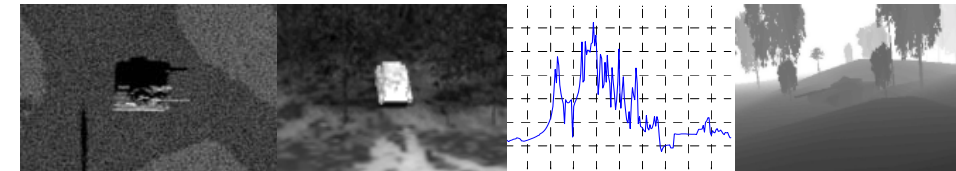


FREDRIK NÄSSTRÖM, LEIF CARLSSON, ROBERT FORSGREN, TOMAS CHEVALIER,  
OVE GUSTAFSSON, NILS KARLSSON, AIN SUME



SAR

IR

RR

Laser



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Fredrik Näsström, Leif Carlsson, Robert Forsgren,  
Tomas Chevalier, Ove Gustafsson, Nils Karlsson,  
Ain Sume

## Integration av atmosfärsmodeller i MSSLab

Titel	Integration av atmosfärsmodeller i MSSLab
Title	Integration of atmospheric models in MSSLab
Rapportnr/Report no	FOI-R--2521--SE
Rapporttyp Report Type	Underlagsrapport Base data report
Sidor/Pages	66 p
Månad/Month	Juni
Utgivningsår/Year	2008
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde Programme area	4. Sensorer och signaturanpassning 4. Sensors and Low Observables
Delområde Subcategory	42 Sensorer 42 Above surface Surveillance, Target acquisition and Reconnaissance
Projektnr/Project no	E3097
Godkänd av/Approved by	Jörgen Ahlberg
FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI , Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för Sensorsystem	Sensor Systems
Box 1165	P.O.Box 1165
581 11 Linköping	SE-581 11 Linköping

## Sammanfattning

I denna rapport beskrivs arbetet med att simulera sensorsystem i olika väderfall. Sensorerna som studerats i denna rapport är IR, laser och radar. Olika simuleringsprogram har använts för att simulera de olika sensorerna och dessa simuleringsprogram är integrerade i MSSLab. MSSLab (MultiSensorSimuleringsLab) är ett simuleringslab där avancerade sensorsystem kan simuleras i olika miljöer.

Rapporten inleds med en kort översikt om väder och hur vädret påverkar optroniska- och radarsensorer. Fyra väderscenarier har specificerats: vackert väder, regn, moln och snöfall. Dessa väderfall kommer i det fortsatta arbetet att användas för att studera hur en UAV (Unmanned Aerial Vehicle) med dess sensorer påverkas av de olika väderfallen. En beskrivning av den tänkta UAV:n och dess anflygning mot vissa områden finns även i rapporten.

För IR och visuella simuleringar har beräkningsprogrammet CameoSim använts. För att beräkna atmosfärerna som används i CameoSim har transmissionsmodellen MODTRAN använts. Med MODTRAN kan atmosfärens egenskaper för olika väderfall beräknas.

En modell för 3D-laser som tagits fram på FOI används för lasersimuleringarna. Denna modell saknar för tillfället möjlighet att simulera väder, men med underlag från exempelvis MODTRAN kan även atmosfärspåverkan på lasersensorer simuleras.

För radarsimuleringar används beräkningsprogrammet SE-RAY-EM. Detta program har nu kompletterats med funktioner för att ta hänsyn till både dämpning och spridning för de olika väderfallen. Några metoder för hur en simuleringsgemensam vädermodulering kan åstadkommas finns även beskriven i rapporten.

Inledande simuleringar har gjorts med IR och radar för de olika väderfallen och avstånd upp till några kilometer. De visar att framförallt moln kraftigt degraderar IR-prestanda, medan väderpåverkan på det simulerade radarsystemet endast är måttlig.

Nyckelord: IR, laser, radar, väder, MSSLab

## Summary

In this report the work with simulation of different sensor systems in various weather conditions is described. The sensors studied in this report are IR, laser and radar. Different tools have been used to simulate the different sensors and these tools are integrated in MSSLab. MSSLab (MultiSensor-SimulationLab) is a simulation laboratory where advanced sensor systems can be simulated in various environments.

In the introduction there is a short overview of different weather conditions and how they affect optronic and radar sensors. Four weather conditions (cases) are specified: mostly sunny, rain, cloud and snowfall. These cases will be used in the future work to study how a UAV with its sensors is affected in the different weather cases. In the report there is also a description of the studied UAV and its approach to specific target areas.

For simulation in thermal IR and visual wavebands the multispectral software suit "CameoSim" is used. The atmospheric transmission used by CameoSim is calculated in MODTRAN (MODerate spectral resolution atmospheric TRANSmittance algorithm and computer model). With MODTRAN the transmittance can be calculated for the different weather cases.

A 3D-laser model developed at the FOI has been used to simulate laser sensors. In this model there is currently no possibility to simulate atmospheric transmission. However, with data from MODTRAN the influence from atmospheric transmission can be handled in the laser sensor simulations.

The ray tracing software tool "SE-RAY-EM" is used for radar simulations. This software is now complemented to handle both damping and scattering for the different weather cases. Some methods of how to achieve a common modelling of the weather influence on all sensors in the simulations are also described in the report.

Preliminary IR and radar simulations have been made for the different weather cases and ranges up to a few kilometres. The results show that clouds heavily degrade the IR-performance, whereas weather influence on the simulated radar system is moderate.

Keywords: IR, laser, radar, weather, MSSLab

# Innehållsförteckning

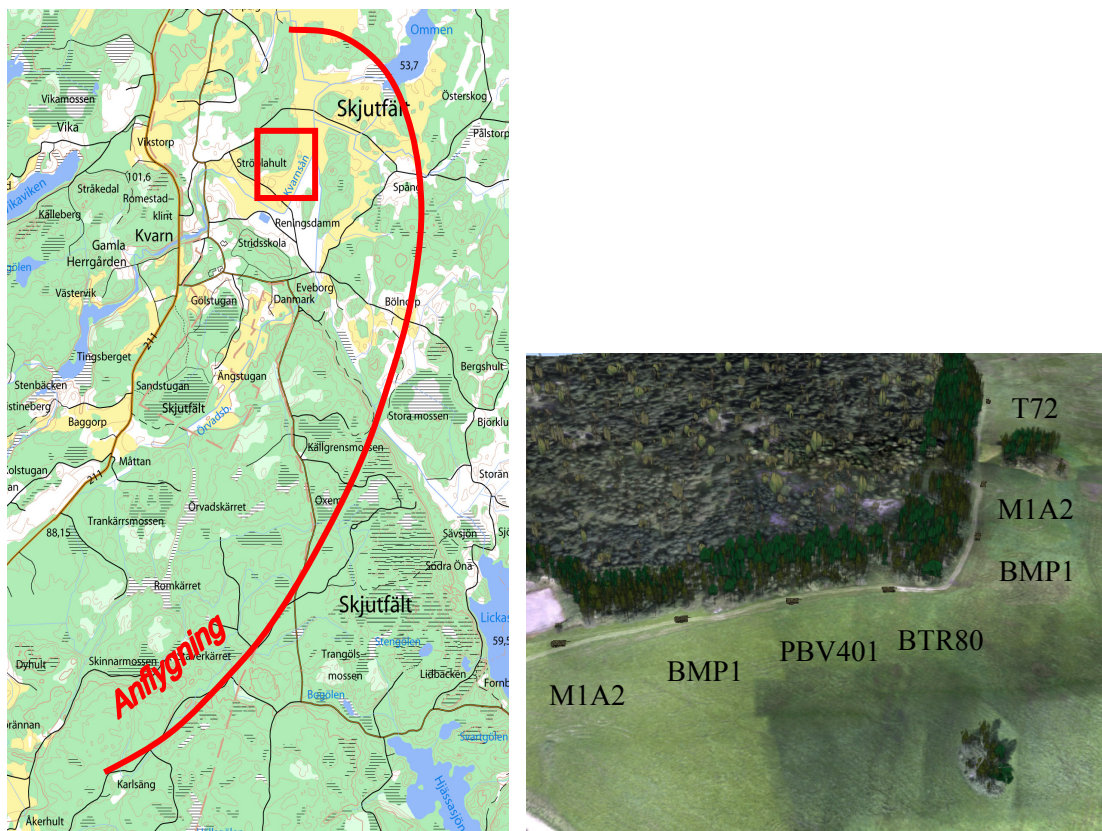
<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>7</b>
1.1	Sensorbärare .....	8
1.2	Sensorer.....	8
1.2.1	SAR.....	8
1.2.2	IR och visuellt.....	9
1.2.3	3D-Laser .....	10
<b>2</b>	<b>Kort översikt om väder</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>Väderscenarier</b>	<b>15</b>
3.1	A: Vackert väder.....	15
3.2	B: Regn .....	16
3.3	C: Moln.....	18
3.4	D: Snöfall.....	18
<b>4</b>	<b>Vädrets påverkan på optroniska sensorer</b>	<b>20</b>
4.1	Atmosfärstransmissionsmodeller .....	21
4.1.1	MODTRAN.....	21
4.1.2	Koppling mellan CameoSim och MODTRAN .....	25
4.1.3	Högupplösta transmissionsmodeller.....	26
4.2	Simulering av väder med CameoSim och MODTRAN .....	28
4.3	Sammanfattning av vädersimuleringarna med CameoSim .....	31
4.4	Simulering av väder med 3D-lasermodellen .....	32
4.4.1	Dämpning.....	32
4.4.2	Scintillationer.....	33
4.4.3	Breddning.....	34
4.4.4	Exempel på simulerade data .....	34
<b>5</b>	<b>Vädrets påverkan på radarsensorer</b>	<b>36</b>
5.1	Radarevågutbredning i atmosfären.....	36
5.2	Beskrivning av atmosfärmodellerna för radar .....	38
5.2.1	Vackert väder (Klar luft, ren gasform).....	38
5.2.2	Regn.....	41
5.2.3	Moln och dimma.....	44
5.2.4	Snöfall (torrt) .....	46
5.3	Sammanfattning av atmosfärspåverkan på radarsimuleringarna ..	48
<b>6</b>	<b>Väderbeskrivning i MOSART</b>	<b>50</b>
6.1	Grundläggande implementering av väderobjekt.....	50

6.2	Enkel beskrivning av väderobjekt.....	50
6.3	Detaljerad beskrivning av väderobjekt .....	51
<b>7</b>	<b>Resultat</b>	<b>52</b>
7.1	Status på integration av atmosfärmodeller i MSSLab .....	52
7.2	Slutsatser och framtida arbete .....	52
<b>8</b>	<b>Bilaga. Teoriöversikt av radarextinktion orsakad av hydrometeoror</b>	<b>54</b>
8.1	Koherent och inkoherent fält och intensitet .....	54
8.2	Ekvationen för strålningstransport.....	55
8.3	Tvärsnittsberäkning enligt Mie .....	56
8.4	Storleksfördelningar .....	57
8.5	Rayleigh-spridning.....	58
8.6	Skiktade sfärer, icke-sfäriska partiklar, polarisation.....	58
8.7	Specialfallet smältande snö .....	58
<b>9</b>	<b>Referenser</b>	<b>60</b>

# 1 Inledning

Denna rapport beskriver aktuell status för integrationen av olika atmosfärsmo-  
deller i systemsimuleringsverktyget MSSLab (MultiSensorSimuleringsLab)  
[1]. Målet med arbetet är att studera vädrets inverkan på olika sensorsystem.  
När atmosfärsmodellerna har integrerats till MSSLab ska en plattform med  
sensorerna IR, laser och radar simuleras under anflygning i olika väderfall.  
Plattformen i scenariot består av en UAV (Unmanned aerial vehicle) och togs  
fram inom FoT-projektet SUPREM (Svårupptäckt precisionsmålsökare) [1].

Det simulerade scenariot kommer att utspelas vid Prästtomta skjutfält i Kvarn,  
se figur 1. För detta område finns en terrängmodell med högupplöst markyta,  
automatiskt rekonstruerade byggnader och modeller av enskilda träd inplacera-  
de med korrekta dimensioner på korrekta positioner. Eftersom omgivningsmo-  
dellerna representerar en verklig plats är det möjligt att verifiera simulerade  
resultat mot verkliga fältmätningar i det aktuella terrängområdet.



Figur 1. Till vänster visas UAV-systemets anflygningsbana med en röd linje. Den röda rutan markerar målområdet. Till höger visas terrängmodellen över målområdet med målobjekten utplacerade.

Anflygningsbanan för UAV-systemet visas i figur 1 och är vald som en krökt bana fram till målområdet och därefter som en del av en cirkelbana kring målen. Banan är vald för att ge möjlighet att använda SAR (Synthetic aperture radar) under hela flygbanan samt för att den avsevärt förbättrar EO-sensorernas klassificeringsförmåga då målen ses under föränderlig aspektvinkel.



Målet i det fiktiva scenariot består av ett kompani med sju stridsfordon. I detta fall befinner sig kompaniet på ett öppet fält med kort gräs. En skogsridå med i huvudsak barrträd finns ett antal meter bakom fordonen, som antas vara under framryckning längs med skogskanten, temporärt stillastående, eller på väg in i skogen.

## 1.1 Sensorbärare

Den generiska UAV-modell som används vid arbetet är av typen MALE (Medium Altitude Long Endurance UAV) och har data enligt tabell 1. Data har inspirerats från försvarsmaktens studie av UAV-system, IPT-UAV.

*Tabell 1. Data på UAV-plattformen.*

Sensorlast:	50 kg
Vapenlast:	400 kg
Räckvidd:	1500 km
Flyghastighet:	Mach 0,8+, vid spaning 100 m/s
Längd:	8,0 m
Spännvidd:	5,5 m
Max Startvikt:	3500 kg
Motmedel:	Facklor, remsor och skenmål

## 1.2 Sensorer

### 1.2.1 SAR

SAR-systemet och dess prestanda kommer endast översiktligt att beskrivas i detta avsnitt. En mer detaljerad beskrivning finns i rapporten ”Duell mellan brusradar i UCAV och radarvarnare i markfordon” [2]. För att få tillräcklig spaningskapacitet, spaningsavstånd och väderoberoende samtidigt som UAV-systemets smygegenskaper bibehålls, används en smygande radar (LPI-radar) med SAR-kapacitet. Radarsensorn baseras på brusradar och har designats för att vara odetekterbar för alla varnarsystem som förekommer idag.

En lämplig stråkbredd för ett system av detta slag är ca 500 - 1000 m, vilket med en flyghastighet på 100 m/s ger en yttäckningsförmåga på 50 000 - 100 000 m<sup>2</sup>/s. Att avsöka ett område på 5×5 km tar då 4 - 8 minuter under goda förhållanden. Denna tid kan dock snabbt dubblas om t.ex. terrängen är kraftigt kuperad eller har många småvägar genom skogsbevuxna områden.

Radarsensorn är inte tänkt att operera ensam, utan ska i första hand detektera målen och invisera de optiska sensorerna. Upplösningen i SAR-bilderna har därför valts till 0,3 × 0,3 m i markplanet. Centerfrekvensen har valts till 35 GHz (K<sub>a</sub>-bandet), vilket ger rimliga aperturstorlekar och god komponenttillgänglighet. Några ytterliga data för SAR-systemet ges i tabell 2.

Tabell 2. Några data för det aktuella SAR-systemet.

Parameter	Värde	Kommentar
Antennlob	4° och 6° (två fasta lober)	Idealt krävs 3° till 12°, vilket kan fås med AESA <sup>1</sup> -antenn. Av kostnadsskäl har två elektriskt valbara lober valts istället.
Bandbredd	1 GHz	En bandbredd på 1 GHz ger en upplösning på 0,3 m upp till en depressionsvinkel på ca 51°.
Upplösning	0,3 m × 0,3 m	Vid en depressionsvinkel på 65° blir upplösningen ca 0,45 m med en bandbredd på 1 GHz.
Pulslängd	14 µs till 61 µs	Korta pulser krävs vid korta spaningsavstånd och hög depressionsvinkel.
PRF	7,8 kHz till 34 kHz	Låg PRF kan användas vid långa spaningsavstånd, dock ej ett krav för brusradar då tvetydighet ej är ett avgörande problem.
Uteffekt (medel)	10 mW till 400 mW	Anpassning av uteffekten är nödvändig för att erhålla goda smygegenskaper när avståndet till målområdet minskar. Vid dåligt väder, såsom kraftigt regn, krävs dock högre uteffekt.

### 1.2.2 IR och visuellt

För att med en IR-sensor kunna göra måligenkänning av markmål av stridsvagnsstorlek på 2-5 km avstånd krävs en kyld IR-sensor med en upplösning på minst 640×480 pixlar och en optik med ett FOV på ca 1° [3]. Både MWIR (3-5 µm) och LWIR (8-12 µm) klarar vid god atmosfärstransmission igenkänning på omkring 5 km med åtminstone sannolikheten 80 %. LWIR klarar uppgiften på ca 300 m längre avstånd än MWIR. Enbart detektion skulle klaras med ett större synfält och därmed något sämre upplösning.

Bildalstrande IR-system kan vara av både stirrande och skannande typ, men numera är de stirrande helt dominerande. De kan också vara av två olika klasser, okylda eller kylda. De okylda arbetar i rumstemperatur och är av bolometertyp eller pyroelektriska, dvs. de utnyttjar termiska effekter som antingen direkt påverkar motståndet i detektorelementet eller påverkar polarisationen. Typiskt för okylda detektorer är en känslighet på ca 0,1 K och en integrations-tid på 20 ms. De kylda detektorerna arbetar oftast vid 77 K, de är av typen fotovoltiska eller fotokonduktiva, och har en känslighet på 15-25 mK vid en integrationstid på ca 0,3 ms. Vanliga detektormaterial är InSb (Indium antimonid) eller CMT (Kadmium kvicksilver tellurid). InSb är användbar vid 3-5 µm, medan CMT kan tillverkas med känslighet både vid 3-5 och 8-12 µm. QWIP-sensorn är en nyutvecklad kyld detektor av galliumarsenid (GaAs) med höga prestanda men med ett smalt spektralområde (8-9 µm).

<sup>1</sup> AESA, Eng: Active Electronically Scanned Array

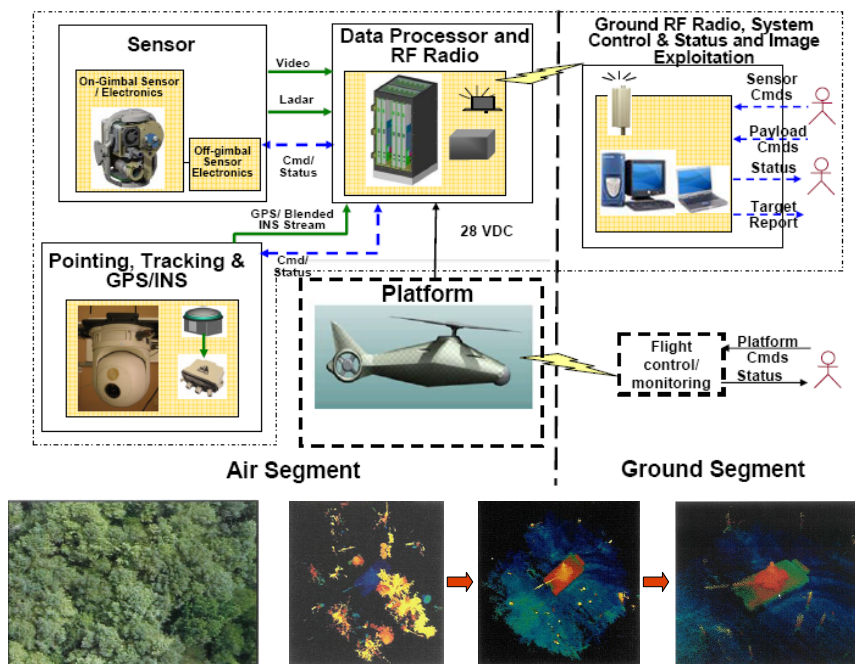
För att förbättra detektions och igenkänningsprestanda kan man utnyttja både multispektral teknik – typiskt 4 våglängdsband inom 3-5  $\mu\text{m}$ , eller hyperspektral teknik – med ett hundratal smala våglängdsband inom t.ex. 3-5  $\mu\text{m}$ . Fler våglängdsband ger möjlighet till mer information och därmed förbättrade prestanda. Det kan också vara av intresse att under en aktuell operation optimera prestanda för systemet genom att välja det för tillfället ”bästa” våglängdsbandet. Beroende på signalbehandlingskapaciteten får man välja mellan att utnyttja alla band samtidigt eller välja ut ett eller ett fåtal optimala band.

För att simulera IR- och visuella bilder används i denna rapport simuleringsprogrammet CameoSim. IR-sensorn som simuleras har respons i våglängdsbandet 1,5-5,2 $\mu\text{m}$ . Sensorn har 384×288 pixlar och ett synfält på 20°×15°. Den visuella sensorns respons är i våglängdsområdet 0,3-0,8  $\mu\text{m}$ . Sensorn har 1300×1000 pixlar och dess synfält på 20°×15,5°.

### 1.2.3 3D-Laser

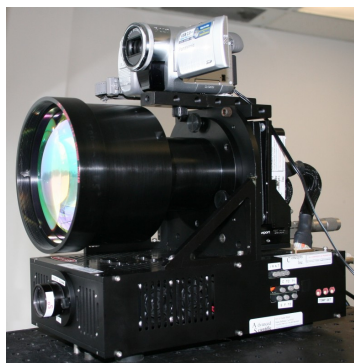
Ett antal olika typer av laserbaserade system är tänkbara för 3D-avbildning från UAV. Det finns ingen klar vinnare, utan de har alla olika fördelar och nackdelar. Nedan visas två olika system, där det första är framtaget inom det amerikanska DARPA-projektet JIGSAW och består av en skannade 32×32 bildelements laseravståndsmätare. Det andra systemet, ASC FLASH 3D LADAR ger 3D-avbildning i 128×128 bildelement med kompletta vågformer. Under olika faser i utvecklingen av lasersimuleringsmodellen kommer dessa olika sensorer att användas som exempelsystem.

M. Vaidyanathan et al. [4] beskrev under 2007 utvecklingsläget för JIGSAW, se figur 2. Detta system är avsett för en UAV för att detektera och känna igen mål i vegetation genom att processera flera 3D-punktmoln tagna från olika vyer. Hela systemet inklusive gimbal (12 tum) väger 45 kg. JIGSAW tillåter ett autonomt arbetssätt efter det att den invisats till ett intressant område (t.ex. via SAR-systemet). Större delen av processeringen sker ombord och en länk sänder ned bearbetade bilder till operatören. Systemet har testats i flygande plattform, men befinner sig fortfarande i forsknings- och utvecklingsstadiet.



Figur 2. Överst JIGSAW arkitekturen som den tett sig under fas 3 av projektet. Under visas detektion och identifiering av en stridsvagn under tät vegetation. Bild från [4].

Genom det unika samarbetet med Air Force Research Laboratory (AFRL) i USA, har FOI haft nära kontakt med upphovsmännen bakom 3D-sensorn *Flash ladar*, se figur 3. Denna sensor har genomgått ett antal utvecklingssteg, från att först bestå av  $32 \times 32$  bildelement, med mycket brus och en dåligt anpassad laser, till att idag vara en state-of-the-art 3D-avbildande sensor med  $128 \times 128$  bildelement, och med mätkapacitet på flera kilometer. Till och med vågformen kan sparas för varje bildelement vilket gör data utmärkt för fortsatt analys. Själva systemet har utvecklats av Advanced Scientific Concepts [5] på uppdrag av AFRL. Försök med denna sensor i en flygande plattform planeras äga rum under de närmsta åren. Under 2007 såldes även en liknande enhet till FGAN/FOM i Tyskland vilket även visar att den är mogen nog att spridas. Vi har nära kontakt även med denna grupp genom flera samarbeten och personliga kontakter.



Figur 3. AFRLs 3D-sensor ASC FLASH 3D LADAR. Nederst syns lasern och kontrollenheten, i mitten optiken som sitter kopplad med detektorplattan (till höger). Överst sitter en videokamera för att få en överblick över mätningen. Utanför bild finns en laptop för styrning och datalagring. Bild FOI.

## 2 Kort översikt om väder

All elektromagnetisk (EM) strålning som passerar genom atmosfären påverkas av dess egenskaper genom dämpning eller riktingsändring av strålningen. För strålning i det optiska våglängdsområdet, dvs strålning från ultraviolett till långvågig infraröd strålning (inklusive visuellt ljus), är våglängden av sådan storleksordningen att strålningen påverkas genom spridning mot molekyler eller aerosoler, droppar och partiklar i atmosfären. Dessutom påverkas strålningen av resonansfenomen hos i atmosfären ingående gaser.

Moln är en synlig anhopning av vatten i form av små partiklar (droppar) och spårgaser [6]. Vattnet kan vara i flytande, fast eller gas fas. I flytande fas är det i huvudsak droppar vars storlek ofta är större 10  $\mu\text{m}$ , men mindre än regndroppar. Storleksfördelningarna brukar ha ett maximum kring 20-50  $\mu\text{m}$  beroende på molntyp och eller vid vilken höjd i molnet mätningen genomförts. Beroende på dropparnas storlek har dessa olika fallhastigheter. När dropparna växer till sig och blir större hålls inte dessa uppe av uppåtvindar i molnen utan faller ut i form av regn eller snö.

Det finns en internationell praxis att mäta mängden molnighet i åttondelar. Den bygger på att observatörer vid väderobservationerna anger hur stor del av himlen som är täckt av moln. Det är relativt enkelt att dela himlen i halvor, fjärdedelar och åttondelar som observatör. Vanligtvis anges vid väderleksrapporter mängden moln med orden *klart*, *nästan klart*, *halvklart*, *lätt molnighet*, *växlande molnighet*, *molnigt*, *nästan mulet*, *mulet* eller *gråväder* (fler ord används). Några översättningar av väderleksrapports nomenklaturen och användningen av åttondelar är *Klar* himmel avser att 1/8 eller mindre är täckt av moln, *halvklart* avser att 3-5 åttondelar är täckta med moln. *Molnigt* eller *mulet* anger att nästan hela eller hela himlen är täckt av moln, dvs. nästan 8/8 delar.

*Halvklart* angav att 3-5 åttondelar av himlen är molntäckt men molnens rörelser gör att olika delar av himlen kan var täckta av moln under olika delar av dagen. Molnen täcker solen under en halvtimme upp till någon timme åt gången, då molnsjoken är relativt stora.

*Växlande molnighet* anger inte en specifik täckningsgrad av moln på himlen utan beskriver snarare att solen går bakom molnen respektive kommer fram ur molnen. Vanligtvis skiftar sol respektive molntäckningen av solen med högre frekvens än vid halvklart väder. Typiska situationer är soliga sommardagar med förekommande cumulusmoln som rör sig över himlen och växelvis täcker eller släpper fram solen.

*Molnigt* är detsamma som mycket moln, dvs sol eller måne visar sig endast under korta stunder. Säger man att molnen dominerar så är solstunderna (månstunderna) något längre.

I visa prognoser anger man variationen i molnigheten genom att säga mulnande, ökande molnighet, uppsprickande etc. det är dock inte relevant så länge inte tidsutvecklingen av scenariot skall beaktas.

När man anger molns egenskaper så anges framförallt molntyp, molnbas och moln höjd. *Molnbasen* anger höjden till molnens underdel, alltså på vilken höjd som molnen börjar. Molnbasen varierar från några hundra meter upp till ca 10-

12 km. Molnens utsträckning, både molnbas och molnhöjd, är olika beroende på breddgrad. Höga moln är på höjder 3-8 km i polartrakterna, 5-13 km vid mellanbreddgraderna samt 6-18 km vid tropikerna. Medelhöjdsmoln befinner sig på 2-4 km, 2-7 km respektive 2-8 km för motsvarande breddgrader. Med låga moln avses moln med en molnbas under 2 km. Det finns dessutom speciella moln som exempelvis nattlysande moln med mycket hög molnbas, men som inte behandlas här. *Molnhöjd* anger avståndet från molnets undersida till dess översida.

Molntypen anges med ett antal enkla beskrivningar av molnens form hämtade från latinet. Det vanliga är att även höjden tas med i beskrivningen av moln på sånt sätt att det finns låga, medelhöga och höga moln samt moln som sträcker sig genom nästan hela troposfären. Det används idag vid väderobservationer ett molnindex där varje molntyp anges med beteckning enligt  $C_h n$ . Där  $h$  är ett tecken L, M eller H beroende på om det är lågt, medelhögt eller högt moln samt  $n$  är en siffra (1-9) som är kopplad till molntypen

Den vanligaste molntypen som sträcker sig från låg höjd till hög höjd är cumulonimbusmoln (åsk eller bymoln, Cb). Cb bildas genom konvektiv lyft av luften vilket gör att de ofta bildas ur mindre cumulus moln. Cb kan ha låg bas men sträcker till höga höjder, från några hundra meter till 10 -12 km, där de översta delarna består av iskristaller. Nibustratus (regn eller snömoln, Ns) sträcker sig från låg höjd upp till 3 km eller mer. Både Ns och Cb moln är så kallade regnmoln vilket innebär att de ofta ger regn.

Exempel på låga moln är stratus (dimmoln, St), stratocumulus (valkmoln, Sc) och cumulus (stackmoln, Cu) och kan exempelvis ha en molnbas på mellan 300 – 2000 m. Stratus och stratocumulus är ofta täckande moln, som täcker stora områden och som upplevs som om de täcker hela himlen, 8/8-delar. Cumulus humilis är vad som vanligtvis kallas vackert väder moln.

Böljemoln eller Altocumulusmoln (Ac) befinner sig på medelhöjd. Molnhöjden kan variera kraftigt men dessa moln är ofta molnbollar eller molnflak med ljus undersida och därmed tunna. Ac bildas ofta genom konvektion eller förtätning av cirrusmoln. Altostratusmoln (As) eller skiktmoln är ofta täckande och relativt täta. Dessa moln bildas ofta genom hävning av vidsträckta luftlager, regnstrimmor kan falla ur dessa moln.

Cirrus, Ci, eller fjädermoln är tunna höghöjdsmoln som består nästan uteslutande av iskristaller och har ett trådigt eller fjäderlikt utseende. Andra typer av höghöjdsmoln är cirrocumulus (makrillmoln, Cc) och cirrostratus (slöjmoln, Cs). Dessa befinner sig vanligen på 7 - 10 km höjd och endast är några hundra meter tjocka.

*Sikt* är en vanlig karaktärisering av atmosfärens påverkan på synligt ljus. Sikt definieras för strålning (eller ljus), med våglängder nära maximum för ett mänskligt öga, dvs våglängder kring 0,55  $\mu\text{m}$ , som det avstånd då strålningen sjunkit till 2% alternativt 5% av ursprungliga nivå. Sikt enligt den första definitionen kallas *meteorologisk sikt* (eng. visibility) och används vanligtvis av militären samt vid specificering av utrustning. Definitionen av observerbar sikt utgår från att strålningen gått ner till 5%. Den senare modellen är definierad enligt Wold Meteorological Organisation (WMO). Ursprunget till de olika de-

initionerna är olika uppskattningar av det mänskligt ögas möjlighet att särskilja en lägsta kontrastskillnad (i medeltal), vilken anses vara 2% eller 5%.

Olika nivåer av *observerbar sikt* ges i tabell 3. För att få fram vilka nivåer som gäller för *meteorologisk sikt* så är det bara att multiplicera tabellens värden med 1,3. *Meteorologisk sikt (räckvidd)* anger motsvarande sträcka då signalnivån sjunkit till 2 %, beroende på dämpning i atmosfären. Meteorologisk räckvidd kan approximativt beräknas utifrån sikt med hjälp av tumregler eller alternativt mätas.

*Tabell 3: Beskrivning av sikt enligt SMHI<sup>2</sup>. En omräkning till meteorologisk sikt kan göra genom att multiplicera observerbar sikt med faktorn 1,3.*

Beskrivning	Observerbar sikt (WMO)
Mycket god sikt	> 30 km
God sikt	10 – 30 km
Måttlig sikt	4 – 10 km
Disigt	2 – 4 km
Mycket disigt	1 – 2 km
Dimma	200 – 1000 m
Tätt dimma	50 - 200
Mycket tät dimma, i moln	< 50 m

---

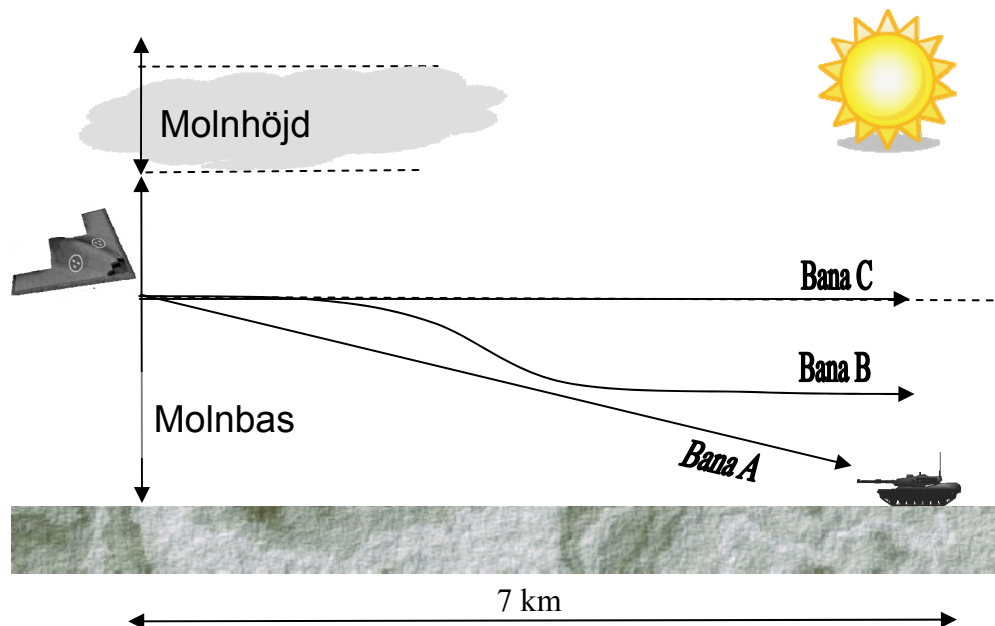
<sup>2</sup> [www.smhi.se](http://www.smhi.se)

### 3 Väderscenarier

I detta avsnitt kommer några olika väderfall att specificeras. Dessa väderfall kommer senare att användas för att studera UAV-systemets väderpåverkan. Väderfallen som beskrivs i detta avsnitt är vanliga svenska väderfall, men i det fortsatta arbetet kommer även internationella scenarier såsom öken och tropiska scenarier att studeras.

#### 3.1 A: Vackert väder

Denna vädersituation är hämtad från markmålsstudien [7] ”S1a Bekämpa fallskärmsluftlandsättning”. Solig försommar dag med nästan klart väder. Molnen består av lätta stackmoln som i allmänhet kallas ”cumulus” och lätta stackmoln ”cumulus humilis”. Det är konvektiva moln som främst förekommer över land om sommaren. Molnen består av vattendroppar och då de bildas om förmiddagen kan molnbasen ligga kring ca 500 meter, men under dagen då de växer i mäktighet höjs molnbasen successivt till mellan 1 000 och 2 000 meter.



Figur 4. Väderscenariot Vackert väder.

Datum:	2020-05-16
Tidpunkt:	kl. 8:00
Temp, marknivå:	+10°C
Luftfuktighet, marknivå:	50 %
Lufttryck, marknivå:	101.3 kPa
Molntyp:	Cumulus humilis
Molnbas:	800 m
Molnhöjd:	300 m

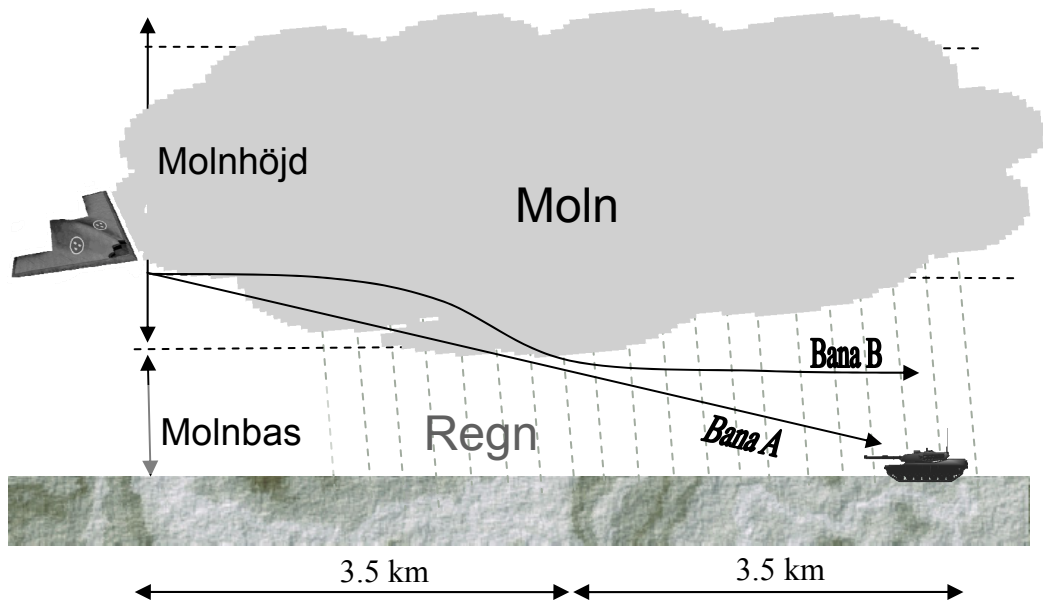


Molnighet:	2/8
Sikt:	10 km
Ljusförhållanden:	Gryning kl. 04:30-05:30 och skymning kl. 22:30-23:30
Vind:	0 m/s

Anflygningen sker på 2000 m höjd och cirkelbanan på slutet sker på sådant avstånd att sensorernas depressionsvinkel mot målområdet hålls konstant på ca 40°. Under anflygningen är det inga moln som stör sikten. Det är inte heller några moln som skymmer solen.

### 3.2 B: Regn

Denna vädersituation är hämtad från markmålsstudien ”3b Vapensmuggling via vägar och stråk”. Molntypen Nimbostratus är ett nederbördsmoln som är mycket vanligt vid frontpassager och ger ihållande regn eller snöfall. Molnets undersida ligger på några hundra meter och dess ovansida på 4 000 - 8 000 meter. Dess vattenhalt har antagits enligt [36]. I ett regnmoln finns oftast kraftiga uppåtvindar vilket gör att moln består av både mindre och större droppar. I denna rapport ansätts regnet från molnbasen. Detta för att inte riskera att dubbelräkna dämpningen då vattenhalten är givet i molnet och intensiteten är givet för regnet.



Figur 5. Väderscenariot Regn.

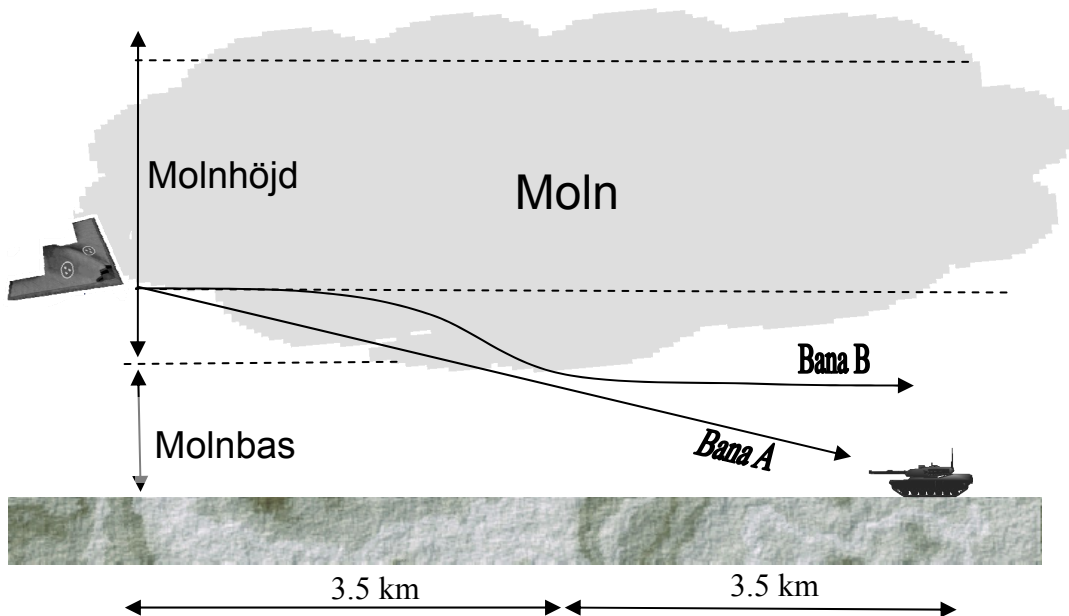
Datum:	2020-11-21
Tidpunkt:	kl. 2:00
Temp, marknivå:	+2°C
Luftfuktighet, marknivå:	85 %
Lufttryck, marknivå:	101.3 kPa
Molntyp:	Nimbustratus
Molnbas:	150 m
Molnhöjd:	4000 m
Molnighet:	8/8
Droppstorlek:	5-10 µm
Vattenhalt i molnet:	0.33 g/m <sup>3</sup>
Luftfuktighet i molnet:	95-100 %
Regnintensitet:	5 mm/h
Droppstorlek:	~ 2 mm
Sikt:	2 km
Vind:	0 m/s

Det ovan beskrivna vädret har pågått under en timme och innan dess uppehåll (se scenario Moln).

Anflygningen i detta scenario börjar på 500 m höjd, men minskar till 150 m höjd efter 3.5 km. Detta för att EO-sensorerna skall ges möjlighet att verka, men då på bekostnad av risken för visuell eller akustisk upptäckt.

### 3.3 C: Moln

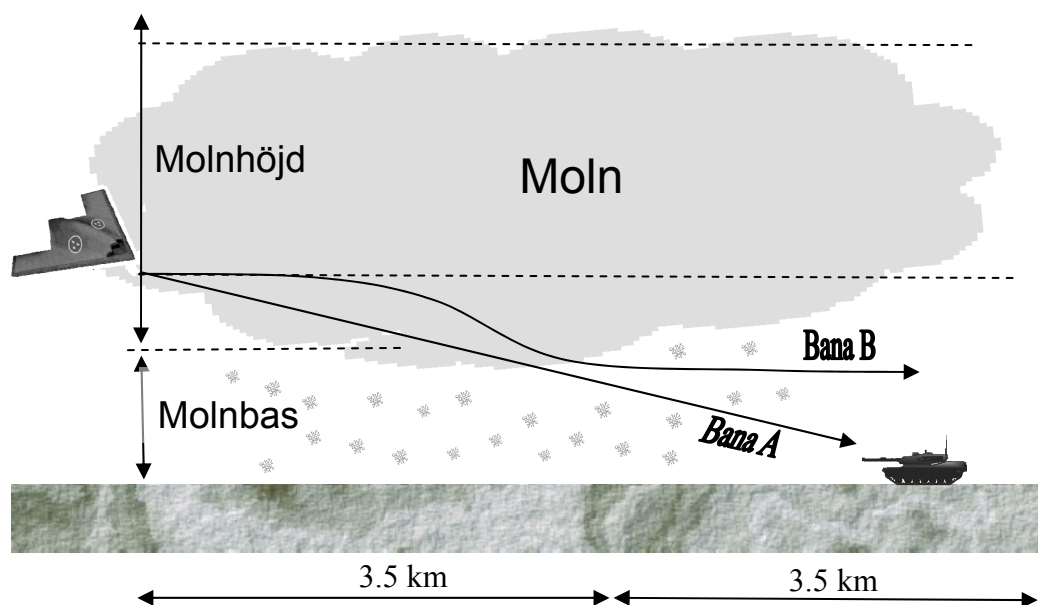
Detta scenario är detsamma som i regnscenarioet förutom att det i detta scenario inte regnar.



Figur 6. Vädersscenarioet Moln.

### 3.4 D: Snöfall

Denna vädersituation är hämtad från markmålsstudien "N2a Bekämpa underhållsförband (luftvärnsskyddat)". Scenarioet består av mulet väder med snöfall. Sikten är disig. Fordonen i scenarioet är rena från snö.



Figur 7. Vädersscenarioet Snöfall.

Datum:	2020-02-12
Tidpunkt:	kl. 22:00
Temp, marknivå:	-5°C
Luftryck, marknivå:	101.3 kPa
Molntyp:	Nimbustratus
Molnbas:	300 m
Molnhöjd:	4000 m
Molnighet:	8/8
Droppstorlek:	5-10 µm
Vattenhalt i molnet:	0.33 g/m <sup>3</sup>
Luftfuktighet i molnet:	95-100 %
Snöfall:	1 mm/tim ekvivalent regnintensitet [8].
Sikt:	2 km
Vind:	5 m/s
Ljusförhållanden:	Gryning kl.08:00-09:00, skymning kl.15:00-16:00

## 4 Vädrets påverkan på optroniska sensorer

Vädrets inverkan på optiska sensorers prestanda är beroende av sensorns konstruktion. Med optiska sensorer avses här sensorer som arbetar med strålning inom de optiska våglängdsområdena, t.ex. UV-, IR- eller visuella våglängdsområdet. I denna rapport begränsas det optiska sensorområdet till våglängdsområdet mellan ultraviolett och långvågig infraröd. Inverkan av meteorologiska parametrar på sensorprestanda inom området är direkt parametrarna *sikt*, *nederbörd* och *luftfuktighet*. Parametrar för indirekt inverkan är *temperatur*, *vindhastighet* och *vindriktning*.

Sikten kan som nämnts tidigare användas för att karaktärisera atmosfärens egenskaper i det optiska området. Detta gäller främst mängden av partiklar eller aerosoler som direkt påverkar sikten. Typen av aerosol har betydelse då vissa typer av aerosol absorberar mera strålning medan andra typer av aerosol sprider strålningen mest. Luftfuktigheten har i kombination med aerosol en indirekt inverkan på atmosfärstransmissionen. Detta då aerosoltillväxten varierar kraftigt med mängden fukt i luften, se exempelvis Nilsson [9]. Tillväxten av aerosol på grund av fuktig luft är en av de viktiga processerna vid molnbildning och bildningen av dimmor, men aerosoltransmissionen påverkas långt innan det bildas moln- eller dimmdroppar.

Aerosoler är partiklar eller droppar som svävar fritt i luften. Aerosoler kan bestå av fast material, fasta partiklar med skikt av fukt, droppar med fasta partiklar i droppen eller helt genom av flytande fas. Dropparna kan bestå av rent vatten eller olika vattenlösningar med exempelvis mer eller mindre mängd upplöst salt. Sikten kan användas som ett mått på mängden aerosol i atmosfären. Storleksfördelningen hos aerosol varierar med fuktigheten, men radien är vanligtvis av storleksordningen från  $10^{-2}$  till  $10\ \mu\text{m}$ . Mindre partiklar kan också förekomma men då spridningen från mindre aerosolpartiklar är relativt svag kommer dessa att vara av mindre betydelse här. Under antagandet att aerosoler i huvudsak består av vatten kommer strålningen ha sin maximala dämpning, räknat som extinktion per volymenhet, för radier som är ungefär lika med våglängden. Det innebär att långvågig infraröd (LWIR) strålning kommer att dämpas mindre än vad mellanvågig infraröd (MWIR) strålning och visuellt ljus kommer att göra, för normala atmosfärsaerosoler. Aerosoler med oregelbundet formade partiklar kan ha dämpningsmaximat förskjutet spektralt i förhållande till aerosoler som består av droppar.

Nederbörd är ett begrepp som beskriver alla former av regn, snö och hagel. Dessa har i stort likartad inverkan på transmissionen för strålning med olika våglängder inom det optiska våglängdsområdet, dvs från ultraviolett (UV) strålning till LWIR. Detta då partikelfördelningen hos nederbörden är betydligt större än våglängden för strålningen. Det har alltså ingen betydelse om det är regn, snö eller hagel, optisk strålning kommer i stort att dämpas på likartat sätt oavsett våglängd. Det finns dock skillnader i dämpning av strålning mellan de olika formerna av nederbörd. Det är främst kopplat till nederbördsintensiteten. Det finns dessutom skillnader i vilka effekter som orsakar dämpningen. Dämpningen av optisk strålning i nederbörd orsakas av dels absorption och av spri-

ding mot dropparna respektive partiklarna (iskristallerna eller isklumparna). Det kan vara betydlig skillnad i återspridd strålning från exempelvis iskristaller i förhållande till om samma mängd vatten kommer som smält nederbörd, exempel på detta syns när skenet från bilstrålkastare träffar snöflingor i förhållande till motsvarande i regn.

Luftfuktighetens indirekta inverkan på dämpning av strålningen är redan omnämnd men den direkta inverkan är framförallt kopplat till gasdämpningen i vattenångan. LWIR strålning dämpas betydligt mer än MWIR strålning och ljus i det visuella våglängdsområdet. Detta gör att LWIR system kommer att ha kortare räckvidd i tropiska miljöer med varm och fuktig luft än för torra (arida) klimat. Detta gör också att räckvidden i marina miljöer är något sämre än för motsvarande MWIR system. Det skall dock tilläggas att räckvidden är en fråga om känslighet hos detektorsystemen liksom valet av detektorsystem är beroende av många andra faktorer.

Temperaturen har en indirekt inverkan på räckvidden hos olika system. Ur atmosfärtransmissionsperspektiv kommer temperaturen avgöra om aerosolerna eller nederbörden kommer att bestå av iskristaller eller av vattendroppar. Dessutom avgör temperaturen hur mycket vatten som kan bindas i luften. Det betyder att antalet absorberande vattenmolekyler kan öka avsevärt vid högre temperaturer och om vattnet fälls ut eller inte, dvs om det bildas moln eller dimmor. Eftersom temperaturen varierar med solens höjd på himlen eller om det är natt så kommer temperaturen variera under dygnet på de flesta platser och därmed transmissionen.

Vindhastigheten och vindriktningen kommer att vara avgörande på många platser för aerosolegenskaperna i luften. I torra arida eller ökenområden kan damm att blåsa upp med olika intensitet och egenskaper beroende av riktning och hastighet är uppenbart. Vindhastigheten och vindriktningen påverkar aerosolegenskaperna och därmed sikt och dämpning för alla våglängder och för alla typer av områden som exempelvis för nordiska områden eller ute till havs. Det är dock inte enbart den momentana vindhastigheten och vindriktningen som har betydelse. Stora mängder partiklar genereras till havs, som exempelvis aerosoler genererade ute på Atlanten påverkar aerosolegenskaperna i hela norden. Det är också känt att sandstormar i Sahara återverkar på aerosolen på den Amerikanska kontinenten, se exempelvis [10]. Koren, se [10] uppskattar att stora delar av Amazonas göds av mineraler från Saharas damm. Exempel på att stora aerosol- eller dammoln från Sahara blåser även till Norra Europa med nedfall av damm eller fint sand även i de nordiska länderna [11]. Inverkan på detta har klimatologiska effekter och är därför relativt väl studerat.

## 4.1 Atmosfärstransmissionsmodeller

### 4.1.1 MODTRAN

Programmet eller koden för att beräkna atmosfärstransmissionen MODTRAN "MODerate resolution TRANsmission", se *Kneisys m.fl.* [12], består av en samling modeller av atmosfärens egenskaper, modeller för solens och månens radians samt modeller för att beskriva transmission av elektromagnetisk strålning inom det spektrala området 0 till  $50000 \text{ cm}^{-1}$ . Den spektrala upplösningen hos MODTRAN är  $2 \text{ cm}^{-1}$  (FWHM) och ges i vad som kallas medelvärdesbildade

steg på  $1 \text{ cm}^{-1}$ . Modellen är avsedd för bredbandiga system och har inte tillräckligt hög spektral egenskap för att på ett riktigt sätt beskriva transmissionen av smalbandigt laserljus.

I MODTRAN ingår modeller för att beräkna atmosfärstransmission, atmosfärens bakgrundsradians, direkt sol- och måninstrålning, enkelspridd sol- och månlyjus, multipelspridd solljus samt termisk radians. Enkelspridd strålning är spridd endast en gång i partiklar (aerosoler) medan multipelspridd strålning är spridd flera gånger.

Modellerna innehåller effekten av spridning mot molekyler, sammanhängande molekylära spektrala absorption, den s.k. kontinuumabsorption samt absorption och spridning av aerosoler och hydrometeor. I koden finns modeller för atmosfärsaerosoler, moln och regn samt möjligheten att byta ut dessa modeller med egna modeller för motsvarande. Vid beräkningar längs sluttande banor och vid atmosfärsdämpning längs en sträcka eller bana tas hänsyn till sfäriska refraktionen och jordens krökning.

Dessa modeller är delvis utvecklade och samlade av MODTRAN i en gemensam kod av Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base i Massachusetts, (benämnt AFGL även kallad Phillips Laboratory). Ursprunget till MODTRAN är den serie av koder som kallades LOWTRAN. Utvecklingen av modellerna påbörjades under första delen av 1970-talet, se *Waldman m. fl.* [13]. De första modellerna bestod av ett antal tabeller och grafer, ur vilka efterfrågade värden för transmission kunde beräknas. Ur dessa modeller utvecklades datormodeller som gick under namnet LOWTRAN och HITRAN, för en lågupplöst respektive för en högupplöst transmissionsmodell. HITRAN är i huvudsak en modell avsedd att beräkna transmissionen för lasrar. Utvecklingen av LOWTRAN-modellen fortsatte och modellen släpptes ut i ett antal versioner som namngavs med en siffra. LOWTRAN-modellen, med en upplösning på  $5 \text{ cm}^{-1}$ , och MODTRAN-modellerna har etablerats med HITRAN. Efterhand som HITRAN blivit tillgängliga i nya förbättrade versioner har LOWTRAN och MODTRAN uppdaterats. Den första versionen av LOWTRAN kom 1971 och flera uppdateringar gjordes fram till 1988 då den sista versionen LOWTRAN7 kom. LOWTRAN7 hade flera förbättringar och fick ett utökat spektralområde, gränsen inom UV flyttades ned till  $0,2 \mu\text{m}$  (tidigare hade gränsen gått vid  $0,25 \mu\text{m}$ ). Koden har levererats av AFGL till alla som registrerat sig. Detta har gjort att koden används av flera olika program i exempelvis systemberäkningar eller i olika simuleringsprogram. En anpassning av koden med ett interaktivt gränssnitt för PC levereras av Ontar Corporation [14], under namnet PCModWin.

MODTRAN utnyttjar en tre-parametermodell för att beräkna transmissionen molekylära linjeabsorptionen, dessa parametrar är atmosfärstryck, temperatur och en linjebredd. I modellen används molekylära kontinuumabsorptionen, molekylspridning, aerosol- och hydrometeorabsorption och spridning. Spridningen av strålningen i atmosfärens aerosoler kan beräknas från partikelstorleksfördelningen hos den valda aerosolen.

Atmosfärmodellerna är uppdelade i olika skikt från 0 km till 120 km (sfäriska skal kring jorden), där ett antal parametrar ges för varje höjd. De smalaste luftskikten närmast jorden ges med steg på enstaka km upp till 25 km därefter i steg om 2,5 km upptill 50 km höjd, varefter stegen är 5 km respektive 10 km.

De representativa atmosfärmodellerna är "Tropical Model", "MidLatitude Summer", "Midlatitude Winter", "SubArctic Summer", "SubArctic Winter" och "1976 U S Standard ". För varje sådan atmosfärmodell ges temperaturen, atmosfärstrycket, densiteten och blandningsförhållande för molekylerna H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, CO och N<sub>2</sub>O. Molekylerna CO<sub>2</sub> och O<sub>3</sub> anses säsongsoberoende och finns tillsammans med ca 18 andra molekyler i modellen U.S. Standard Atmosphere. Den absolut vanligaste molekylerna i luften N<sub>2</sub> finns med i modellen men den är inte optiskt aktiv, dvs absorberar inte optisk strålning, då den inte har något dipolmoment. Det finns också möjlighet att definiera egna atmosfärmodeller efter uppmätta data.

I MODTRAN beräknas aerosoltransmissionen eller radianseffekter som funktion av aerosoler i luften. Aerosoler har olika egenskaper beroende hur de bildas och sprids. Det gör att aerosoler på olika höjd över marken har olika egenskaper. Fördelningen av exempelvis aerosol från vulkanutbrott når mycket höga höjder och har andra egenskaper än saltpartiklar som bildats genom uppkast till havs. I MODTRAN finns fyra klasser av aerosolskikt. Det är gränsskiktsaerosol (0-2 km), övre troposfärsaerosol (2-10 km), lägre stratosfärsaerosol (10-30 km) samt stratosfärsaerosol (mesosfärisk aerosol) (30-100 km). Transmissionen genom aerosolen beräknas med Beer's lag

$$Tr = \exp\{-\alpha(\nu) \cdot k \cdot ds\}$$

Där  $\alpha(\nu)$  avser normaliserade extinktionen som funktion av vågtalet,  $\nu$ , en aerosol skalningsfaktor,  $k$ , och propageringssträckan,  $ds$ . Normaliserings- eller skalningsfaktor har värdet 1 vid 0,55  $\mu\text{m}$  och varierar beroende på aerosolegenskaperna och säsong. Det finns möjlighet att ange både skalningsfaktorer och extinktionskoefficienter i MODTRAN.

För atmosfärens gränsskikt (ca 0 - 2km) finns ett antal färdiga aerosolmodeller i MODTRAN, se tabell 4. Dessa aerosolmodeller används tillsammans med en parameter meteorologisk räckvidd, som avser siktsträcka med 2 % kontrast som gräns, för att beräkna transmissionen. Aerosolmodellerna bygger på aerosolfördelningar som kan hittas i handböcker, se exempelvis [15].



Tabell 4. Aerosolmodeller som används i MODTRAN för gränssiktet.

Aerosol modell	Siktsträcka [km]	Kommentar
No Aerosol	-	Ingen dämpning pga aerosol
Rural	23	Landsbyggdsmodell med 23 km sikt (bra sikt). Modellen är gjord för att motsvara kontinentala aerosoler samt är beroende av atmosfärmodellens luftfuktighet.
Rural	5	Landsbyggdsmodell med 5 km sikt, se förövrigt ovan.
Navy Maritime	Mod	Aerosolmodell som innehåller havs-, samt två komponenter som beror av vindhastigheten momentant och medelvind under 24 h. Det finns flera modeller för havsaerosol.
Maritime	23	Aerosolen bygger på landsbyggdsaerosolmodellen men den övervägande delen (75%) är aerosol från havet (sea sprey). Den modellen som mest liknar förhållanden i Sverige, enligt Nilsson [9].
Urban	5	Urban (stadsmiljö) aerosolmodell, sikt 5 km. Innehåller en stor portion av sotpartiklar (35%) som är adderad till landsbyggdsaerosolen.
Tropospheric	50	Används för att beräkna extremt klara luftförhållanden. Aerosolmodellen motsvarar landsbyggdsmodellen (rural) men utan de större partiklarna i modellen.
User defined	23	Använder definierad aerosol.
Fog advection	0,5	Avser advektionsdimma, som bildas då luftmassor flyttas från varma till kalla områden. Ofta stora områden med dimma.
Fog radiation	0,2	Avser strålningsdimma, är ofta något tätare än advektionsdimma. Dimma kan dock vara betydligt tätare än att ha sikt på 200 m.
Desert extinktion		

Aerosol för högre nivåer är mycket mera likformig än aerosolerna i gränsskiktet. I modellen för den övre troposfären (2 - 10 km) har stora partiklar mycket lite effekt på propageringen. Stora partiklar når mycket sällan så höga höjder.

Den lägre stratosfären är mycket säsonsberoende, detta då höjden hos tropospausen varierar mycket med säsongen. Aerosolerna på dessa höjder är i stort

jämt fördelade över hela jordklotet. Vulkanaska kan påverka aerosolen på dessa höjder mycket kraftigt. Det finns modeller för vulkanaska i MODTRAN.

#### 4.1.2 Koppling mellan CameoSim och MODTRAN

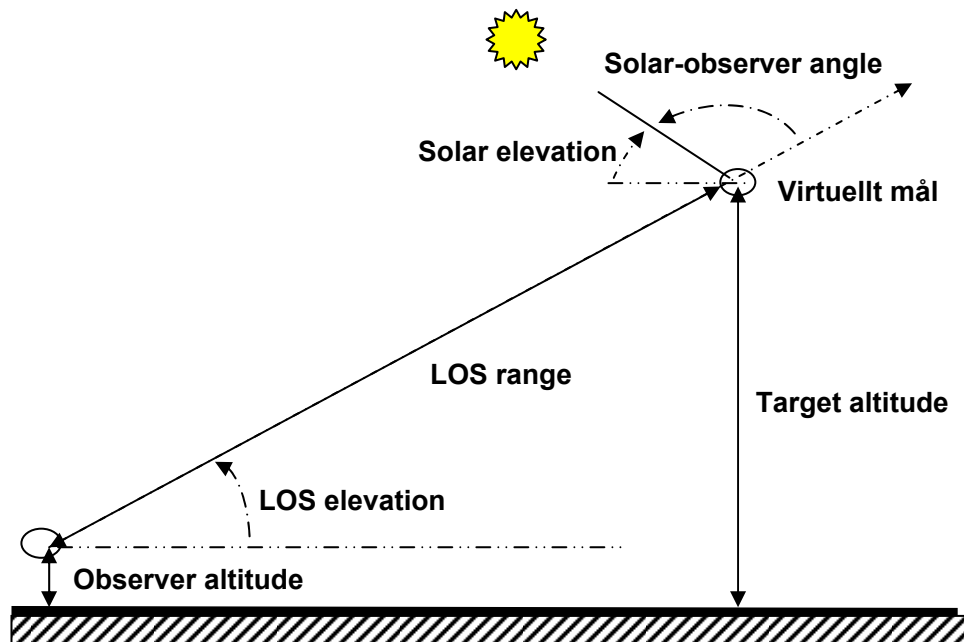
För omvärldssimulering inom IR-området används programmet CameoSim. Programmet utgår från väderdata och materialbeskrivningar för scenelementen och utnyttjar sedan strålföljning och grundläggande principer inom termofysik och radiometri vid renderering av bilder. Dessa bilder simulerar den infallande strålningen till en sensor. En separat sensorsimulering som tar hänsyn till effekter av den optiska avbildningen och detektoregenskaper hos en specifik sensor krävs för att generera simulerade sensordata. För sensorsimulering utnyttjas egenutvecklade algoritmer.

En begränsning i CameoSim är att termofysikaliska beräkningar endast utförs i en dimension, vilket medför att värmeflödet till och från en yta beräknas endast i djupled. För att mer noggrant simulera komplexa objekt kan CameoSim hantera objekt som är beräknade i programmet RadTherm, som har möjlighet till termofysikaliska beräkningar i tre dimensioner.

För att beräkna de atmosfärer som används av CameoSim används programmet MODTRAN som är beskrivet i avsnittet ovan. På grund av licensregler levereras inte MODTRAN med CameoSim, men väl installerat används MODTRAN som om det vore en del av CameoSim via dess normala grafiska användargränssnitt. I CameoSim har man valt att dela upp atmosfären i en spektralatmosfär och en termisk atmosfär. Vid modellering i det visuella våglängdsbandet, som inte innehåller någon termisk information, behöver man därför endast ta med den spektrala delen av atmosfären.

I MODTRAN skapas en parametriserad atmosfär som beräknas i de diskreta punkter i rymden som anges av användaren. När man sedan använder atmosfären i simuleringar interpoleras värden fram mellan de förberäknade värdena för att få värden som stämmer med de punkter som gäller för aktuell simulering. Hur tätt man måste beräkna punkter för att göra korrekta interpolationer har inget enkelt svar. Generellt kan man säga att vid klart väder behövs fler punkter än vid mulet väder. Fler punkter ger givetvis bättre förutsättningar, men beräkningar i MODTRAN kan riskera att bli mycket omfattande och tidskrävande, så onödigt stora atmosfärer ska inte skapas vare sig det gäller i volym eller våglängdsband.

För att beräkna en atmosfär anges på vilken plats och vid vilken tidpunkt som atmosfären skall gälla. Geometriska parametrar som definierar de punkter där man beräknar atmosfären angivet i "LOS range", "LOS elevation", "observer altitude", "target altitude" och "Solar-observer angle" visas i figur 8.



Figur 8. Geometriska parametrar i MODTRAN.

MODTRAN är uppbyggt av flera modeller som är anpassade för olika förutsättningar. Ett antal inställningar ska anges i programmet såsom årstid, atmosfärisk modell och markegenskaper alternativt ett material. Vidare anges om det är molnigt och i så fall vilken molntyp det är, t.ex. cumulus eller nimbostratus. Man anger även i förekommande fall regnintensitet i mm/h. I vädersituationer är himlen ofta inte helt och hållet molnig. Tyvärr kan man endast ange om det är molnigt och molntyp. Det innebär att om man valt molnigt så är hela hemisfären täckt av den molntyp som man valt. Detta gör att scener sedda i det visuella området som kräver belysning blir mörka om man har moln i scenariot. Molnbasen och molnhöjd bestäms även av molntyp. Det finns möjlighet att i CameoSim skapa egna moln utifrån geometrier med materialegenskaper som man godtyckligt kan placera i scenen. Detta ger frihet att både skapa bilder av moln i scenen samt på ett friare sätt styra molnigheten. Detta är något som inte gjorts i de bilder som presenteras i denna rapport.

#### 4.1.3 Högupplösta transmissionsmodeller

I detta avsnitt följer en sammanställning av några högupplösta transmissionsmodeller som kan användas för att verifiera simuleringarna med MODTRAN.

**HITRAN** används för att beräkna utbredningen av monokrom strålning, laserstrålning, genom atmosfären. För laserstrålning kan man inte utnyttja t.ex. MODTRAN, utan det är nödvändigt att använda ett program som utnyttjar en högupplöst molekyl-databas för absorption- och transmissionsberäkningar genom atmosfärens gaser. HITRAN är en akronym för "High-resolution transmission molecular absorption database".

HITRAN är en sammanställning av spektroskopiska parametrar som används av flera olika datorprogram för att prediktera och simulera transmission och emission i atmosfären. Projektet att etablera databasen startades av AFCRL i

slutet av 1960-talet för att svara på behovet av en detaljerad kunskap av om atmosfärens egenskaper inom det infraröda området. Sammanställningen HITRAN, och dess jämförbara databas HITEMP (absorptionsparametrar för spektroskopi vid höga temperaturer), utvecklas f.n. vid Atomic and Molecular Physics Division, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics under ledning av Dr. Laurence S. Rothman. Flera versioner HITRAN har på senare tid getts ut på CD-ROM. Några av dem är HITRAN 1992, 1996 och 2000. Databasen HITRAN är empirisk och etablerades med hjälp av spektroskopimätningar av olika gaser, f.n. 35 stycken med i förekommande fall olika isotoper.

Några exempel på program som direkt utnyttjar HITRAN-databasen är FASCOD, PcLnWin, HAWKS och HitranPC. Åtminstone tre av programmen säljs av Ontar Corporation i USA. HITRAN-databasen ligger också till grund för modellerna LOWTRAN och MODTRAN men där har en mellanliggande databas med fast upplösning etablerats för respektive gas.

**FASCOD** är en allmänt accepterad mjukvara med syftet att prediktera atmosfärens transmission och radians med hög (linje för linje) spektral upplösning. De grundläggande atmosfärsberäkningarna i FASCOD utför noggranna och snabba beräkningar från UV, genom det visuella, IR och mikrovägsområdet. (0-50000 cm<sup>-1</sup>).

**PcLnWin** är en kommersiell PC-version av Air Force Phillips Laboratory's FASCOD även kallad FASCOD3P. PcLnWin modellerar även atmosfärens aerosolinnehåll på snarlikt sätt som i MODTRAN. Ontar Corporation [14] marknadsför och tillhandahåller även PcLnWin.

**HitranPC** (version 3.0) är utvecklat av Professor Dennis Killinger och Dr. William Wilcox vid University of South Florida (USF). Användaren kan definiera olika gaskoncentrationer eller använda definierade standardmodeller. Programmet består av flera delprogram och har ett annat gränssnitt än PcLnWin. Det kan för vissa applikationer vara snabbare och enklare att använda. Det har dock inte lika omfattande modellering av atmosfären t. ex. beträffande aerosoler. HitranPC hanterar även spektraldatabasen *NIST/EPA* som liksom HITRAN består av en högupplöst molekyl-databas för absorption och transmission, men för ett stort antal molekyler med mer eller mindre komplicerad struktur. Programmet HitranPC kan t.ex. beräkna transmissionen genom atmosfären där en viss mängd gas släppts ut. Detta åstadkoms genom att först beräkna transmissionen genom atmosfären, därefter i gasmolnet, varefter produkten beräknas.

**HAWKS**. Det nya programmet JHAWKS "JAVA HITRAN ATMOSPHERIC WORKSTATION"; har nyligen getts ut i programspråket Java för att erhålla en plattformsoberoende programkod för datorer med t.ex. Windows-, UNIX-, och MAC- operativsystem. Programmet distribueras tillsammans med HITRAN-2000-databasen på CDROM av Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics och Ontar Corp. i USA. Med hjälp av programmet kan användaren utföra de grundläggande operationerna på databasen, exempelvis göra ett urval med avseende på frekvens, molekyl, isotop, etc och plotta urvalet linje för linje. Det går att överföra valt avsnitt ur HITRAN-databasen till andra program för fortsatta analyser. JHAWKS innehåller inga data för aerosoler.

**LBLRTM** står för "Line-by-line radiative transfer model" och modellen används för radians-beräkningar för långvågig IR och mikrovågstrålning. Modellen är baserad på FASCOD, men strålningsberäkningsdelen har skrivits om. Modellen har tagits fram av Atmospheric and Environmental Research, Incorporated, (AER)<sup>3</sup>.

## 4.2 Simulering av väder med CameoSim och MODTRAN

Inledande simuleringar för en visuell sensor och en IR-sensor har gjorts för de specificerade väderfallen vackert väder, regn och moln. MODTRAN har inte möjlighet att simulera snöfall, så detta fall finns inte med i detta avsnitt. Sensorerna har ett synfält på 5°. Då ljusförhållandena varierat kraftigt för olika väder och beroende på hur långt in i molnet sensorn befunnit sig återges bilderna med hjälp av autofunktionen vid bildåtergivning i Cameosim.

### Scenariot Vackert väder

Tidpunkten för simuleringen av både den visuella sensorn och IR-sensorn är vald till den 1/6 2007 kl.13:00. Som markegenskap används materialet för MODTRAN.farm och som aerosolmodell används "Rural" med 23 km visibilitet. Scenariot är helt molnfritt.

För den visuella sensorn har en spektral atmosfär använts vid simuleringen. I MODTRAN har årstiden sommar angetts och modellen "Subarctic summer".

För IR-sensorn har en termisk atmosfär använts vid simuleringen. Parametrar till denna överensstämmer med motsvarande spektrala atmosfärer som i sig utgör indata till beräkningen av den termiska atmosfären. I MODTRAN har årstiden sommar angetts och modellen "Midlatitude summer".

### Scenariot Regn

De flesta parametrarna i MODTRAN är samma som för vackert väder. I detta scenario ligger dock ett molntäcke i form av nimbostratus moln ovanför målområdet med en regnintensitet på 5mm/h. Som molntyp har "Nimbostratus light rain" använts. Molntypen som valts har molnbasen på 160möh som förvalt värde i MODTRAN.

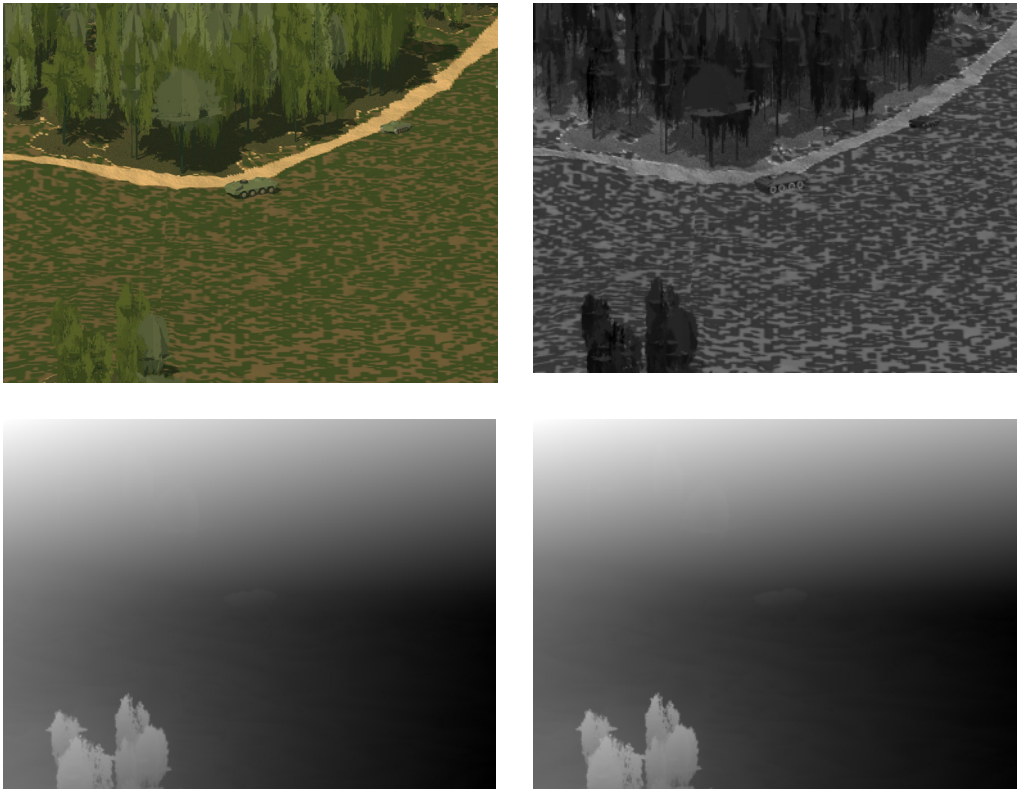
### Scenariot Moln

De flesta parametrarna i MODTRAN är även här samma som för vackert väder. Den stora skillnaden är att som indata till den spektrala och termiska atmosfären har molntypen "Nimbostratus no rain" använts. Molntypen som valts har sin molnbas på 160 möh i MODTRANS standardinställning [16]. Detta går inte att ändra i CameoSim-körningarna.

IR och visuella data har simulerats under en anflygning enligt Bana A i kapitel 3. Data kommer att presenteras för tre olika avstånd från målen.

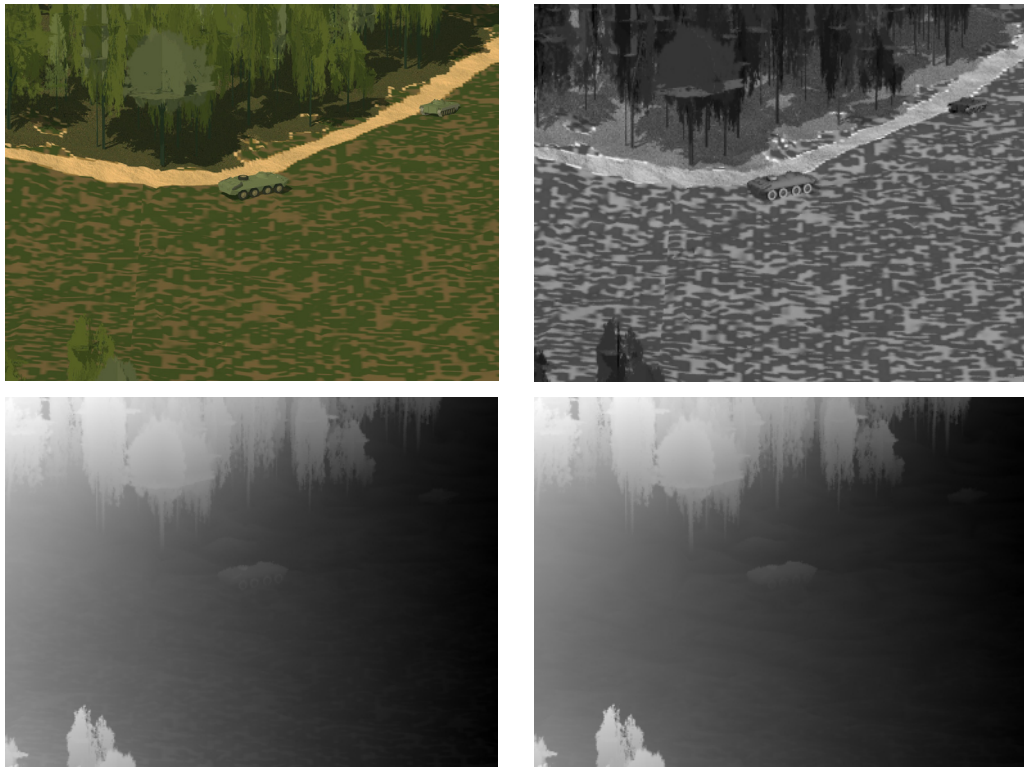
---

<sup>3</sup> [www.aer.com](http://www.aer.com)



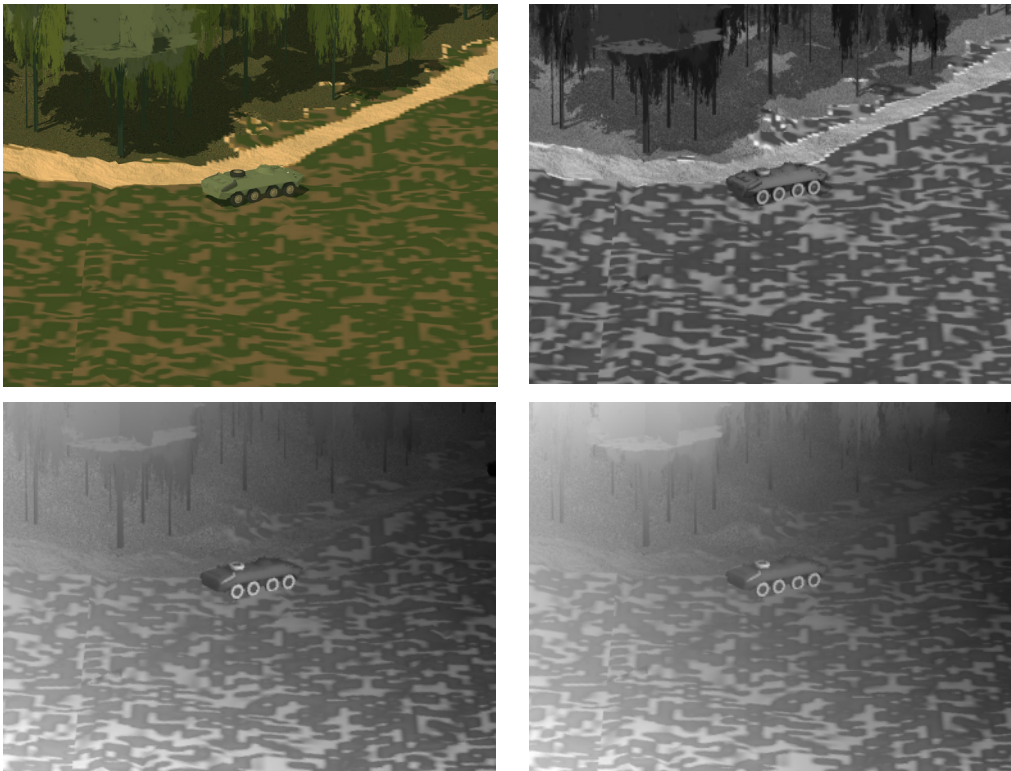
*Figur 9. En visuell bild och tre IR-bilder genererade för de olika väderfallen. De översta bilderna är genererade i vackert väder; bilden nere till vänster är genererad för molnscenariot och bilden nere till höger är genererad för regnscenariot. Avstånd till målet är 850 och depressionsvinkeln 14 grader.*

Data är genererat på ett avstånd om 850 m avstånd till målen och sensorn befinner sig då på 260 möh. På långa avstånd i dåligt väder blir kontrasten för liten för att målen ska kunna upptäckas. På det avstånd som återges i bilderna ovan kan man precis börja ana målet. Man kan notera att de träd som befinner sig relativt nära sensorn framträder mycket tydligt relativt allt annat i scenariot.



*Figur 10. En visuell bild och tre IR-bilder genererade för de olika väderfallen. De översta bilderna är genererade i vackert väder; bilden nere till vänster är genererad för molnscenariot och bilden nere till höger är genererad för regnscenariot. Avståndet till målet är nu 650m.*

Data i figur 10 är genererat på ett avstånd av 650 m och höjden 220 möh (målet befinner sig på 56 möh). På detta avstånd befinner sig UAV-plattformen fortfarande i molnet som har molnbasen på 160 möh. Dock är gångvägen i molnet inte större än att man på detta avstånd kan urskilja målet. Man kan även ana att scenariot med regn ger en något sämre bild än scenariot med enbart moln. På närmare avstånd kan målen lätt upptäckas.



*Figur 11. En visuell bild och tre IR-bilder för de olika väderfallen. De översta bilderna är genererade för vackert väder-scenariot, bilden nere till vänster är genererad för molnscenariot och bilden nere till höger är genererad för regnscenariot. Avståndet till målet är nu 450m.*

Målet i figur 11 är ett pansarskyttefordon BTR70. Detta objekt har stått stilla en längre tid så inga inre värmekällor bidrar till signaturen. Avståndet till målet är 450 m och depressionsvinkeln är 14 grader. Sensorn befinner sig nu precis under molnet. Man kan se inverkan av regn i den nedre högra bilden som har en sämre kontrast och dynamik mellan gråskalorna jämfört med den nedre vänstra bilden där det inte regnar. I de övre bilderna har solen värmt upp området med jord i dagen.

### 4.3 Sammanfattning av vädersimuleringarna med CameoSim

Med hjälp av atmosfärfiler som beräknas med MODTRAN kan olika väderfall simuleras i CameoSim. Inledande simuleringar har gjorts vilka tydligt visar att olika väder och framförallt moln kraftigt degraderar prestanda för de simulerade sensorerna.

MODTRAN i sig är ett något trubbigt verktyg då man inte kan ha en atmosfär som är delvis molnig. Det är alltså inte möjligt att ange en atmosfär som är delvis molnig till 2/8 som anges i "vackert väder"-scenariot. Istället har scenen simulerats helt utan moln. Ett alternativ till detta är att använda en tunnare molntyp t.ex. cirrusmoln. Det är emellertid inte enkelt att översätta en delvis molnig hemisfär av en molntyp till en helt molnig hemisfär av annan molntyp.



Ett sätt att lösa problemet kan vara att tillverka egna molnmodeller och placera ut dessa som objekt i scenen som skall simuleras. Detta är inte gjort i detta arbete.

Det bör nämnas att fokus i detta arbete har varit väder och atmosfärer. Marken i målområdet är en blandning av gräs och jord. På nära håll framträder blandningen som ett något grovt mönster.

För det fortsatta arbetet behöver dessa simuleringar valideras. En metod är att jämföra de parametriska atmosfärerna som räknats fram i CameoSim via MODTRAN med körningar direkt i MODTRAN samt jämföra med teoretiska beräkningar direkt från storheternas definitioner. Man kan även studera kontraster i CameoSimbilder och jämföra dessa med mätningar.

Modellerna som använts kan numera ses som noggranna och är inte gränsättande för hur noga man kan beräkna transmissionen i ett specifikt fall. Osäkerheten bestäms oftast till övervägande delen av att man inte har en noggrann kännedom av transmissionen utmed utbredningssträckan (regncellers exakta utsträckning, intensitetsvariationer hos nederbörden, komplicerad dynamik som leder till inhomogeniteter etc.). Beräkningarna ger därför oftast typiska värden, snarare än att vara giltiga för specifika fall.

## 4.4 Simulering av väder med 3D-lasermodellen

Men underlag från exempelvis MODTRAN, kan även lasersensorers atmosfärspåverkan simuleras väl. Den enklaste nivån är att signalstyrkan dämpas, vilket skapar en sämre bildkontrast, mellan signal och sensorbrus. Utöver detta bryts ljusstrålen upp i vad som kallas scintillationer. Beroende på turbulensstyrka påverkas signalen olika mycket. Dessutom breddas signalen på grund av ljusets spridning genom atmosfären. I en kommande rapport (*Modeling of 3D-laser radar systems*, FOI, 2008) beskrivs teorin bakom simuleringarna mer utförligt.

### 4.4.1 Dämpning

Som beskrivet i avsnitt 4.1 orsakar partiklar i luften dämpning av den optiska signalen på grund av luftens absorption och spridning. Dämpningsfaktorn kan enligt Steinvall [17], beskrivas av

$$\Psi_{attenuation} = e^{-2R \cdot \sigma_{aer}},$$

där  $R$  är envägsavståndet genom atmosfären till målet. Dämpningskoefficienten  $\sigma_{aer}$  kan beskrivas av

$$\sigma_{aer} = \frac{3.91}{V_M} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q},$$

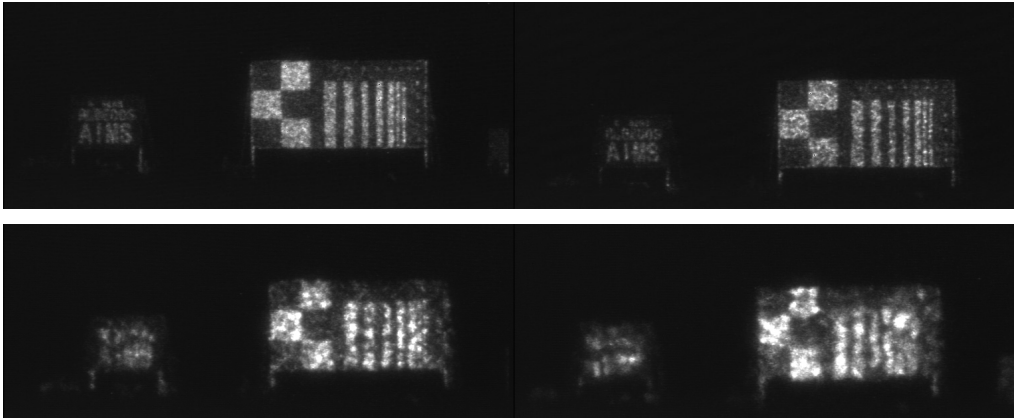
där  $\lambda$  [ $\mu\text{m}$ ] är våglängden och  $V_M$  [km] är visibiliteten. Variabeln  $q$  kan beskrivas genom

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{if } V_M > 50\text{km} \\ 1.3 & \text{if } 50\text{km} > V_M > 6\text{km} \\ 0.585 \cdot V_M^{0.33} & \text{if } 6\text{km} > V_M \end{cases}$$

Ekvationerna ovan gäller endast vid våglängder runt 0.5-2  $\mu\text{m}$ , men eftersom lasermodellen främst är avsedd för detta intervall är det en användbar approximation.

#### 4.4.2 Scintillationer

Vid optisk transport genom atmosfären påverkas färdvägen genom luften av att brytningsindex i luften varierar, på grund av vindar och temperaturskillnader. Detta gör att en homogen ljusstråle ser ut att brytas upp i celler av högre energitäthet, vilka separeras av områden med lägre energitäthet. Detta fenomen visas i figur 12, där en referenstavla är avbildad under försämrade turbulensförhållanden. Fysikaliskt kan detta mönster beräknas med hjälp av fasskärmar [18], men denna metod är mycket beräkningskrävande och är därför inte att föredra för beräkningarna som genomförs inom detta projekt. Istället finns approximerade beräkningar för turbulenscellstorleken samt för den fördelningsfunktionen som beskriver scintillationernas energitäthet, sammanställda i exempelvis [19].



Figur 12. Bilden visar mätningar av samma referenstavla under fyra olika turbulensnivåer. Uppe till vänster är  $C_n^2 < 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  medan för den nedre högra bilden är  $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ . Man ser hur scintillationerna förändras i storlek och intensitetsfördelning. Mätningarna är genomförda med ett GV-system. Bild FOI.

Sammanfattande kan man säga att cellstorleken bestäms av strukturparametern för brytningsindex (även kallad optiskturbulens)  $C_n^2$ , mätsträcka  $R$ , mottagarens fokallängd  $f$ , stråldivergensen  $\phi$  samt våglängden  $\lambda$ . Fördelningsfunktionen som beskriver energitäthetens variationer följer

$$P_{\text{turb}} = \frac{1}{S \cdot \sqrt{2\pi\sigma_{\ln I}^2}} \exp \left( - \frac{\left( \ln\left(\frac{S}{S_{\text{av}}}\right) + \frac{1}{2} \sigma_{\ln I}^2 \right)^2}{2\sigma_{\ln I}^2} \right),$$

där  $S$  är signalen,  $S_{av}$  är medelenergin, och  $\sigma_{ml}^2$  är log-intensitetsvariansen som påverkas av turbulensen  $C_n^2$ , mätsträckan  $R$  samt våglängden  $\lambda$ . Vid stark turbulens visar sig denna förenklade beskrivning av modellen mindre korrekt, och fortsatt utveckling och validering kommer att bli nödvändig.

#### 4.4.3 Breddning

På grund av spridning under laserljusets färd genom atmosfären breddas signalen. Den slutliga strålbredden påverkas av ett antal parametrar enligt [20];

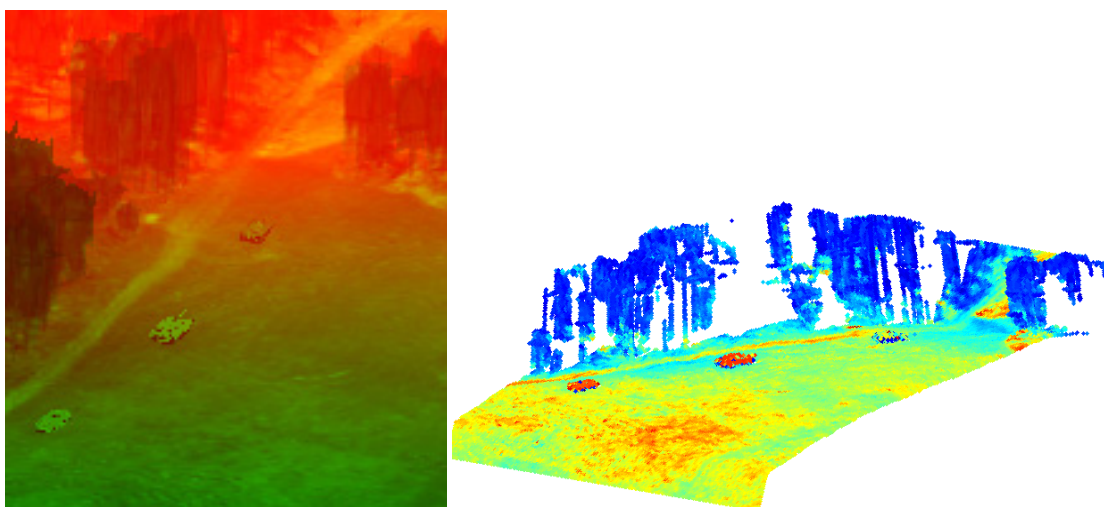
$$w_{spread} = w \cdot \sqrt{1 + 1.624 \cdot (\sigma_{Rytov}^2)^{6/5} \cdot \Lambda_1}, \quad (4-1)$$

där  $\sigma_{Rytov}^2 = 1.23 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot R^{11/6}$ ,  $\Lambda_1 = \frac{\lambda R}{\pi w^2}$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  och  $w$  är den ursprungliga strålbredden.

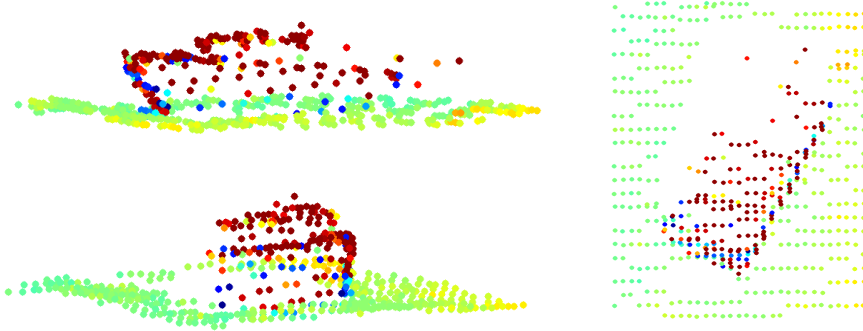
#### 4.4.4 Exempel på simulerade data

Ovanstående förenklade beskrivning av atmosfärens påverkan på optisk propagering stämmer vid bra väder (lågt  $C_n^2$ ) väl överrens med verkligheten. Dock klarar inte modellen i sitt nuvarande utförande att simulera sämre väder. Dessutom har ännu inte den mest uppdaterade modellen inkluderat atmosfärspåverkan. Detta planerar att implementeras under 2008. Figur 13 och figur 14 visar en simulering av vackert väder. Bilderna visar dels rådata ut från simuleringsmotorn, och dels påvisas styrkan med 3D-data genom att data har roterats så att landskapets form visas. Dessutom visas den lokala regionen runt ett av målen, roterat så att målet ses uppifrån, bakifrån och från sidan. Detta kan sedan användas för att automatiskt känna igen målet.

Då vädret (sikten) blir sämre kommer först intensitetsdata (färgen) blekna och bruset i avståndsdata att öka. Så småningom kommer lasersensorn att tappa ekon och tomma områden kommer att uppstå i data. Vid snöfall är förutsättningarna att få 3D-laserdata på långa avstånd mycket dåliga.



Figur 13. Till vänster en färgkodad laserbild (rådata) från 5 km avstånd. FOV  $1 \times 1$  grader. Till höger samma datamängd men roterad för att visa landskapsgeometrin. Färgen beskriver reflekterade laserintensiteten och kan vara stöd för klassificering.



*Figur 14. En förstord region runt ett av fordonen. Bilderna visar en stridsvagn från sidan, bakifrån samt uppifrån. Färgerna visar intensitetsdata från lasersensorn.*

## 5 Vädrets påverkan på radarsensorer

### 5.1 Radarvågutbredning i atmosfären

En radarvåg i atmosfären kan påverkas av ett antal fenomen [21, 22]. Dessa påverkar vågens amplitud, fas (frekvens), hastighet, utbredningsriktning och polarisation i både tid och rum. Vilken utbredningsmekanism som ger de dominerande variationerna beror på frekvensen, mediets tillstånd och geometrin hos utbredningsvägen. För frekvenser under ca 300 GHz är det jonosfären, den icke-joniserade delen av atmosfären samt jordytan som ger de signifikanta utbredningseffekterna. I den här aktuella tillämpningen kommer vi att avgränsa oss till utbredning i troposfären, som utgör nederdelen (1 till ca 11 km höjd) av den icke-joniserade delen av atmosfären. Vidare håller vi oss inom frekvensområdet 1-300 GHz. De fenomen som då blir aktuella sammanfattas i tabell 5.

Tabell 5: Utbredningsfaktorer som påverkar en radarvåg i troposfären.

Utbredningsmekanism	Påverkan
Gasabsorption	Dämpning
Refraktion (brytning)	Riktningfel, avståndsfel
Spridning i småskalig turbulens hos atmosfärsgaserna	Scintillation (amplitud-, fas, riktningensfluktuationer), fädning
Spridning i hydrometeorer	Dämpning, klotter
Flervägsutbredning	Fädning
Ledsjiktsutbredning	Anomal utbredning

För teoretiska beräkningar av utbredningen är mediets *brytningsindex* en nyckelstorhet (se t.ex. [23]). För ett allmänt medium är detta komplext, d.v.s har en realdel och en imaginärdel. Imaginärdelen beskriver amplituddämpningen, medan realdelen är förknippad med fasändringen hos vågen då den interagerar med mediet, och bestämmer bl.a. vågens fashastighet.

Det är inte ofta en radarvåg observeras direkt från källan, utan vågen når oftast mottagaren indirekt, via någon form av *spridning* [24]. Spridning åtföljs ofta av *absorption*, vilket innebär att en del av vågens energi omvandlas till någon annan form – för vårt ändamål är det irrelevant vilken denna nya form är. Både spridning och absorption avlägsnar energi från en radarvåg; vågen utsätts därmed för förluster och dämpas. Denna totala dämpning kallar vi *extinktion*:

$$\text{Extinktion} = \text{spridning} + \text{absorption}$$

Av de effekter som nämns i tabell 5 kommer vi i denna del av arbetet att välja dem som är av störst betydelse för den valda SAR-sensorn, som arbetar på 35 GHz och på relativt begränsade avstånd från målområdet, se kapitel 1. Dessa effekter är

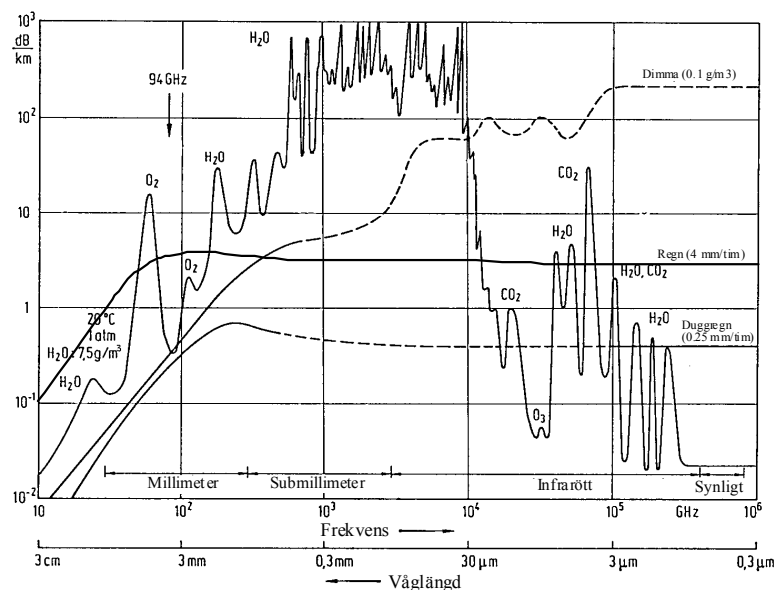
- 1) dämpning, orsakad av vågens *absorption* i
  - 1a) atmosfärsgaserna

1b) naturligt förekommande hydrometeorer (regn, snö, dimma, moln)

## 2) spridning i hydrometeorer

För en radarvåg i frekvensområdet 1 till 300 GHz orsakar syremolekyler och vattenånga den största absorptionen [23]. Denna molekylära absorption i atmosfärsgaserna orsakas av att radarvågen förlorar energi genom att bli av med fotoner, som absorberas av molekylerna. Dessa lyfts därmed upp till högre energitillstånd (med t.ex. högre rotationsenergi). Detta kan ske enbart kring vissa frekvenser, karakteristiska för ett visst molekyllslag, vilket ger upphov till absorptions-”linjer”. Inom det nämnda frekvensområdet har syre en grupp sådana absorptionslinjer i närheten av 60 GHz, och en isolerad linje vid 119 GHz, medan vattenånga har linjer vid 22.2 och 183.3 GHz, samt en strax ovanför intervallet vid 324 GHz, se figur 15.

Molekylabsorptionen beror av tryck och temperatur, samt av molekylkoncentrationen. Den blir därmed beroende av höjden, eftersom dessa parametrar är höjdberoende och även kan variera starkt på en viss höjd. Atmosfärstrycket minskar med höjden, vattenångans täthet avtar i allmänhet med höjden, medan temperaturen generellt avtar med höjden upp till tropopausen, på ca 11 km höjd. Vattenångans koncentration kan dessutom i en fix rumsposition uppvisa avsevärda variationer med tiden.



Figur 15. Dämpning i atmosfärsgaserna vid havsnivån som funktion av frekvensen [25]. Några kurvor visas också för dimma och regn.

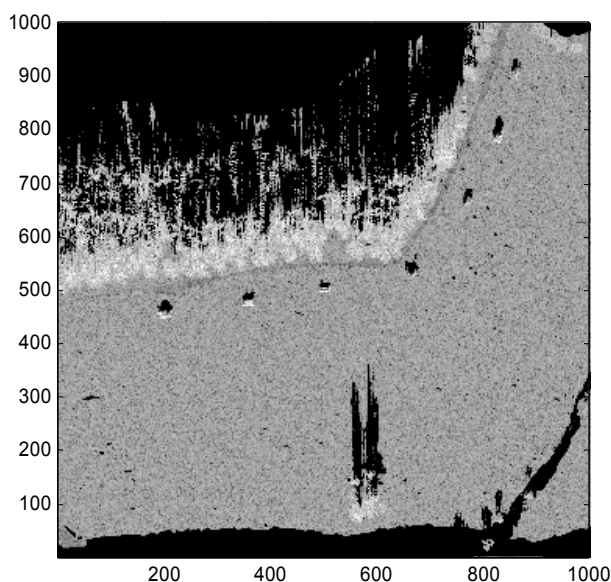
Nära toppen av en absorptionslinje uppträder anomal dispersion, som karakteriseras av en snabb variation av brytningsindex med frekvensen (se figur i avsnitt 5.2.1). Dispersionen orsakar en skillnad mellan grupp- och fashastighet hos vågen. Här kommer vi inte att behandla dem närmare, men i andra tillämpningar kan dispersionseffekter vara betydelsefulla.

Regndroppar, snöflingor, iskristaller, hagelkorn, vattendroppar i moln och dimma är alla små dielektriska spridare. Deras storlek varierar från några µm (molndroppar) till några få cm (hagel). En allmänt använd approximation för

att beräkna deras spridnings- och absorptionsegenskaper är att behandla dem som sfärer. Denna approximationsnivå tillämpas i denna rapport. Den formella lösningen för absorption och spridning av en plan våg i en dielektrisk sfär med godtycklig storlek och brytningsindex brukar tillskrivas Gustav Mie, från 1908 (se [26] sid. 82). Bilagan innehåller en närmare beskrivning av teorin, med några kompletteringar som senare gjorts för att hantera mer komplexa fall.

## 5.2 Beskrivning av atmosfärmodellerna för radar

För att studera vädrets påverkan på SAR-systemet har simuleringar gjorts för de fyra väderfallen vackert väder, regn, moln och snöfall. Figur 16 visar en simulerad SAR-bild av den aktuella målscegen utan någon pålagd atmosfärspåverkan. Sensorn arbetar på frekvensen 35 GHz och har en upplösning på  $0,3 \times 0,3$  m. Bilden är simulerad för flyghöjden 1 km, på avståndet 4.1 km från målområdet.



Figur 16. Simulerad 35 GHz SAR-bild med sju mål framför skogsridå i Kvarnområdet. Bilden visar en SAR-registrering upptagen på 4.1 km avstånd, utan någon antagen atmosfär.

I de följande avsnitten illustreras atmosfärens inverkan i de olika väderfallen, med beskrivning av MATLAB-funktionerna som tagits fram för de numeriska beräkningarna.

### 5.2.1 Vackert väder (Klar luft, ren gasform)

Dämpningen för klar luft beräknas med kvantmekanisk teori, som beskrivits av Sume (2006). För beräkning av dämpning och dispersion (fasändring) som funktion av frekvensen (1-1000 GHz) har MATLAB-funktionen `liebe89.m` implementerats. Numeriska värden på ingående parametrar har erhållits från [27, 28].

Spridningen är för detta väderfall försumbar i en atmosfär utan turbulens.

Indata:

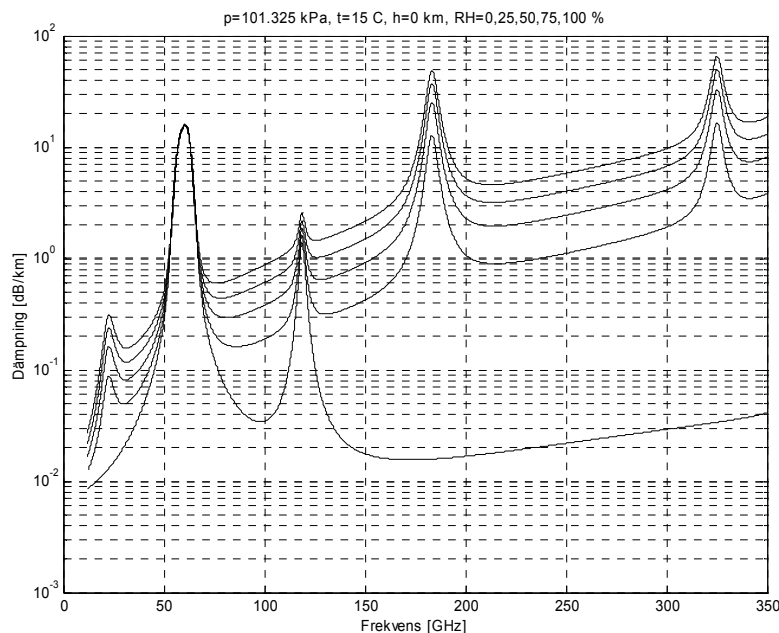
- Relativ fuktighet  $RH$  (%)
- Relativ invers temperatur  $\theta=300/(T+273.15)$ , där  $T$  är temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Partialtryck för torr luft  $p$  (kPa)
- Frekvensen  $f$  (GHz)
- Molekyllkonstanter för vattenånga och syre. Dessa finns lagrade i filerna liebe89\_h2o.txt respektive liebe89\_o2.txt och kan t.ex. läsas in från en separat rutin, som sedan i ett anrop till MATLAB-funktionen liebe89.m levererar molekylkonstanterna.

Storheterna  $RH$ ,  $\theta$ ,  $p$  beror av höjden över jordytan. Samhörande värden på  $\theta$ ,  $p$  erhålles lämpligen från någon standardatmosfärmodell (se [27]).

Utdata:

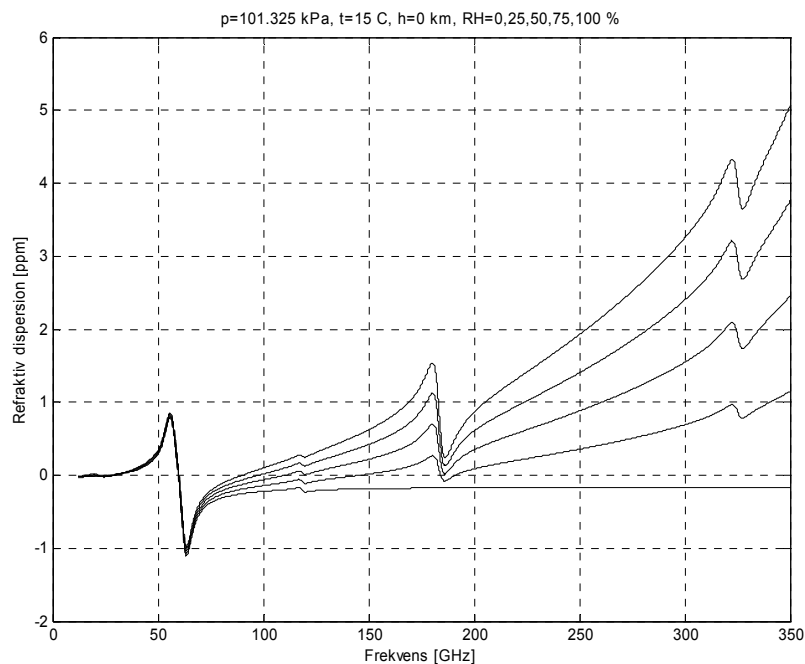
Real- och imaginärdel hos brytningsindex, vilket ger dämpning och fasvridning per vägsträckeinheit.

Ett exempel på en beräkning av dämpningen och dispersionen vid havsyttenivå, för olika relativa fuktigheter, som funktion av frekvensen mellan 12 och 350 GHz ges i figur 17 och figur 18.



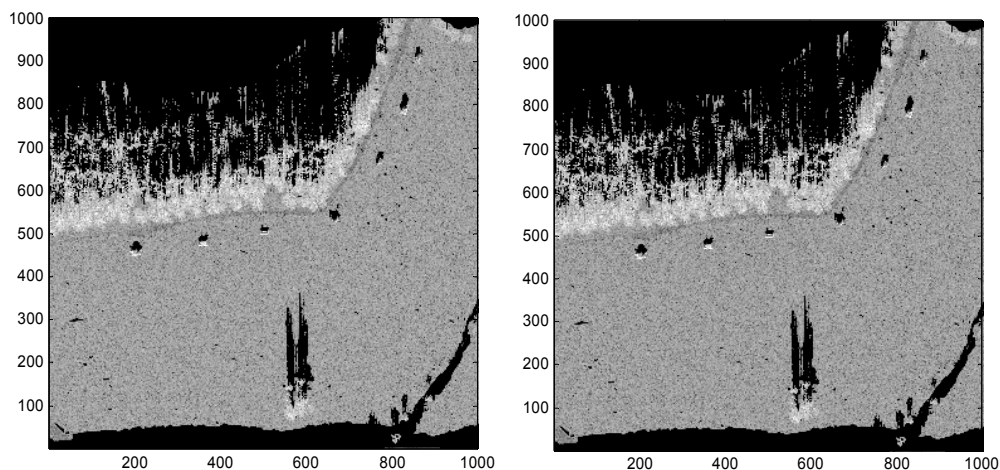
Figur 17. Dämpning i atmosfärsgaserna vid havsnivån som funktion av frekvensen, för olika relativa fuktigheter ( $RH$ ), angivna överst tillsammans med tryck och temperatur. Kurvorna räknade nerifrån och uppåt i figuren svarar mot ökande fuktighet.





Figur 18. Dispersion i atmosfärsgaserna vid havsnivån som funktion av frekvensen, för olika relativa fuktigheter (RH), angivna överst tillsammans med tryck och temperatur. Kurvorna räknade nerifrån och uppåt i figuren svarar mot ökande fuktighet.

Figur 19 visar ett exempel på simulering av väderpåverkan på SAR-systemet. I den högra bilden har en klar atmosfär införts, med temperaturen  $+10^{\circ}\text{C}$ , trycket 101.3 kPa och relativa fuktigheten 50%, motsvarande väderscenario Vackert väder. Inverkan av dämpning i atmosfärsgaserna har här ingen synbart försämrande effekt på radarbilden.



Figur 19. Simulerade SAR-bilder utan atmosfärs effekter till vänster och för fallet vackert väder till höger.

### 5.2.2 Regn

Regndroppar fungerar som små dielektriska spridare. En allmänt använd approximation för att beräkna spridnings- och absorptionsegenskaper är att behandla dem som sfärer.

Denna approximation tillämpas här för regn. Extinktionen i regndroppar beräknas med Mie-teori för spridningen från en dielektrisk sfär samt [35] storleksfördelning för dropparna, vilken ges av

$$M_a(D) = M_0 e^{-\Lambda D} \text{ [m}^{-3} \text{ mm}^{-1} \text{]},$$

där

$$M_0 = 8000 \text{ [m}^{-3} \text{ mm}^{-1} \text{]} \text{ och}$$

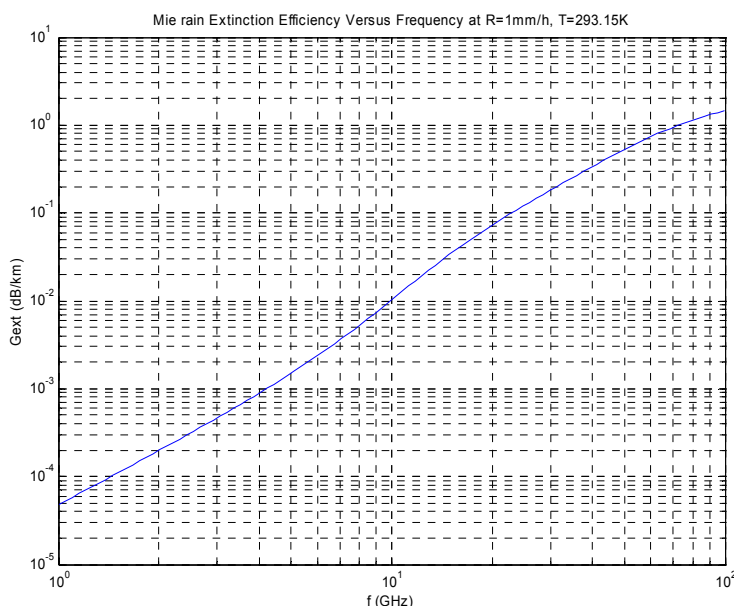
$$\Lambda = 4.1R^{-0.21} \text{ [mm}^{-1} \text{]}.$$

Storheten  $R$  är regnmängden [ $\text{mm h}^{-1}$ ].

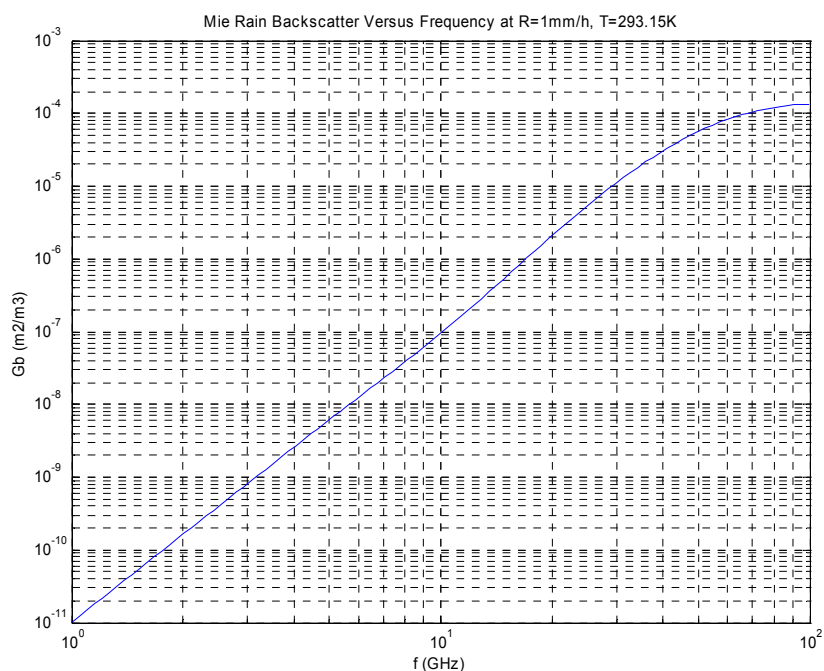
Följande MATLAB-funktioner har övertagits från Mätzlers rapporter för beräkningarna [29, 30]:

Mie\_rain4( $R, TK, fmin, fmax, nfreq$ ) med indata: regnmängd  $R$  (mm/tim), temperatur  $T$  (K), lägsta och högsta frekvens för beräkningen,  $fmin$  resp.  $fmax$  (GHz), samt antal frekvenser  $nfreq$ . Mie\_rain4 använder funktionerna epswater( $fGHz, TK$ ) och Mie( $m, x$ ), där  $m$  är komplext brytningsindex som beräknas i epswater och  $x = ka$ , där  $k = 2\pi/\lambda$  och  $a$  är droppradien. Mie använder i sin tur funktionen Mie\_abcd( $m, x$ ).

Exempel på extinktionen, som är förluster på grund av absorption och bortspridning från utbredningsriktningen, samt bakåtspridningen (regn-”klotter”) ges i figur 20 och figur 21.

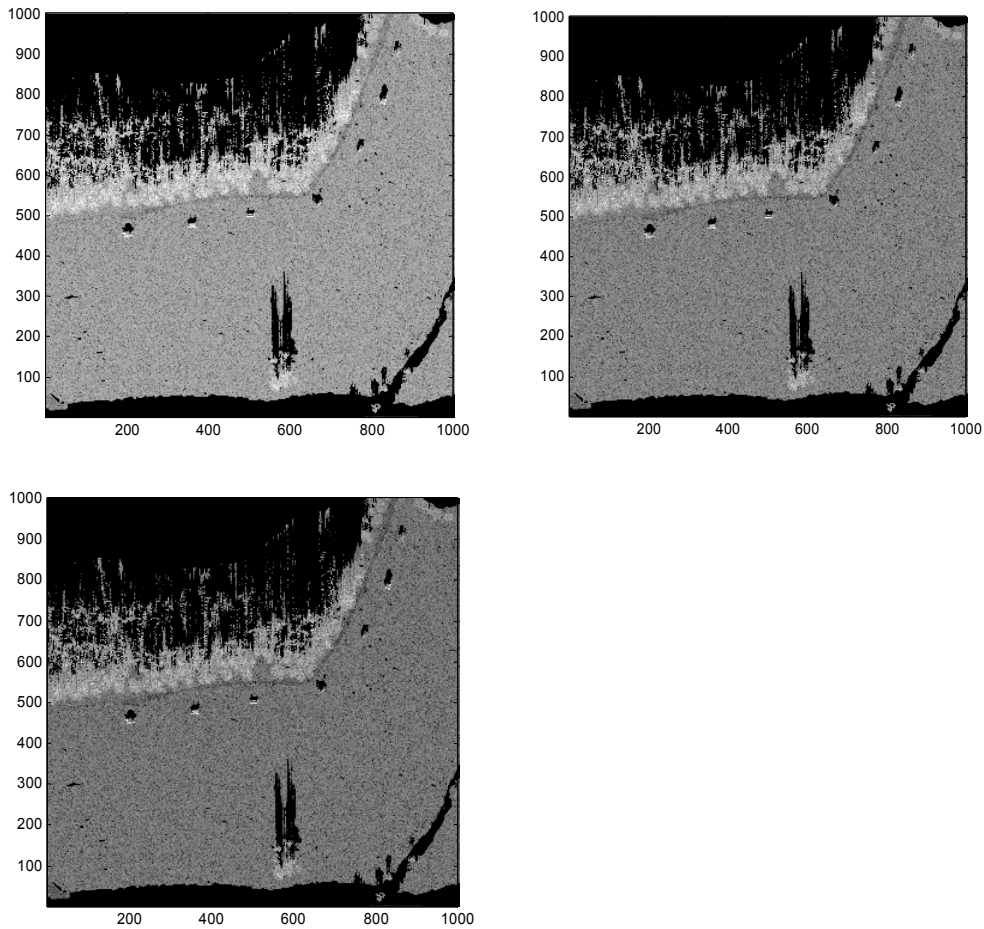


Figur 20. Extinktionen (dämpning på grund av absorption och bortspridning från utbredningsriktningen) som funktion av frekvensen, med  $R=1$  mm/tim,  $TK=293.15^\circ \text{ K} = 0^\circ \text{ C}$ ,  $fmin=1$  GHz,  $fmax=100$  GHz,  $nfreq=100$ .



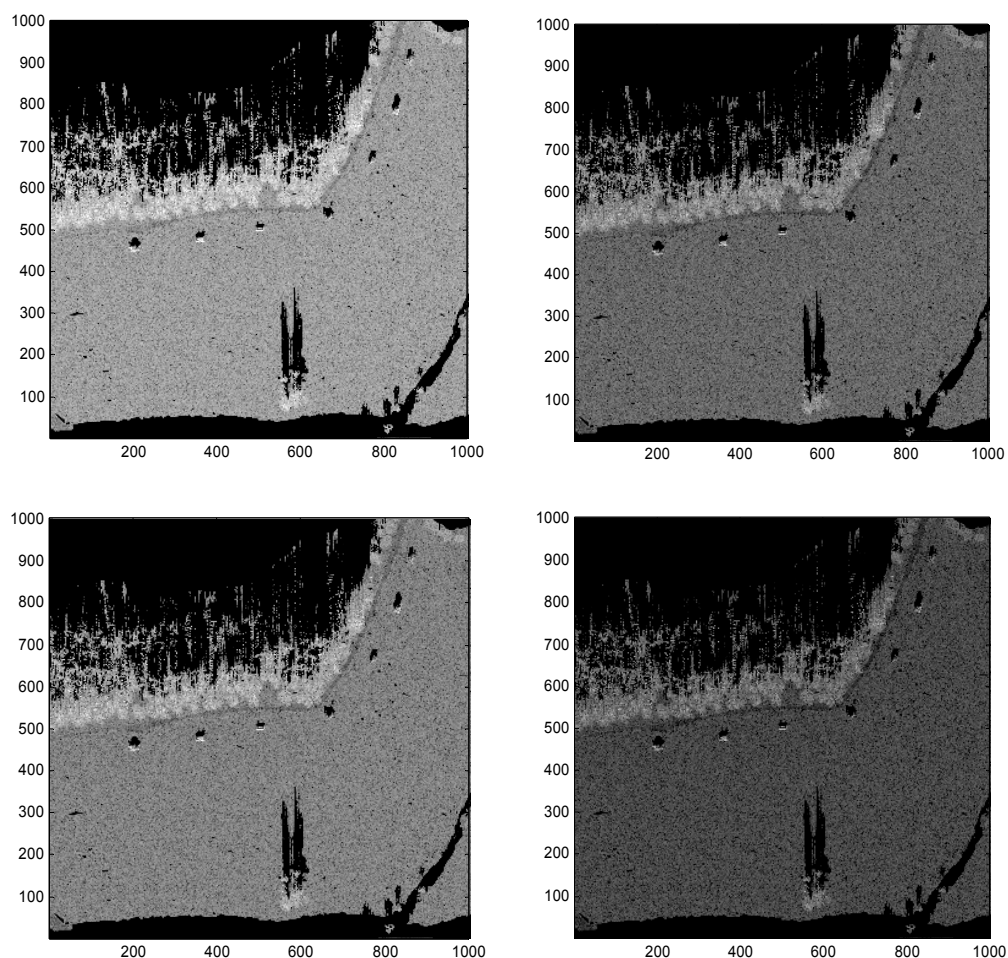
Figur 21. Bakåtspridningen (radarmålarea per volymenhet av regnmediet) som funktion av frekvensen, med  $R=1$  mm/tim,  $T=293.15^\circ\text{K} = 0^\circ\text{C}$ ,  $f_{\min}=1$  GHz,  $f_{\max}=100$  GHz,  $n_{\text{freq}}=100$ .

Regnets påverkan på SAR-systemet visas i figur 22. Den övre vänstra bilden visar en SAR-registrering upptagen vid vackert väder, vid temperaturen  $+2^\circ\text{C}$ , trycket 101.3 kPa och relativa fuktigheten 85%. I den övre högra bilden är tillagt absorptionen i regn, av intensiteten 5 mm/tim utmed hela sträckan mellan mål och sensor (4.1 km). Man får en måttlig försämring av radarbilden i form av minskade kontraster. I den nedre vänstra bilden är även spridningsförlusterna i regnet inkluderade, d.v.s. den del av radarvågen som gått förlorad genom bortspridning i regndropparna från utbredningsriktningen mellan radar och mål. Man har fått ytterligare en måttlig försämring av radarbilden.



*Figur 22. Inverkan av regn enligt väderfall enligt regnscenariot. Övre vänstra bilden visar en SAR-registrering upptagen vid vackert väder. I den övre högra bilden är tillagt absorptionen i regn, av intensiteten 5 mm/tim utmed hela sträckan mellan mål och sensor (4.1 km). I den nedre vänstra bilden är även spridningsförlusterna i regnet inkluderade, d.v.s. den del av radarvågen som gått förlorad genom bortspridning i regndropparna från utbredningsriktningen radar till mål.*

Figur 23 illustrerar dels effekten av en ökad regnintensitet (10 mm/tim), samt dels en jämförelse mellan absorptionen och spridningen i regndroppar, vilka visas separat i två figurdelar.



Figur 23. Som figur 22, men med högre regnintensitet, 10 mm/tim. Dessutom visas separat inverkan av absorptionen respektive spridningsförlusterna. Övre vänstra bilden visar SAR-registreringen upptagen vid vackert väder. I den övre högra bilden är tillagt absorptionen i regn (10 mm/tim) utmed hela sträckan mellan mål och sensor (4.1 km). Den nedre vänstra bilden visar separat spridningsförlusterna i regnet utan absorption. Man ser att spridningsförlusterna är mindre än absorptionen. Den nedre högra bilden har alla förluster inkluderade (gasabsorption jämte absorption och spridning i regndropparna).

### 5.2.3 Moln och dimma

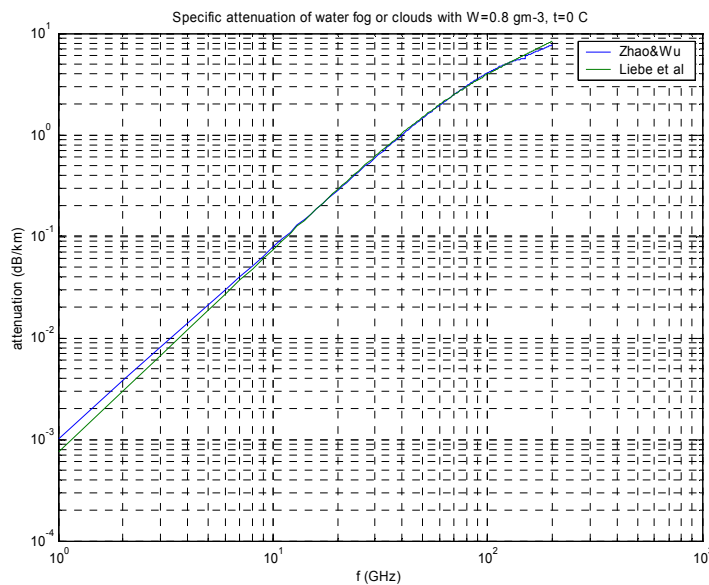
För moln och dimma bestående av små partiklar  $<100 \mu\text{m}$  är Rayleigh-approximationen berättigad i större delen av millimetervågsbandet. Vid tät dimma eller *cumulonimbus* med hög halt av flytande vatten, kan Rayleigh-approximationen bli ogiltig för kortare millimetervågor; då måste man ta hänsyn till droppstorleksfördelningen och använda Mie-teori. Se vidare i referensen [31].

En empirisk förbättring [31] av Rayleigh-approximerad Mie-teori har implementerats i MATLAB-funktionen `Rayl_fog(W,TK,fmin,fmax,nfreq)`. Droppstorleken antas vara gamma-fördelad:  $n(r) = ar^2 \exp(-br)$ , där  $r$  är droppradien

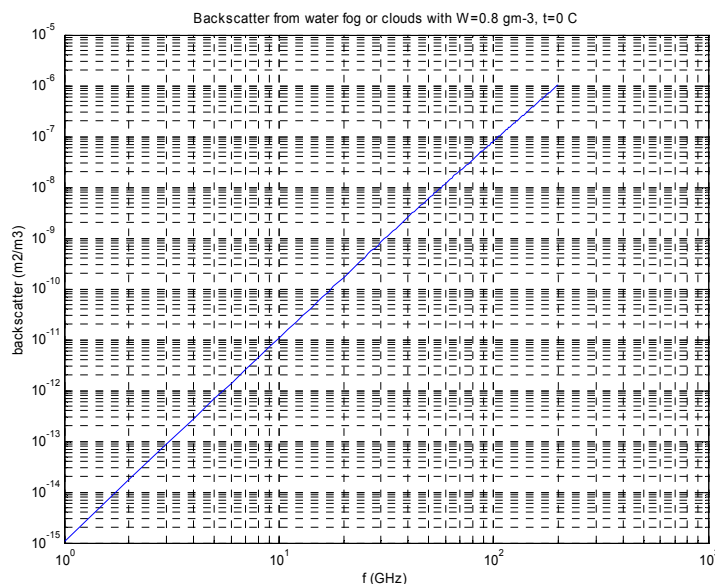
och  $a, b$  är konstanter. Funktionen `Rayl_fog` använder funktionen `epswater( $f$ GHz,  $TK$ )`, nämnd tidigare. Indata till `Rayl_fog` är mängd flytande vatten  $W$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ ), temperatur  $TK$  (K), lägsta och högsta frekvens för beräkningen,  $f_{min}$  resp.  $f_{max}$ , samt antal frekvenser  $nfreq$ .

Författarna i [31] anger att deras uttryck är noggrannare än vissa tidigare empiriska formler, bl.a. de som ges av [32]. För jämförelses skull har de senares formler också implementerats i funktionen `Rayl_fog`.

Ett exempel med  $W=0.8 \text{ g}/\text{m}^3$ ,  $T=293.15^\circ \text{ K}$  ( $0^\circ \text{ C}$ ),  $f_{min}=1$ ,  $f_{max}=200$ ,  $nfreq=200$ , ges i figur 24 och figur 25.

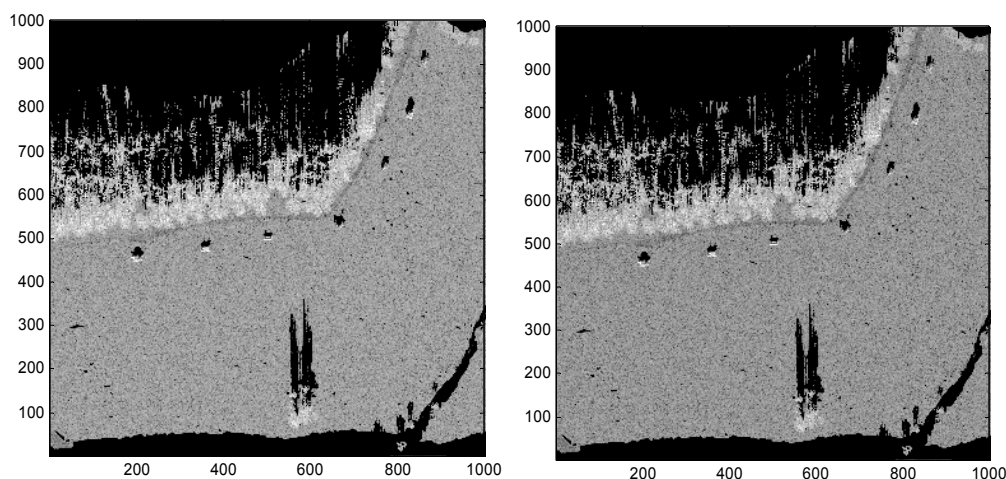


Figur 24. Dämpning i vattendimma eller moln med vattenhalten  $W=0.8 \text{ g}/\text{m}^3$ .



Figur 25. Bakåtspridning (radarmålärea per volymenhet av dimmediet) i vattendimma eller moln med vattenhalten  $W=0.8 \text{ g}/\text{m}^3$ , enligt [32].

Inverkan av moln enligt väderscenariot Moln, visas i figur 26. Den klara atmosfären (vänstra figuren) antas vid temperaturen  $+2^{\circ}\text{C}$ , trycket 101.3 kPa och fuktigheten 85%. I högra bilden visas en simulering med ett moln, som har vattenhalt  $0.33\text{ g/m}^3$  utmed hela vägsträckan från radarn till målområdet. Man ser en svag försämring av SAR-bilden.



Figur 26. Inverkan av moln enligt väderscenariot Moln. Den vänstra figuren visar den klara atmosfären och bilden till höger har pålagts ett moln med vattenhalten  $0.33\text{ g/m}^3$  utmed hela vägsträckan från radarn till målområdet.

#### 5.2.4 Snöfall (torrt)

Extinktionen vid utbredning i torr snö har beräknats med den implementerade funktionen  $\text{Rayl\_snow2}(R, TK, fmin, fmax, nfreq)$ . Modellen avser endast torr snö, medan smältande snö är ett mycket mer komplicerat fall. En översiktlig beskrivning av hur det kan modelleras ges i bilagan.

Den implementerade funktionen är baserad på Rayleigh-approximation av Mie-teori, jämte ytterligare approximationer i form av ekvivalenta, sfäriska ispartiklar enligt [33] avsnitt 5-13. Isens dielektriska egenskaper är tagna från [34]. Droppstorleksfördelningen antas följa Marshall-Palmers lag [35].

Rayleighapproximationen är god upp till ca 20 GHz, men har här tillämpats på 35 GHz, för att få en grov skattning av extinktionen, i avvaktan på en noggrannare behandling, se bilagan.

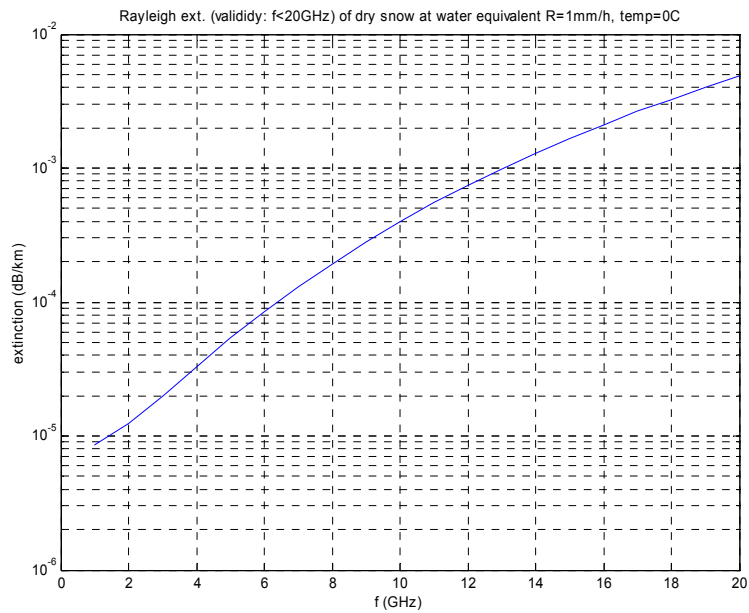
Indata [33,34]:

$R$ : nederbördsmängden i smält form (mm/tim)

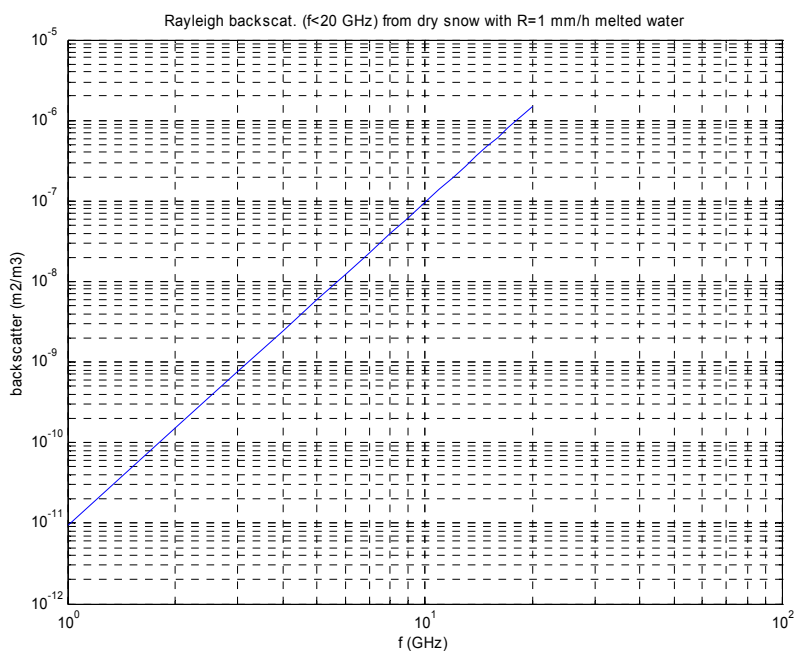
$TK$ : Temp. i K,

$fmin, fmax$ : lägsta och högsta frekvens för beräkningen, i GHz.

$nfreq$ : Antal frekvenser mellan  $fmin$  och  $fmax$  för vilka beräkningen görs.



Figur 27. Extinktionen (dämpning på grund av absorption och bortspridning från utbredningsriktningen) i torr snö vid 0° C som funktion av frekvensen, beräknad med Rayleigh-approximation. Nederbördens intensitet motsvarar 1 mm regn per timme.

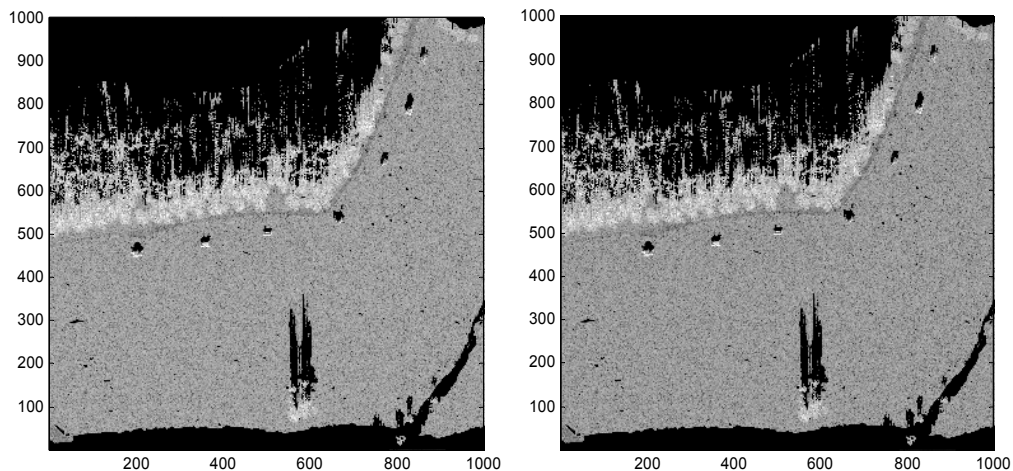


Figur 28. Bakåtspridning (radarmålarea per volymsenhet av snömediet) i torr snö vid 0° C som funktion av frekvensen, beräknad med Rayleigh-approximation. Nederbördens intensitet motsvarar 1 mm regn per timme.

Inverkan av snöfall enligt väderscenariot Snöfall visas i figur 29. Den klara atmosfären (vänstra figuren) antas vid temperaturen -5° C, trycket 101.3 kPa och fuktigheten 95%. I bilden till höger har pålagts snöfall med ekvivalent regnintensitet 1 mm/tim utmed hela vägsträckan från radarn till målområdet;



någon molninverkan har inte antagits längs denna sträcka. På detta korta avstånd ger snöfallet endast mycket svag försämring av SAR-bilden.



Figur 29. Inverkan av snöfall enligt väderscenariot. Den vänstra figuren visar den klara atmosfären och bilden till höger har pålagts snöfall med ekvivalent regnintensitet 1 mm/tim utmed hela vägsträckan från radarn till målområdet; någon molninverkan har inte antagits längs denna sträcka.

### 5.3 Sammanfattning av atmosfärspåverkan på radarsimuleringarna

En sammanfattande kommentar rörande väderpåverkan enligt dessa simuleringar är att på de relativt korta avstånd som studerats, är inverkan måttlig på en SAR-sensor för frekvensen 35 GHz. Snöfallet kräver en noggrannare modellering för att få med inverkan vid högre frekvenser och för delvis smälta flingor, där det är känt att dämpningen kan överstiga den i regn, för samma ekvivalenta vattenintensitet.

En grov tumregel för storleksförhållandena hos utbredningsförlusterna i atmosfären för radarvägen är i minskande storleksordning: smältande snö, regn, moln och dimma, samt slutligen torr snö.

Modellerna kan numera ses som noggranna och är inte gränssättande för hur noga man kan beräkna utbredningsförlusterna i ett specifikt fall. Osäkerheten bestäms oftast till övervägande delen av att man inte har en noggrann kännedom av atmosfärens tillstånd utmed utbredningssträckan (t.ex. regncellers exakta utsträckning, intensitetsvariationer hos nederbörden och komplicerad dynamik som leder till inhomogeniteter). Beräkningarna ger därför oftast typiska värden, snarare än att vara giltiga för specifika fall.

I ett fortsatt arbete bör främst ingå en implementering av de senaste årens framtagna modeller för realistisk hantering av snöfall med smältningsskikt. Man bör också undersöka om det krävs eventuella kompletteringar som innefattar andra väderfall än de som förekommer i vårt tempererade klimat (t.ex. tropiskt regn).

Kompletteringar som också kan göras är att inkludera ytterligare mekanismer som nämndes i tabell 5:

- Brytningseffekter, som gör sig gällande för större avstånd. Modellering kan erhållas ur standardlitteratur.
- Inkludering av mer komplicerad utbredning (flerväg, ledsikt).
- Turbulenseffekter.

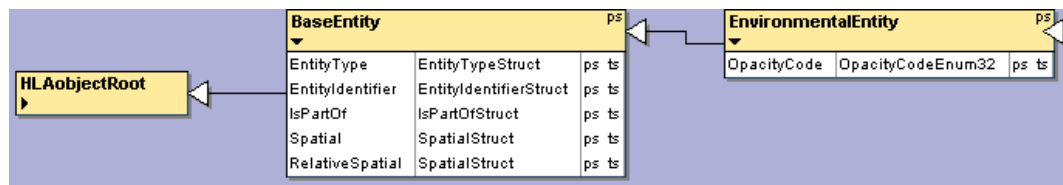
En närmare specificering vore önskvärd rörande noggrannheterna hos de implementerade beräkningsmodellerna.

## 6 Väderbeskrivning i MOSART

MOSART är ett integrationsramverk som bygger på HLA (High Level Architecture), vilket är en standard för integration av olika simulatorer. Med MOSART kan olika beräkningsenheter (s.k. federater) användas tillsammans i en simulering. Detta avsnitt beskriver hur MOSART kommer att vidareutvecklas för att en simuleringsgemensam vädermodulering ska erhållas.

### 6.1 Grundläggande implementering av väderobjekt

Att införa ett enkelt väderobjekt som den som återfinns i RPR-FOM:en och som ligger till grund för FOM:en som används inom FOI är enkelt. FOM:en (Federation Object Model) innehåller vanligt förekommande standardobjekt och interaktioner, och RPR-FOM:en är en standardiserad FOM som innehåller definitioner av olika typer av plattformar, sensorer etc. Väderobjektet i RPR-FOM:en heter *EnvironmentalEntity* och ligger under *BaseEntity* (se figur 30).



Figur 30. Lokal HLA-struktur runt *EnvironmentalEntity* i RPR-FOM.

*EnvironmentalEntity* innehåller ett attribut, *OpacityCode*, som är en beskrivning av hur densiteten på det aktuella vädret är. *OpacityCode* kan ha ett av följande värden:

- Clear
- Hazy
- Dense
- VeryDense
- Opaque

Att införa detta objekt som ett konfigurerbart objekt i NetScene (scenariomotor i MOSART) skulle innebära en uppdatering av scenariomodellen och synkroniseringskonfigureringen. Detta skulle innebära att man kan skapa ett *EnvironmentalEntity* med ett statiskt värde eller sätta den *Remote* så att andra federater kan se till att väderobjektet skapas och attribut sätts. Federaterna som behöver väderinformationen prenumererar sedan på väderobjektet och anpassar sensormodelleringen efter vädret.

### 6.2 Enkel beskrivning av väderobjekt

För att få väderobjektet att ändra position kan existerande rörelsemodeller användas i NetScene för att förflytta ett *EnvironmentalEntity*-objekt. För att ändra värdet på attributet *OpacityCode* kan en entitetsmodell för NetScene skapas som ändrar värdet till exempel med avseende på tiden.

### 6.3 Detaljerad beskrivning av väderobjekt

För att kunna beskriva ett mer komplext väder i MOSART krävs en HLA-subklassning av *EnvironmentalEntity* med nya attribut som 3D-utbredning, molntyp, regnintensitet, droppstorlek etc. Beskrivningen kan då bli godtyckligt detaljerad och hela vädersystemet skulle kunna simuleras i en dedikerad federat. Om federaten inte görs för komplex och beräkningstung, till exempel genom att endast tillåta variationer av en 3D-box, kan en entitetsmodell skapas till NetScene.

## 7 Resultat

### 7.1 Status på integration av atmosfärsmodeller i MSSLab

Denna rapport har beskrivit arbetet med att ta fram atmosfärsmodeller för de fyra väderfallen: vackert väder, regn, moln och snöfall. Atmosfärsmodellerna som används i denna rapport kan numera ses som noggranna och är inte gräns-sättande för noggrannheten vid vädersimuleringar av ett specifikt väderfall. Inledande simuleringar med dessa atmosfärsmodeller har också utförts.

För IR och visuella simuleringar har beräkningsprogrammet CameoSim använts. För att beräkna atmosfärsfiler som CameoSim använder har programmet MODTRAN med ingående atmosfärsmodeller använts. Med MODTRAN kan atmosfärsfiler genereras för de olika väderfallen. Inledande simuleringar har gjorts vilket visar att framförallt moln kraftigt degraderar IR-prestanda.

För lasersimuleringar används idag 3D-lasermodellen. Denna modell saknar för tillfället möjlighet att simulera effekterna av atmosfärspåverkan. Med underlag från exempelvis MODTRAN kan dock atmosfärspåverkan på lasersensorer simuleras. Några modeller för väderpåverkan hos lasersensorer finns beskrivet i rapporten.

För radarsimuleringar används beräkningsprogrammet SE-RAY-EM. Detta program har nu kompletterats med funktioner för att ta hänsyn till både dämpning och spridning för de olika väderfallen. En grov tumregel för storleksförhållandena hos utbredningsförlusterna i atmosfären för radarvågen är i minskande storleksordning: smältande snö, regn, moln och dimma, samt slutligen torr snö. Inledande simuleringar har gjorts för de olika väderfallen och dessa visar att på de relativt korta avstånd som studeras här, är inverkan måttlig på det simulerade radarsystemet.

### 7.2 Slutsatser och framtida arbete

I det fortsatta arbetet kommer väderpåverkan hos ett UAV-system att studeras. De specificerade väderfallen kommer framöver även att kompletteras med internationella väderfall för t.ex. öken och tropiska miljöer. Atmosfärsmodellerna kan då eventuellt behöva kompletteras.

En begränsning med MODTRAN är att molnen i modellen täcker hela himlen. Det går alltså inte att ändra molnens täckningsgrad på himlen. Ett sätt att lösa detta kan därför vara att generera egna modeller av moln och placera ut dessa som objekt i scenen som skall simuleras. En annan begränsning i MODTRAN är att det inte finns modeller för snöfall och hagel, utan endast moln och regn.

De inledande simuleringarna av väder med CameoSim behöver valideras. En metod för detta är att jämföra de parametriska atmosfärerna som räknats fram i CameoSim via MODTRAN med körningar direkt i MODTRAN, samt jämföra med teoretiska beräkningar direkt från storheternas definitioner. Kontraster i CameoSim-bilder kan även jämföras med mätningar. När MODTRAN körs genom CameoSim kan inte alla väderparametrar varieras. Exempelvis kan inte

molnbasen varieras utan sätts enligt den standardmodeller som används i MODTRAN.

I CameoSim hanteras sensoregenskaper endast i form av antalet pixlar, synfält, våglängdsområde och sensorrespons. Modeller för att simulera IR-sensorn kommer att införas i inom kort. Detta är ett Matlab-program där bl.a. Cameo-Sim-genererade bilder postprocessas. Detta för att få med effekter som döda pixlar, komponentbrus, linsfel etc. Modeller för att simulera mottagaren i ett radarsystem kommer också att införas i det fortsatta arbetet.

Atmosfärmodellerna för radar är mycket bra, men en noggrannare modellering av snöfall krävs för att få med inverkan vid högre frekvenser och för delvis smälta flingor, där det är känt att dämpningen kan överstiga den i regn, för samma ekvivalenta vattenintensitet.

Arbetet som beskrivs i denna rapport har begränsats till atmosfärs effekter. Förändringar av marken och målets materialegenskaper för de simulerade väderfallen har därför inte tagits med. Detta måste åtgärdas i det fortsatta arbetet.

En simuleringsgemensam vädermodulering bör även göras i MOSART. Detta för att de olika sensorsimuleringsprogrammen ska få tillgång till det aktuella väderscenariot. En koppling mellan väderparametrar och vädermodulerna behöver fastställas och verifieras.

## 8 Bilaga. Teoriöversikt av radarextinktion orsakad av hydrometeorer

Denna bilaga beskriver inledningsvis några grundläggande begrepp vid en vågs utbredning i ett medium, med definition av koherent respektive inkoherent fältkomponent. Den grundläggande ekvationen för strålningens transport genom ett medium med spridande partiklar tas fram, som visar den exponentiella förändringen av strålningsenergin längs gångvägen med hänsynstagande till partikelstorleksfördelningen. Sedan följer en beskrivning av Mie-teorin för spridning av en elektromagnetisk våg i en sfär av godtycklig storlek. Inga härledningar ges, utan bara de ohanterliga slutformlerna. Mie-teorin kan approximeras med Rayleigh-spridning för långa våglängder i förhållande till partikelstorleken; de resulterande formlerna presenteras. Slutligen ges en kort översikt av några utvidgningar som senare gjorts för att hantera mer komplicerade fall än homogena sfäriska spridare, t.ex. vid snöfall, där snöflingor genomgår smältning i ett atmosfärsskikt.

### 8.1 Koherent och inkoherent fält och intensitet

Först några grundbegrepp vid planvågsutbredning i ett icke-turbulent medium [36]. Eftersom de partiklar som vi betraktar är slumpmässigt fördelade och i allmänhet i konstant rörelse, är inte det spridda fältet konstant och dess amplitud och fas bör uppvisa slumpmässiga variationer. Kalla en komponent av det elektriska eller magnetiska fältet  $V(\mathbf{r}, t)$ . Den är en reell funktion av tid  $t$  och position  $\mathbf{r}$  och kan uttryckas i termer av det komplexa fältet  $U(\mathbf{r}, t)$ , amplituden  $A(\mathbf{r}, t)$ , och fasen  $\varphi(\mathbf{r}, t)$  :

$$V(\mathbf{r}, t) = \text{Re}[U(\mathbf{r}, t)e^{-j\omega t}],$$

$$U(\mathbf{r}, t) = A(\mathbf{r}, t)e^{j\varphi(\mathbf{r}, t)},$$

där  $A(\mathbf{r}, t)$  och fasen  $\varphi(\mathbf{r}, t)$  är långsamt varierande funktioner av tiden. Därför kan fältet skrivas som en summa av ett medelfält  $\langle U \rangle$  och en fluktuerande del  $U_f$  :

$$U(\mathbf{r}, t) = \langle U(\mathbf{r}, t) \rangle + U_f(\mathbf{r}, t), \quad \text{där } \langle U_f(\mathbf{r}, t) \rangle = 0.$$

De vinklade parenteserna anger ensemblamedelvärde. Medelfältet  $\langle U \rangle$  kallas det koherenta fältet och  $U_f$  det inkoherenta fältet. Kvadraten av beloppet av det koherenta fältet kallas den koherenta intensiteten  $I_c$  och medelvärdet av kvadraten av beloppet av det inkoherenta fältet kallas den inkoherenta intensiteten  $I_i$ . Summan av  $I_c$  och  $I_i$  är medelintensiteten  $\langle I \rangle$  :

$$\langle I \rangle = \langle |U|^2 \rangle = I_c + I_i,$$

$$I_c = |\langle U \rangle|^2,$$

$$I_i = \langle |U_f|^2 \rangle.$$

## 8.2 Ekvationen för strålningstransport

Den inkoherenta intensiteten är mycket svag i mikro- och millimetervågsområdet [37], varför vi bara behandlar den koherenta delen i de här aktuella tillämpningarna. En intuitiv ansats som beskriver variationen av den koherenta intensiteten  $I_c$  längs utbredningsriktningen är

$$\frac{dI_c}{dz} = -(\sum Q_t)I_c,$$

där  $\sum Q_t$  är summan av totala tvärsnitten hos alla partiklar i en enhetsvolym av mediet. Ekvationen uttrycker att vågens intensitetsminskning i ett tunt skikt av tjockleken  $dz$  är proportionell mot energin som absorberas och sprids av partiklarna i skiktet. Ytterligare beskrivning av antaganden, approximationer m.m. vid koherent vågutbredning i nederbörd ges i bl.a. [38].

Lösningen till den ansatta differentialekvationen är

$$I_c = I_{c0} e^{-(\sum Q_t)z},$$

där  $I_{c0}$  är intensiteten vid  $z=0$ . Om förhållandena varierar längs vägsträckan  $z$ , krävs en integration över  $z$  av tvärsnittssumman i exponenten.

I regn förekommer droppar av mycket varierande storlek. Även i andra aktuella media kan partiklarnas storlek variera, t.ex. i moln och dimma. Man måste därför ta hänsyn till deras storleksfördelning, och man skriver summan av de totala spridningstvårsnitten  $\sum Q_t$  som en integration över en partikelstorleksfördelning

$$\sum Q_t = \int Q_t(a)n(a)da,$$

där  $n(a)da$  är antalet partiklar per enhetsvolym med storlekar mellan  $a$  och  $a+da$ . Den mera generella ekvationen för strålningens transport genom mediet, med variation av medieegenskaperna längs gångvägen får formen

$$I_c(l) = I_{c0} \exp\left(-\int_0^l \left[\int_0^\infty Q_t(a)n(a,z)da\right]dz\right),$$

där  $l$  är totala gångvägen. Dämpningskoefficienten (dämpning per längdenhet [1/m]) för strålningen är

$$\alpha_l = \int_0^\infty Q_t(a)n(a,z)da.$$

Man bör observera två saker:



1) Dämpningskoefficienten gäller för intensitet, d.v.s. ett effekt- eller energimått.

2) Utbredningen är envägs. Vid t.ex. monostatisk radar tillryggalägger vågen en propagationssträcka två gånger, i motsatt riktning, vilket får beaktas vid  $z$ -integrationen.

Oftast anger man dämpningen per km gångväg i homogent medium, som dämpningsmått. Dämpningen (dB) av vågens intensitet då den passerar genom ett 1 km tjockt skikt av mediet med partiklar är  $10 \times^{10} \log(I_{c0} / I_c) |_{z=1000}$ , d.v.s.

$$L = 4.343 \times 10^3 \times \int Q_t(a)n(a)da. \quad [\text{dB/km}]$$

Vi har funnit att två centrala storheter för dämpningsberäkningar för hydrometeorer är tvärsnittet  $Q_t$  och fördelningen av partikelstorheten  $n$ .

### 8.3 Tvärsnittsberäkning enligt Mie

Regndroppar, snöflingor, iskristaller, hagelkorn, vattendroppar i moln och dimma är alla små dielektriska spridare. Deras storlek varierar från några  $\mu\text{m}$  (molndroppar) till några få cm (hagel). En allmänt använd approximation för att beräkna deras spridnings- och absorptionsegenskaper är att behandla dem som sfärer. Denna approximationsnivå används i föreliggande tillämpningar.

Den formella lösningen för absorption och spridning av en plan våg i en dielektrisk sfär med godtycklig storlek och brytningsindex brukar tillskrivas Gustav Mie, från 1908 (se [26] sid. 82). Lösningen är rättfram men något ohanterlig; den består av en oändlig serie av koefficienter innehållande bl.a. sfäriska Bessel- och Hankelfunktioner. Den finns behandlad i standardverk (t.ex. [26, 39, 40]), vi ger här bara resultaten.

De Mie-koefficienterna som kommer till användning i vår tillämpning är [29].

$$a_n = \frac{m^2 j_n(mx)[xj_n(x)]' - \mu_1 j_n(x)[mxj_n(mx)]'}{m^2 j_n(mx)[xh_n^{(1)}(x)]' - \mu_1 h_n^{(1)}(x)[mxj_n(mx)]'}$$

$$b_n = \frac{\mu_1 j_n(mx)[xj_n(x)]' - j_n(x)[mxj_n(mx)]'}{\mu_1 j_n(mx)[xh_n^{(1)}(x)]' - h_n^{(1)}(x)[mxj_n(mx)]'}$$

Här är  $m$  brytningsindex för sfären relativt omgivande medium,  $\mu_1$  är kvoten mellan magnetiska permeabiliteten hos sfären och hos omgivande medium,  $x=ka$  en storleksparameter,  $a$  sfärens radie,  $k=2\pi/\lambda$  vågtalet, och  $\lambda$  våglängden i omgivande medium. Funktionerna  $j_n$  och  $h_n^{(1)}$  är sfäriska Besselfunktioner.

Prim:en anger derivering med avseende på argumentet.

Med dessa Mie-koefficienter bildas serier som ger storheterna som representerar förlusterna. Dessa storheter är de s.k. Mie-verkningsgraderna,  $Q_i$ , för interaktion av strålning med en spridande sfär med radien  $a$ . Dessa verkningsgrader är tvärsnitt (målareor)  $\sigma_i$ , normaliserade med partikelns geometriska tvärsnitt,  $\pi a^2$ , där  $i$  står för extinktion ( $i=ext$ ), absorption ( $i=abs$ ), spridning ( $i=sca$ ) eller bakåtspridning ( $i=b$ ); [rörande radarmålarea och dess fysikaliska tolkning, se [26], s. 120-122].

Således har vi

$$Q_i = \frac{\sigma_i}{\pi a^2}.$$

Energikonservering kräver att

$$Q_{ext} = Q_{sca} + Q_{abs}, \quad \text{eller} \quad \sigma_{ext} = \sigma_{sca} + \sigma_{abs}.$$

Mie-lösningen är

$$Q_{sca} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2),$$

$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n),$$

vilket enligt ovan ger absorptionen

$$Q_{abs} = Q_{ext} - Q_{sca}.$$

Spridningen specifikt i bakåtriktningen ger den för monostatisk radar väsentliga

$$Q_b = \frac{1}{x^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (-1)^n (a_n - b_n) \right|^2.$$

Motsvarande radarmålarea per enhetsvolym av partikelmediet blir

$$\gamma_b = \pi \int_0^{\infty} a^2 Q_i(a) n(a) da. \quad [\text{m}^2 / \text{m}^3]$$

Detta är ett exempel på volymsklotter, se t.ex. [41] avsnitt 2.6.

En rad artiklar finns publicerade rörande frågor om den numeriska implementeringen av Mie-spridning. I föreliggande projektarbete har använts MATLAB-rutinerna i [29]. Ett annat, relativt nytt arbete av [42] innehåller en alternativ algoritm. Några övriga arbeten är [43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50].

## 8.4 Storleksfördelningar

Dropstorleksfördelningar för regn har bestämts av flera forskare. De två kanske mest använda är de av Laws och Parsons [51] samt av Marshall och Palmer [35]. Den förstnämnda är given i tabellform för olika regnintensiteter (se [33] Section 5-12.1). Den andra, som kommer användas i föreliggande arbete, ges av av följande formel för antalet droppar med diameter  $D$  per enhetsvolym per enhet droppdiameterintervall [36].

$$M_a(D) = M_0 e^{-\Lambda D} [\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}],$$

där

$$M_0 = 8000 [\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}],$$

$$\Lambda = 4.1 R^{-0.21} [\text{mm}^{-1}]$$

Storheten  $R$  är regnintensiteten  $[\text{mm h}^{-1}]$ .

## 8.5 Rayleigh-spridning

Om droppstorleken är betydligt mindre än våglängden, kan man approximera verkningsgraderna  $Q_{sca}$  och  $Q_{ext}$  (se avsnitt 8.3) med de mest signifikanta termerna i respektive serieutveckling [33]:

$$Q_{sca} = \frac{8}{3} x^4 |K|^2 + \dots,$$

och

$$Q_{ext} = 4x \operatorname{Im}\{-K\} + \frac{8}{3} x^4 |K|^2 + \dots,$$

där den komplexa storheten  $K$  är

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}.$$

där  $m$  som förut är brytningsindex för sfären relativt omgivande medium och  $x = 2\pi a/\lambda$ .

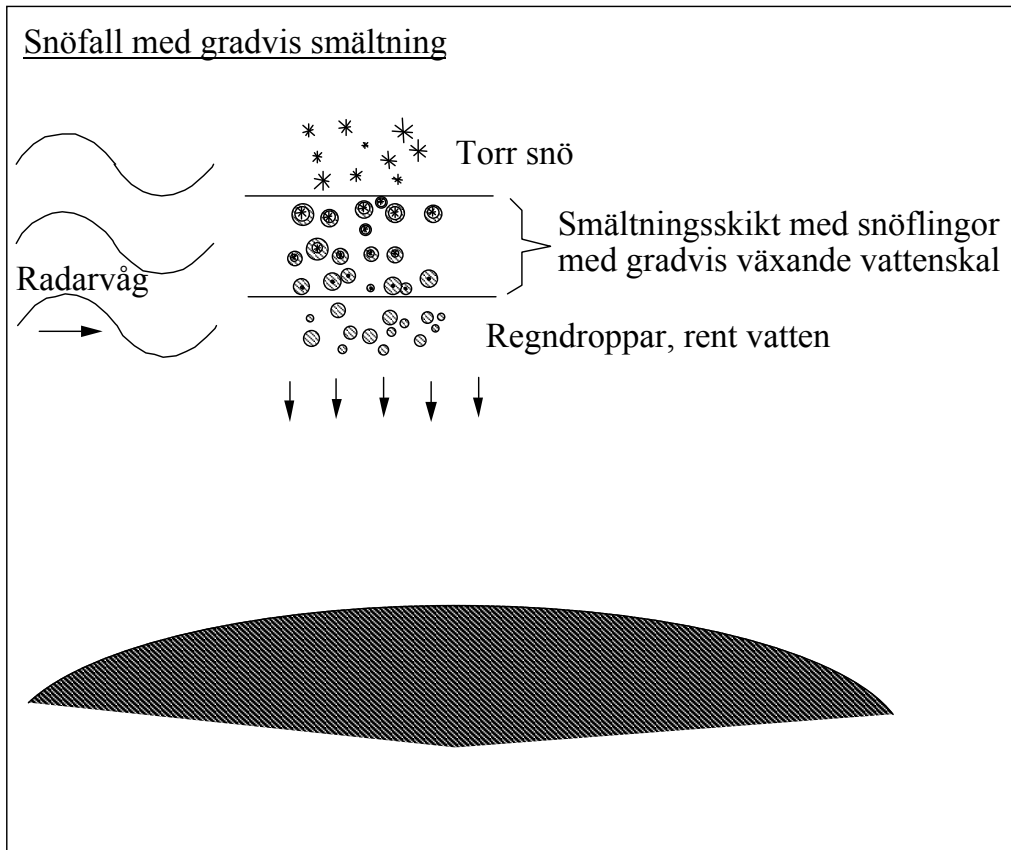
## 8.6 Skiktade sfärer, icke-sfäriska partiklar, polarisation

Mie-teorin har senare utvidgats till att omfatta skiktade sfärer, med sfäriska, koncentriska skal av olika dielektriska material, kring en sfärisk kärna. Ett enskilt skal kring en sfärisk kärna har behandlats av bl.a. [26, 52, 53]. Multipla skikt har behandlats av [54]. En skiktad sfär kan t.ex. användas som en modell för en smältande ispartikel, med ett yttre skal av vatten.

Verklighetens hydrometeorer uppvisar avvikelser från sfärisk form. Sådana partiklar ger bl.a. depolarisation, d.v.s. transformationer mellan ortogonala polarisationer. Brussaard och Watson [36] har en översikt i sin tabell 4.2 över metoder för beräkning av spridning i enskilda partiklar av olika form. Se även [37] och [55]. Korrektioner till Mie-dämpningen, som tar hänsyn till avvikelse från sfärisk form, har tagits fram av [56]. Mätzler [57] har en undersökning av polarisationseffekter i anisotrop nederbörd.

## 8.7 Specialfallet smältande snö

Med utvidgad Mie-teori (skiktade sfärer, icke-sfäriska partiklar) och blandningsmodeller som omfattar representation av blandningar av olika dielektriska material med ett enda, ekvivalent dielektrikum, har man under de senaste åren börjat behandla problemet med icke-torr snö, som genomgår smältning. Följande figur visar en skiss över ett sådant scenario.



Figur 31. Snöfall med smältningsskikt.

Följande figur från [58] ger en uppfattning om vilken komplexitet hos de enskilda smältande partiklarna man numera kan hantera.



Figur 32. En modell av smältande snöflinga, där man betraktar inneslutningar av ett dielektriskt material i en matris av ett annat, samt sfäriska skal. I figuren representerar svart is, grått representerar vatten, och vitt representerar luft (från Fabry och Szyrmer, 1999).

Scenariot kräver en förståelse både av dynamiken, smältningsprocessen och vågutbredningen. Någon implementation av aktuella modeller över dessa moment har inte kunnat inrymmas i årets arbete i projektet. För ev. framtida bruk ges här ett antal referenser som behandlar olika delar av problematiken [59, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 56, 70, 71, 72, 73, 74, 75].

## 9 Referenser

- 1 Carlsson, L., Karlsson, M., Andersson, B., Grönwall, C., Haapalahti, G., Karlholm, J., Karlsson, N., Lauberts, A., Letalick, D., Näsström, F., Persson, A., Svedin, J.: ”Slutrapport SUPREM, svårupptäck precisionsmålsökare”, Användarrapport, FOI-R--2366--SE, Linköping 2007.
- 2 Karlsson M., Andersson B., Svedin J.: ”Duell mellan brusradar i UCAV och radarvarnare i markfordon”, Teknisk rapport, FOI-R--2056--SE, Linköping 2006.
- 3 Carlsson, L., Karlsson, M., Näsström, F., Lauberts, A., Karlholm, J., Letalick, D., Grönwall, C., Andersson, B.: ”Sensorer för smyganpassad UCAV”, Teknisk rapport, FOI-R--2134--SE, 2006.
- 4 Vaidyanathan, M., Blask S., Higgins, T., Clifton, W., Davidsohn, D., Carson, R., Reynolds, V., Pfannenstiel, J., Cannata, R., Marin, R., Drover, J., Hatch, R., Schue, D., Freehart, R., Rowe, G., Mooney, J., Hart, C., Stanley, B., McLaughlin, J., Lee, E., Berenholtz, J., Aull, B., Zayhowski, J., Vasile, A., Ramaswami, P., Ingersoll, K., Amoruso, T., Khan, I., Davis, W., Heinrichs, R.: “Jigsaw Phase III: A Minituarized Airborne 3-D Imaging Laser Radar with Photon-Counting Sensitivity for Foliage Penetration”, Vol. 6550, pp. 65500N, Proceedings SPIE, April, 2007.
- 5 Stettner, R., Bailey, H., Silverman, S.: “Large format time-of-flight focal plane detector development”, Vol. 5791, Proceedings SPIE, April, 2005.
- 6 Brogren, J., Gustavsson, T., Loman, G.: 1999, Klimatologi Meteorologi, Studentlitteratur, Lund, Sverige.
- 7 Framtida markmålsbekämpning (ATK00259S), 2003.
- 8 Nemarich, J., Wellman, R.J., Lacombe, J.: “Backscatter and attenuation by falling snow and rain at 96, 140, and 225 GHz”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 26, no. 3, pp. 319-329, May 1988.
- 9 Nilsson B.: Meteorological influence on aerosol extinction in the 0.2- 40- $\mu$ m wavelength range. *Applied Optics* 18, pp. 3457-3472, 1979.
- 10 Koren I., Kaufman Y. J., Washington R., Todd M. C., Rudich Y., Vanderlei Martins J. and Rosenfeld D.: 2006, The Bodélé depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest. *Environ. Res. Lett.* 1 (October–December 2006) 014005. doi:10.1088/1748-9326/1/1/014005.
- 11 Papayannis, A., Amiridis V., Mona L., Tsaknakis G., Balis D., Bösenberg J., Chaikovski A., De Tomasi F., Grigorov I., Mattis

- 
- I., Mitev V., Müller D., Nickovic S., Pérez C., Pietruczuk A., Pisani G., Ravetta F., Rizi V., Sicard M., Trickl T., Wiegner M., Gerding M., Mamouri R. E., D'Amico G., Pappalardo, G.: "Systematic lidar observations of Saharan dust over Europe in the frame of EARLINET (2000-2002)". *J. Geophys. Res.* 113, D10204, doi:10.1029/2007JD009028 2008.
- 12 Kneizy F. X., Abreu L. W., Anderson G. P., Chetwynd J. H., Shettle E. P., Berk A. Bernstein L.S., Robertson D. C., Acharya P., Rothman L. S., Selby J. E. A., Gallery W. O., Clough S. A.: "The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 Model". Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, PL/GPOS, Hanscom AFB, MA 01731-3010, USA . 1996 (Rapporten finns i PDF format på CD-ROM distributionen av PcModWin4.0.
- 13 Waldman, G., Wooton, J.: *Electro-Optical Systems Performance Modeling*, Artech House, Inc., 1993.
- 14 Ontar Corporation, North Andover, MA, USA. [www.Ontar.com](http://www.Ontar.com), 2008-05-05.
- 15 Handbook of Geophysics and the space environment. Air Force Geophysics laboratory- Airforce systems command, USA, 1985.
- 16 Berk, A., Anderson, G. P., Acharya, P. K., Chetwynd, J. H., Hoke, M. L., Bernstein, L. S., Shettle, E. P., Matthew, M. W., Adler-Golden, S. M.: "MODTRAN4 Version2 User's manual.
- 17 Steinvall O.: "Waveform simulation for 3-D sensing laser radar", FOI. Linköping, Scientific report, FOA-R--00-01530-612, 408--SE, 2000.
- 18 Andrews L. C., Phillips R. L.: *Laser Beam Propagation through Random Media*. Bellingham, Washington, USA: SPIE Press, 1998.
- 19 Carlsson (later Chevalier) T., Steinvall O., Letalick D.: "Signature simulation and signal analysis for 3-D laser radar", FOI, Sensor Technology, FOI-R--0163--SE, July 2001.
- 20 Steinvall O.: "Theory for laser systems performance modelling", FOA. Linköping, Technical report, FOA-R--97-00599-612--SE, Oct 1997.
- 21 Crane, R.K.: "Fundamental limitations caused by RF propagation", *Proceedings of the IEEE*, vol. 69, no. 2, p. 196-209, February 1981.
- 22 Asp, B.: "Vågutbredning över mark och hav. Kurskompendium", FOI Metodrapport FOI-R--0038--SE, Februari 2001.
- 23 Sume, A.: "Atmosfärgasers inverkan på radarvågor. Klassisk och kvantmekanisk analys. Kursmaterial.", FOI-D--0272--SE, Linköping, november 2006.

- 
- 24 van de Hulst, H.C.: *Light Scattering by Small Particles*. John  
Wiley & Sons, New York, 1957.
- 25 Preissner, J. Symp. Millimeter Submillimeter Wave Propag. Cir-  
cuits; AGARD Conf. Proc. No. 245, pp.48/1-48/13, 1978.
- 26 Bohren, C.F., Huffman, D.R.: *Absorption and Scattering of Light  
by Small Particles*, Wiley, New York, 1983. ISBN 0-471-05772-  
X.
- 27 Liebe, H.: "Modeling attenuation and phase of radio waves in air  
at frequencies below 1000 GHz", *Radio Science*, vol. 16, no. 6, p.  
1183-1199, November-December 1981.
- 28 Liebe, H.: "MPM – An atmospheric millimeter-wave propagation  
model", *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*.  
Vol. 10, no. 6, p. 631-650, 1989.
- 29 Mätzler, C.: "MATLAB functions for Mie scattering and absorp-  
tion", Institut für Angewandte Physik, Mikrowellenabteilung, Re-  
search Report No. 2002-08, 18 pp., June 2002 (b). Downloaded  
from [www.iap.unibe.ch/publications/publication.php?lang=en](http://www.iap.unibe.ch/publications/publication.php?lang=en)  
(visited 2008-01-30).
- 30 Mätzler, C.: "Effects of rain on propagation, absorption and scat-  
tering of microwave radiation based on the dielectric model of  
Liebe", Institute of Applied Physics, University of Bern, Re-  
search Report No. 2002-010, June 2002 (c). Downloaded from  
[www.iap.unibe.ch/publications/publication.php?lang=en](http://www.iap.unibe.ch/publications/publication.php?lang=en) (visited  
2008-01-30).
- 31 Zhao, Z. och Wu, Z.: "Millimeter-wave attenuation due to fog  
and clouds", *International Journal of Infrared and Millimeter  
Waves*, vol. 21, no. 10, p. 1607-1615, 2000.
- 32 Liebe, H.J., Manabe, T., Hufford, G.A.: "Millimeter-wave at-  
tenuation and delay rates due to fog/cloud conditions", *IEEE  
Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 12, p.  
1617-1623, December 1989.
- 33 Ulaby, F.T., Moore, R.K., och Fung, A.K.: *Microwave Remote  
Sensing, Active and Passive*, vol I, Addison-Wesley, 1981.
- 34 Hufford, G.: "A model for the complex permittivity of ice at fre-  
quencies below 1 THz", *International Journal of Infrared and  
Millimeter Waves*, vol. 12, no. 7, p. 677-682, 1991.
- 35 Marshall, J.S., Palmer, W.M.: "The distribution of raindrops with  
size", *J. Meteorol.*, vol. 5, p. 165-166, 1948.
- 36 Brussard, G., Watson, P.A.: *Atmospheric modelling and millime-  
tre wave propagation*, Chapman & Hall, London, 1995. ISBN 0-  
412-56230-8.

- 
- 37 Oguchi, T.: "Electromagnetic wave propagation and scattering in  
rain and other hydrometeors", *Proceedings of the IEEE*, vol. 71,  
p. 1029-1078, September 1983.
- 38 Olsen, R.L.: "A review of theories of coherent radio wave propa-  
gation through precipitation media of randomly oriented scatter-  
ers, and the role of multiple scattering", *Radio Science*, vol. 17,  
no. 5, p. 913-928, September-October 1982.
- 39 Kong, J.A.: *Electromagnetic Wave Theory*, Wiley, New York,  
1986. ISBN 0-471-63389-5.
- 40 Kristensson, G.: *Spridningsteori med antenntillämpningar*, Lund,  
Studentlitteratur, 1999. ISBN 91-44-01134-2.
- 41 Kingsley, S., Quegan, S.: *Understanding Radar Systems*,  
McGraw-Hill, London, 1992. ISBN 0-07-707426-2.
- 42 Du, H.: "Mie-scattering calculation", *Applied Optics*, vol. 43, no.  
9, p. 1951-1956, 20 March 2004.
- 43 Cachorro, V.E., Salcedo, L.L.: "New improvements for Mie scat-  
tering calculations", arXiv:physics/0103052v1 [physics.optics],  
17 pp., 19 March 2001.
- 44 Cantrell, C.D.: "Numerical methods for the accurate calculation  
of spherical Bessel functions and the location of Mie resonances",  
August 2, 1988; references updated 2006.  
<http://www.utdallas.edu/~cantrell/ee6481/lectures/bessres1.pdf>  
(visited 2008-03-17).
- 45 Dave, J.V.: "Scattering of electromagnetic radiation by a large,  
absorbing sphere", *IBM J. Res. Develop.*, p. 302-313, May 1969.
- 46 Lentz, W.J.: "Generating Bessel functions in Mie scattering cal-  
culations using continued fractions", *Applied Optics*, vol. 15, no.  
3, p. 668-671, March 1976.
- 47 Shen, J., Cai, X.: "Algorithm of numerical calculation on Lorentz  
Mie Theory", *Progress In Electromagnetics Research Symposium*  
2005, p. 691-694, Hangzhou, China, August 22-26, 2005.
- 48 Toon, O.B., Ackerman, T.P.: "Algorithms for the calculation of  
scattering by stratified spheres", *Applied Optics*, vol. 20, no. 20,  
p. 3657-3660, 15 October 1981.
- 49 Wiscombe, W.J.: "Mie scattering calculations: advances in tech-  
nique and fast, vector-speed computer codes", Atmospheric  
Analysis and Prediction Division, National Center for Atmos-  
pheric Research, Boulder, Colorado, NCAR Technical Note,  
NCAR/TN 140+STR, June 1979. Downloaded from  
<http://www.library.ucar.edu/uhtbin/cgiisirse/20080318135736/SIRSI/0/520/DR000290> .
- 50 Wiscombe, W.J.: "Improved Mie scattering algorithms", *Applied*  
*Optics*, vol. 19, no. 9, p. 1505-1509, 1 May 1980.



- 
- 51       Laws, J.O., Parsons, D.A.: “The relation of raindrop size to intensity”, *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 24, p. 452-460, 1943.
- 52       Liu, L., Wang, H., Yu, B., Xu, Y., Shen, J.: “Improved algorithm of light scattering by a coated sphere”, *China Particuology*, vol. 5, p. 230-236, 2007. Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
- 53       Mätzler, C.: “MATLAB functions for Mie scattering and absorption. Version 2”, Institut für Angewandte Physik, Mikrowellenabteilung, Research Report No. 2002-11, 24 pp., August 2002 (d). Downloaded from [www.iap.unibe.ch/publications/publication.php?lang=en](http://www.iap.unibe.ch/publications/publication.php?lang=en) (visited 2008-01-30).
- 54       Yang, W.: “Improved recursive algorithm for light scattering by a multilayered sphere”, *Applied Optics*, vol. 42, no. 9, p. 1710-1720, 20 March 2003.
- 55       Kobayashi, S., Oguchi, T., Tanelli, S., Im, E. : “Backscattering enhancement on spheroid-shaped hydrometeors: Considerations in water and ice particles of uniform size and Marshall-Palmer distributed rains”, *Radio Science*, vol. 42, RS2001, doi:10.1029/2006RS003503.
- 56       Noland, W.L., Olsen, R.L., Shkarofsky I.P.: “Theoretical relationship between rain depolarization and attenuation”, *Electronics Letters*, vol. 13, no. 22, p. 676-678, 1977.
- 57       Mätzler, C.: “Radarsignale von anisotropem Niederschlag”, Institut für Angewandte Physik, Mikrowellenabteilung, Forschungsbericht Nr. 02-2, 23 pp., April 2002 (a). Downloaded from [www.iap.unibe.ch/publications/download/200/en](http://www.iap.unibe.ch/publications/download/200/en) (visited 2008-02-06).
- 58       Fabry, F., Szyrmer, W.: “Modeling of the melting layer. Part II: Electromagnetic”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 56, p. 3593-3600, 15 October 1999.
- 59       Bohren, C.F., Battan, L.J.: “Radar backscattering of microwaves by spongy ice spheres”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 39, p. 2623-2628, November 1982.
- 60       Fujiyoshi, Y.: “Melting snowflakes”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 43, no. 3, p. 307-311, 1 February 1986.
- 61       Fares, M.A., Fares, S.C., Ventrice, C.A.: “Phase shift of the electromagnetic waves due to dry snow”, *Proceedings IEEE SoutheastCon 2000*, p. 150-153, 2000.
- 62       Fares, M.A., Fares, S.C., Ventrice, C.A.: “Comparison between the attenuation of the electromagnetic waves due to moist snow and dry snow”, *Proceedings IEEE SoutheastCon 2002*, p. 259-262, 2000.

- 
- 63 Kharadly, M.M.Z., Choi, A. S.-V.: "A simplified approach to the evaluation of EMW propagation characteristics in rain and melting snow", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 2, p. 282-296, February 1988.
- 64 Kharadly, M.M.Z., Owen, N.: "Microwave propagation through the melting layer at grazing angles of incidence", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 8, p. 1106-1113, August 1988.
- 65 Klaassen, W.: "Radar observations and simulation of the melting layer of precipitation", *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 45, no. 24, p. 3741-3753, 15 December 1988.
- 66 Klaassen, W.: "Attenuation and reflection of radio waves by a melting layer of precipitation", *IEE Proceedings*, vol. 137, Pt. H, no. 1, p. 39-44, February 1990.
- 67 Knight, C.A.: "Observations of the morphology of melting snow", *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 36, p. 1123-1130, June 1979.
- 68 Korkmaz, S.D.: "Radar attenuation due to melting: a comparison of physical models proposed for the melting morphology", *Atmospheric Research*, vol. 70, p. 261-274, 2004.
- 69 Meneghini, R., Liao, L.: "Comparisons of cross sections for melting hydrometeors as derived from dielectric mixing formulas and a numerical method", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 35, p. 1658-1670, October 1996.
- 70 Raynaud, L., Chênerie, I., Lemorton, J.: "Modeling of radiowave scattering in the melting layer of precipitation", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 4, p. 1574-1584, July 2000.
- 71 Russchenberg, H.W.J., Ligthart, L.P.: "Backscattering by and propagation through the melting layer of precipitation: a new polarimetric model", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 1, p. 3-14, January 1996.
- 72 Sun, X., Wang, H., Han, Y., Shi, X.: "A new melting particle model and its application to scattering of radiowaves by a melting layer of precipitation", *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 28, p. 993-1001, 2007.
- 73 Szyrmer, W., Zawadzki, I.: "Modeling of the melting layer. Part I: Dynamics and microphysics", *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 56, p. 3573-3592, 15 October 1999.
- 74 Zhang, W.: "Scattering of radiowaves by a melting layer of precipitation in backward and forward directions", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 3, p. 347-356, March 1994.

- 75            Zhang, W., Karhu, S.I., Salonen, E.T.: "Predictions of radiowave attenuations due to a melting layer of precipitation", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 4, p. 492-500, April 1994.