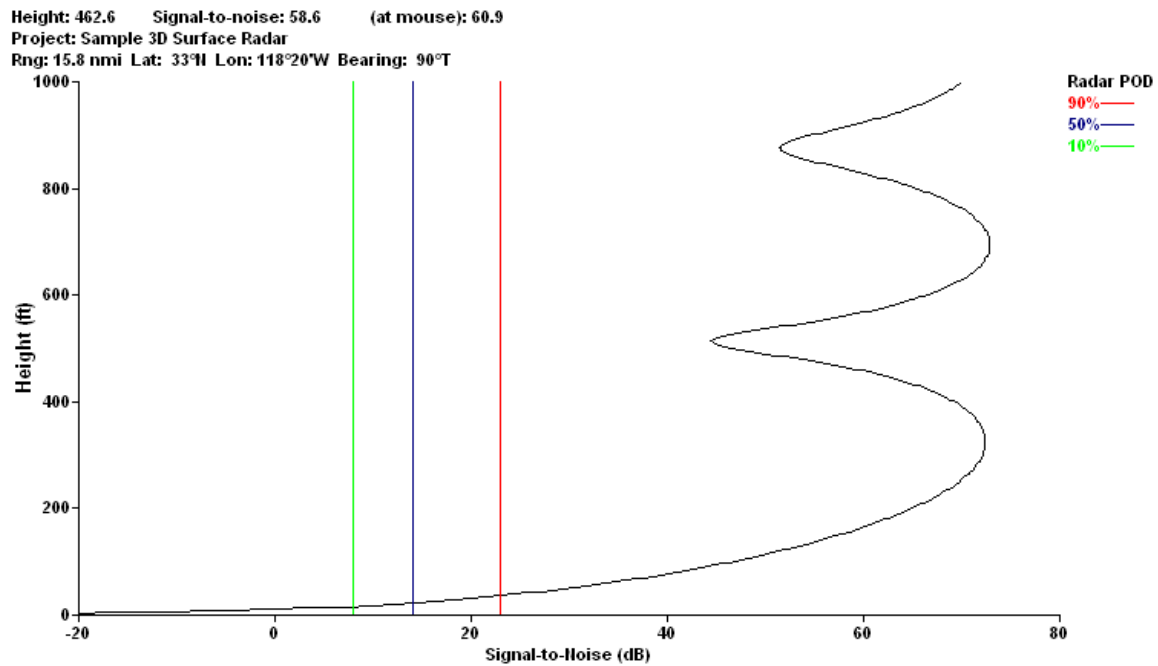
AREPS har även en Raytrace-funktion, se figur 23.



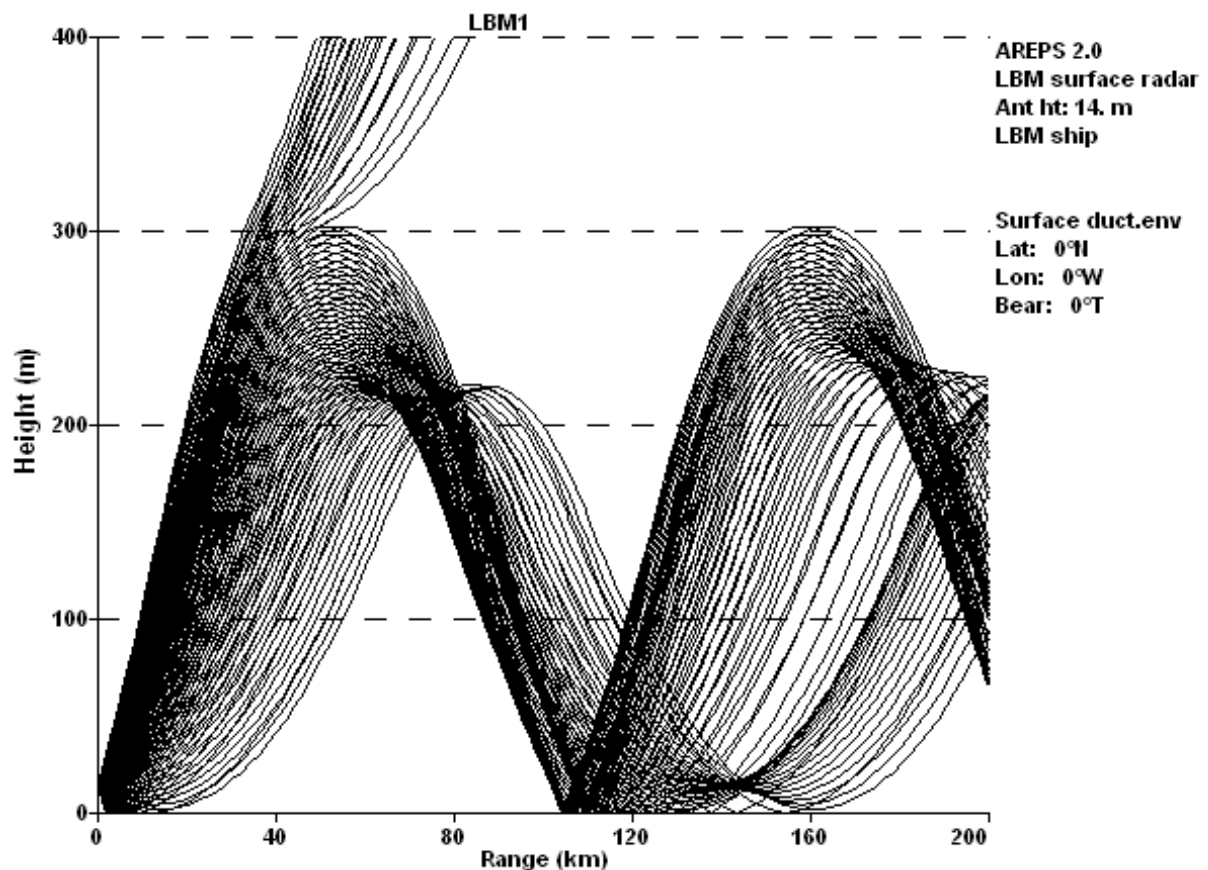
Figur 20 Denna figur visar i grafform samma sak som föregående figur (maximala detektionsavstånden vid en viss sannolikhet för detektion på olika höjder för upp till fyra olika mål).



Figur 21 Ett exempel på en beslutstödsfunktion i AREPS där utbredningsdämpning plottas som funktion av avståndet vid en given höjd. I grafen finns även koppling till radardata eftersom gränserna för 90, 50 och 10% för sannolikhet för detektion (POD) finns inlagda i grafen.



Figur 22 Ett exempel på en beslutstödsfunktion i AREPS där signal-brusförhållandet hos en radar plottas som funktion av höjden vid ett givet avstånd. I grafen finns även koppling till radardata eftersom gränserna för 90, 50 och 10% för sannolikhet för detektion (POD) finns inlagda i grafen.

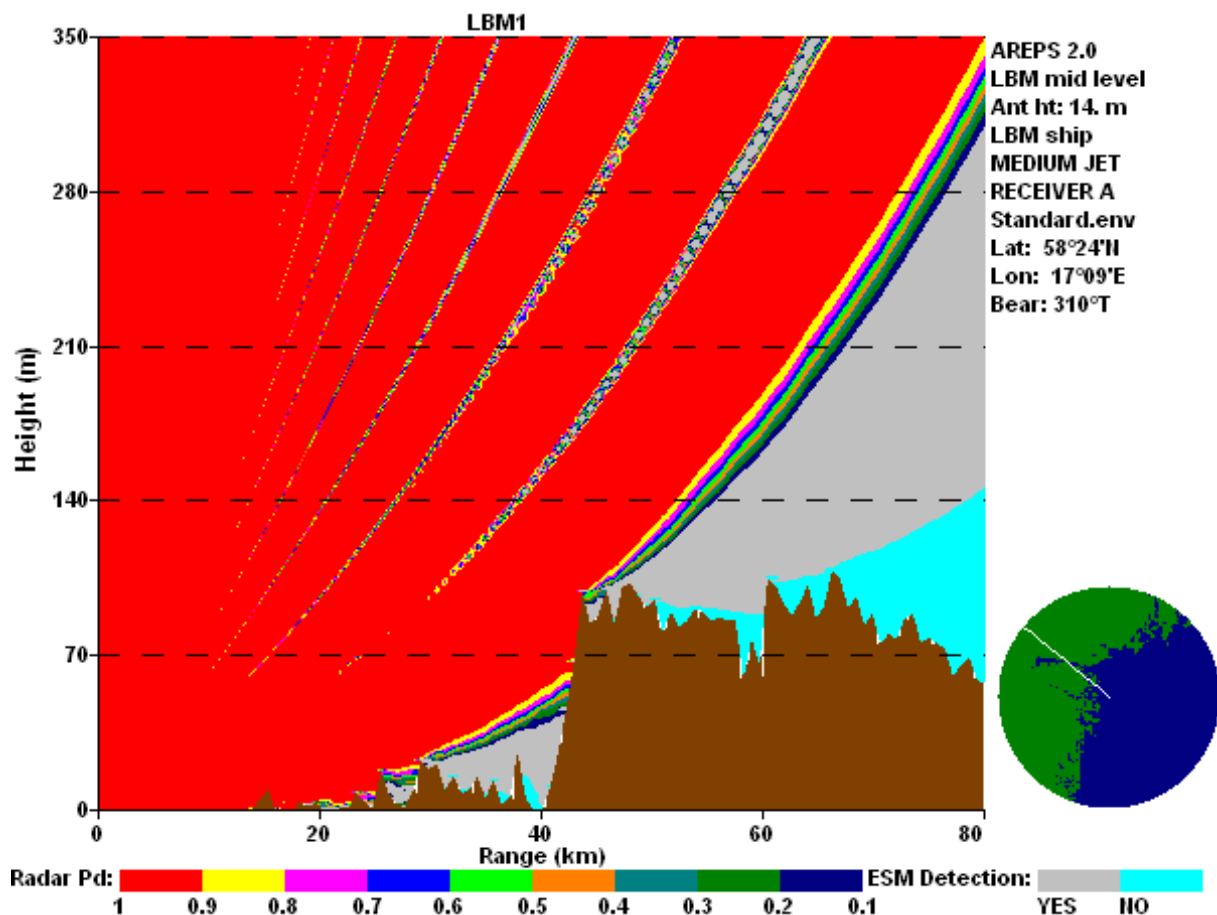


Figur 23 Exempel på en Raytrace-beräkning i AREPS.

De flesta verkliga mål uppvisar fluktuationer i radarmålärea. Dessa måste man ta hänsyn till när man beräknar signal/brusförhållandet. Swerling introducerade 1954 [Swerling, 1954 och 1960] fyra olika modeller för dessa fluktuationer. Swerling fall 1 och 2 gäller för komplexa mål som består av många oberoende spridande ytor, alla med ungefär samma storlek. Fallen 3 och 4 däremot gäller för mål med en stor reflekterande yta där det dessutom finns andra små reflektorer. I AREPS har detta förenklats till två fall, ett med helt stabil radarmålärea och Swerling fall 1. Den stabila radarmålärea säger man vara tillämpbar för fartygsmål och fall 1 för flygplansmål. Detta är en försiktig uppskattning som inte ger upphov till orimligt höga signal/brusförhållanden.

AREPS/APM täcker för närvarande frekvensområdet 100-20000 MHz. I AREPS tar man inte specifikt hänsyn till att regn, snö eller dimma kan påverka beräkningen. Enda möjligheten att få med inverkan av detta är att manuellt mata in ett gasdämpningsvärde som då utgör ett samlat mått på dessa effekter.

Sträckor som innehåller landavsnitt kan utnyttja höjddata från kartdatabaser eller manuellt inmatade höjdprofiler. AREPS stöttar kartformatet DTED (nivå 0, 1 och 2). Förutom höjddata kan AREPS hantera olika terrängtyper och följer ITU:s rekommendationer beträffande uppdelning i terrängkategorier.



Figur 24 Demonstration av AREPS förmåga att kombinera radar- och ESM-data i en beräkning där dessutom terrängen spelar en viktig roll. Beräkningen visar sannolikheten för upptäckt av ett mellanstort jetplan med en C-bandsradar på ett fartyg till havs under normal-atmosfärsförhållanden. Dessutom visas inom vilka områden en generisk ESM-mottagare (100-20000 MHz) förväntas upptäcka signaler.

I figur 24 demonstreras slutligen AREPS förmåga att kombinera olika verktyg där dessutom terrängen spelar en viktig roll. Beräkningen visar sannolikheten för upptäckt av ett mellanstort jetplan med en C-bandsradar till havs under normalatmosfärsförhållanden. Dessutom visas inom vilka områden en generisk ESM-mottagare (100-20000 MHz) förväntas upptäcka signaler. ESM-mottagaren kan i detta fallet upptäcka signaler som kommer från plattformar som ligger i radarskugga bakom den skuggande terrängen.

4.6 SEAWASP

Detta är ett system som kan liknas vid en kraftfullare variant av vårt Svenska LBM. Inom US Navy utvecklades detta system under lång tid med början runt 1984. De första testerna genomfördes 1993 och ett flertal fartyg har utrustats med systemet.

I systemet ingår primärt två subsystem, "Environmental Characterisation" och "Radar Performance Assessment subsystem". Basen i den första delen utgörs av två meteorologimaster, raketsonder, flytsonder och ett datainsamlings/bearbetningssystem. I masterna mäter man relativ fuktighet, vind-hastighet och -riktning vid en höjd av 9 meter över havsytan. I en av masterna finns dessutom GPS-antenn, kompass och IR temperatursensorer. Databearbetningen innehåller metoder för datautjämning, kvalitetskontroll, assimilering och modeller för att beräkna skikthöjd, främst avdunstningsskikt. Dessutom ingår ett expertsystem som automatiskt skall ge råd angående användningen av raketsonder respektive flytsonder. Data från masterna och flytsonderna används främst för estimering av avdunstningsskikt och data från raketsonderna för att karakterisera atmosfären ovanför avdunstningsskikten.

Vågutbredningsmodellen som används är PE-modellen TEMPER. Modellen används för beräkningar upp till ca 500 m och ut till 128 nautiska mil. Avsikten har tidigare varit att ersätta TEMPER med RPO och senare med APM, men uppgift saknas om detta har skett. Med de nyare modellerna räknar man med att kunna hinna med att täcka den använda radarns, AN/SPY-1, täckningsområde i realtid. Radarberäkningarna utförs med något som kallas AN/SPY-1 radar performance model (FIRMTRAK). Utöver detta finns ett speciellt utvecklat MMI-gränssnitt.

SEAWASP kan vara mycket lämplig att studera vidare eftersom detta system innehåller mycket av det som den svenska marinen kan tänkas vara intresserad av och ingår som en del av fartygets ledningssystem. Erfarenheterna från de omfattande försöken bör även dessa vara av stor nytta för en svensk utveckling.

4.7 De svenska systemen LBM och MUP

Under åren 1986-1988 utvecklade FOA två metoder - GIT och LBM - för att beräkna brytningsindex och analysera radio- och radarvågors utbredning. LBM [Karlsson m. fl., 1988] används för lokala beräkningar av vågutbredningsförhållandena för ett fartyg. För beräkning av brytningsindexprofilen utnyttjas en bulkmodell som hämtar indata från mätningar ombord på fartyget. Vågutbredningseffekterna beskrivs med hjälp av strålbågar och relativ räckvidd beräknas med utgångspunkt från radarhorisontekvationen.

Modellerna i LBM ger värdefull information om utbredningsförhållandena, men ingen direkt information om signalstyrka och från målet reflekterad energi och ingen tydlig beskrivning av nedre gränsen för de frekvenser som påverkas.

Vid utprovning 1987-1988 [Karlsson m.fl., 1989] med hjälp av radarobservationer gav LBM bra resultat i 75 % av fallen. LBM tycks klara övernormal radarutbredning bättre än

undernormal. Med de indata som mäts på fartyget kan LBM beräkna brytningsindex upp till ca 100 m höjd, i vissa gynnsamma vädersituationer kanske upp till ca 200 m, men i ogynnsamma vädersituationer endast till upp till 30 m höjd. Däröver antas att standardatmosfär råder. Avdunsningsledskikten, som ofta förekommer inom höjdintervallet 0- <40 m, kan därmed oftast predikteras. Dessa ledskikt påverkar speciellt frekvenser över ca 1 GHz om antennen ligger inom ledskiktet, och är anledningen till att LBM trots sin enkelhet ger bra resultat för radar.

Över ett innanhav som Östersjön förekommer ofta på sommarhalvåret så kallade "advektionsledskikt", på grund av att varm torr luft strömmar ut över kallare hav. Dessa skikt förstärker och utökar avdunsningsledskikten i vertikal led. Utprovningen 1987-1988 pekar på att LBM också hyggligt klarar advektionsledskikten. Advektionsledskikten kan nå över 100 m mäktighet och påverkar då också kommunikationsfrekvenser.

Ibland förekommer dock en annan typ av markbaserade ledskikt, speciellt i högtryck, med översida över 100 m höjd, som påverkar radarfrekvenser men också kommunikationsfrekvenser. Exempelvis fångar ett markbaserat ledskikt med en översida på 100 m frekvenser över ca 180 MHz och ett marbaserat ledskikt med en översida på 300 m kan fånga frekvenser över ca 35 MHz. Eftersom LBM inte har möjlighet att mäta lufttemperatur, luftfuktighet och lufttryck på högre höjd kan dessa ledskikt inte upptäckas. Detta är en av anledningarna till att LBM idag i allmänhet inte klarar av att förutsäga utbredningsförhållandena för kommunikationsfrekvenser. LBM kan inte heller prediktera inverkan från dessa höjdsikt vid radarutbredning, men detta får troligen inte så stor betydelse om det samtidigt finns ett avdunsningsledskikt eller advektionsledskikt med en översida som är högre än radarantennens höjd. De beskrivna ledskikten förekommer i högtryck och högtrycksryggar där luften sjunker ned mot havsytan genom så kallad "subsidents", varvid luften blir varmare och torrare. Det är dock inte helt klarlagt hur ofta de förekommer över exempelvis Östersjön. Däremot vet vi att de är vanliga i de subtropiska högtrycksområdena mellan 30° – 45° latitud, exempelvis i Medelhavet under sommarhalvåret. För att kunna beräkna vågutbredningsförhållandena för kommunikationsfrekvenser samt även kunna förbättra beräkningen för radarfrekvenser behövs alltså en metod att sondera upp till minst 500 m, gärna 1000 m höjd.

Eftersom LBM endast mäter indata lokalt i den punkt där fartyget befinner sig, kan LBM inte ta hänsyn till horisontella variationer i brytningsindex. Sådana variationer är vanliga vid kust och i skärgård och därför bör LBM idag endast tillämpas över öppet hav. Horisontella gradienter kan också förekomma genom att havsytans temperatur varierar i horisontell led på grund av att kallt djupvatten kommer upp till ytan vid frånlandsvind. Sådant förhållanden kan förekomma i Östersjön under perioden juni-september. Horisontella variationer kan också orsakas av luftmassors olika transportvägar samt av kallfronter och varmfronter.

Noggrann mätning av speciellt lufttemperatur, luftfuktighet och havsytans temperatur är en förutsättning för att LBM skall fungera bra. Havsytans temperatur bör mätas på högst 0.1 m djup i vatten som inte blivit omblandat, eftersom det kan förekomma vertikala temperaturgradienter i vattnet. Sådant är vanliga vid svag vind och soligt väder under sommarhalvåret. Dagens metod att mäta vattentemperatur med resistanstermometer medger i nuvarande LBM-installationer mätning på 0.5 – ca 1,0 m djup, vilket visat sig fungera acceptabelt. Ännu bättre resultat skulle troligen erhållas om man kunde införa en metod att mäta vattentemperaturen alldeles vid ytan.

Beräkning av radarutbredning i LBM görs i dag med hjälp av radarhorisontekvationen och strålbånor. Trots att signalstyrka inte beräknas kan dock en viss uppfattning om radarenergien erhållas genom att studera hur tätt strålbånor ligger i ett visst område. En grov beräkning av vilka frekvenser, över ett visst gränsvärde, som fångas av ledskikt görs med hjälp av förenklad vågledarteori (se kapitel 3.1). Ledskiktets inverkan på de lägre frekvenserna som inte helt fångas, kan dock inte klart specificeras, vilket är en andra anledning till att LBM i dag inte ger en tydlig diagnos av utbredningsförhållandena för kommunikationsfrekvenser.

GIT [Karlsson, 1989] används av försvarets vädertjänst för beräkning över ett större område och ingår numera i det så kallade MUP-systemet vid FM Vädercentral, se kapitel 2.8.2. GIT-modellen är 2-dimensionell och kan därför inte ge information i tre dimensioner.

Vågutbredningsförhållanden beskrivs med ledskikt och en strålbånomodell som kan ta hänsyn till horisontella gradienter i brytningsindex [Ladell, 1989].

5 Vågutbredningsberäkningar med AREPS och LBM

Genom att kombinera utdata från LBM med beräkningsmodellerna och de visuella hjälpmedlen i AREPS kan man redan i dag visa något av den funktionalitet ett framtida system skulle kunna tillföras. Beslutsstödsbegreppet omfattar många olika delar men AREPS innehåller bara en del av vad vi en framtid skulle vilja se ombord på ett fartyg och som del i ett modernt ledningssystem. Vi väljer därför här att främst visa ett av de enklaste men ändå en av de mest användbara redskapen, nämligen att plotta sannolikhet för målupptäckt som funktion av avstånd och höjd. I dessa bilder finns dessutom en mycket tydlig koppling till det radarsystem som finns ombord.

5.1 Översättning av brytningsindexprofiler från LBM till AREPS

För äldre versioner av LBM var det möjligt att, med visst besvär, konvertera brytningsindexprofiler till så kallade 'environment' filer användbara i AREPS. En vid FOI NBC-skydd hösten -00 framtagna Win32-baserad version av LBM har dock denna möjlighet inbyggd redan från början. Detta gör det mycket enkelt att koppla ihop meteorologidelen i LBM med vågutbredningsberäkningsdelen och presentationsdelen i AREPS.

5.2 Transmissionsförlust och sannolikhet för målupptäckt över hav

Nio olika typfall, se tabell 3, har valts ut för demonstration av hur data från brytningsindexberäkningen hos LBM kan kombineras med AREPS. Brytningsindexprofilerna är beräknade med den nya Windows-versionen av LBM. I alla nio typfall är vindhastigheten svag till måttlig, dvs. högst 6 m/s.

	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6	Fall 7	Fall 8	Fall 9
Havsyntans temperatur [° C]	0.0	11.8	12.3	10.3	7.0	12.3	12.3	12.3	12.3
Mäthöjd 1 [m]	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
Lufttemperatur [° C]	-5.0	11.9	12.3	11.8	10.0	13.0	13.4	13.5	13.5
Daggpunkt [° C]	-	11.3	8.7	6.8	-	11.0	11.0	11.0	11.0
Relativ fuktighet [%]	85	-	-	-	95	-	-	-	-
Mäthöjd 2, vind [m]	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4
Vindhastighet [m/s]	4.0	4.0	6.0	5.0	4.0	4.0	5.0	5.0	2.5
Beräknad ledskikthöjd [m]	3	1.5	9	70	--	17	22	43	30

Tabell 3 Data för de nio beräkningsfallen. På mäthöjd 2 mäts endast vindhastigheten.

Upptäcktssannolikheten har beräknats för tre olika fiktiva mål;

- Mindre fartyg, typ kustkorvett, ett stabilt mål med målarean 1000 m²
- Smygfartyg, mycket hög klass, ett stabilt mål med målarean 10 m²
- Kryssningsmissil, fluktuerande mål (Swerling, fall 1) med målarean 0.01 m²

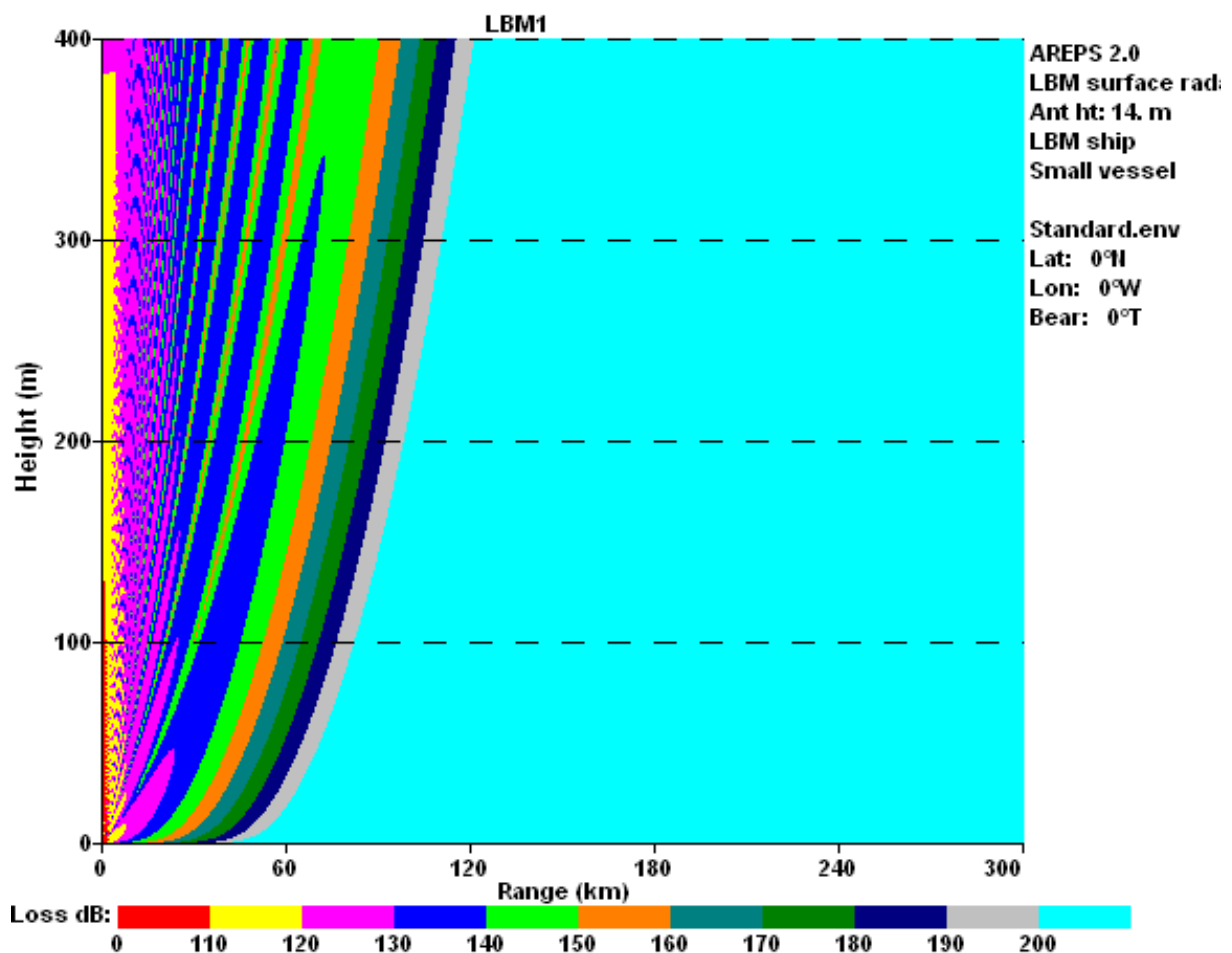
Dessa fiktiva mål är avsiktligt grovt tillryggade och har bara en vag anknytning till verkliga målareor. Dessutom är målen definierade med samma målarean oavsett aspektvinkel, polarisation och frekvens vilket normalt inte är med sanningen överensstämmande.

Vid beräkningen har en fiktiv C-bands (5 GHz) radar använts. Denna skall motsvara en fartygsradar avsedd främst för spaning mot ytmål och sitter på en höjd av 14 m.

För referensändamål visas i figur 25 transmissionsförlusten, L_b dvs. mediets utbredningsdämpning, vid normalatmosfärsförhållanden.

Figur 19-30 visar beräkningar utmed en sträcka av 300 km för höjder upp till 400 m. Den fiktiva radarn har en instrumenterad räckvidd på 50/100 km men för att åskådliggöra de överräckvidder som kan förekomma har vi valt att visa beräkningsresultat ut till 300 km.

I a-delen av figur 27, 29, 31, 33, 35 och 37 visas transmissionsförlusten, L_b , dvs. mediets utbredningsdämpning. Transmissionsförlusten visas i 10 dB intervall. I samma figurers b-c del visas upptäcktssannolikheten, P_d , för de tre målen. Intervallet mellan färgerna motsvarar 0.1 enheter av P_d , där 1 motsvarar 100% sannolikhet för detektion.

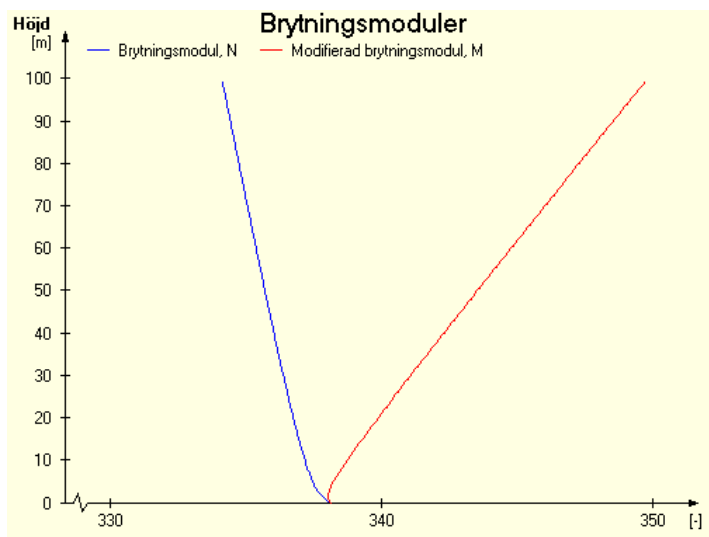


Figur 25 Transmissionsförlust vid normalatmosfärsförhållanden ut till 300 km och upp till 400 m för antennhöjden 14m. Observera att transmissionsförlusten anges i 10 dB intervall mellan 110 och 200 dB.

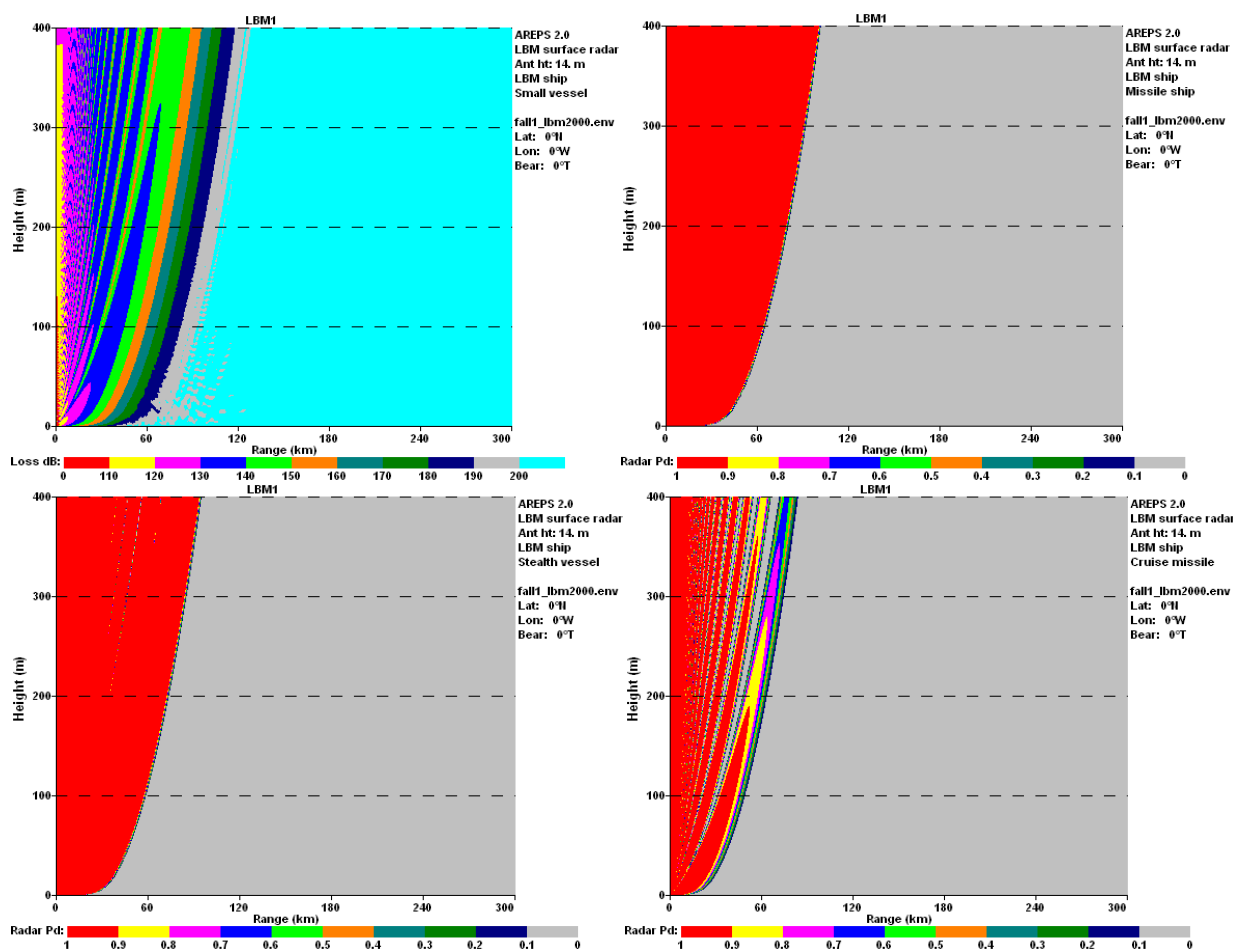
5.2.1 Typfall 1

Detta fall karakteriseras av att kall luft under vintern strömmar ut över öppet hav. Havsytan är betydligt varmare än luften, så kallad instabil skiktning. Detta symboliserar ett normalfall över hav där vi har ett lågt avdunstningsskikt (ca 3m högt) men i övrigt normalatmosfär, se figur 26.

Det låga avdunstningsskiktet ger upphov till de något förhöjda signalnivåer som kan studeras i figur 27a (190-200 dB under 100 m och ut till ca 120 km). Skiktet ger dock i detta fallet ingen eller mycket liten påverkan på radarns räckvidd. Den relativt lilla skillnaden i radarmålarearea mellan de fiktiva fartygen ger inte upphov till någon nämnvärd skillnad i upptäcktssannolikhet i det visade höjdintervallet. Förmågan att upptäcka kryssningsroboten nere vid ytan är nästan lika stor som för de övriga målen men avtar med höjden.



Figur 26 Brytningsmoduler för typfall 1.

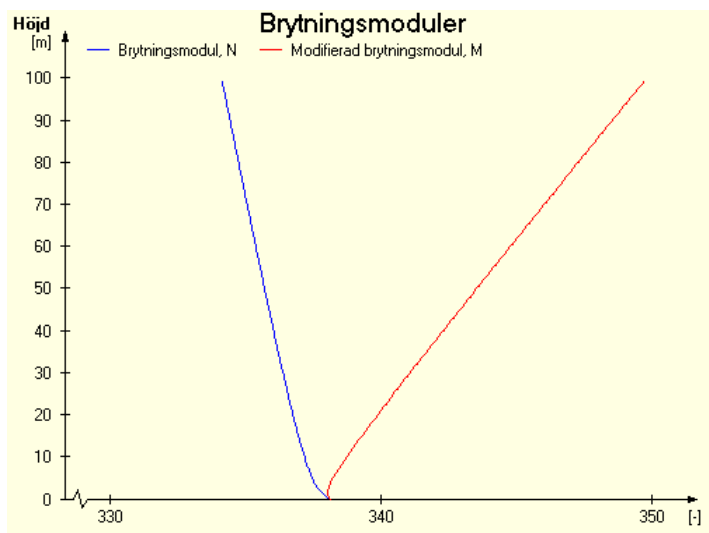


Figur 27 Typfall 1. Upp till vänster visas transmissionsförlust (a), upp till höger sannolikhet för detektion för ett mindre fartyg (b), ner till vänster sannolikhet för detektion för ett smygfartyg (c) och ner till höger sannolikhet för detektion för en kryssningsrobot (d).

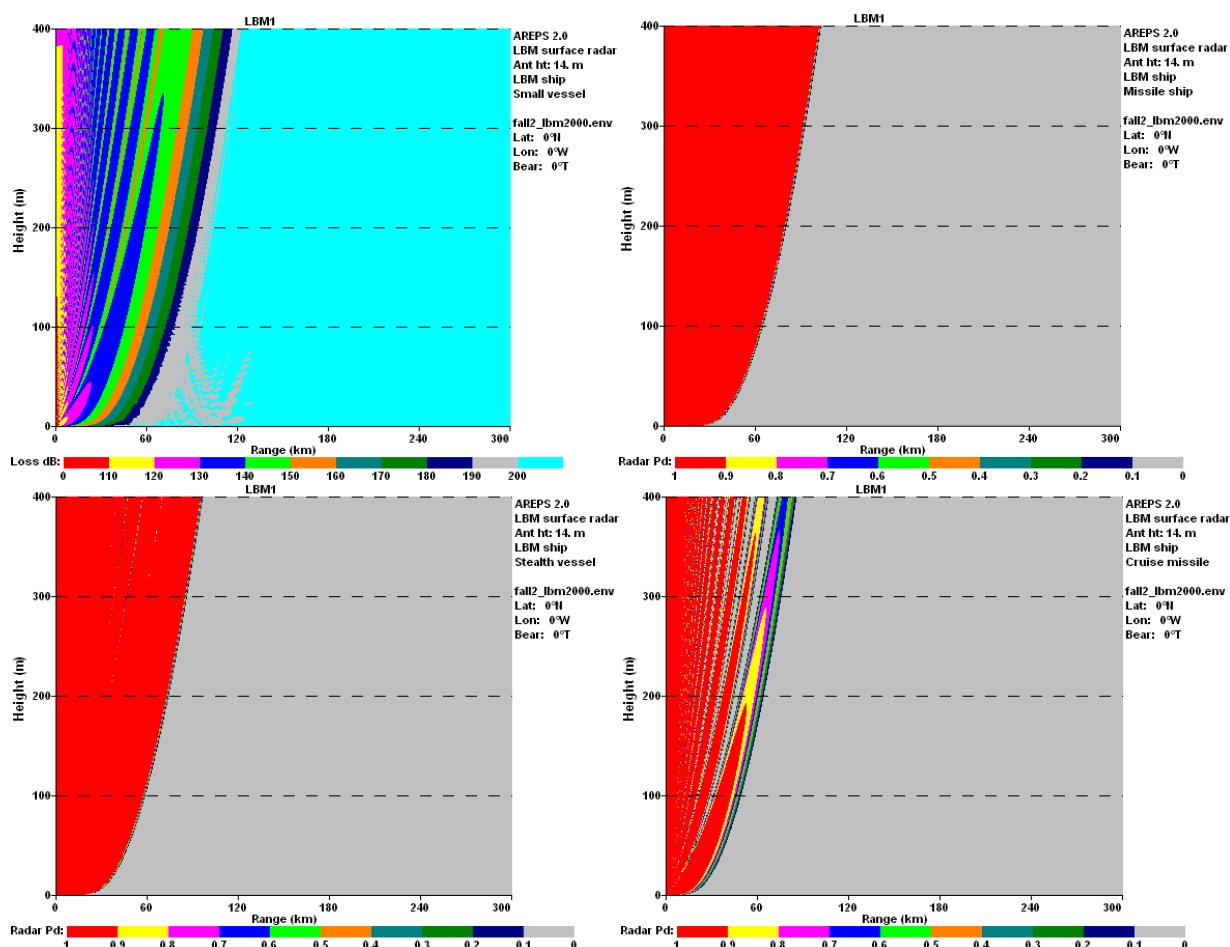
5.2.2 Typfall 2

I detta fall är havsytans temperatur och lufttemperaturen ungefär samma samt att luftfuktigheten är hög. Detta inträffar till exempel efter att luften strömmat lång sträcka över hav, så kallad neutral skiktning. Även här får vi ett lågt avdunstningsskikt (ca 1.5 m högt), se figur 28.

Det låga avdunstningsskiktet ger även här upphov till de förhöjda signalnivåer som kan studeras i figur 29a (190-200 dB under 150 m och ut till ca 120 km). Skiktet ger även i detta fallet ingen påtaglig påverkan på radarns räckvidd. I övrigt se typfall 1.



Figur 28 Brytningsmoduler för typfall 2.

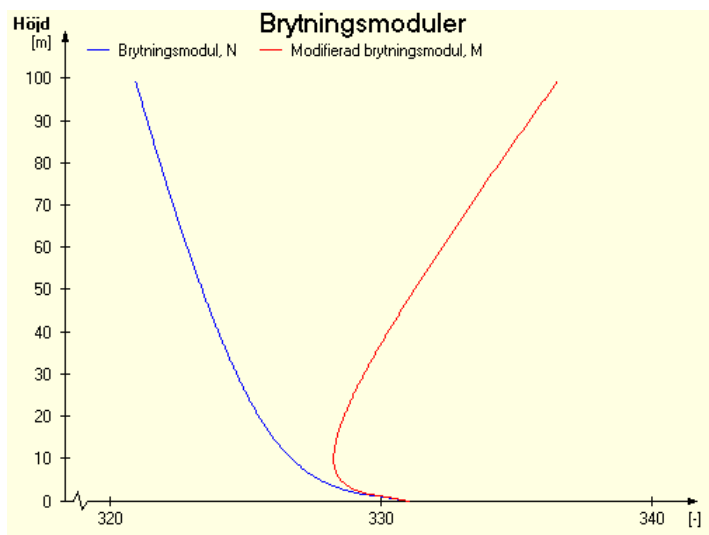


Figur 29 Typfall 2. Upp till vänster visas transmissionsförlust (a), upp till höger sannolikhet för detektion för ett mindre fartyg (b), ner till vänster sannolikhet för detektion för ett smygfartyg (c) och ner till höger sannolikhet för detektion för en kryssningsrobot (d).

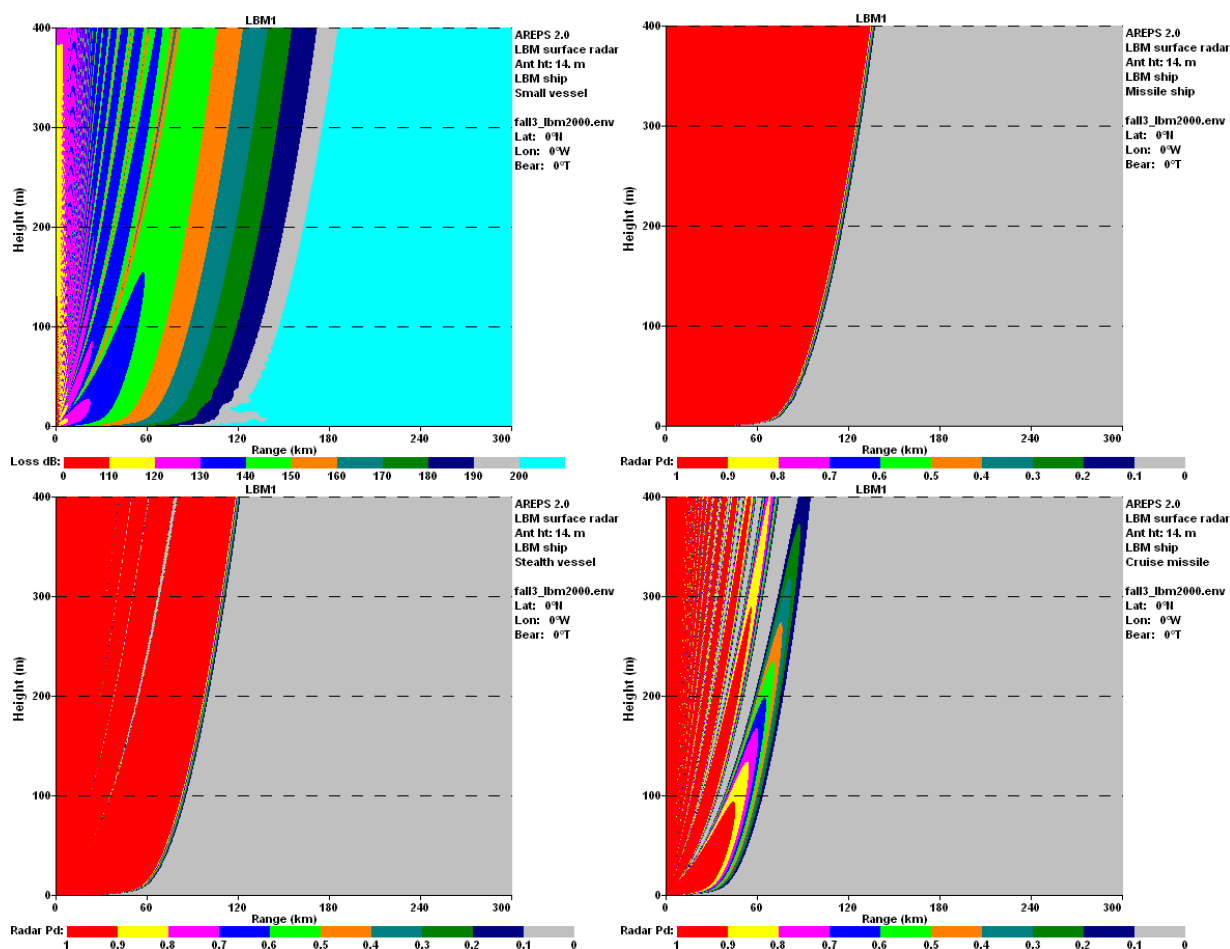
5.2.3 Typfall 3

Såsom i typfall 2 har havsytan och luften samma temperatur, så kallad neutral skiktning, men i detta fall är luften relativt torr. Detta inträffar när torr, kylig luft under sommarhalvåret (ofta norrifrån) strömmar ut över hav, se figur 30.

Den torra luften ger upphov till ett ledskikt med ca 9 m höjd. Här sker en inlåsning av radarenergin, men kopplingen är inte så stark på grund av att antennhöjden är 14 m (över skiktet). Ledskiktet ger dock en räckviddsökning, mot alla tre målen, av storleksordningen 2 ggr längs havsytan och på låg höjd, se figur 31.



Figur 30 Brytningsmoduler för typfall 3.

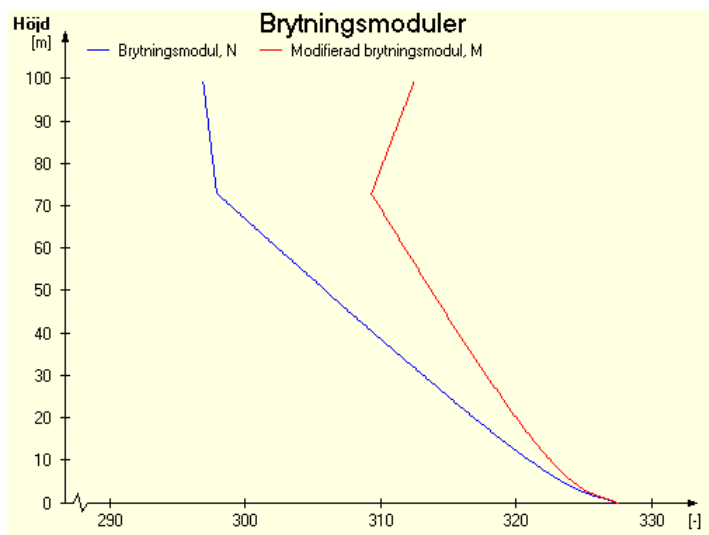


Figur 31 Typfall 3. Upp till vänster visas transmissionsförlust (a), upp till höger sannolikhet för detektion för ett mindre fartyg (b), ner till vänster sannolikhet för detektion för ett smygfartyg (c) och ner till höger sannolikhet för detektion för en kryssningsrobot (d).

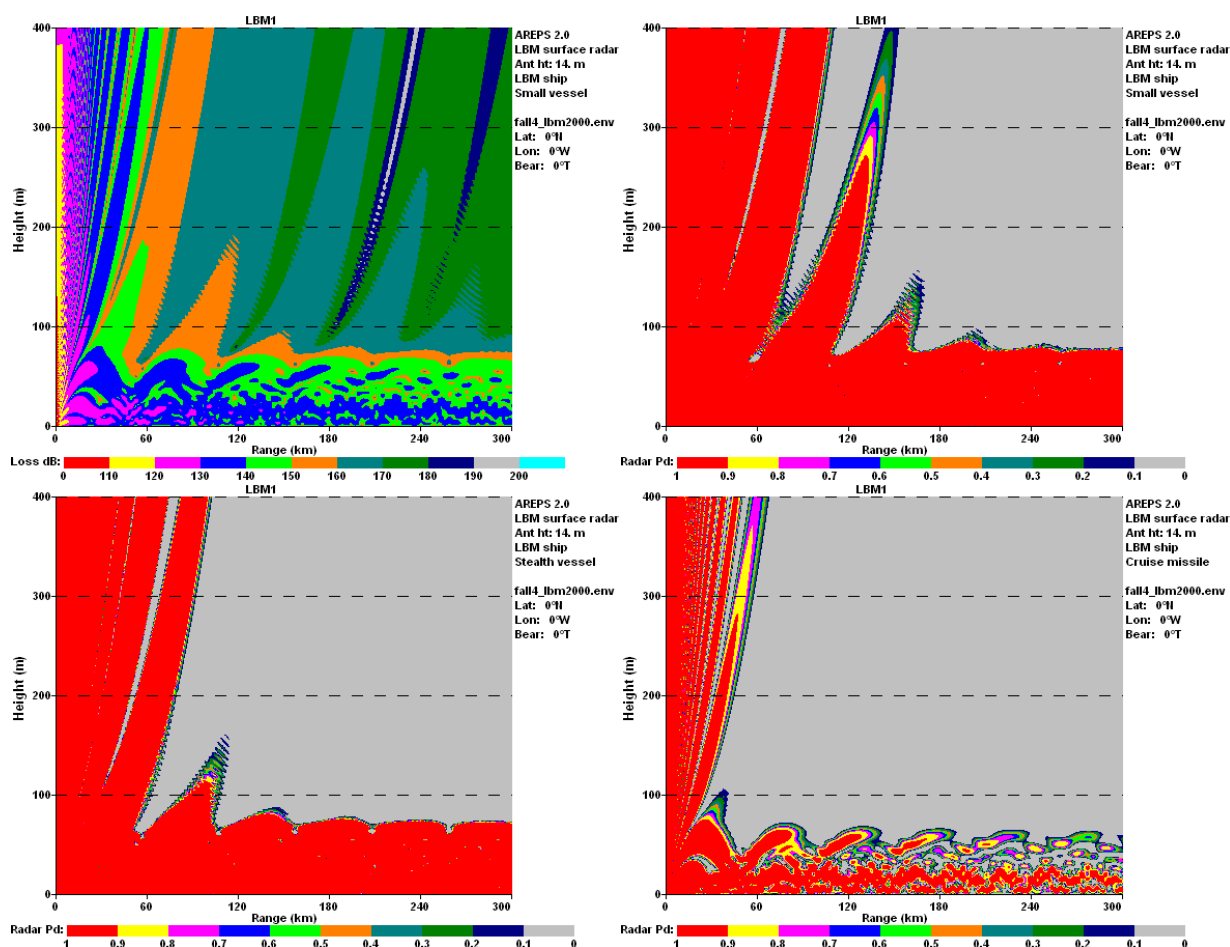
5.2.4 Typfall 4

I detta fall är havet kallare än luften och luften är torr. Detta är vanligt på vår/försommar när varm torr luft från land strömmar ut över ett kallare hav, så kallad stabil skiktning, se figur 32.

LBM ger att ledskikt råder minst upp till ca 70 m höjd. Däröver kan LBM inte uppskatta hur profilen ser ut och antar normalatmosfär. Detta bör man ha i åtanke när man studerar den kraftiga räckviddsökningen i figur 33. Räckviddsökningen kan i verkligheten gå ännu högre upp i höjd och räckviddsprognosen blir osäker. Detta är ett bra exempel på tillfällen då dagens LBM behöver kompletteras med indata för högre höjder.



Figur 32 Brytningsmoduler för typfall 4.

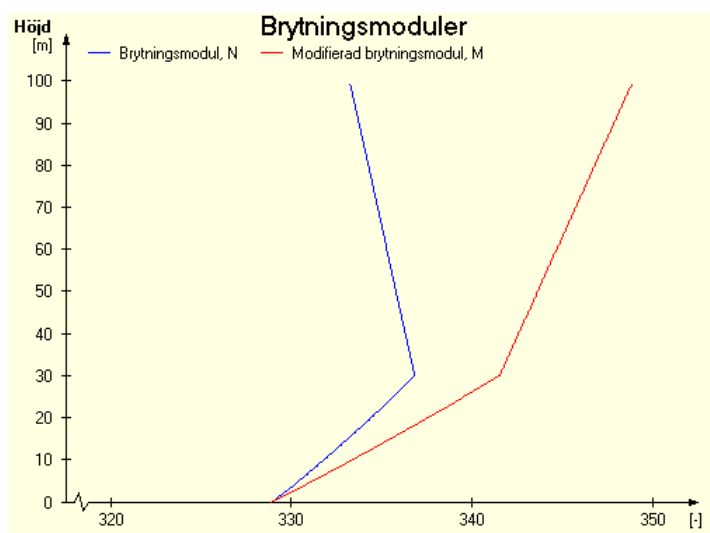


Figur 33 Typfall 4. Upp till vänster visas transmissionsförlust (a), upp till höger sannolikhet för detektion för ett litet fartyg (b), ner till vänster sannolikhet för detektion för ett smygfartyg (c) och ner till höger sannolikhet för detektion för en kryssningsrobot (d).

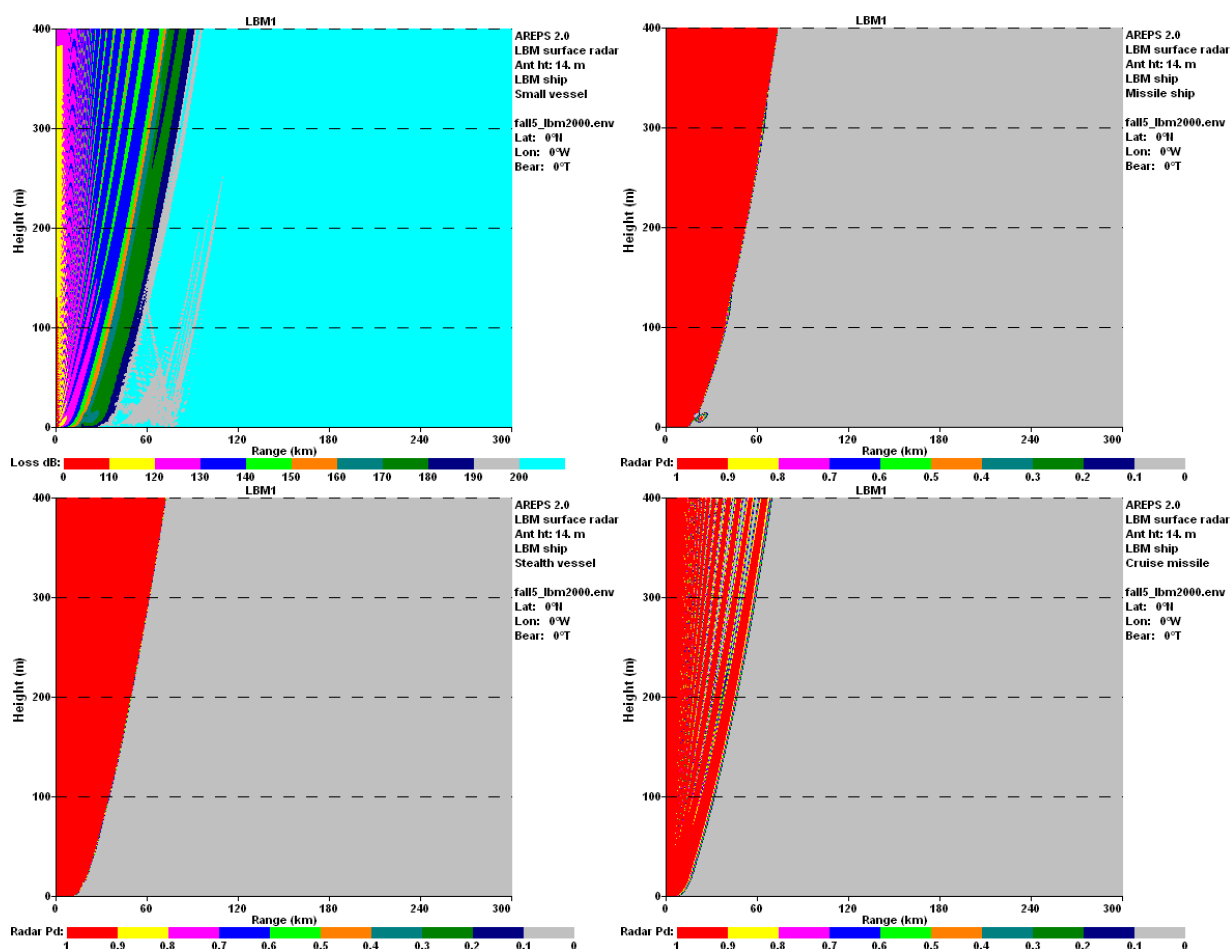
5.2.5 Typfall 5

Liksom i typfall 4 är havet kallare än luften och stabil skiktning förekommer. Till skillnad mot typfall 4 är däremot luftfuktigheten mycket hög. Detta kan inträffa när varm fuktig luft från söder strömmar norrut över kallare hav, eller efter nederbörd. Dimma kan förekomma, se figur 34.

På grund av den höga luftfuktigheten bildas inget ledskikt utan undernormal utbredning förekommer med ca 50% av räckvidden i normal-atmosfärfallet, se figur 35.



Figur 34 Brytningsmoduler för typfall 5.

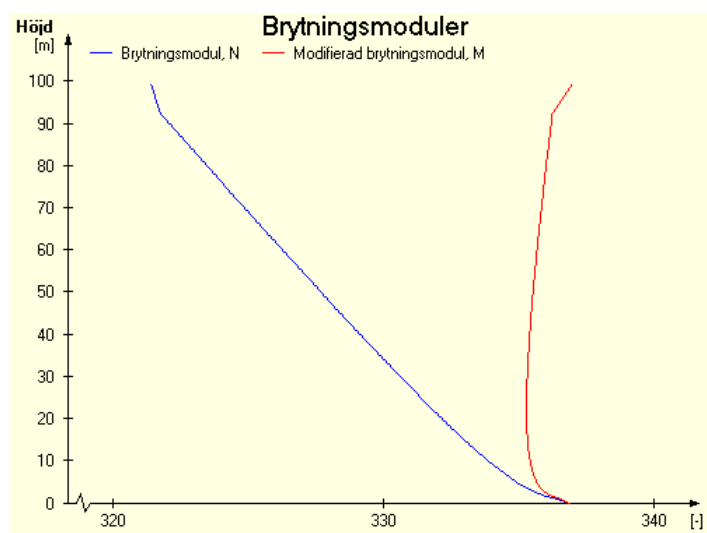


Figur 35 Typfall 5. Upp till vänster visas transmissionsförlust (a), upp till höger sannolikhet för detektion för ett mindre fartyg (b), ner till vänster sannolikhet för detektion för ett smygfartyg (c) och ner till höger sannolikhet för detektion för en kryssningsrobot (d).

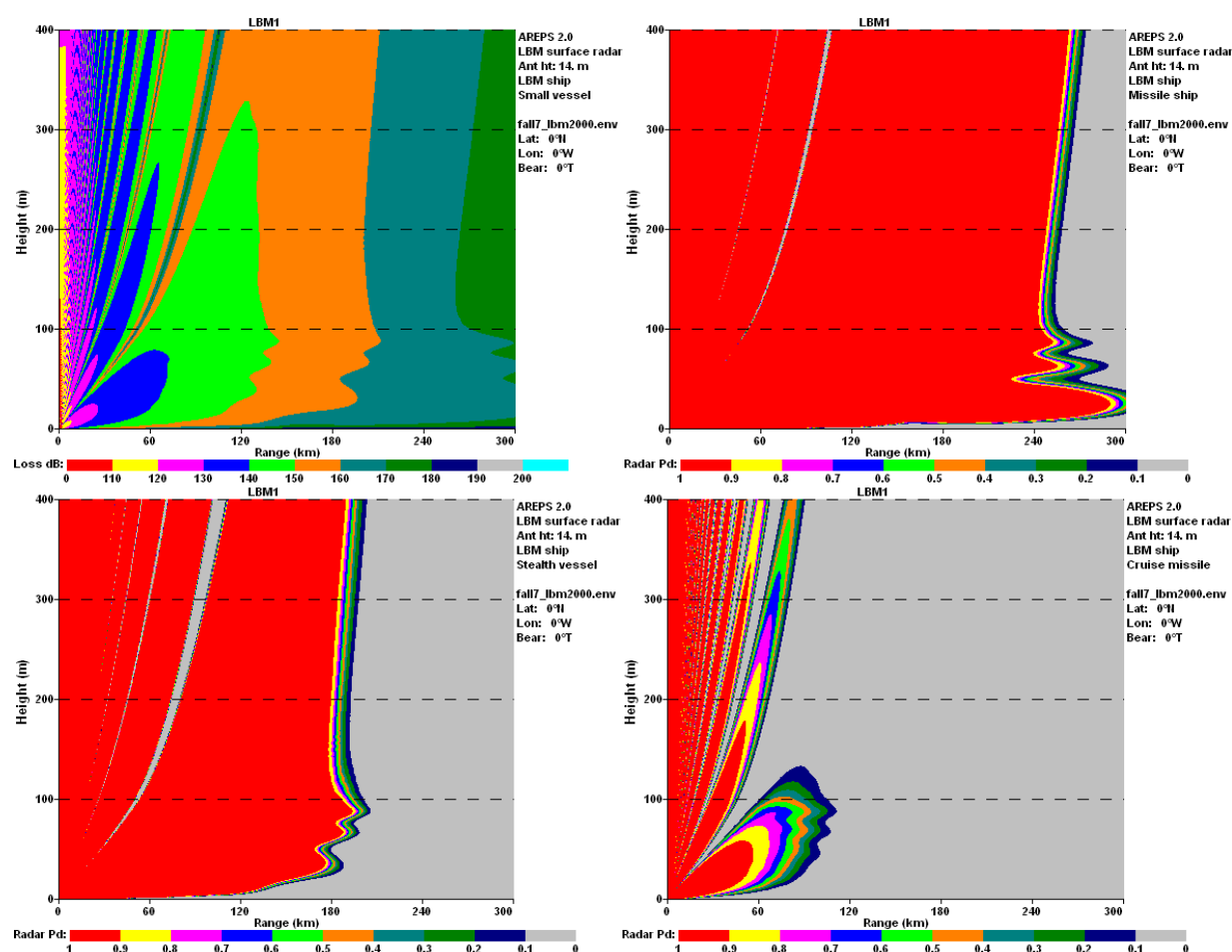
5.2.6 Typfall 6-9

I typfallen 6-9 är luften något varmare än havsytan, det vill säga så kallad stabil skiktning. Luftfuktigheten är måttlig. Detta förkommer när varmluft från land strömmat en längre sträcka över kallare hav. Små ändringar i temperatur eller vindhastighet kan ge betydande förändringar av ledsiktets höjd och utbredningsförhållandena kan skilja sig en hel del mellan de olika fallen, se tabell 3. Som exempel visas här typfall 7 i figurerna 36-37. Här erhålles en svag ökning av räckvidden utmed ytan och en kraftig ökning av räckvidden på höjder över ca 20 m.

Om fartygen kommer att upptäckas beror på hur högt deras huvudsakliga målarea ligger relativt havsytan. I ett för fartygen gynnsamt läge kan detta betyda att radarns räckvidd blir jämförbar med räckvidden i normalatmosfär. En kryssningsrobot på låg höjd (10-130 m) riskerar att upptäckas något tidigare än på högre höjd. För typfall 8-9 med ledsikt ≥ 30 m blir



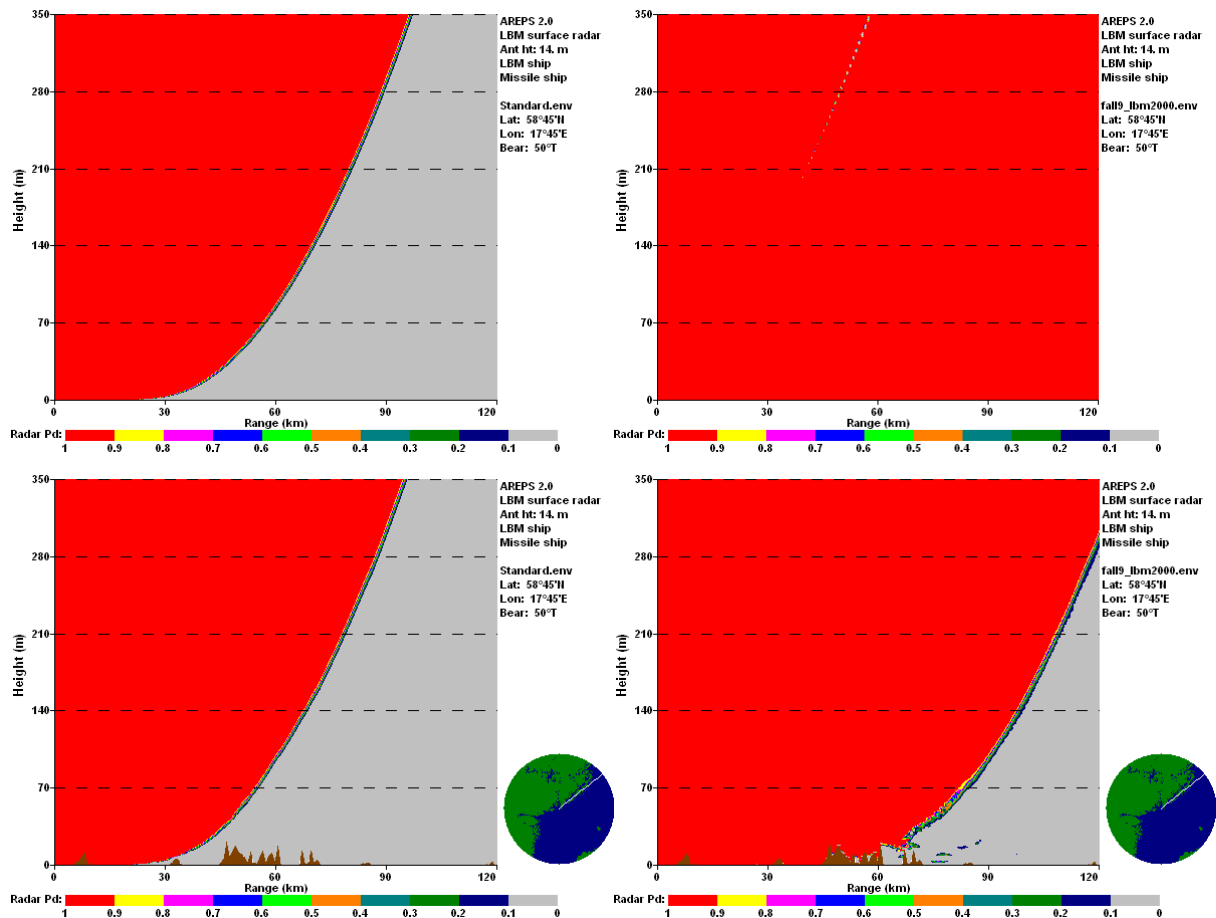
Figur 36 Brytningsmoduler för typfall 7.



Figur 37 Typfall 7. Upp till vänster visas transmissionsförlust (a), upp till höger sannolikhet för detektion för ett mindre fartyg (b), ner till vänster sannolikhet för detektion för ett smygfartyg (c) och ner till höger sannolikhet för detektion för en kryssningsrobot (d).

räckvidden längs ytan betydligt större och liknar typfall 4.

5.3 Radarräckvidd i skärgårdsmiljö



Figur 38 Inverkan av terräng på sannolikheten för målupptäckt. I de två övre delfigurerna visas beräkning över öppet hav, i de två lägre visas motsvarande beräkning i skärgård (centrum på den lilla infällda kartan, som motsvarar sträckans startpunkt, är straxt SV om Nynäshamn) Den vänstra figuren gäller för normalatmosfär och den till höger med ett avdunstningsskikt enligt typfall 9.

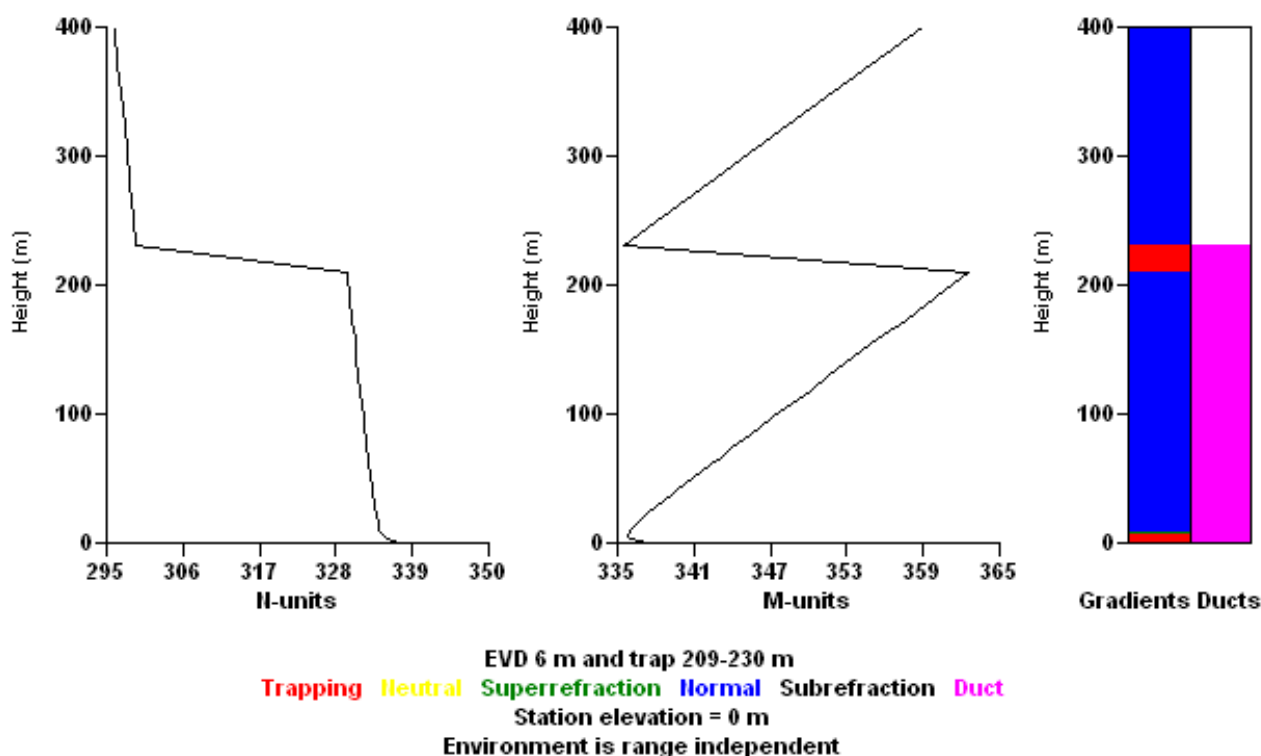
I figur 38 visas beräknad upptäcktssannolikhet för en C-bandsradar i två olika troposfärsituationer för mål (mindre fartyg, typ kustkorvett) som befinner sig i olika terrängtyper, dels över hav, dels i skärgårdsmiljö. Förutom normalatmosfär visas beräkningar enligt typfall 9 (ett ca 30 m tjockt avdunstningsskikt).

För beräkningen i skärgård har vi använt den öppna DTED databasen (nivå 0 med en upplösning i sida på 1000 m). Behovet av att ha tillgång till terrängdata och att kunna utföra denna typ av beräkning med hänsyn till terrängen åskådliggörs mycket tydligt i figurens nedre högra del. Här upphävs mycket av den kraftiga överräckvidd som avdunstningsskiktet ger över öppet hav. Detta sker trots att huvuddelen av sträckan går över vatten. Orsaken till detta är den diffraktion som uppstår över öarna.

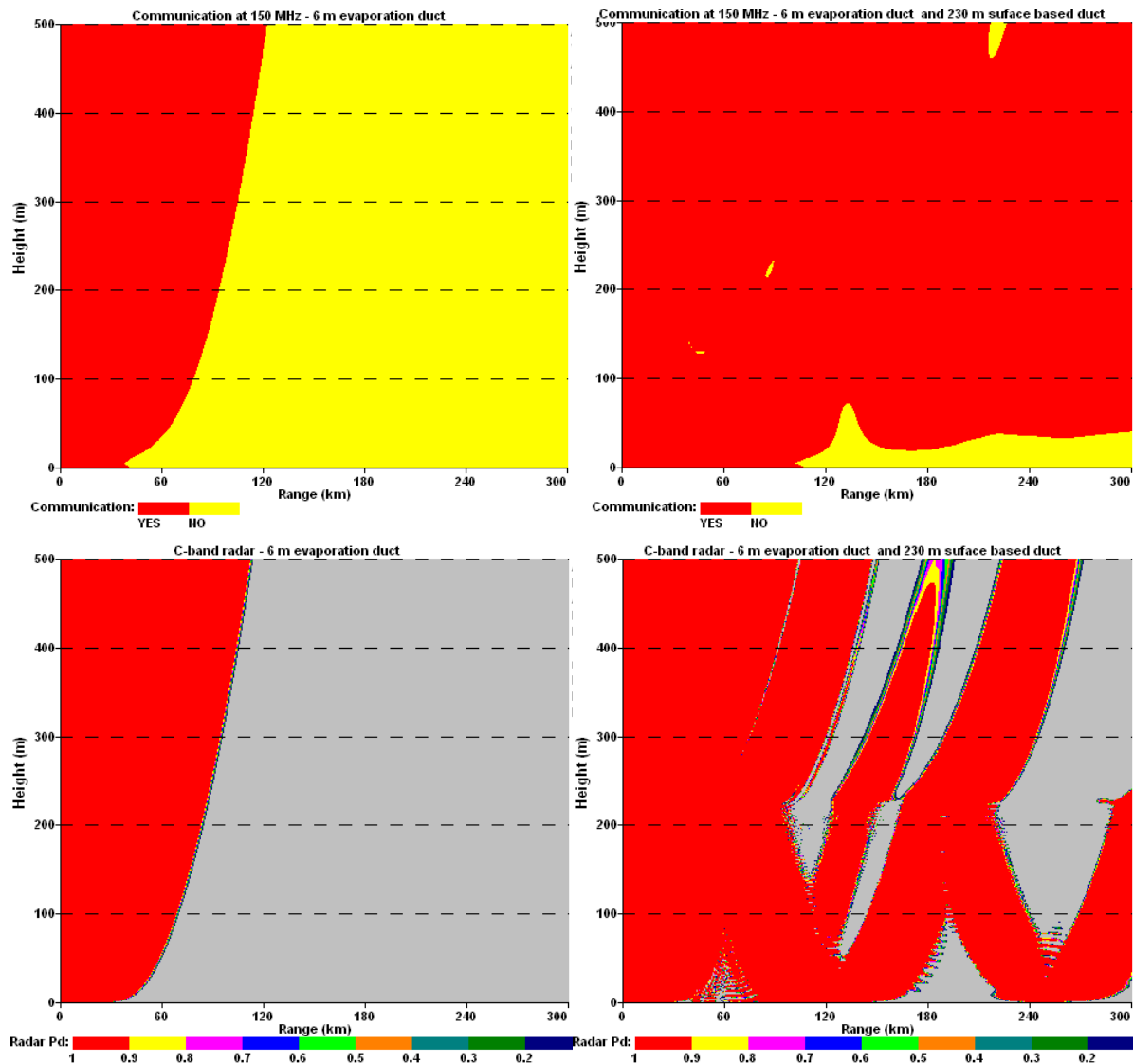
5.4 Inverkan av skikt på högre höjd än vad LBM kan upptäcka

LBM kan i dag inte klara av att prediktera skikthöjder högre än ca 100 m (ibland inte högre än 30 m). Meteorologiska situationer där det föreligger både ett lågt avdunstningsskikt (ex 10 m) och ett markbaserat skikt på höjd över 100 meter är inte alltför ovanliga. Figur 39 visar som exempel på detta brytningsindexprofiler för ett fall där det föreligger ett svagt avdunstningsskikt med höjden ca 6 m samtidigt som det finns ett markbaserat ledskikt med översida vid 230 m, orsakat av en temperaturinversion och ett fuktighetsavtagande mellan 209 och 230 m.

I figur 40 visas inverkan av detta dels på ett kommunikationssystem vid 150 MHz och dels på en C-bandsradar. De två vänstra delfiguren visar först situationen med enbart ett svagt avdunstningsskikt med höjden ca 6 m. Detta skikt ger en liten ökning av räckvidden relativt standardatmosfär. I de högra delfiguren föreligger markbaserat ledskikt enligt figur 39. Figuren visar tydligt behovet av en i höjddel mer heltäckande modellering av brytningsindex.



Figur 39 Brytningsindexmodul (N) och modifierad brytningsindexmodul (M) för beräkningen i figur 40. Bilden är hämtad från AREPS refractive summary.



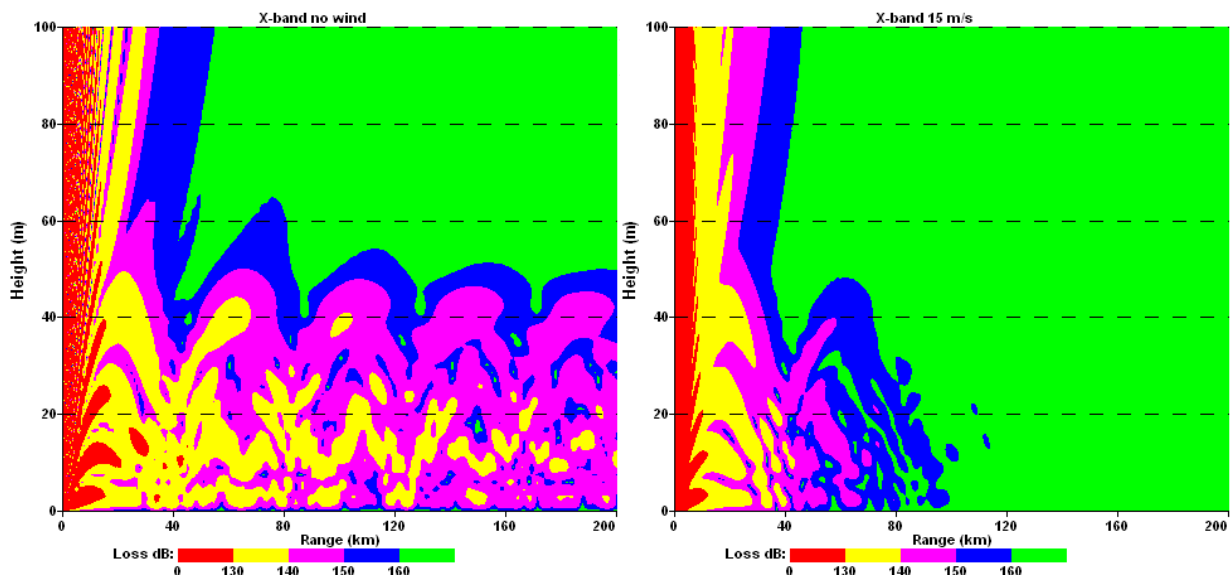
Figur 40 Inverkan av skikt som ligger ovanför vad bulkmodellen i LBM kan predicera. Överst visas kommunikationsmöjligheterna för ett typiskt marint kommunikationssystem på VHF (150 MHz) och därunder upptäcktsannolikheten för en C-bandsradar mot ett mindre fartyg (kustkorvett). De två vänstra delfigurerna visar situationen med ett svagt avdunstningsskikt med höjden ca 6 m. I de högra delfigurerna föreligger ett markbaserat ledskikt med en översida på 230 m.

5.5 Vindens inverkan på beräkningar till havs

Förutom att vindstyrkan ingår som en viktig parameter vid beräkning av avdunstningsskikt med hjälp av bulkmodeller kommer vinden även att ge upphov till variationer i radio- och radarvågutbredningen och därmed även förmågan till målupptäckt. När det är vindstilla fungerar havsytan som en bra reflektor och ger därmed upphov till flervägsutbredning. Med tilltagande vindstyrka blir havsytan skrovligare och därmed minskar ytans reflekterande egenskaper och reflektionen ersätts av diffus spridning. Vindstyrkans inverkan på vågutbredningen visas i figur 41a och 41b. I figuren visas transmissionsförlusten på X-bandet (10 GHz) upp till 100 meters höjd och ut till 200 km. Ett markbaserat troposfärskikt med höjden 50

m föreligger och antennen sitter på 14 meters höjd. I denna beräkning har vi för enkelhetens skull antagit att troposfärskiktet är lika i de båda fallen trots att den relativt starka vinden i verkligheten troligen skulle förändra skiktets struktur och troligen även dess höjd. I Figur 41a är det vindstilla och i figur 41b blåser det med en hastighet av 15 m/s. I det senare fallet uppskattas våghöjden (dess RMS-värde) till ca 1 m.

Den markanta räckviddsökningen som råder under vindstilla förhållanden minskar kraftigt vid vindstyrkan 15 m/s eftersom reflektionen från havsytan minskar. Effekten är dessutom frekvensberoende och är mindre påtaglig vid C-band.



Figur 41 Inverkan av vind vid X-band (10 GHz). Till vänster råder vindstilla, till höger blåser det med ca 15 m/s. I båda fallen är antennen på 14 meters höjd och ett markbaserat skikt föreligger upp till 50 meters höjd.

6 Slutsatser och förslag

6.1 Allmänt

Sedan LBM utvecklades i slutet av 1980-talet har möjligheten att beräkna atmosfärens inverkan på signaldämpning, räckvidd, upptäcktsavstånd mm kraftigt förbättrats under förutsättning att brytningsindexförhållandena är kända. Orsaken är främst utvecklingen av PE-modellerna. Dessa modeller ger också bättre möjlighet att beräkna effekter av terräng, kust och öar. Modellerna kan även tillämpas på kommunikationsfrekvenser eftersom modellerna bland annat hanterar frekvensberoende effekter. När det gäller bestämning av brytningsindex i vertikal led, lokalt över en viss punkt på markytan, har också möjligheterna förbättrats sedan slutet av 1980-talet. Bättre möjlighet finns tex. för punktmätning av temperatur och fuktighet, sondering med raket- eller ballongsond och mätning av havsytans temperatur med IR-termometer. Sondering till ca 500 m höjd eller mer är speciellt viktigt för kartläggning av utbredningsförhållandena för kommunikationsfrekvenser. Möjligheten att bestämma horisontella variationer av brytningsindex och variationer med tiden är dock fortfarande begränsad. Vissa lösningar kan dock skönjas, exempelvis mesoskaliga meteorologiska modeller och fjärranalys med befintliga sändare som GPS, radio/TV-sändare, radarstationer,

vilka kan ge ett medelvärde av brytningsindex mellan sändare och mottagare, samt fusion av data från många olika källor. Den klassiska bulkmodellen som finns i LBM kan också, till viss del, förbättras.

6.2 Förslag till fortsatt verksamhet - systemgenerationen bortom dagens LBM

Förslag rörande anskaffning av sensorer och datorprogram direkt kopplade till LBM diskuteras av Karlsson mfl [2000] och tas inte upp här. Ett framtida system måste vara helt integrerat i fartygets ledningssystem. Nya beslutsstödsverktyg, exempelvis av den typ AREPS innehåller bör tas i bruk för att förenkla och förbättra beslutsprocessen. Beslutsstödsfunktionerna bör även adaptivt kunna anpassas till operatörens kunnande och belastning.

Indata till beslutsprocessen kommer i ett framtida scenario inte endast från sensorer ombord på det egna fartyget. Att ta emot och utnyttja information från andra enheter och att vidarebefordra egen information medför en övergång från plattformstänkande till ett nätverksorienterat tänkande. Genom datafusion av information från olika sensorer (egna och andras), utnyttjande av utdata från meteorologiska modeller, mätning av kända sändare, analys av GPS-information samt utnyttjande av kartdata erhålles en tredimensionell beskrivning (i rummet) av scenario och miljö. Detta medför nya möjligheter att anpassa stridsteknik och taktiskt uppträdande. Det ger också ett stöd för hotvärdering av sensorer (egna och andras) och mot-medelssystem. De meteorologiska modellerna kan också ge en prognos över utvecklingen 0-48 timmar framåt i tiden. Statistisk information om ledskikt och utbredningsförhållanden behöver insamlas och sammanställas som underlag för planering på lite längre sikt.

Ett väl utvecklat stödsystem av den art vi skissat härövan är dessutom ett måste när fartygen skall operera i okända farvatten som är fallet vid internationella operationer.

Följande delar bör ingå i ett framtida system;

- Databashantering (radarsystem, ESM-system, kommunikationsutrustning, väderdata, ledskikts/utbredningsstatistik, terrängdata).
- Automatisk datainsamling från meteorologiska sensorer ombord.
- Meteorologiska modeller.
- Datafusion med brytningsindexdata från externa källor (välbestämda sändarstationer, GPS, fjärranalys,).
- Värderingsmodul för väderdata.
- Vågutbredningsberäkning baserad på en PE-hybridmodell.
- Beräkningsmoduler för radar, ESM och kommunikation.
- Beslutsstödsfunktioner med varning för brister i indata (tillförlitlighetsanalys) och adaptiv anpassning till operatörens förmåga.
- Stöd även för akustiska och elektrooptiska system (främst de meteorologiska delarna har stora likheter med vad som gäller för radio/radar).

Detta kan givetvis inte nås på en enda gång. En del av detta föreslås genomföras som en del av en vidareutveckling av LBM. Detta gäller exempelvis sensorer, statistik, meteorologiska modeller och vågutbredningsmodeller. En mer detaljerad beskrivning och en lämplig tågordning diskuteras av Karlsson m.fl [2000]. Andra delar fordrar forskning/utveckling/anpassning i det nuvarande forskningsprojektet vågutbredningsanalys och diskuteras i följande avsnitt.

6.2.1 *Sensorer*

I dag finns ingen metod på svenska fartyg att mäta brytningsindex över ca 100 m (ibland endast 30 m) höjd. Därför föreslås en sonderingsmetod som i första hand klarar 0-500 m och gärna även upp till 1000 m. Möjlighet att använda raket med sond som faller ned med fallskärm bör därför utvärderas/prövas. Detta omfattar exempelvis studier av meteorologiska, modellmässiga och handhavandemässiga frågor men även frågor som rör hur fartygets smygegenskaper påverkas av telemetrisignalen från sonden och sondens radarmålarea. Andra tänkbara möjligheter är ballongsond, helikopter- eller UAV-baserad sond. Metodik att konsekvent integrera (koppla samman) bulkmätningarna och höjdsonderingarna måste utvecklas och anpassas.

Genom att havsyttans temperatur är en mycket kritisk parameter för bulkmodellernas noggrannhet bör alternativ till dagens metoder prövas och utvärderas, tex IR-termometer. Därvid bör man också studera hur felkällor som solstrålning och reflekterad IR-strålning kan undvikas. Automatstationer i form av utlagda bojar som mäter vattentemperatur, lufttemperatur, luftfuktighet och vindhastighet skulle i framtiden kunna ge kontinuerlig information och underlag för beräkning av vågutbredningsförhållanden och statistik över ledskiktsförhållanden.

Möjligheten att komplettera brytningsindexinformationen från bulkmodellen med information från fjärranalys med radiosignaler bör undersökas vidare. Den teknik som bedöms mest mogen för detta ändamål är att använda information från befintliga markbaserade radiosändare. I ett första steg kan det t.ex. vara radio- och TV-sändare i frekvensområdet 100-1000 MHz, belägna på lämpliga platser längs kusten. Genom sådan fjärranalys kan viktig information om troposfärskikt i höjdintervallet 100-1000 meter erhållas. Dessa skikt kan normalt inte detekteras med bulkmodellen, men kan ge upphov till mycket stora räckviddsökningar för både radio- och radarfrekvenser. I ett andra steg kan det vara intressant att titta på signaler från sändare i frekvensområdet 1-10 GHz. Detta skulle då kunna ge värdefull information om lägre skikt, som till exempel avdunstningsskikt, i höjdområdet 1-100 meter. Genom att dessa senare mätningar kompletterar informationen från bulkmodellen kan man bl.a. få ett mått på dessa skikts horisontella homogenitet.

Tekniken för att göra fjärranalys med hjälp av radiosignaler från satellit, i första hand GPS, bedöms som intressant, men det behöver utföras mera forskning kring detta för att utreda dess användbarhet i fartygsbaserade system.

För att få bättre statistik som underlag för planering bör förekomst av alla typer av markbaserade ledskikt i svenska farvatten kartläggas och sammanställas i form av en ledskiktsklimatologi. I detta ingår avdunstningsledskikt, advektionsledskikt och markbaserade ledskikt med översida över 100 m höjd, orsakade av subsidens i högtryck/högtrycksryggar.

6.2.2 *Meteorologiska modeller*

SMHI:s mesoskaliga modell HIRLAM har i dag inte kapacitet att ge temperatur och fuktighet med tillräcklig upplösning och noggrannhet för tillfredställande beräkning av hur brytningsindex varierar i horisontell led. Däremot bör en kombination och anpassning mellan bulkmodellen i LBM och data från HIRLAM kunna ge bättre information om förhållandena på över 100 m höjd än att som idag anta standardatmosfär. Anpassningen mellan bulkmodellen och HIRLAM kan exempelvis göras med GIT-modellen. Indata som behövs är profildata mellan 0-

1000 m från HIRLAM. Övriga indata hämtas från LBM. Radiosonderingar över land kan på så sätt också anpassas för en bulkmodell på fartyg. Om dessutom information om horisontella variationer i vattentemperatur är tillgänglig, kan metodiken utvidgas att också beräkna effekten av dessa.

Vissa brister har observerats hos bulkmodeller av den typ som används på många håll bla i LBM,. Tex bör man studera effekten på de vertikala fukt- och temperaturgradienterna av kraftig vind och brytande vågor som genererar sjöspray.

6.2.3 Vågutbredningsmodeller

Nästan all modellutveckling i världen inom troposfärområdet sker idag inom PE-området. Denna teknik har den överlägset största utvecklingspotentialen av de tekniker som förekommer idag. Den framtida utvecklingen av vågutbredningsmodeller bör därför baseras på någon PE-implementation. Man bör dessutom eftersträva att utnyttja befintlig kod och i så liten utsträckning som möjligt skriva egen eller modifiera kod.

Det finns två implementationer av vågutbredningsmodeller baserade på PE-teknik som bedöms som lämpliga för en framtida svensk användning. Den ena är den brittiska TERPEM som EEMS bygger på och den andra är APM som AREPS bygger på. Båda två har sina förtjänster och det är mycket svårt att för närvarande bedöma vilken som passar bäst. Därför föreslås en jämförelse mellan TERPEM och APM (båda med terränghöjdsdatabas) inom ett hav-skärgård-kust-område med hjälp av verkliga vertikalsonderingar av temperatur och fuktighet. Om möjligt bör också verifikation ske med mätdata från radio eller radar.

7 Referenser

Anderson K. D.: Inference of refractive profiles by satellite-to-ground RF measurements. Radio Science, vol. 17, no. 3, pp. 653-663, May-June 1982.

Anderson K. D.: Tropospheric profiles inferred from low angle measurements of global positioning system (GPS) signals. Proc. of the AGARD SPP Symposium on "Propagation assessment in coastal environments", AGARD CP-567, pp. 2.1-2.7, Bremerhaven, Germany, 19-22 September 1994a.

Anderson K.D.: An evaluation of three GPS receivers for use in the GPS sounder. Tech. Rept. TR 1637, Naval NCCOSC, San Diego, CA, USA, April 1994b.

Anderson K.D. and Paulus R. A.: Rough evaporation duct (RED) experiment. BACIMO conference 25-27 April 2000. Army Research Laboratory.

Andersson S. och Lundquist J-E.: Personlig kommunikation, SMHI 2000.

Agnew J.L., Marsh A.K:P: Gibson A.J.: Determination of radio refractivity at altitudes up to 2 km using UV Lidar. Millennium conference on antennas and propagation, AP2000, section 3P5 Prediction and sensing of tropospheric refractivity. ESA-SP-444, Davos, Schweiz, 9-14 April 2000.

A. E. Barrios, "Parabolic equation modelling in horizontally inhomogeneous environments," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-40, no. 7, pp. 791-797, 1992.

Barrios A. E.: Estimating refractivity from land clutter. Millennium conference on antennas and propagation, AP2000, section 3P5 Prediction and sensing of tropospheric refractivity. ESA-SP-444, Davos, Schweiz, 9-14 April 2000.

Bean B. R. and Dutton E.J.: 'Radio meteorology'. US National Bureau of Standards, monograph 92, 1966, chap. 1.

Burk S. D. and Thompson W. T.: Mesoscale Modelling of refractive conditions in a complex coastal environment. AGARD conf. Proc. 567 (1995).

Bösenberg J.: Ground-based differential absorption lidar for water-vapour and temperature profiling: methodology. Applied optics, vol. 37 pp3845-3860, 1998.

J.F. Claerbout, "Fundamentals of Geophysical Data Processing with Application to Petroleum Prospect," McGraw-Hill, New York, 1976.

Claverie J. and Hurtaud Y.: Variation of the apparent RCS of maritime target due to ducting effects. Millennium conference on antennas and propagation, AP2000, section 3P5 Prediction and sensing of tropospheric refractivity. ESA-SP-444, Davos, Schweiz, 9-14 April 2000.

Claverie J. and Marcel D.: Over the horizon propagation of a 36 GHz wave within the marine boundary surface layer (MBSL). Millennium conference on antennas and propagation, AP2000, section 2P2 Millimetre-wave Propagation. ESA-SP-444, Davos, Schweiz, 9-14 April 2000.

Claverie J. and Hurtaud Y., De Fromont Y. and Junchat A.: Modélisation des profils verticaux d'indice de réfraction et de C_n^2 en atmosphère marine. Proc. of the 2nd AGARD SPP Symposium, pp 29-1,29-11, Bremerhaven Germany, Sept 1994.

Claverie J.: The use of bulk method to predict RF and EO propagation within the marine atmospheric surface layer: An overview. 1999 IEE AP-S International symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting July 11-16.

Dion D. and Gardenal L.: On the accuracy of bulk methods for predicting path-loss in the marine surface layer. 1999 IEE AP-S International symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting July 11-16.

Davidson K. L. and Wash C. H.: Remote measurement of atmospheric refraction conditions in coastal regions. AGARD conf. Proc. 567, 1995

G.D. Dockery and J.R Kuttler, "An Improved Impedance Boundary Algorithm for Fourier Split-Step Solutions of the Parabolic Wave Equation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-44, no. 12, December 1996.

G.D. Dockery, "Development and use of Electromagnetic Parabolic Equation Propagation Models for U.S Navy Applications," *Johns Hopkins APL Tech. Dig.*, vol. 19, no. 3, pp. 283-292, 1998.

Eklund F., Wickets S., Gjessing D., Jonasson L., Carlsson G. och Nilsson J.: Radiovågors utbredning. Troposfärens inverkan. Kapitel 8-10. Kompendium nr 25 A-B. Kursverksamheten vid FOA, 1969.

Fabry F., Frush C., Zawadzki I. and Kilambi A.: On the extraction of near-surface index of refraction using radar phase measurements from ground targets. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, vol. 14, pp. 978-987, 1997.

Falk J-E.: Utvärdering av GIT-modellen. FOA rapport D 40228-3.2, 1990.

Forand J. L.: MAPTIP: Refractive effects in the visible and IR. *SPIE VOL.* 2828/39, pp 39-49.

Gerstoft P., Gingras D. F., Rogers L. T. and Hodgkiss W. S.: Estimation of radio refractivity structure using matched-field array processing. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 48, pp. 345-356, March 2000.

J. Goldhirsh and G.D. Dockery, "Measurement Resolution Criteria for Assessment of Coastal Ducting," *Conference publication no. 407: ICAP'95* vol. 2, 4-7 April 1995, Eindhoven, The Netherlands.

Eijk A. M. J., Navarro L. J. and Mestayer P. G.: Refractive profiles over a marine surface. Millennium conference on antennas and propagation, AP2000, section 3P5 Prediction and sensing of tropospheric refractivity. ESA-SP-444, Davos, Schweiz, 9-14 April 2000.

Gollvik S. and Olsson E.: A one-dimensional model for detailed short range forecasting. *Meteorol. Appl.* 2, pp 209-216, 1995.

R.H. Hardin and F.D. Tappert, "Applications of the Split-Step Fourier Method to the Numerical Solution of Non-linear and Variable Coefficient Wave Equations," *SIAM Rev.* 15, 423, 1973.

Henmi T.: Comparison and evaluation of operational mesoscale models MM5 and BFM over White Sands Missile Range (WSMR). BACIMO conference 25-27 April 2000. Army Research Laboratory.

Hitney H. V: Means for determining the refractive index profile of the atmosphere, U.S. Patent 4,093,918, June 6, 1978.

Hitney H. V.: Modelling tropospheric ducting effects on satellite-to-ground paths. Proc. of the AGARD EPP Symposium on "Multiple mechanism propagation paths (MMPPs), their characterisation and influence on system design", AGARD CP-543, pp. 16.1-16.5, Neuilly sur Seine, France, 4-8 October 1993.

Hitney H. V.: Inferring refractive structure from land clutter. Millennium conference on antennas and propagation, AP2000, section 3P5 Prediction and sensing of tropospheric refractivity. ESA-SP-444, Davos, Schweiz, 9-14 April 2000.

Karlsson Edvard, Nilsson Ann-Charlotte, Nordstrand Melker: Lokal brytningsindexmodell på fartyg. Beskrivning av beräkningsmetodik och mätsystem. FOA Rapport E 40037, 1988.

Karlsson Edvard, Nilsson Ann-Charlotte, Nordstrand Melker, Renström Hans, Caspersson Peter, Ladell Lars, Moberg Allan: Utvärdering av lokal brytningsindexmodell på fartyg. Försök genomförda 1987 och 1988. FOA Rapport E 40038, 1989.

Karlsson E.: GIT-modellen. Atmosfärisk grässkiktsmodell längs en trajektoria. FOA Rapport E 40039-3.2, 1989.

Karlsson Edvard och Larsson Mikael: Jämförelse mellan sensorer för temperatur och fuktighet ombord rbb Nynäshamn. FOA skr 00-2785/U, 00-05-10.

Karlsson, Edvard, Asp Börje, Eriksson Gunnar, Rundgren Marcus: Hur kan LBM vidareutvecklas. En förstudie om vågutbredningsanalys för radio och radar på fartyg. FOA Memo dnr 00-5428/U, 2000-11-20.

Kerans A., Kulesa A.S., Herman J. And Woods G.S.: Evaporation duct statistics around Australia and the west pacific. Millennium conference on antennas and propagation, AP2000, section 1P7 Propagation in Troposphere and Ionosphere. ESA-SP-444, Davos, Schweiz, 9-14 April 2000.

M. Sempreviva och S-E. Gryning: Mixing height over water and its role on the correlation between temperature and humidity fluctuations in the unstable surface layer. Boundary Layer Meteorology 97, pp 273-291, 2000.

Kli H: Klimathandbok för försvarsmakten, Chefen för Flygvapnet, M7748-500232, 1975

SMHI: Kartor över ytvattentemperaturer, 1988.

Richard A. Paulus and Kenneth D. Andersson: Application of an evaporation duct climatology in the littoral. Conference on Battlespace Atmospheric and Cloud Impacts on Military Operations (BACIMO) 2000, University Park Holiday Inn Fort Collins, CO , USA, 25-27 April 2000

H.W. Ko, J.W. Sari and J.P. Skura, "Anomalous Microwave Propagation Through Atmospheric Ducts," *Johns Hopkins APL Tech. Dig.*, vol. 4, pp. 12-26, 1983.

G.C. Konstanzer, J.R. Rowland, G.D. Dockery, J.J. Sylvester, M.R. Neves, D.R. Davies, "SEAWASP: A prototype system for shipboard assessment based on in situ environmental measurements," *Proceedings of the 1996 Battlespace Atmospheric Conference*, Tech. Doc. 2938, NCCOSC, RDT&E Division, San Diego, 1996.

Krolik J. L. and Tabrikian J.: Tropospheric refractivity estimation using radar clutter from sea surface. Proc. Battlespace atmospheric conference, San Diego, CA, USA, 2-4 Dec. 1997, SPAWAR TD 2989, pp. 635-642, March 1998

Krolik J. L., Vsudevan S., Tabrikian J. and Rogers L. T: The performance of surface duct parameter estimation from radar sea clutter. Millennium conference on antennas and propagation, AP2000, section 3P5 Prediction and sensing of tropospheric refractivity. ESA-SP-444, Davos, Schweiz, 9-14 April 2000.

J.R Kuttler and G.D. Dockery, "Theoretical Description of the Parabolic Approximation/Fourier Split-Step Method of Representing Electromagnetic Propagation in the Troposphere," *Radio Science*, vol. 26, no. 2, pp. 381-393, 1991.

Ladell L.: Strålbånor och radarräckvidd. FOA rapport C 30557-3.5; November 1989.

D. Lee, G. Botseas, and J.S. Papadakis, "Finite-Difference Solution to the Parabolic Wave Equation," *J. Acoust. Soc. Am.* 70, pp. 795-800, 1981.

D. Lee, and S.T. McDaniel, "Ocean Acoustic Propagation by Finite Difference Methods," *Comput. Math. Appl.* 45(5), 1987.

H.J. Liebe, G.A. Hufford and M.G. Cotton, "Propagation modelling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 100 GHz," *AGARD Symposium on "Atmospheric propagation effects through natural and man-made obscurants for visible mm-wave radiation"*, AGARD-CP-542, pp. 3.1-11, 1993.

M.A. Leontovich and V.A. Fock, "Solution of the Problem of Propagation of Electromagnetic Waves Along the Earth's Surface by Method of Parabolic Equations," *J. Phys. USSR*, vol 10, pp. 13-23, 1946.

Levy M. F.: Horizontal parabolic equation solution of radiowave propagation problems on large domains. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 43, pp. 137-144, February 1995.

M.F. Levy and K.H. Craig, "TERPEM propagation package for operational forecasting with EEMS," *Proceedings of the 1996 Battlespace Atmospherics Conference*, Tech. Doc. 2938, NCCOSC, RDT&E Division, San Diego, pp. 497-505, 1996.

M.F. Levy, *Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation*, The Institution of Electrical Engineers, ISBN 085296 764 0, 2000.

Levy M. F. and Anderson K. D.: Modelling refractive effects on earth-space paths with hybrid parabolic equation techniques. Millennium conference on antennas and propagation, AP2000, section 3P5 Prediction and sensing of tropospheric refractivity. ESA-SP-444, Davos, Schweiz, 9-14 April 2000.

J-E Lundqvist SMHI, Personlig kommunikation, 2000

Mayer James H. And Rowland John R.: An Instrumentation SLED for measurements of near-ocean surface temperature, humidity and water temperature. Marine Technology society conf. Proc., Science and technology for a new ocean decade, Volume 2, Sept 1990.

A. R. Miller, R. M. Brown, and E. Vegh, "New derivation for the rough-surface reflection coefficient and for the distribution of sea-wave elevations", *IEE Proc.*, Vol. 131, Pt. H, No. 2, April 1984.

MTP 5. Meteorological Temperature Profiler. SCI-TEC Instruments. Klipp & Zonen BV, PO Box 507, 206 00 AM Delft, the Netherlands.

Moss J.S. and Steel A.C.: Meteorological support for UK Navy operations. Atmospheric Battlespace Symposium, 1996.

Nordvall L.: Personlig kommunikation. FM vädercentral, oktober 1999.

Olsen J.: Shipboard Measurements of Air-Sea Temperature in the Evaporation Duct. Naval Ocean Systems Center, Technical report 1313, dec 1989.

Olsson E.: Hirlam 1D; a one-dimensional version of Hirlam model. Polarfront, Årgång 26, nr 100/101, sid 35-37, september 1999.

Paulus Richard A.: Specification for measurements to assess radar sensors. Technical document 1685, 1989, Naval Ocean System Center, San Diego, Ca, USA.

A. V. Popov, "Solution of a Parabolic Equation of Diffraction Theory by a Finite Difference Method," *USSR Comput. Math. and Math. Phys.* 8, pp. 282–286, 1968.

P.L. Rice, A.G. Longley, K.A. Norton and A.P. Barsis, "Transmission Loss Predictions for Tropospheric Communication Circuits," vol. 1 & 2, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Technical note 101, 1965.

Richard A. Paulus and Kenneth D. Andersson: Application of an evaporation duct climatology in the littoral. Conference on Battlespace Atmospheric and Cloud Impacts on Military Operations (BACIMO) 2000, University Park Holiday Inn Fort Collins, CO , USA, 25-27 April 2000

Richter Juergen H.: Sensing of radio refractivity and aerosol extinction. AGARD lecture series 196, 1994.

Rogers L. T.: Remote sensing of evaporation ducts using SHF propagation measurements. Proc. of the AGARD SPP Symposium on "Remote Sensing: A Valuable Source of Information", AGARD CP-582, pp. 48.1-48.9, Toulouse, France, 22-25 Apr. 1996a.

Rogers L. T., Paulus R. A., and Cook J.: Fusing data from the mesoscale model and radio remote sensing. Proc. Battlespace atmospheric conference, San Diego, CA, USA, 3-5 Dec. 1996b.

Rogers L. T.: Likelihood estimation of tropospheric duct parameters from horizontal propagation measurements. Radio Science, vol. 32, no. 1, pp. 79-92, Jan.-Feb. 1997a.

Rogers L. T.: Modelling the atmospheric refractivity structure for the EM inverse medium problem. Proc. Battlespace atmospheric conference, San Diego, CA, USA, 2-4 Dec. 1997b, SPAWAR TD 2989, pp. 629-634, March 1998.

Rogers L. T.: Demonstration of an efficient boundary layer parametrization for unbiased propagation estimation. Radio Science, vol. 33, no. 6, pp. 1599-1608, Nov.-Dec. 1998.

Rogers L. T., Hattan C.P., and Stapleton J.K.: Estimating evaporation duct heights from radar sea echo. Radio Science, vol. 35, no. 4, pp. 955-966, July-August 2000.

Rowland J.R. and Steven M. Babin.: Fine-scale measurements of microwave refractivity profiles with helicopter and low-cost rocket probes. John Hopkins APL Technical Digest, Volume 8, Number 4 , 1987.

J.R. Rowland, G.C. Konstanzer, M.R. Neves, R.E. Miller, J.H. Meyer, J.R. Rottier, "SEAWASP: Refractivity characterisation using shipboard sensors," *Proceedings of the 1996 Battlespace Atmospherics Conference*, Tech. Doc. 2938, NCCOSC, RDT&E Division, San Diego, 1996.

Seaman N., Wyngaard J., Stauffer D., Gilbert K., Kimmel S., Di X., Li Y. and Hunter G.: The refractivity testbed: A multi-scale approach for the study of propagation in the marine boundary layer. Millennium conference on antennas and propagation, AP2000, section 3P5 Prediction and sensing of tropospheric refractivity. ESA-SP-444, Davos, Schweiz, 9-14 April 2000.

M. Sempreviva och S-E. Gryning: Mixing height over water and its role on the correlation between temperature and humidity fluctuations in the unstable surface layer. *Boundary Layer Meteorology* 97, pp 273-291, 2000.

Schuster D. C., Cotton W. R. and Walko R.L.: A prototype real-time boundary layer forecast model running on clusters of PC's. BACIMO conference 25-27 April 2000. Army Research Laboratory.

SMHI: Kartor över ytvattentemperaturer, 1988.

P. Swerling, "Probability of Detection for Fluctuating Targets," *RAND report RM-1217*, March 1954; reprint *IRE Transactions on Information Theory*, vol. IT-6, no. 2, April 1960.

Thies Clima (1984): Instruction for use Psychro-Transmitter. Thies Clima L-nr 1.1130.10.000. svensk representant: Svenska Termoinstrument AB, Essingestråket 9 11266 Stockholm.

Vaisala: HMP243 Transmitter Operating Manual, HMP243-U145en-1.3, Vaisala 9 januari 1996. Svensk representant: Live data ab box 579, 175 26 Järfälla, tel 08-761 15 20, fax 08-761 15 19

Warner T., Shantz A., Davis C., Cram J., Swerdlin S. and Bowers J.: Development of operational meso-gamma-scale numerical weather-prediction systems for army test ranges. BACIMO conference 25-27 April 2000. Army Research Laboratory.

G. N. Watson, "The diffraction of radiowaves by the earth," *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, **vol. 95**, pp.83-99,1918.

Westwater E. R., Han Y., Irisov V. G. and Leuskiy V. Y.: Sea-air and boundary layer temperature measured by a scanning 5-mm –wavelength radiometer: Resent results. *Radio Science*, Volume 33 pp 291-302 ,1998.

Wickerts S: Radarmeteorologi. OVÄ 4/1963. Militära vädertjänstens Centralorgan, Flygstaben.

Wulfmeyer V. and Bösenberg J: Ground-based differential absorption lidar for water-vapour profiling: assessment of accuracy, resolution, and meteorological applications. *Applied optics*, vol. 37 pp3825-3844, 1998.

L.P. Yeh, "Simple methods for designing troposcatter circuits, " *IRE Trans. CS-8*, pp. 193-198, 1960.

Zilitinkevich S. S.: On the determination of the height of the Ekman boundary layer. *Boundary layer meteorology*, 3 (1972) 141-145.

Zilitinkevich S. S and Mironov D. V.: A multilimit formulation for the equilibrium depth of a stably stratified boundary layer. *Boundary layer meteorology*, 81 (1996) 325-351.