

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Timo Piepponen

KAKSOISPOLARISAATIOSSÄÄTUTKAN TAKAISINSIRONNAN  
NUMEERINEN MALLINTAMINEN

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten Espoossa 21.5.2009

Työn valvoja:

Prof. Martti Hallikainen

Työn ohjaaja:

Prof. Jouni Pulliainen

Tekijä: Timo Piepponen		
Työn nimi: Kaksoispolarisaatiosäätutkan takaisinsironnan numeerinen mallintaminen		
Päivämäärä: 21.5.2009	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 9+63
Tiedekunta: Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta		
Professuuri: Avaruustekniikka		Koodi: S-92
Valvoja: Prof. Martti Hallikainen		
Ohjaaja: Prof. Jouni Pulliainen		
<p>Polarimetriset säätutkat ovat tulossa lähiaikoina operatiiviseen käyttöön Suomessa ja muualla maailmassa. Polarimetriset säätutkat tuovat lisää informaatiota ilmakehän hydrometeorien mittaukseen ja mahdollistavat siten perinteisiä säätutkia tarkemman sateen vesimäärän arvioinnin ja sateen olomuotojen luokittelun. Polarimetristen säätutkien parempaa hyödyntämistä varten tarvitaan lisää tietoa erilaisten hydrometeorien sirontaominaisuuksista.</p> <p>Tässä työssä tehtiin modifioitua DDA- eli diskreettidipoliapproksimaatiolaskentaa ja nollannen asteen säteilynkuljetusteoriaa käyttävä sirontamallinnusohjelma. Ohjelma kykenee laskemaan yksittäisen partikkelin eteenpäin ja takaisinsirontaparametrit eri polarisaatioille ja samoista kappaleista käyttäjän antamalla tiheydellä muodostuvan kerroksen sironta- ja vaimennusominaisuudet. Ohjelman toiminta validoitiin vertaamalla pallomaisten kappaleiden mallinnustuloksia analyttisiin, ja siten tarkasti oikean tuloksen antaviin Mie-sirontatuloksiin.</p> <p>Ohjelmaa käytettiin sulavan lumi-, räntä- ja vesisateen etenemisvaimennuksen mallintamiseen. Ohjelmalla tutkittiin miten etenemisvaimennus muuttuu partikkelin sisältämän vesimäärän kasvaessa ja kuinka veden sijoittuminen eri puolille kappaletta vaikuttaa eri polarisaatioilla tapahtuvaan vaimennukseen. Sulamista mallinnettiin yksinkertaisella mallilla, jossa on neljä sulamisvaihetta.</p> <p>Vaimennusmallinnuksen tuloksista havaittiin, miten HH- ja VV-polarisaatioiden ero kasvaa voimakkaasti, kun partikkelin alaosaan kertyy nestemäistä vettä tai kun partikkelin muoto muuttuu litteämmäksi. Pallosymmetristä tilannetta kuvaavassa toisen sulamisvaiheen partikkelissa havaittiin oletuksen vastaisesti myös jonkin verran eroa polarisaatioiden vaimennustuloksissa. Ongelman oletettiin johtuvan tavasta, jolla partikkelit luotiin, eikä varsinaisesta mallinnusohjelmasta, joka vaikuttaa muuten toimivan oletetusti.</p>		
Avainsanat: Sirontamallinnus, DDA, säteilynkuljetusteoria, säätutka, sulamis- kerros		

Author: Timo Piepponen

Title: Numerical modelling of the backscattering of dual-polarization weather radar

Date: 21.5.2009

Language: Finnish

Number of pages: 9+63

Faculty: Electronics, Communications and Automation

Professorship: Space technology

Code: S-92

Supervisor: Prof. Martti Hallikainen

Instructor: Prof. Jouni Pulliainen

Polarimetric weather radars will be in operational use in the near future. Polarimetric weather radars provide more information in the measurement of the atmospheric hydrometeors when compared to traditional weather radars. Hence more accurate estimates of the rain water content and precipitation types can be attained. In order to make better use of the features of polarimetric weather radars more information on the scattering properties of hydrometeors is needed.

In this thesis a program, that models scattering using modified DDA calculation and the zeroeth degree radiative transfer theory, was made. The program is able to calculate forward and backscattering parameters of a single particle and scattering and attenuation properties for a layer consisting of those particles with a specified numerical density. The results from program for spherical particles were validated by comparing them to Mie scattering results, which are analytical, and therefore, true results for the scattering situation.

The program was used to model attenuation due to hydrometeors in the melting layer. It was studied how the propagation attenuation changes when the water volume fraction in the particles increases and how differential accumulation of the water affects the attenuation in different polarization components. Melting of the particle was modeled with a simple model with four phases of melting.

The results of the attenuation modeling suggest, that the difference between HH and VV polarizations increases strongly when more water accumulates in the bottom of the particle and when the particle changes to a flatter shape. The second phase of the melting was spherically symmetric but contrary, to the initial assumption, differences between attenuation results for different polarizations were noticed. The problem was assumed to be caused by the way the particles were generated and not by the program which otherwise seems to be working properly.

Keywords: Scattering modelling, DDA, Radiative transfer theory, Weather radar, Melting layer

## Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun Avaruustekniikan laboratoriolle, joka myöhemmin muodostui osaksi Radiotieteen- ja tekniikan laitosta. Työn valvojana toimi professori Martti Hallikainen ja ohjaajana professori Jouni Pulliainen Ilmatieteen laitokselta. Tutkimus liittyi Tekesin rahoittamaan ja useiden eri tutkimuslaitosten yhteistyönä toteutettuun POMO-tutkimushankkeeseen (Polarisaatio-tutkan monitieteelliset sovellukset).

Kiitokset valvojalle ja ohjaajalle saamastani avusta ja mahdollisuudesta tehdä tämä haastava ja mielenkiintoinen työ Avaruustekniikan laboratoriolle. Iso kiitos viimeisten kuukausien kannustuksesta ja hyvistä neuvoista hyvälle työkaverille, assistentti Jaan Praksille.

Vanhemmilleni kuuluu suuri kiitos ja kunnia kaikesta siitä tuesta, luottamuksesta ja kannustuksesta mitä olen saanut tämän diplomityön ja koulu- ja opiskeluvuosieni aikana kokea. Lämmin kiitos myös rakkaalle vaimolleni Hannalle tuesta ja tähänastisista ihanista yhteisistä vuosistamme. Nyt kun molemmat olemme saamassa opiskelumme päätökseen, on mahtavaa, että saan astua kanssasi rinnakkain kohti elämän uusia polkuja.

Espoo, 21.5.2009

Timo Piepponen

# Sisältö

<b>Tiivistelmä</b>	<b>ii</b>
<b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>	<b>iii</b>
<b>Esipuhe</b>	<b>iv</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>v</b>
<b>Symbolit ja lyhenteet</b>	<b>vii</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Kaksoispolarisaatiosäätutka</b>	<b>3</b>
2.1 Tutkat . . . . .	3
2.2 Perinteiset säätutkat . . . . .	3
2.3 Kaksoispolarisaatiosäätutka . . . . .	4
2.4 Kumpulan säätutka . . . . .	5
2.5 Katsaus sulamiskerroksen polarimetristen säätutkahavaintojen tul- kintaan ja mallintamiseen . . . . .	5
<b>3 Tutkamittauksen ja sironnan mallintamisen teoriaa</b>	<b>8</b>
3.1 Sähkömagneettisen säteilyn perusteita . . . . .	8
3.2 Väliaineiden sähköisiä ominaisuuksia . . . . .	10
3.2.1 Vesi . . . . .	11
3.2.2 Jää . . . . .	11
3.2.3 Lumi . . . . .	12
3.3 Sironna väliaineesta . . . . .	13
3.3.1 Sironnan mittaaminen polarimetrisellä säätutkalla . . . . .	15
3.4 Sironnan mallinnus . . . . .	16
3.4.1 Yksittäisen partikkelin sironnan mallinnus DDA-mallilla . . . . .	17
3.4.2 Yksittäisen kappaleen sironnan yleistäminen säteilykuljetus- teorian avulla . . . . .	18
<b>4 Mallinnusohjelma</b>	<b>20</b>

4.1	Aikaisemmin tehdyt ohjelman osat . . . . .	20
4.2	Ohjelman toiminta . . . . .	20
4.2.1	Partikkelien muodostaminen DDA-laskentaa varten . . . . .	21
4.3	Ohjelman rakenne . . . . .	21
4.4	Laskennan nopeus . . . . .	27
4.5	Ohjelman validointi . . . . .	27
4.5.1	Validoinnin tulokset vedelle . . . . .	28
4.5.2	Validoinnin tulokset jäälle . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Hydrometeorien mallinnus ja vaimennusmallinnuksen tulokset</b>	<b>38</b>
5.1	Lumen sulaminen . . . . .	38
5.2	Mallinnettavat partikkelit . . . . .	39
5.3	Vaimennusmallinnuksen tulokset . . . . .	40
5.3.1	Mallinnus ja tulokset veden tilavuusosuuden funktiona toisen ja kolmannen sulamisvaiheen hydrometeoreille . . . . .	41
5.3.2	Mallinnus ja tulokset partikkelien kappalemääräisen tiheyden funktiona . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>50</b>
	<b>Viitteet</b>	<b>52</b>
<b>A</b>	<b>Pääohjelman koodi</b>	<b>56</b>
<b>B</b>	<b>Pääohjelman muuttujat</b>	<b>62</b>

# Symbolit ja lyhenteet

## Symbolit

$B$	magneettivuon tiheys
$c$	valon nopeus tyhjiössä
$D$	halkaisija
$D$	sähkövuon tiheys
$dBZ$	tutkaheijastuvuus desibeleinä esitettynä
$E$	sähkökenttävektori
$E_i$	tuleva sähkökenttävektori
$E_s$	sironnut sähkökenttävektori
$E_0$	tulevan sähkökentän voimakkuus
$f$	sirontamatriisi
$f$	taaajuus
$f_{HH}$	sirontamatriisin alkio HH-polarisaatiolle
$f_{VV}$	sirontamatriisin alkio VV-polarisaatiolle
$f_{VH}$	sirontamatriisin alkio VH-polarisaatiolle
$f_{HV}$	sirontamatriisin alkio HV-polarisaatiolle
$f_{PFR}$	pulssintoistotaajuus
$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$	Greenin dyadi
$h$	kerroksen paksuus
H-	horisontaali-
$H$	magneettikentän voimakkuus
$I$	identiteettimatriisi
$\hat{i}$	sironneen aallon suuntavektori
$J$	sähkövirran tiheys
$j$	imaginaariyksikkö
$k$	aaltoluku
$k_0$	tyhjiön aaltoluku
$LDR$	lineaarinen depolarisaatiosuhde
$N$	laskentaelementtien lukumäärä mallinnettavassa kappaleessa
$N_{oper}$	laskentaoperaatioiden lukumäärä
$n$	taitekerroin
$R$	etäisyys
$R_r$	sademäärä
$r$	pallon säde
$\mathbf{r}$	paikkavektori
$s$	laskenta-alkion sivun pituus
$T$	lämpötila
$t$	aika
$\mathbf{u}$	yksikkövektori
$V$	tilavuus
V-	vertikaali-
$v$	aaltoliikkeen etenemisnopeus
$v_t$	putoavien hydrometeorien terminaalinopeus
$Z$	tutkaheijastuvuus
$Z_{dr}$	differentiaalinen tutkaheijastuvuus

$\epsilon$	permittiivisyys
$\epsilon_a$	näennäinen permittiivisyys
$\epsilon_0$	tyhjiön permittiivisyys
$\epsilon_i$	jään suhteellinen permittiivisyys
$\epsilon_r$	suhteellinen permittiivisyys
$\epsilon'_r$	suhteellisen permittiivisyyden reaaliosa
$\epsilon''_r$	suhteellisen permittiivisyyden imaginaariosa
$\epsilon_w$	veden suhteellinen permittiivisyys
$\epsilon_{ws}$	Debyen yhtälön matalan taaajuuden parametri vedelle
$\epsilon_{w\infty}$	Debyen yhtälön korkean taaajuuden parametri vedelle
$\Theta$	modifioitu käänteinen lämpötila
$\kappa_e$	kokonaisvaimennuskerroin
$\kappa_{diff}$	differentiaalinen vaimennuskerroin
$\mu$	permeabiliteetti
$\nu_i$	jään tilavuusosuus
$\lambda$	aallonpituus
$\rho$	kappalemääräinen tiheys
$\sigma$	johtavuus
$\sigma_a$	absorptiopoikkipinta
$\sigma_b$	takaisinsirontapoikkipinta
$\sigma_{bi}$	bistaattinen sirontapoikkipinta
$\sigma_d$	differentiaalinen poikkipinta
$\sigma_e$	ekstinktiopoikkipinta
$\sigma_s$	sirontapoikkipinta
$\sigma_r$	keskihajonta pallon sisältä arvottavan pisteen $r$ -muuttujan satunnaisjakaumalle
$\sigma_v$	tilavuustakaisinsirontakerroin
$\sigma_0$	takaisinsirontakerroin
$\tau$	transmissiivisyys
$\tau_w$	veden relaksaatioaika
$\Omega$	avaruuskulma
$\omega$	kulmataajuus
$\hat{\mathbf{0}}$	tulevan aallon suuntavektori

## Lyhenteet

DDA	Discrete-dipole approximation Diskreettidipoliapproksimaatio
RF	Radio frequency Radiotaaajuus-
SAR	Synthetic aperture radar Synteettisen apertuurin tutka



# 1 Johdanto

Tämä diplomityö liittyy uudentyyppisten kaksoispolarisaatiota käyttävien säätutkien tehokkaampaan käyttöön tähtäävään tutkimukseen. Tällä hetkellä operatiivisessa käytössä on suurimmaksi osaksi perinteisiä säätutkia, jotka mittaavat ilmakseen hydrometeoreista eli lunta, jäätä ja vettä sisältävistä partikkeleista heijastunutta sähkömagneettista aaltoa yhdellä polarisaatiolla eli sähkökenttävektorin värähtelysuunnalla. Tämän tyyppisillä säätutkilla saadaan mitattua sateen voimakkuus, mutta niillä ei ole mahdollista selvittää tarkasti sateen vesimäärää tai partikkelien muotoa. On oletettavaa, että jatkossa suurin osa uusista säätutkista tulee olemaan kaksoispolarisaatiosäätutkia, jotka poikkeavat perinteisistä säätutkista siinä, että niissä mitataan kahdella erillisellä polarisaatiolla. Tällöin kohteista saadaan enemmän mitaussuureita, ja sitä kautta enemmän tietoa niiden rakenteesta. Tärkeimmät asiat joihin kaksoispolarisaatiosäätutkien käytön odotetaan tuovan tarkennuksia ovat sateen sisältämän vesimäärään mittaus ja sateen eri olomuotojen havaitseminen.

Tärkeimpänä tavoitteena tässä työssä oli erilaisten hydrometeorien ominaisuuksia mallintavan Matlab-ohjelman tekeminen ja testaus. Ohjelma kykenee laskemaan yksittäisen partikkelin eteenpäin ja takaisinsirontaparametrit eri polarisaatioille ja samoista kappaleista käyttäjän antamalla tiheydellä muodostuvan sadekerroksen sironta- ja vaimennusominaisuudet. Ohjelman toiminta validoitiin vertaamalla pallomaisten kappaleiden mallinnustuloksia analyttisiin, ja siten tarkasti oikean tuloksen pallomaisille sirottaajille antaviin Mie-sirontatuloksiin.

Tilavuussirontaa on monissa erilaisissa sovelluksissa mallinnettu käyttämällä diskreettidipoliapproksimaatioon (DDA, Discrete-dipole approximation) perustuvaa numeerista laskentaa. DDA:n etu on se, että sillä voi tarkasti mallintaa monimutkaisen muotoisia kappaleita, jotka koostuvat useista erilaisista materiaaleista. Teknillisen korkeakoulun Sähkömagneetiikan laboratoriossa, joka on nykyisin osa Radiotieteen ja -tekniikan laitosta, on kehitetty DDA:han pohjautuva, mutta siitä jonkin verran poikkeava, sirontan mallinnusalgoritmi, josta käytetään jatkossa nimitystä modifioitu DDA. Modifioitua DDA-laskentaa käyttävä Matlab-ohjelmointikielellä toteutettu laskentakoodi oli tehty aikaisemmin Sähkömagneetiikan laboratoriossa. Laskentakoodi ratkaisee sille annetun kappaleen sirottavat ominaisuudet annetuille säteilyn tulosuunnille ja yhdelle tai useammalle sirontasuunnalle. Aikaisemmin tehty laskentakoodi laskee mallinnettavien kappaleiden sirontamatriisit, jotka ovat kaikkien tässä työssä esitettyjen sironta- ja vaimennustulosten laskemisen lähtökohtana. Tämän laskentakoodin ympärille ohjelmoitiin tässä diplomityössä esitetty mallinnusohjelma. Ohjelmassa modifioitua DDA-mallia käytettiin yksittäisen kappaleen sirontan laskemiseen, ja yhdistämällä tähän nollannen asteen säteilynkuljetusteoria, laskettiin mm. sirottavan kerroksen aiheuttama etenemisvaimennus. Sähkömagneettisen aallon eri polarisaatiokomponentit pystyttiin laskemaan toisistaan riippumatta, jolloin voitiin tutkia miten epäsymmetrisesti rakentuneet partikkelit vaikuttavat sirontaan ja vaimennukseen eri polarisaatioilla.

Työssä tehtyä sirontanmallinnusohjelmaa käytettiin sulamiskerroksen hydrometeo-

rien, eli veden ja lumen sekoituksesta muodostuneiden räntäpartikkelien, etenemisvaimennuksen tutkimiseen. Sulamiskerroksen hydrometeoreista luotiin DDA-mallinusta varten yksinkertaiset mallit, joiden etenemisvaimennus laskettiin. Sulamismallissa lumen sulaminen on luokiteltu neljään eri sulamisvaiheeseen, joista ensimmäisessä kappale koostuu pelkästä lumesta, toinen ja kolmas koostuvat lumesta muodostetusta taustakappaleesta, jonka sisälle kertyy erilaisten jakaumien ohjaamana nestemäistä vettä ja neljäs sulamisvaihe koostuu pelkästä vedestä. Neljännen sulamisvaiheen kappale on kiekkomainen ellipsoidi, ja muiden sulamisvaiheiden kappaleet ovat pallomaisia.

Putoavien räntäpartikkelien sulaessa partikkelien sisälle kertyy entistä enemmän vettä. Aluksi vettä kertyy tasaisesti pinnan läheisyyteen, mutta sulamisen edistyessä vesimäärä lisääntyy enemmän kappaleen alapinnalla. Epäsymmetrisen rakenteen takia on oletettavaa, että kappale vaikuttaa etenevään sähkömagneettiseen aaltoon eri lailla eri polarisaatioilla. Tavoitteena oli mallintaa kappaleen sulamista ja selvittää, minkä suuruinen kutakin lumen sulamisvaihetta vastaava etenemisvaimennus on eri polarisaatiokomponenteilla.

Vaimennusmallinnuksen tuloksista havaittiin miten HH- ja VV-polarisaatioiden ero kasvaa voimakkaasti, kun partikkelin alaosaan kertyy nestemäistä vettä tai kun partikkelin muoto muuttuu litteämmäksi. Pallosymmetristä tilannetta kuvaavassa toisen sulamisvaiheen partikkelissa havaittiin oletuksen vastaisesti myös jonkin verran eroa polarisaatioiden vaimennustuloksissa. Ongelman oletettiin johtuvan tavasta, jolla partikkelit luotiin, eikä varsinaisesta mallinnusohjelmasta, joka vaikuttaa muuten toimivan oletetusti.

Tämä diplomityö on rakennettu seuraavasti: luvussa 2 kerrotaan yleisesti tutkista, ja esitellään perinteinen säätutka ja kaksoispolarisaatiosäätutka sekä niiden toiminta. Lisäksi luvussa esitellään aikaisemmin tehtyä, samaan aihepiiriin liittyvää tutkimusta. Luvussa 3 esitellään yleistä sähkömagneettiseen säteilyyn ja DDA-pohjaiseen mallinnukseen liittyvää teoriaa. Luvussa 4 on keskitytty tehtyyn mallinnusohjelmaan ja sen toiminnan validoimiseen. Luvussa 5 kerrotaan sulavien hydrometeorien etenemisvaimennuksen mallinnuksesta, sen toteutuksesta ja tuloksista.

## 2 Kaksoispolarisaatiosäätutka

### 2.1 Tutkat

Tutka on aktiivinen mittausväline, joka lähettää sähkömagneettista säteilyä ja vastaanottaa kohteesta palaavan kaiun. Yleisin tutkatyyppi on pulssitutka, joka lähettää toistuvasti lyhyitä pulsseja. Vastaanotettujen pulssien viiveestä ja voimakkuudesta voidaan päätellä havaittujen kohteiden sijainti ja tietoja niiden ominaisuuksista. Käyttämällä voimakkaasti suuntaavaa pyöriteltävää antennia pystytään keilaamalla muodostamaan kolmiulotteinen kuva tutkan ympäristöstä. Pulssintoistotaajuus  $f_{PRF}$  on valittu siten, että tutkan maksimikantaman päässä olevasta kohteesta palannut kaiku on ehtinyt vastaanottimeen ennen seuraavan pulssin lähetystä.

Tässä työssä tutkasta puhuttaessa puhutaan nimenomaan radioteknisestä tutkasta, eikä esimerkiksi samalla periaatteella toimivasta näkyvän valon aallonpituuksien ”tutkasta” eli lidarista. Yleisimpien tutkatyyppien taajuudet ovat välillä 1–40 GHz, eli ne toimivat mikroaaltoalueella. Taajuuden valintaan vaikuttaa tutkan käyttötarkoitus siten, että suurta erottelukykyä tarvitsevilla tutkilla käytetään yleensä korkeaa taajuutta, koska tällöin tutkan antennin keila saadaan riittävän kapeaksi ilman valtavan kokoista tutka-antennia. Korkeiden taajuuksien ongelmaksi muodostuu yleensä suurempi vaimennus varsinkin sateisella säällä, joten pitkän kantaman tutkissa käytetään yleensä pienempiä taajuuksia.

Tässä työssä on keskitytty säätutkaan, jonka tarkoituksena on havaita pilvistä satavat vesi, lumi ja räntäpartikkelit. Muita tutkia ovat mm. ilmavalvontatutka, erilaisten sotilasjärjestelmien tulenohjaustutkat, autojen peruutustutkat, tutkakorkeusmittarit lentokoneissa ja kaukokartoitussatelliittien synteettisen apertuurin tutkat (SAR).

Tämän kohdan tietojen lähteenä on käytetty Olli Klemolan ja Arto Lehdon suomenkielistä alan oppikirjaa [1].

### 2.2 Perinteiset säätutkat

Perinteinen säätutka ei suuresti poikkea esimerkiksi ilmavalvonnassa käytetystä pulssitutkasta. Säätutkassa on säältä suojaavan kuvun sisällä melko suuri ja siten kapeakeilainen paraboloidiantenni. Keilanleveys on säätutkissa yleensä noin  $1^\circ$ . Yksi keilausjakso, eli halutun tilavuuden kattaminen kapealla keilalla, kestää säätutkassa yleensä joitain minuutteja, sillä vain riittävän hitaalla keilauksella saadaan varmistettua riittävä määrä vastaanotettuja pulsseja kustakin tilavuusalkiosta. Säätutkat toimivat yleensä taajuuksilla 3–10 GHz, joilla saavutetaan riittävän hyvä kompromissi erotuskyvyn ja kantaman välillä. [1]

Säätutka on tärkeä mittausväline, jolla saadaan lähes reaaliaikaista tietoa sateesta melko suurelta mittausalueelta. Säätutkien kuvista on siten muodostunut tärkeä keino visualisoida vallitsevaa säätilaa television sääennustuksissa. Säätutkan mit-

taamia tietoja voidaan käyttää suoraan lyhytaikaisissa sade-ennusteissa, ja tutkimuksissa selvitetään joidenkin säätutkalla mitattujen suureiden, kuten esimerkiksi tuulennopeuden, käyttöä numeeristen sääennustemallien lähtötietoina [2]. Tärkein rooli säätutkilla on erilaisten meteorologisten ilmiöiden tutkimuksessa.

Ilmatieteen laitoksella on Suomessa kahdeksan säätutkaa, joiden avulla pystytään kattamaan lähes koko Suomen alue. Lisäksi Pohjoismaisen NORDRAD-tutkayhteistyön ansiosta saadaan tutkakuvaa myös naapurimaiden alueelta. Ilmatieteen laitoksen nykyinen säätutkaverkosto toimii 5,6 GHz:n taajuudella, jolloin aallonpituus on noin 5,3 cm. [3]

Dopplerin ilmiötä käyttämällä on mahdollista mitata kohteen liikettä. Jos sirottava kappale liikkuu radiaalisuunnassa tutkaan nähden, on tutkaan palanneen aallon taajuus muuttunut Doppler-taajuuden  $f_D = \frac{2v_r}{\lambda}$  verran. Mittaamalla dopplertaajuus eri suunnista tehdyille havainnoille voidaan laskea tutkan havaitsemien partikkeli- nopeusvektorin suunta ja suuruus. Kohteiden nopeustietoa voidaan käyttää monipuolisesti hyödyksi esimerkiksi tuulitietojen hankkimiseen, ympäröivän maaston aiheuttamien häiriökaikujen poistamiseen ja erilaisten partikkelityyppien tunnistamiseen. [4]

Perinteisen säätutkan yksi suurista ongelmista on takaisin heijastuneen kaiun voimakkuuden riippuvuus partikkelin koosta. Perinteisissä säätutkissa käytetty suure on tutkaheijastuvuuskerroin  $Z$ , joka riippuu partikkeli- halkaisijoista  $D$  (millimetreinä) ja kappalemääräisistä tiheyksistä  $\rho$  kaavan (1) mukaan [5]. Tutkaheijastuvuus ilmoitetaan yleensä desibeleinä, jolloin sille käytetään symbolia  $dBZ$ .

$$Z = \int_D D^6 \rho(D) dD \quad (1)$$

Kaavassa (1) partikkelin halkaisijalla on suuri eksponentti, mistä seuraa, että hyvin harvasta, mutta suurista pisaroista koostuvasta sateesta havaitaan suurempi tutkakaiku kuin tiheästä ja pienistä pisaroista koostuvasta sateesta. Tästä johtuen *perinteisillä säätutkilla on todella vaikea erottaa sateen sisältämän veden määrää.*

## 2.3 Kaksoispolarisaatiosäätutka

Kaksoispolarisaatiosäätutkalla tarkoitetaan tutkaa, joka kykenee mittaamaan kappaleiden tutkaheijastuvuutta kahdella keskenään ortogonaalisella lineaarisella polarisaatiolla. Polarisaatiolla tarkoitetaan sähkömagneettisen aallon sähkökenttävektorin värähtelysuuntaa. Tarkempi määrittely erilaisille polarisaatioille esitetään kappaleessa 3.1. Säätutka on suunnattu suurimman osan ajasta melko matalille korotuskulmille, joten on luonnollista käyttää näistä polarisaatiokomponenteista maanpäällisestä tietoliikenteestä periytyviä nimityksiä horisontaali- ja vertikaalipolarisaatio (eli H- ja V-polarisaatio).

Suurin osa nykyisistä, operatiivisessa käytössä olevista säätutkista on vielä perinteisiä säätutkia, jotka hyödyntävät myös Doppler-taajuuden mittausta. Suomalainen

Vaisala Oyj toi vuoden 2007 aikana markkinoille oman kaksoispolarisaatiomittaukseen kykenevän säätutkatuotteensa. Myös Ilmatieteen laitos aikoo lähivuosina uusia säätutkaverkkonsa kaksoispolarisaatiosäätutkilla [6].

Tutkan lähettimessä ja vastaanottimessa on kanavat molemmille polarisaatiokomponenteille, jolloin samaa, kahden polarisaation lähettämiseen kykenevää antennia käyttämällä saadaan lähetettyä molempia komponentteja. Lähetettyjen ja vastaanotettujen komponenttien mukaan kohteesta havaittuja tutkaheijastuvuuksia kutsutaan termeillä HH-, VV-, HV- ja VH-polarisaatio. Ristipolarisaatiokomponentit HV ja VH kuvaavat sitä pientä osaa lähetetystä tehosta, joka on kohteen vaikutuksesta vaihtanut polarisaatiosuuntaansa. [5]

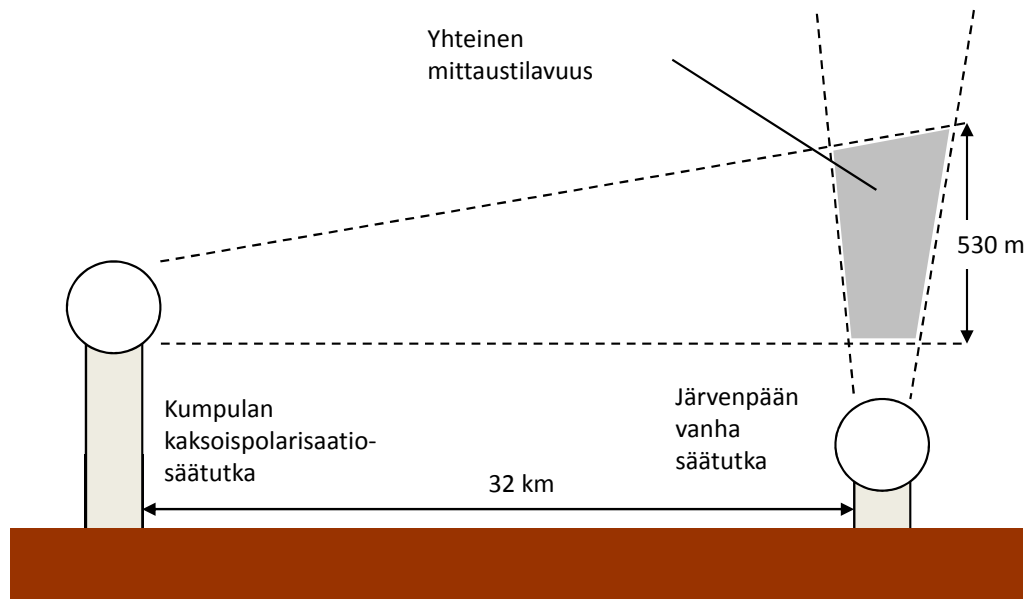
Nykyisillä kaksoispolarisaatiosäätutkilla lähetetään yleensä molempien polarisaatiokomponenttien samanvaiheista yhdistelmää, eli käytännössä lähetetään horisontaali- ja vertikaalipolarisaatioiden puolivälistä olevaa lineaarista polarisaatiota. Vastaanotossa erotellaan molemmat polarisaatiokomponentit omiin vastaanotinkanaviinsa, jolloin saadaan erotettua HH, VV ja ristipolarisaatiokomponenttien yhdistelmä. Polarisaatiokomponenttien voimakkuuksien suhteista ja vaihe-eroista saadaan tietoa kohteena olevien partikkelien muodosta ja rakenteesta. Kaikki polarisaatiokomponentit mittaava, täysin polarimetrinen tutka pystyy lähettämään vuorotellen H ja V polarisaation pulsseja ja mittaamaan heijastuneiden signaalien kaikki pulssikombinaatio. Monet kaukokartoitussatelliiteissa olevat SAR-tutkat pystyvät täysin polarimetrisen mittaukseen. Säätutkissa on usein tyydytty kaksoispolarisaation mittaukseen, koska tällöin tutkan lähettimen RF-osista tulee yksinkertaisempia ja luotettavampia. Ristipolarisaatiokomponenttien erottaminen toisistaan ei tuo myöskään merkittävästi uutta informaatiota sään mittaukseen. [5]

## 2.4 Kumpulan säätutka

Tämä diplomityö liittyy tutkimukseen, jota tehdään Helsingin yliopiston hallinnoimalla ja Vaisala Oyj:n rakentamalla kaksoispolarisaatiosäätutkalla. Tutka sijaitsee Helsingin yliopiston Fysiikan laitoksen rakennuksen katolla Kumpulassa. Tutka on toiminut prototyypinä Vaisalan säätutkatuotepäälle. Tutka ei ole osa Ilmatieteen laitoksen operatiivista säätutkaverkkoa, vaan sitä käytetään tutkimukseen liittyvissä mittauksissa. Kumpulan tutkaa on käytetty myös yhteistoiminnassa Helsingin yliopiston, Järvenpäässä sijaitsevan, vanhemman säätutkan kanssa kuvan 1 mukaisesti [7]. Kumpulan kaksoispolarisaatiosäätutkan teknisiä tietoja on esitelty artikkelissa [8].

## 2.5 Katsaus sulamiskerroksen polarimetristen säätutkavaintojen tulkintaan ja mallintamiseen

Suurin osa kesäsateesta Suomessa syntyy jääkideprosessin kautta veden jäätympisteiden alapuolella olevissa lämpötiloissa [9]. Putoavat jääkiteet alkavat sulaa, kun niitä ympäröivän ilman lämpötila nousee yli nollan celsiusasteen. Nolla-isotermi ja



**Kuva 1:** Helsingin yliopiston säätutkien mittausjärjestely.

sitä kautta myös *sulamiskerros* sijaitsee kesällä Suomessa 1–3 kilometrin korkeudessa [10]. Sulamiskerroksen partikkelien takaisinsironta on erityisen suurta, joten sulamiskerros näkyy tutkassa kirkaampana kuin sen ylä- ja alapuoliset kerrokset [11]. Ilmiö on havaittu ensimmäisen kerran ilma- ja maavalvontatutkilla toisen maailmansodan aikana ja siitä käytetään englanninkielistä nimitystä *bright band* [12].

Sulamiskerroksen partikkelien rakenteesta johtuen niiden aiheuttama vaimennus on voimakkaampaa kuin esimerkiksi lumihiuhtaleiden ja vesipisaroiden vaimennus [11]. Sulamiskerroksen etenemisvaimennus oletetaan monesti merkityksettömäksi eikä sitä toistaiseksi ole yleisesti otettu huomioon säätutkan tuloksia tarkastellessa. Poikkeuksen tästä muodostavat voimakkaat konvektiiviset sateet, joiden aiheuttama varjostuminen voi olla voimakasta. Jos tutkan lähettämä säteily kulkee pitkän matkan voimakkaasti vaimentavassa kerroksessa, voivat tämän alueen takana olevista kohteista tulevat tutkakaiut näyttää vaimenemisen takia todellista heikommilta. Vesisateen aiheuttamaa etenemisvaimennusta on C-taajuusalueella tutkittu mallinnuksella ja mittauksilla useissa julkaisuissa, kuten esimerkiksi Bringin ym. artikkelissa [13] vuodelta 2001.

Tässä työssä kehitettyä mallinnusohjelmaa käytettiin sulamiskerroksen partikkelien etenemisvaimennuksen mallintamiseen C-taajuusalueella, koska tästä aiheesta on melko vähän tutkittua tietoa. Tällä tutkimuksella halutaan osaltaan selvittää, onko tämä etenemisvaimennus niin suurta, että se pitäisi ottaa huomioon säätutkien tuloksia analysoitaessa. Sulamiskerroksen etenemisvaimennus on Suomessa erityisen tärkeää, koska sulamiskerros on täällä kesälläkin melko lähellä maanpintaa, joten tutkasäde kulkee siinä pidemmän matkan verrattuna tilanteeseen, jossa sulamiskerros olisi useiden kilometrien korkeudella. Kaksoispolarisaatiosäätutkia varten halutaan erityisesti selvittää, kuinka suuria eroja erilaisten sulamisvaiheiden epäsymmetriset

kappaleet aiheuttavat eri polarisaatiokomponenttien välille.

Sulamiskerroksen hydrometeoreja on tutkittu laboratorio-olosuhteissa useissa eri tutkimuksissa, mutta kaikkia sulamisen yksityiskohtia ja partikkelien todellisia muotoja ei vielä tunneta kovin hyvin. Tässä työssä käytettiin Mitran ym. [14] vuonna 1990 esittämää kuvausta sulamisen etenemisen vaiheista. Szyrmer ym. [11] ovat tutkineet sulamiskerroksen mikrofysiikkaa ja perinteisillä säätutkilla havaittuja suuria dynaamisella laskentamallilla, jonka pohjana on käytetty eri tahojen tekemiä laboriomittauksia, säätutkahavaintoja ja lentokoneilla tehtyjä in situ -mittauksia.

Sulamiskerroksen hydrometeorien tutkavastetta on mitannut ja mallintanut Klaassen vuonna 1988 julkaistusta tutkimuksessa [15]. Siinä simuloitu tutkavaste saatiin laskemalla sirontaa pallomaisille kappaleille Mie-sirontateorian avulla. Sulamiskerroksen partikkeleiden sirontaa on tutkittu erilaisilla mallinnustavoilla, kuten Rayleigh-sironnalla [16] ja Point-Matching menetelmällä [17]. Aikaisemmin mainitun Smyrmerin ym. [11] kanssa yhteistyössä on Fabry ym. tutkinut [18] sulamiskerroksen partikkelien sirontaa perinteisten säätutkien kannalta. Tutkimuksessa käytettiin viitteessä [19] esitettyjä tapoja laskea nestemäisestä vedestä, jäästä ja ilmasta koostuvan partikkelin efektiivinen permittiivisyys. Fabry ym. vertaili malleja, joissa kappaleen rakennetta approksimoidaan hieman eri tavoilla ja tutki mikä näistä malleista antaa parhaiten havaintoja vastaavia tuloksia sulamiskerroksen partikkelien tutkaheijastuvuudelle ja putoamisnopeudelle.

Russchenberg ym. ovat tutkineet sulamiskerrosta polarimetrinen säätutkien kannalta [20]. He esittivät sulamiskerroksesta yksinkertaisen mallin, jonka avulla voidaan ennustaa polarimetrinen ja Doppler-mittausten tuloksia ja etenemisvaikutuksia sulamiskerroksessa. Tässä mallissa partikkelin sirontaominaisuudet on laskettu keskimääräisten dielektristen ominaisuuksien ja partikkeleita kuvaavien tilastollisten suureiden avulla.

Polarimetrinen tutkien kannalta eniten on tutkittu erilaisia jääpartikkeleita, kuten esimerkiksi artikkelissa [21], jossa yhdistettiin polarimetriset tutkahavainnot, in situ-mittaukset ja DDA:lla tehdyt sirontan mallinnukset.

Zhang ym. ovat tutkineet sähkömagneettisen aaltoliikkeen etenemisvaimennusta sulamiskerroksessa tietoliikenteen kannalta artikkeleissa [22]. He käyttivät Mie-teoriaa sirontan ja absorption mallintamiseen ja esittivät etenemisvaimennuksen laskemiseen sademäärän funktiona tarkoitetun likimääräisen potenssilain (2) sekä siinä esiintyvät parametrit  $k_m$  ja  $\alpha_m$  hyvin laajalle 1–100 GHz taajuusalueelle.

$$\kappa_e \approx k_m R_r^{\alpha_m}, \quad (2)$$

missä  $\kappa_e$  on kokonaisvaimennuskerroin (yksikössä  $\frac{dB}{km}$ ) ja  $R_r$  on sademäärä (yksikössä  $\frac{mm}{h}$ ).

### 3 Tutkamittauksen ja sironnan mallintamisen teoriaa

#### 3.1 Sähkömagneettisen säteilyn perusteita

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D} + \mathbf{J} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (6)$$

Näkyvä valo, radioaallot, röntgen ja infrapuna ovat esimerkkejä sähkömagneettisesta aaltoliikkeestä, jonka käyttäytymistä täydellisesti kuvaavat lainalaisuudet (3)–(6) julkaisi James Maxwell vuonna 1864, joskin hänen käyttämä esitysmuotonsa oli näihin differentiaalimuodossa esitettyihin yhtälöihin nähden huomattavasti monimutkaisempi ja pidempi [23]. Näiden melko erilaisilta vaikuttavien säteilylajien erot johtuvat oikeastaan vain niiden erilaisista energioista ja vuorovaikutusmekanismeista maailman erikokoisten rakenneosasten kanssa.

Sähkömagneettinen säteily on tyhjiössä tai väliaineessa etenevää poikittaista aaltoliikettä, jossa sähkökenttä ja magneettikenttä värähtelevät toisiinsa ja etenemissuuntaan nähden kohtisuorissa tasoissa taajuudella  $f$ . Aallon etenemisnopeus  $v$  riippuu väliaineen sähköisistä ja magneettisista ominaisuuksista eli permittiivisyydestä  $\epsilon$  ja permeabiliteetista  $\mu$  [24]:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (7)$$

Tyhjiössä ja hyvällä tarkkuudella myös ilmassa sähkömagneettisen aallon etenemisnopeus on valon nopeus  $v = c = 299\,792\,458 \frac{m}{s}$ .

Yksinkertaisin ratkaisu etenevälle sähkömagneettiselle säteilylle on tasoaalto, jossa äärettömän leveä aaltorintama etenee tiettyyn suuntaan. Tasoaalto on fysikaalisessa mielessä mahdoton, koska poikittaissuunnassa rajoittamattomana se kuljettaa äärettömän määrän energiaa. Kaukana olevan säteilylähteen kenttää voidaan kuitenkin suurella tarkkuudella approksimoida paikallisesti käyttäen tasoaallon yhtälöitä. Positiivisen z-akselin suuntaan etenevä tasoaalto, jonka sähkökenttä värähtelee x-suunnassa voidaan esittää kaavalla [24]:

$$E_x(z) = E e^{-jkz}, \quad (8)$$

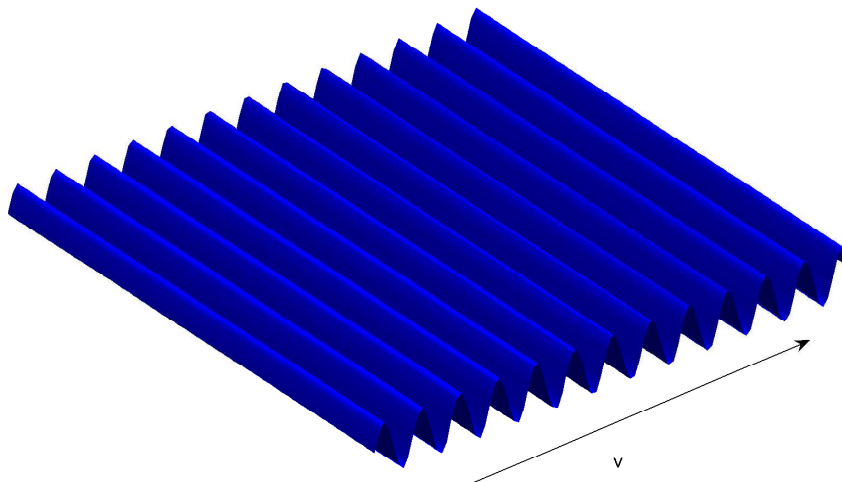
missä  $k$  on aaltoluku. Tasoaallon kentänvoimakkuuksia on hahmoteltu kuvassa 2. Aika-alueessa tämä voidaan esittää muodossa (9). Sähkökentän amplitudivektori



värähtelee ajan  $t$  suhteen sinimuotoisesti kulmanopeudella  $\omega = 2\pi f$  ja toistuu samanlaisena etenemisnopeudesta kaavan (10) mukaan riippuvan aallonpituuden  $\lambda$  välein. [24]

$$E_x(z, t) = E \cos(\omega t - kz) \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (10)$$



**Kuva 2:** Hahmotelma taso-aallon kentänvoimakkuuksista.

Sähkökenttävektorin värähtelysuunta määrittää aallon polarisaation. Sähkökentän suunta voidaan esittää kahden toisiaan vastaan kohtisuoran komponentin avulla 11. Komponentit ovat yleisessä tapauksessa kompleksilukuja, eli niillä on sekä suuruus että vaihe.

$$\mathbf{E} = (E_x \mathbf{u}_x + E_y \mathbf{u}_y) e^{-jkz} \quad (11)$$

Mahdolliset polarisaatiot voidaan luokitella kolmeen kategoriaan:

**Lineaarinen polarisaatio** on kyseessä, kun toinen sähkökentän komponenteista on nolla tai komponentit ovat keskenään samassa vaiheessa. Linearisessa polarisaatiossa sähkökenttävektorin suunta on koko ajan samalla suoralla ja sen suuruus muuttuu sinifunktion mukaisesti maksimiarvojen välillä. Maapallon pinnan suuntaisesta tietoliikenteestä on periytynyt tapa jakaa lineaarinen polarisaatio vertikaaliseen ja horisontaaliseen polarisaatioon.

**Ympyräpolarisaatio** kuvaa tilannetta, jossa sähkökentän komponentit ovat samansuuruisia, mutta niillä on keskenään  $90^\circ$  vaihe-ero eli toinen saavuttaa

huippunsa toisen ollessa nolla. Tästä seurauksena sähkökentän värähtelysuunta kiertää täyden ympyrän yhden jakson aikana sen suuruuden pysyessä vakiotasolla. Kiertosuunnan mukaan ympyräpolarisaatio jaotellaan vasen- ja oikeakätiseen ympyräpolarisaatioon.

**Elliptinen polarisaatio** on yleistapaus polarisaatiolle. Sähkökenttävektori pyörii ympyräpolarisaation tavoin, mutta samalla sen suuruus vaihtelee eli vektori piirtää kierroksen aikana ellipsin muotoista käyrää.

Yksityiskohtaisemmin sähkömagneettisen säteilyn perusteita on esitetty monessa oppikirjassa. Suomeksi esimerkiksi *Radiotekniikan perusteet*-kirjassa [24].

## 3.2 Väliaineiden sähköisiä ominaisuuksia

Ulkoisen sähkökentän vaikuttaessa häviöttömään dielektriseen eristeväliaineeseen sen rakenneosasissa tapahtuu järjestäytymistä tai polarisoitumista. Polarisoituminen aiheuttaa kappaleen sisälle alkuperäistä kenttää vastustavan sähkökentän, joka näkyy efektiivisesti ulkoisen sähkökentän pienenemisenä. Tätä väliaineen kykyä heikentää ulkoista sähkökenttää kutsutaan permittiivisyydeksi  $\epsilon$ . Permittiivisyys ilmoitetaan yleensä suhteellisenä permittiivisyytenä  $\epsilon_r$ , jota kutsutaan myös nimellä dielektrisyysvakio.  $\epsilon_r$  määritellään tyhjiön permittiivisyyden  $\epsilon_0$  avulla:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (12)$$

Erityyppisissä materiaaleissa on erilaisia polarisoitumismekanismeja. Materiaalin polarisoitumista eli polarisaatiota<sup>1</sup> voi aiheuttaa ulkoisen sähkökentän vaikutus atomien elektronipilviin, väliaineessa vapaana oleviin ioneihin tai molekyyliin polaarilla aineilla. Elektronit reagoivat sähkökentän muutoksiin nopeimmin ja molekyylit hitaimmin. Erilaisista polarisaatiomekanismeista johtuu siis väliaineiden permittiivisyyden vaihtelut taajuuden funktiona eli materiaalin dispersio  $\epsilon = \epsilon(f)$ , joka vaikuttaa samalla eri taajuuskomponenttien etenemisnopeuksiin.

*Isotrooppisessa* väliaineessa permittiivisyys on sama suunnasta riippumatta. Tämän vastakohta on *anisotrooppinen* väliaine, josta esimerkkinä voidaan mainita merijää, joka sisältää pitkulaisia suolataskuja ja näyttää sähköisesti erilaiselta riippuen siitä, katsotaanko ainetta suolataskujen suuntaisesti vai niitä vastaan kohtisuorasti.

Useimmat eristemateriaalit eivät ole ideaalisia, eli niillä on jokin nollaa suurempi johtavuus  $\sigma$ , mikä aiheuttaa sähkökentän vaikutuksesta väliaineeseen virrantiheyden  $J$  Ohmin lain  $E = \sigma J$  mukaan. Vain täydellisissä johteissa virta kulkee häviöttä, joten johtavuus aiheuttaa aina häviöitä ja väliaineessa etenevän sähkömagneettisen aallon tehosta osa absorboituu muuttuen lämmöksi. Häviöt voidaan ottaa huomioon myös lisäämällä permittiivisyyteen imaginaariosa kaavan (13) mukaan. Tällöin suhteellisen permittiivisyyden kaava 12 muuttuu muotoon (14).

<sup>1</sup>Tämän kappaleen ulkopuolella polarisaatiosta puhuttaessa tarkoitetaan sähkömagneettisen aallon värähtelysuuntaa.

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 - \frac{j\sigma}{\omega} \quad (13)$$

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (14)$$

Permeabiliteetti  $\mu$  kertoo aineen magneettisista ominaisuuksista ulkoisen magneettikentän vaikutuksen alaisena. Magneettisilla materiaaleilla, erityisesti ferromagneeteilla, permeabiliteetin käyttäytymiseen liittyy usein permittiivisyyttä monimutkaisempia ominaisuuksia, kuten aikaisemman magneettikentän aiheuttamia muistivaikutuksia, epälineaarisuutta ja hystereesiä eli erilaista toimintaa magneettikentän kasvaessa ja pienentyessä. Käytännössä luonnonkohteet ovat yleensä ei-magneettisia eli niiden permeabiliteetti vastaa tyhjiön permeabiliteettiä.

Tässä luvussa esitetyt perustiedot väliaineiden sähkömagneettisista ominaisuuksista ovat lähteestä [25].

### 3.2.1 Vesi

Vesimolekyylin epäsymmetrisen rakenteen takia vesi on voimakkaasti dielektristä ainetta. Monissa luonnonkohteissa ja materiaaleissa juuri kohteen sisältämä vesi määrittää sen permittiivisyyden.

Veden permittiivisyys taaajuuden funktiona riippuu vesimolekyylin värähtelystä, jota kuvaa esimerkiksi oppikirjassa [26] esitetty *Debyen-yhtälö*

$$\epsilon_w = \epsilon_{w\infty} + \frac{\epsilon_{ws} - \epsilon_{w\infty}}{1 + j\omega\tau_w}, \quad (15)$$

jossa  $\epsilon_{ws}$  ja  $\epsilon_{w\infty}$  ovat Debyen-yhtälön matalan ja korkean taaajuuden parametrit vedelle ja  $\tau_w$  on relaksaatioaika vedelle. Parametrin  $\epsilon_{ws}$  arvo on laskettu artikkelissa [27] esitetyn kaavan (16) mukaan.

$$\epsilon_{ws} = 87.74 - 4,0008T + 9,398 \cdot 10^{-4}T^2 + 1.410 \cdot 10^{-6}T^3 \quad (16)$$

$\tau_w$ :lle käytettiin kaavalla (17) laskettua arvoa. Kaava on esitelty Stogrynin vuonna 1971 julkaistussa artikkelissa [28]. Samasta lähteestä poimittiin myös parametrille  $\epsilon_{w\infty}$  käytetty arvo 4,9.

$$\tau_w = \frac{1,1109 \cdot 10^{-10} - 3,842 \cdot 10^{-12}T + 6,938 \cdot 10^{-14}T^2 - 5,096 \cdot 10^{-16}T^3}{2\pi} \quad (17)$$

### 3.2.2 Jää

Jään permittiivisyys on huomattavasti nestemäistä vettä pienempää, koska toisin kuin nesteessä, jäässä eivät polaariset vesimolekyylit pääse värähtelemään vapaasti.

Jään permittiivisyyden reaali-osan on havaittu olevan taajuudesta riippumaton hyvin laajalla taajuusalueella (1 MHz – 1000 GHz). Lämpötila vaikuttaa jään permittiivisyyden reaali-osaan lievästi. Viitteen [29] mukaan jään permittiivisyyden reaali-osa laskettiin kaavalla:

$$\epsilon'_i = 3,1884 + 91 \cdot 10^{-4} (T - 273 \text{ K}). \quad (18)$$

George Hufford esitti tutkimuksessaan [30], että jään permittiivisyyden imaginaariosa voidaan esittää muodossa

$$\epsilon''_i = \frac{\alpha}{f} + \beta f, \quad (19)$$

jossa  $\theta$  on modifioitu käänteinen lämpötila

$$\theta = \frac{T_0}{T - 1}, \quad T_0 = 300 \text{ K}, \quad (20)$$

ja parametrit  $\alpha$  ja  $\beta$  määritellään viitteen [31] mukaan:

$$\alpha = (0,00504 + 0,0062 \cdot \theta) e^{-22,1 \cdot \theta} \quad (\text{GHz}) \quad (21)$$

$$\beta = \frac{0,502 - 0,131 \cdot \theta}{1 + \theta} \cdot 10^{-4} + 0,542 \cdot 10^{-6} \left( \frac{1 + \theta}{\theta + 0,0073} \right)^2 \quad \text{GHz}^{-1}. \quad (22)$$

### 3.2.3 Lumi

Lumen sähkömagneettisia ominaisuuksia voidaan ymmärtää tutkimalla erilaisina sekoituksina ilmaa, jäätä ja märän lumen tapauksessa myös nestemäistä vettä. Lumen permittiivisyyttä mikroaaltoalueella on tutkittu mittauksilla, joiden tuloksia esitellään mm. lähteissä: [32], [33] ja [34].

Kuivan lumen permittiivisyyden laskemiseen käytettiin Ari Sihvolan väitöskirjassaan [35] esittämää rakeisten aineiden yleistä sekoituskaavaa

$$\epsilon = 1 + \frac{V(\epsilon_s - 1) \sum_{i=1}^3 \frac{\epsilon_a}{\epsilon_a + A_i(\epsilon_s - 1)}}{3 - V(\epsilon_s - 1) \sum_{i=1}^3 \frac{A_i}{\epsilon_a + A_i(\epsilon_s - 1)}}, \quad (23)$$

jossa  $\epsilon_s$  on kuivan lumen tapauksessa jään permittiivisyys  $\epsilon_i$ ,  $\epsilon_a$  on niin kutsuttu näennäinen permittiivisyys ja  $A_i$  on depolarisaatiokerroin  $i$ :nnele pääakselille  $i = (1, 2, 3)$ . Depolarisaatiokerroimet ovat positiivisia lukuja, jotka noudattavat kaavaa (24):

$$A_1 + A_2 + A_3 = 1. \quad (24)$$

Erilaiset sekoitustavat on huomioitu näennäisessä permittiivisyydessä  $\epsilon_a$ , jonka arvot vaihtelevat välillä  $0 \geq \epsilon_a \geq \epsilon$ .  $\epsilon_a$  voidaan esittää yhtälöllä (25)

$$\epsilon_a = 1 + a(\epsilon - 1), \quad (25)$$

jolloin otetaan käyttöön parametri  $a$ , joka vaihtelee välillä 0–1. Polderin ja van Santenin esittämään efektiivisen väliaineen yhtälöön (effective medium equation) [36] päästään kun valitaan:

$$a = 1 - A_i. \quad (26)$$

Olettamalla kappaleet ellipsoideiksi, jolloin kaksi depolarisaatiokertoimista ovat yhtä suuria, voidaan tilannetta yksinkertaistaa ja valita  $A = A_1 = A_2$ . Tällöin  $A_3$  saadaan kaavan 24 mukaan:

$$A_3 = 1 - 2A. \quad (27)$$

Tässä työssä parametri  $A$ :n laskemiseen on käytetty Christian Mätzlerin vuonna 1996 esittämiä [37] empiirisiä kaavoja

$$A = \begin{cases} 0, 1 + 0, 5\nu_i; & 0 < \nu_i < 0, 33 \\ 0, 18 + 3, 24(\nu_i - 0, 49)^2; & 0, 33 \leq \nu_i < 0, 71 \\ \frac{1}{3}; & \nu_i \geq 0, 71 \end{cases}, \quad (28)$$

joissa on  $\nu_i$  on jään tilavuusosuus

$$\nu_i = \frac{\rho_{\text{snow}}}{\rho_{\text{ice}}}, \quad \rho_{\text{ice}} = 917 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (29)$$

### 3.3 Sironta väliaineesta

Tyhjiössä tai yhdestä väliaineesta koostuvassa tilassa aalto etenee suoraviivaisesti. Etenevän aallon törmätessä permittiivisyyden epäjatkuvuuteen tapahtuu sirontaa, eli osa aallon tehosta suuntautuu alkuperäisestä suunnasta poikkeaviin suuntiin. Tässä kappaleessa esitettävät yksittäisen sirottajan kaavojen (30)–(37) esitysmuodot ovat Ishimarun vuonna 1978 julkaistusta oppikirjasta [38].

*Pintasironta* on merkittävää erilaisten tasomaisten ainekerrosten rajapinnalla, tai kun sirottava kappale on selvästi aallonpituutta suurempi. *Tilavuussironnalla* tarkoitetaan tilannetta, jossa jonkin taustaväliaineen, kuten esimerkiksi ilman, sisällä on pieniä sirottavia partikkeleita, joiden sirottamien kenttien yhteisvaikutuksesta seuraa koko väliaineen sirontaominaisuudet. [39]

Sirottavaan kappaleeseen osuva ulkoinen sähkökenttä indusoi kappaleeseen näennäisen tai todellisen sähkövirran riippuen kappaleen johtavuudesta. Tulevan aallon taajuuden mukaan värähtelevä sähkövirta saa partikkelin toimimaan antennina ja lähettämään sähkömagneettista säteilyä palloaaltona ympäristöönsä [39]. Kun etäisyys sirottavaan kappaleeseen  $R$  täyttää ehdon  $R > \frac{D^2}{\lambda}$ , eli ollaan kaukokentässä, kappaleen sirottama kenttä on muotoa:

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}) = \mathbf{f}(\widehat{\mathbf{0}}, \widehat{\mathbf{i}}) \frac{e^{-jkR}}{R} E_0, \quad (30)$$

jossa  $\mathbf{f}$  on sirontamatriisi,  $\widehat{\mathbf{0}}$  aallon tulosuunnan suuntavektori,  $\widehat{\mathbf{i}}$  aallon sirontasuunnan suuntavektori,  $k$  aaltoluku,  $R$  etäisyys sirottajasta ja  $E_0$  tulevan sähkökentän suuruus. Kaava (30) voidaan lineaarisessa polarisaatiokannassa avata muotoon:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{s,V}(\mathbf{r}) \\ \mathbf{E}_{s,H}(\mathbf{r}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{VV}(\widehat{\mathbf{0}}, \widehat{\mathbf{i}}) & \mathbf{f}_{VH}(\widehat{\mathbf{0}}, \widehat{\mathbf{i}}) \\ \mathbf{f}_{HV}(\widehat{\mathbf{0}}, \widehat{\mathbf{i}}) & \mathbf{f}_{HH}(\widehat{\mathbf{0}}, \widehat{\mathbf{i}}) \end{bmatrix} \frac{e^{-jkR}}{R} \begin{bmatrix} E_{0,V} \\ E_{0,H} \end{bmatrix}, \quad (31)$$

jolloin sirontamatriisin  $\mathbf{f}$  sirontaa eri polarisaatiokomponenteilla kuvaavat alkioit  $\mathbf{f}_{VV}$ ,  $\mathbf{f}_{VH}$ ,  $\mathbf{f}_{HV}$  ja  $\mathbf{f}_{HH}$  ovat esillä.

Kappaleiden sironnan suuruus ilmoitetaan yleensä käyttämällä sirontapoikkipintoja  $\sigma$ , jotka ilmaistaan pinta-alan yksiköissä. Sirontapoikkipinta vastaa sellaista pinta-alaa, jonka tulevasta tehotiheydestä keräämä ja isotrooppisesti palloaaltoiksi sirottama teho vastaisi havaittua sirontaa. Differentiaalinen sirontapoikkipinta  $\sigma_d$  lasketaan kaavalla

$$\sigma_d = \left| \mathbf{f}(\widehat{\mathbf{0}}, \widehat{\mathbf{i}}) \right|^2. \quad (32)$$

Differentiaalinen sirontapoikkipinta toimii lähtökohtana muiden poikkipintojen laskennalle ja se lasketaan avaruuskulmaysikköä eli steradiaania kohden.

Tutkimuksissa yleisesti käytetty suure on bistaattinen sirontapoikkipinta  $\sigma_{bi}$ , joka määritellään tietyn suuntaisen differentiaalisen sirontapoikkipinnan suhteena isotrooppiseen säteilijään

$$\sigma_{bi}(\widehat{\mathbf{0}}, \widehat{\mathbf{i}}) = 4\pi\sigma_d(\widehat{\mathbf{0}}, \widehat{\mathbf{i}}). \quad (33)$$

Vastaavalla tavalla määritellään myös takaisinsirontapoikkipinta  $\sigma_b$ :

$$\sigma_b = 4\pi\sigma_d(\widehat{\mathbf{i}}, -\widehat{\mathbf{i}}) \quad (34)$$

Laskemalla kaikista suunnista tuleva ja kaikkiin suuntiin sironnut säteily (35) päästään käsiksi kappaleen (kokonais)sirontapoikkipintaan  $\sigma_s$  integroimalla yli täyden avaruuskulman  $\Omega$ .

$$\sigma_s = \int_{4\pi} \left| \mathbf{f}(\widehat{\mathbf{0}}, \widehat{\mathbf{i}}) \right|^2 d\Omega \quad (35)$$

Sirontapoikkipinnan lisäksi voidaan laskea myös kappaleen absorptiopoikkipinta  $\sigma_a$ . Yhdessä nämä muodostavat ekstinktiopoikkipinnan  $\sigma_e$ :

$$\sigma_e = \sigma_s + \sigma_a. \quad (36)$$

Ekstinktiopoikkipinta on suoraan yhteydessä etenevän aallon vaimenemiseen, joten se voidaan laskea eteenpäinsironnan sironta-amplitudista kaavalla

$$\sigma_e = \frac{4\pi}{k} \text{Im} \left\{ \mathbf{f}(\hat{\mathbf{i}}, \hat{\mathbf{i}}) \right\}. \quad (37)$$

### 3.3.1 Sironnan mittaus polarimetrisellä säätutkalla

Polarimetrinen tutkameteorologia tuo tutkamittaukseen useita suureita, jotka perustuvat eri polarisaatiokomponenttien suhteisiin. Tutkasäteen suunnassa eri etäisyyksiltä saatujen mittausten välisistä vaihe-eroista saadaan myös muodostettua erilaisia suureita. Yhdessä nämä suureet antavat tietoa kappaleen muodosta, ja yhdistämällä tämä tieto hydrometeorien ominaisuuksista ja muodonmuutoksista tehtyihin tutkimuksiin pystytään polarimetrisestä tutkamittauksesta saamaan huomattavasti perinteisiä säätutkia enemmän tietoa esimerkiksi sateen olomuodosta ja sen sisältämän veden määrästä.

Tässä työssä käytetyssä mallinnusohjelmassa tarkastelu rajoitettiin vain yksittäisiin kappaleisiin ja niistä koostuvien kerrosten epäkoherentin sironnan ja vaimennuksen laskemiseen. Tällöin polarimetrisistä tutkasuureista voidaan esittää vain differentiaalinen tutkaheijastuvuus  $Z_{dr}$  ja lineaarinen depolarisaatiosuhde LDR (linear depolarization ratio). Desibeleissä nämä voidaan esittää yksittäiselle kappaleelle [5]:

$$Z_{dr} = 10 \log \frac{|f_{HH}|^2}{|f_{VV}|^2}, \quad \text{ja} \quad (38)$$

$$LDR = 10 \log \frac{|f_{VH}|^2}{|f_{HH}|^2}. \quad (39)$$

Yleistettynä koskemaan useista kappaleista muodostuvaa kerrosta, jossa erilaiset partikkelit esiintyvät tietyllä kappalemääräisellä tiheydellä  $\rho$ , nämä voidaan esittää muodossa [5]:

$$Z_{dr} = 10 \log \left( \frac{\langle 4\pi\rho |f_{HH}|^2 \rangle}{\langle 4\pi\rho |f_{VV}|^2 \rangle} \right), \quad \text{ja} \quad (40)$$

$$LDR = 10 \log \left( \frac{\langle 4\pi\rho |f_{VH}|^2 \rangle}{\langle 4\pi\rho |f_{HH}|^2 \rangle} \right). \quad (41)$$

### 3.4 Sironnan mallinnus

Sähkömagneettisen aallon sirontaa pyritään mallintamaan hyvin erilaisissa sovelluksissa, kuten esimerkiksi kaukokartoituksessa, meteorologiassa, antennisuunnittelussa tai tähtitieteessä. Mitään yhtä kaikkiin tarpeisiin sopivaa sironnan mallinnustapaa ei ole vielä kehitetty. Esimerkiksi sirottavan väliaineen ominaisuudet, kohteena olevan kappaleen muoto ja säteilyn aallonpituus ovat asioita, jotka vaikuttavat eri mallinnustapojen valintaan eri tilanteissa.

Yleisesti ottaen sironnut sähkökenttä voidaan laskea yhtälön (42) avulla [40]:

$$\mathbf{E}_s = \int \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') k_0^2 (\epsilon_r(\mathbf{r}') - 1) \mathbf{E}_{\text{tot}}(\mathbf{r}') dV', \quad (42)$$

jossa Greenin dyadi on

$$\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = (\mathbf{I} + k_0^{-2} \nabla \nabla) \frac{e^{-jk_0 |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}}{4\pi |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}. \quad (43)$$

Partikkelin sirottama kenttä pystytään analyttisesti laskemaan vain muutamille yksinkertaisille tapauksille, kuten esimerkiksi *Mie*-ratkaisussa pallomaisille sirottajille. Yleisesti joudutaan tekemään erilaisia approksimaatioita eli yksinkertaistavia oletuksia tai ratkaisemaan ongelma numeerisella laskennalla.

Sähkömagneettisen säteilyn sirontaa on mallinnettu numeerisesti useilla erilaisilla mallinnustavoilla, jotka poikkeavat toisistaan lähtökohdiltaan ja ominaisuuksiltaan. Se, mitä sovellusta varten mallinnusta tehdään, määrää parhaan mallinnustavan. Yleisimpiä mallinnustapoja on vertailtu esimerkiksi Kahnertin vuonna 2003 julkaisussa artikkelissa [41]. Kahnert jakaa sironnan mallinnustavat kolmeen kategoriaan:

1. Differentiaaliyhtälömenetelmät (Differential equation methods)
2. Pintaintegraaliyhtälömenetelmät (Surface-integral equation methods)
3. Tilavuusintegraaliyhtälömenetelmät (Volume-integral equation methods)

Differentiaaliyhtälömenetelmissä sähkömagneettisen aallon etenemistä kuvaavat differentiaaliyhtälöt, kuten esimerkiksi Maxwellin-yhtälöt (3)–(6) tai niistä johdettu Helmholtzin-yhtälö, pyritään ratkaisemaan suoraan käyttäen eri menetelmiä. Differentiaaliyhtälömenetelmiä ovat esimerkiksi FDTD (finite difference time domain method), FEM (finite element method) ja PMM (point matching method).

Pintaintegraaliyhtälömenetelmissä lasketaan ensiksi minkälaiset pinnan suuntaiset sähkö- ja magneettikenttäjakaumat muodostuisivat kappaleen pinnalle ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta. Toisessa vaiheessa lasketaan pinnan kenttien aiheuttamat sironneet aallot. Pintaintegraaliyhtälömenetelmiin kuuluvalla NFM:llä (null field method) pystytään laskemaan kappaleen sironta kaikille tulo- ja sirontasuunnille



samanaikaisesti, mutta menetelmän soveltaminen muihin kuin pyörähdyssymmetriisiin kappaleisiin on vaikeaa. Korkeat taitekertoimet aiheuttavat myös laskennallisia ongelmia NFM:ssä.

Tilavuusintegraaliyhtälömenetelmissä mallinnuksen lähtökohtana on yhtälön (42) mukainen integraali kappaleen osien sironnasta. Tilavuusintegraaliyhtälömenetelmiä ovat esimerkiksi tässä työssä käytetty DDA (discrete-dipole approximation) ja MoM (method of moments), joilla molemmilla pystytään kuvaamaan vapaasti monimutkaisia, pienemmistä osista koostuvia kappaleita.

Tässä työssä käytettiin sironnan mallintamiseen diskreettidipoliapproksimaatioon perustuvaa menetelmää (discrete-dipole approximation: DDA), jonka on ensimmäisen kerran esittänyt DeVoe [42] ja Purcell ym. [43]. Draine ja Flatau esittelivät artikkelissään [44] oman implementaationsa DDA-mallinnuksesta ja heidän DDASCAT-sirontamallinnusohjelma on laajasti käytössä.

DDA:n etu on, että sillä voidaan mallintaa tarkasti monimutkaisia kappaleita, eikä se rajoitu pelkästään tiettyjen geometrinen muotojen, kuten ellipsoidien ja pallojen mallintamiseen. DDA:lla voidaan laskea epähomogeenisten ja anisotrooppisten kappaleiden sirontaa, koska eri laskenta-alkiot voivat edustaa eri materiaalien permittiivisyyksiä. DDA:ssa otetaan huomioon kappaleen kaikkien rakenneosasten väliset vuorovaikutukset, mikä lisää laskennan tarkkuutta, mutta samalla laskennallinen raskaus ja vaadittava muistikapasiteetti kasvavat suuriksi. DDA:lla voidaan laskea kerralla vain yhdestä tulosuunnasta tulevaa säteilyä, joten jos haluttaisiin laskea saman kappaleen sirontaa eri orientaatioilla, joudutaan laskenta suorittamaan useita kertoja.

### 3.4.1 Yksittäisen partikkelin sironnan mallinnus DDA-mallilla

DDA:ssa sirottavaa kappaletta mallinetaan suurella määrällä ( $N$  kappaletta) alkeissirottajia, joiden aiheuttamien kenttien yhteisvaikutuksesta koko kappaleen sironnut kenttä muodostuu. Tässä työssä käytetyssä menetelmässä alkeissirottajat ovat kuution muotoisia ja ne muodostavat kolmiulotteisen matriisihilan. Alkeissirottajien eli laskentaelementtien, jota termiä alkeissirottajista jatkossa käytetään, sivun pituus  $s$  on keskeinen parametri mallinnuksessa. Mallintamisen tarkkuuden takia laskentaelementin pitää olla riittävän pieni aallonpituuteen nähden. Yksittäisille kappaleille riittää, kun  $s \leq \lambda_0/7$ , mutta väliaineen yksityiskohtaisempien ominaisuuksien kuvaus vaatii tarkkuuden  $s \leq \lambda_0/60$  [40].

Modifioitu DDA-laskenta on esitelty von Lerber ym. toimesta julkaisussa [40] ja tässä diplomityössä on käytetty samanlaista muotoilua modifioitua DDA-laskentaa kuvaavissa yhtälöissä.

DDA-mallinnuksen toiminta perustuu laskentaelementtien kuvaamiseen yksittäisillä laskentaelementin keskipisteessä sijaitsevilla dipoli-tyyppisillä sirottajilla. Kuhunkin laskentaelementtiin tuleva sähkökenttä  $\mathbf{E}_i$  saadaan summaamalla kaikkien muiden elementtien tähän kohteena olevaan elementtiin aiheuttama sironta. Syntyvä yhtälöryhmä (44) ratkaistaan iteratiivisesti käyttäen Matlabin sisäänrakennettua `gmres`-

funktiota.

$$\mathbf{E}_m^{\text{tot}} \approx \mathbf{E}_i(\mathbf{p}_m) + \sum_{n=1}^N C_{mn} \tau_n \mathbf{E}_n^{\text{tot}}, \quad (44)$$

jossa  $C_{mn}$  on:

$$C_{mn} = \int_{V_n} \mathbf{G}(\mathbf{p}_m, \mathbf{r}') dV', \text{ ja} \quad (45)$$

$\tau_n = k_0^2 (\epsilon_r(\mathbf{p}_n) - 1)$  ja  $\mathbf{p}_n$  on laskenta-alkion  $V_n$  keskipiste.

Perinteisessä DDA-mallinnuksessa yhtälö (45) ratkaistaan approksimaatiolla (46). Modifioidussa DDA:ssa kaukana toisistaan oleville laskentaelementeille käytetään DDA-approksimaatiota, kun taas lähinaapureille integraalin (45) ratkaisuun käytetään numeerista integrointia Gaussin kvadratuurilla.

$$C_{nm} = \text{vol}(V_n) \mathbf{G}(\mathbf{p}_m, \mathbf{p}_n) \quad (46)$$

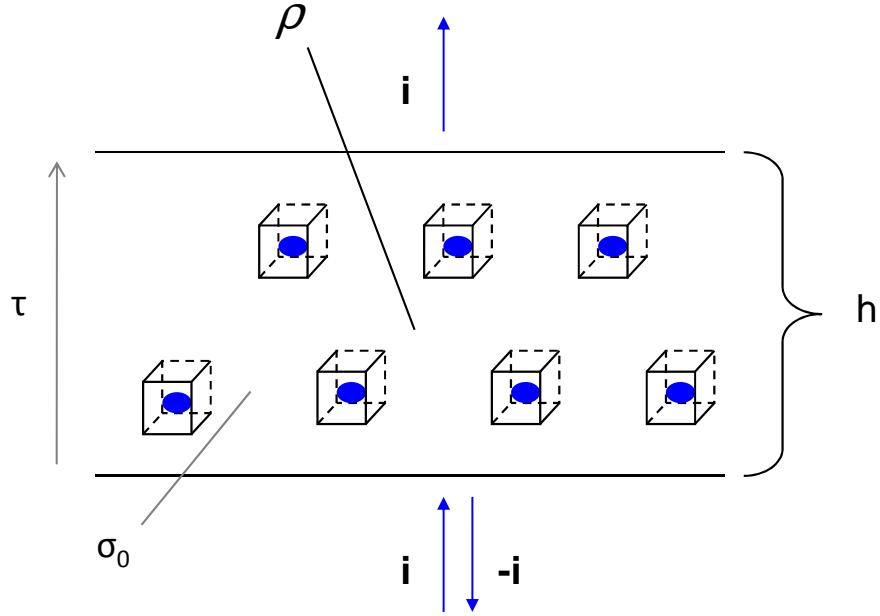
DDA-mallinnuksen lopputuloksena saadaan takaisinsironnan ja eteenpäin sironnan sironta-amplitudit  $\mathbf{f}(\hat{\mathbf{i}}, -\hat{\mathbf{i}})$  ja  $\mathbf{f}(\hat{\mathbf{i}}, \hat{\mathbf{i}})$  eri polarisaatiokomponenteille. Näistä lasketaan partikkelin aiheuttamat takaisinsironta- ja ekstinktionpoikkipinnat  $\sigma_b$  ja  $\sigma_e$  käyttäen kaavoja (34) ja (37).

### 3.4.2 Yksittäisen kappaleen sironnan yleistäminen säteilykuljetusteorian avulla

DDA-mallinnuksen avulla saadaan tarkka kuvaus yksittäisen partikkelin sironnasta, ja teoriassa sillä voisi laskea myös suuremman kappalejoukon ominaisuudet kaikki kappaleiden väliset vuorovaikutuksen huomioiden. Käytännössä laskennan resurssi-vaatimukset kuitenkin kasvaisivat liian suureksi usealla tarkasti kuvatulla kappaleella, joten kappalejoukon ominaisuuksiin pitää päästä käsiksi jollain muulla tavalla. Ilmakehän hydrometeorien tapauksessa voidaan olettaa, että partikkelit ovat niin kaukana toisistaan, että keskinäiset vuorovaikutukset ovat merkityksettömiä, jolloin säteilykuljetusteorian avulla voidaan helposti tehdä tämä yleistys yksittäisestä sirottajasta kappalejoukon tai partikkeleita tietyllä tiheydellä sisältävän kerroksen ominaisuuksiin. Asetelma on esitetty yleisellä tasolla kuvassa 3.

Säteilykuljetusteoria käsittelee sirottavassa tai häviöllisessä väliaineessa tiettyyn suuntaan etenevän sähkömagneettisen aallon vaimenemista. Yleisessä tapauksessa täytyy ottaa huomioon muun muassa kaikki sirontasuunnat, sirottavien partikkelien välinen moninkertainen sironta ja partikkelien itsensä säteilemä lämpösäteily. Tietyissä olosuhteissa voisi olla mahdollista, että etenemissuunnasta poikkeavasta suunnasta siroaa etenemissuuntaan enemmän tehoa kuin mitä etenevä aalto vaimenee sironnan vaikutuksesta, jolloin aalto itse asiassa vahvistuisi.

Tässä työssä käytetään ns. *nollannen asteen säteilykuljetusteoriaa*, jossa huomioidaan vain absorptio ja sironnan aiheuttama vaimennus ja takaisinsironta. DDA:n



**Kuva 3:** Nollannen asteen säteilykuljetusteorian avulla voidaan yleistää yksittäisten partikkelien sirontan mallinnuksen tulokset näistä kappaleista koostuvan kerroksen ominaisuuksiin.

avulla lasketaan partikkelien sirontamatriisit, joissa sirontasuuntina ovat säteilyn alkuperäinen etenemissuunta  $\hat{i}$  ja sille vastakkainen suunta  $-\hat{i}$ . Käyttämällä kunkin sirotajatyyppin sirontamatriiseista laskettuja  $\sigma_e$  ja  $\sigma_b$  poikkipintoja painotettuna niiden kappalemääräisillä tiheyksillä  $\rho$  yhtälöiden (47) ja (48) mukaisesti. [45]

$$\kappa_e = \frac{N\sigma_e}{V} = \rho\sigma_e \quad (47)$$

$$\sigma_V = 4\pi\sigma_b\rho \quad (48)$$

Tällöin saadaan laskettua kerroksen kokonaisvaimennuskerroin  $\kappa_e$  ja tilavuustakaisinsirontakerroin  $\sigma_V$ . Kokonaisvaimennuskerroin  $\kappa_e$  saadaan helpommin hahmotettavaan muotoon  $\frac{dB}{m}$  kaavalla (49):

$$\kappa_{e,dB} = 20 \log(e) \cdot \kappa_e \approx 8,6859 \cdot \kappa_e \quad (49)$$

$\kappa_e$ :n ja  $\sigma_V$ :n avulla pystytään laskemaan kerroksen transmissiivisuus  $\tau$  kaavalla (50), kun tunnetaan myös kerroksen paksuus  $h$ . Kerroksen keskimääräistä sirontaa kuvaava takaisinsirontakerroin  $\sigma_0$  lasketaan kaavalla (51). [45]

$$\tau = e^{-\kappa_e h} \quad (50)$$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_V}{2\kappa_e} [1 - \tau^2] \quad (51)$$

## 4 Mallinnusohjelma

Tämän työn keskeinen anti on Matlab:illa toteutettu ja modifioitua DDA-mallinnusta käyttävä sirontamallinnusohjelma ja siihen liittyvät apuohjelmat. Ohjelma pystyy laskemaan minkä tahansa muotoisen, yksittäisen partikkelin takaisinsironnan poikkipinnat ja yhdestä tai useammasta erilaisesta kappaleesta koostuvan kerroksen keskimääräisiä sironta- ja vaimennusominaisuuksia käyttäjän antamien kerroksen paksuuden ja kappalemääräisen tiheyden mukaan. Ohjelma laskee kunkin polarisatiokomponentin tulokset toisistaan riippumatta, jolloin niitä voidaan käyttää mm. polarimetrinen tutkasuureiden  $Z_{dr}$  ja  $LDR$  laskemiseen. Tässä työssä käytetyssä lähestymistavassa oletettiin, että mallinnettavat partikkelit, eli ilmakehän erilaiset hydrometeorit ovat yleisesti niin kaukana toisistaan, että moninkertaista sirontaa partikkelien välillä ei esiinny. Tällöin kerroksen läpäisy- ja vaimennusominaisuuksien laskemiseen voidaan käyttää nollannen asteen säteilynkuljetusteoriaa.

### 4.1 Aikaisemmin tehdyt ohjelman osat

Teknillisen korkeakoulun Sähkömagneetiikan laboratoriossa on Professori Jukka Sarvaksen johdolla ohjelmoitu Matlab:ille varsinaisen modifioidun DDA-ratkaisun tekevä laskentakoodi, jolle annetaan syötteenä simuloitava kappale kolmiulotteisen matriisin muodossa ja tarvittavat laskentaparametrit. Samaa modifioitua DDA-mallinnusta on käytetty Avaruustekniikan laboratoriossa aikaisemmassa tutkimusprojektissa lumipeitteen sirontaominaisuuksien mallintamiseen [40].

Tässä työssä tehtyä mallinnusohjelmaa varten on otettu jonkin verran mallia näistä edellisistä lumelle tehdyistä ohjelmista, mutta ongelman erilaisen luonteen takia muutoksia on tehty melko paljon. Ohjelmakoodista siis vain itse modifioidulla DDA:lla tehtävä sironta-amplitudien laskenta on muiden tekemää, loppujen ollessa kirjoittajan omaa ohjelmakoodia.

### 4.2 Ohjelman toiminta

Ohjelman toiminnassa on seuraavat vaiheet:

1. Asetetaan laskentaparametrit ja muut tarvittavat muuttujat. Tärkeimmät parametrit ovat taaajuus, laskentamatriisin koko ja partikkelien koot.
2. Luodaan laskenta-ajon tiedostoja varten kovalevyllä hakemisto ja alihakemistot: `params`, `particles`, `F_files`, `results`, `pictures`.
3. Luodaan laskennassa käytettävät kappaleet asetettujen parametrien mukaan.
4. Lasketaan sirontamatriisit DDA:n avulla.
5. Lasketaan sirontamatriiseiden avulla loput yksittäisen kappaleen sirontasuureet ( $\sigma_b$  ja  $\sigma_e$ ) ja kerroksen ominaisuudet ( $\tau$ ,  $\sigma_0$ ,  $\kappa_s$  ja  $\kappa_s$ ).

6. Esitetään tulokset kuvaajissa.

#### 4.2.1 Partikkelien muodostaminen DDA-laskentaa varten

Mallinnettavat partikkelit muodostuvat suorakulmaisessa kolmiulotteisessa matriisissa olevista kuutioista, joiden suhteellinen permittiivisyys voidaan asettaa halutuksi. Näistä pienistä elementtikuutioista muodostettiin erilaisia geometrisiä muotoja kuten palloja (kuva 4) ja pyörähdysellipsoideja (kuva 5). DDA-mallinnuksen vahvuus on siinä, että kappale voidaan haluttaessa rakentaa täysin vapaavalintaisen muotoiseksi.

Laskennan minimivaatimukset kappaleiden resoluutiolle (kappaleesta 3.4.1) täyttyivät helposti jopa pienellä matriisin koolla, mutta tulosten kannalta tuntui olevan kuitenkin merkitystä sillä, kuinka karkeasti kappale kuvataan. Laskennan tarkkuus oli sitä parempi mitä tarkemmin kappaleet oli kuvattu, eli mitä suurempi oli laskennassa käytetty matriisi ja toisaalta mitä pienempi oli yksittäisen laskentaelementin koko.

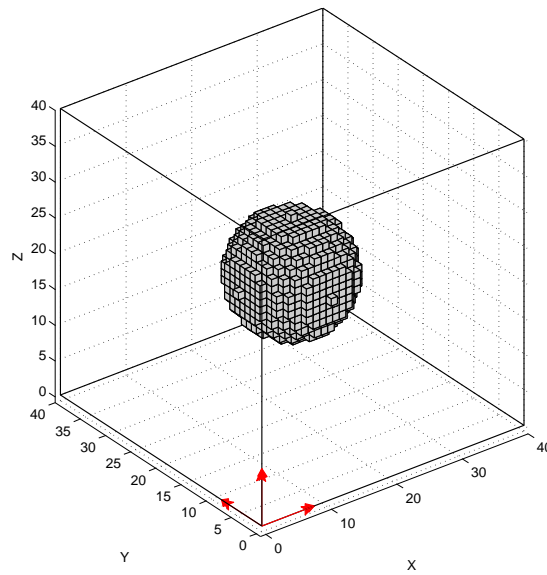
Kappaleiden tekemisessä päädyttiin seuraavaan menetelmään:

1. Valitaan laskennan kannalta järkevä matriisikoko.
2. Valitaan matriisikokoon sopiva kappaleen suurimman dimension koko laskentaelementeissä.
3. Asetetaan laskentaelementin sivun pituus  $s$  siten, että partikkeli vastaa todellisuudessa haluttua kokoa.
4. Kappaleen luomista varten matriisihilan resoluutiota suurennettiin tilapäisesti halutulla suurennuskertoimella (esimerkiksi 2).
5. Kappale luotiin kerroksittain kappaleen pohjasta ylöspäin laskemalla, mitkä kerroksen ruuduista kuuluvat kerroksen ympärystä vastaavan ympyrän sisään. Kappaleen kerroksittainen luominen on havainnollistettu kuvassa 6.
6. Matriisihilan resoluutio palautettiin alkuperäiseksi jakamalla laskenta-alkioiden koordinaatit suurennuskertoimella ja pyöristämällä ne kokonaisluvuiksi.

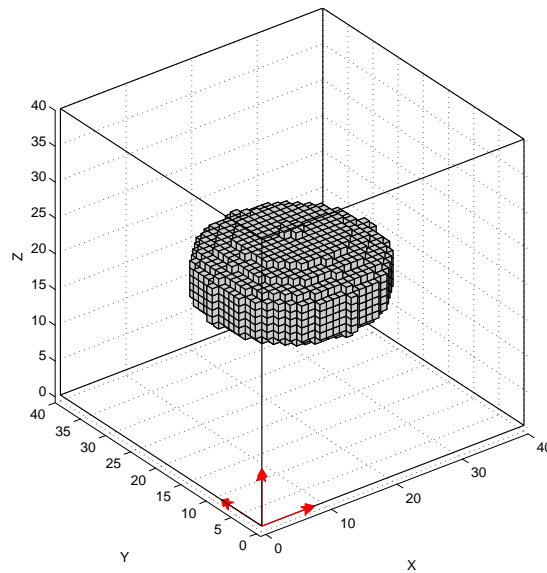
Menetelmän kohdat 4 ja 6 liittyvät mahdollisuuteen käyttää tarkempaa resoluutiota kappaleen luomisessa.

### 4.3 Ohjelman rakenne

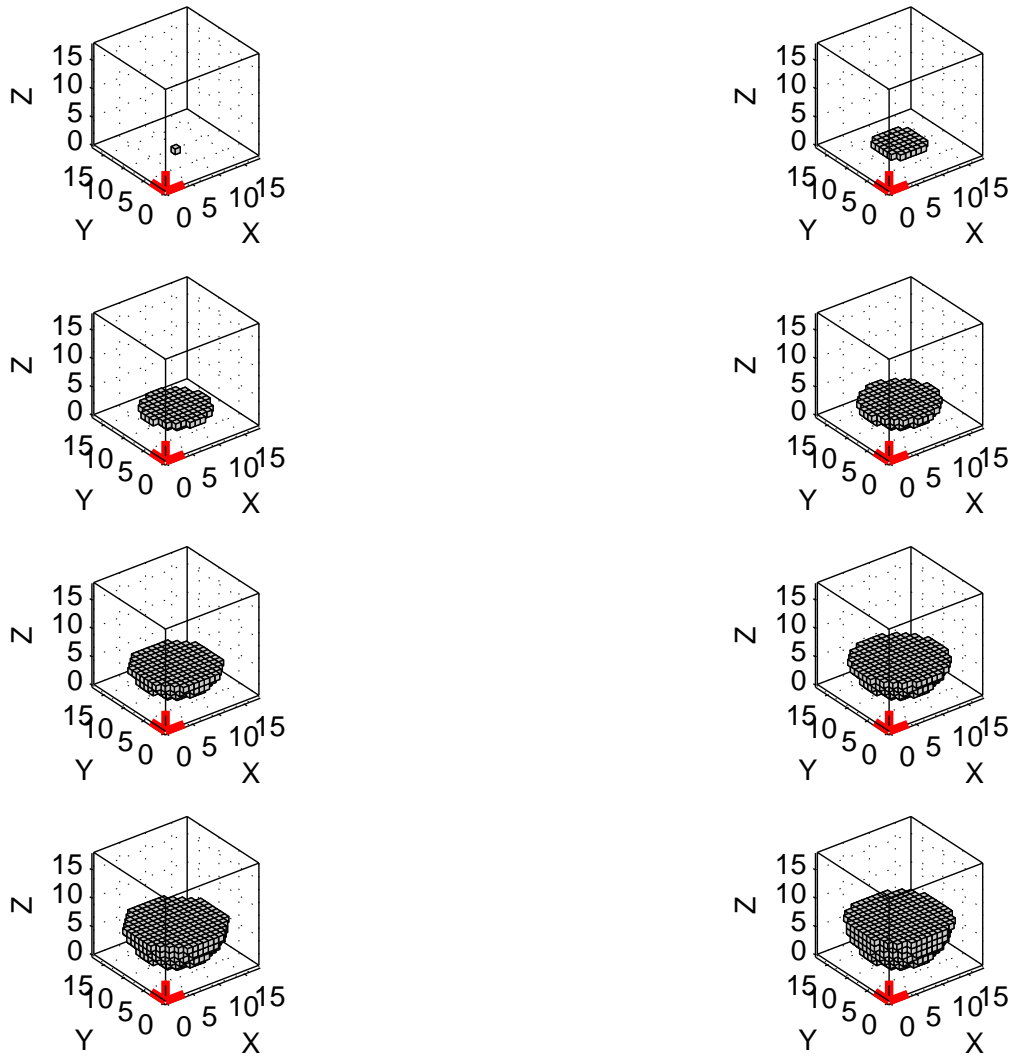
Kuvaus ohjelman rakenteesta on esitetty kuvassa 7. Taulukossa 1 on kerrottu eri aliohjelmien tarkoitukset. Pääohjelman ohjelmakoodi on esitetty liitteessä A ja pääohjelmassa esiintyvät muuttujat liitteessä B.



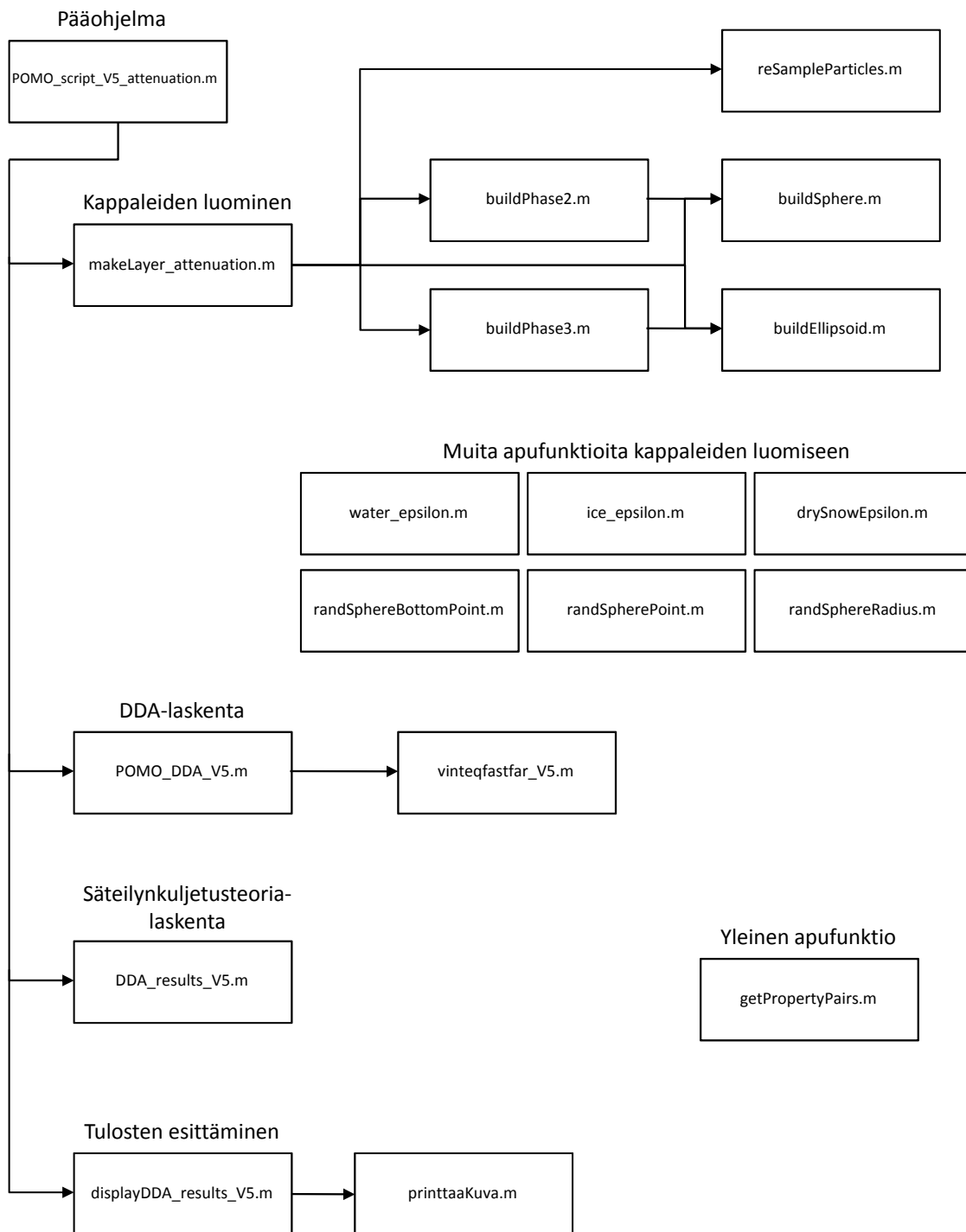
**Kuva 4:** Esimerkki pallomaisesta kappaleesta, jonka säde on 8 yksikköä.



**Kuva 5:** Esimerkki kiekkomaisen pyörähdyssellipsoidin muotoisesta kappaleesta, jonka isoakseli on 12 ja pikkuakseli 6 yksikköä.



**Kuva 6:** Pallomainen kappale muodostettiin kerroksittain z-akselin suunnassa.



Kuva 7: Ohjelman eri tiedostot ja apuohjelmat.



Ohjelmaa on kehitetty koko diplomityöprosessin ajan, ja tässä esitellään viimeisin, etenemisvaimennusta varten muokattu versio. Kappaleessa 4.5 esitetyt validointikuvat on laskettu aikaisemmalla versiolla, jossa kappaleiden luominen ja tulosten esittäminen oli tehty eri tavalla. Varsinainen laskenta ei kuitenkaan ole muuttunut, joten validoinnin tulokset ovat vertailukelpoisia uusimman version antamien tulosten kanssa.

Ohjelman toimintaa ohjaa pääohjelma, joka on muodoltaan skripti eli komentosarja. Pääohjelmätiedoston alkuun asetetaan halutut laskentaparametrit, jotka ohjaavat ohjelman suoritusta. Pääohjelmasta valitaan, mitä sulamisvaiheita otetaan mukaan laskentaan ja mitä laskentavaiheita suoritetaan. Mahdollisuus erottaa laskentavaiheiden suoritus toisistaan on erityisen hyödyllinen ohjelman testauksessa ja kehittämisessä, koska siten pystytään muokkaamaan esimerkiksi tulosten esitystapaa ilman, että joka kerta pitää odottaa melko hidasta DDA-laskentaa. Laskennan vaiheet on selvyuden vuoksi sijoitettu eri tiedostoihin omiksi funktioikseen.

Ohjelmassa voidaan valita erilaisia laskentamoodeja, joilla ohjataan mm. kappaleiden luomista ja tulosten esittämistä. Eri laskentamoodeissa on laskettu eri suureiden vaikutusta lopputulokseen. Jokaiselle laskentatapaukselle annetaan nimi, jota käytetään laskenta-ajoon liittyvien tiedostojen hakemiston nimenä ja osana kaikkien luotujen tiedostojen nimiä. Laskenta-ajoa varten luodun hakemiston alihakemistoihin tallennetaan ohjelman eri välivaiheissa muodostetut muuttujat, kuten laskentaparametrit, tehdyt kappaleet, kappaleiden sirontamatriisit, lopulliset sironta-, läpäisy- ja vaimennustulokset sekä tuloksista tehdyt kuvat. Muuttujat tallennetaan kovalevylle Matlab:in omassa *mat*-tiedostomuodossa ja kuvat eri käyttötarkoituksia varten *eps*, *tiff* ja *fig* muodoissa. Luotujen partikkelien ja kaikkien välivaiheiden tulosten tallentaminen helpotti ohjelman ulkopuolisten apukoodien käyttöä esimerkiksi partikkelien visualisointiin ja tulosten tarkasteluun.

**Taulukko 1:** Mallinnusohjelman osien esittely

Tiedosto	Tarkoitus
POMO_script_V5_attenuation.m	Päähjelma, eli skripti, joka kutsuu ohjelman muita osia. Normaalisissa käytössä ainoa, jota käyttäjä joutuu muuttamaan.
makeLayer_attenuation.m	Muodostaa eri kerrosten partikkelit apufunktioiden avulla
POMO_DDA_V5.m	Laskee sironta-amplitudit kunkin kerroksen kappaleille. Kutsuu vinteqfastfar-funktiota
vinteqfastfar_V5.m	Sähkömagnetiikan laboratoriossa luotu DDA-laskentakoodi. Laskee kappaleen sirontamatriisin parametreinä annetuille säteilyn tulosuunnalle ja yhdelle tai useammalle sirontasuunnalle.
vinteqfasta.m	Aliohjelma vinteqfastfar_V5.m-funktiolle
vinteqfasta1.m	Aliohjelma vinteqfastfar_V5.m-funktiolle
DDA_results_V5.m	Apufunktio, joka laskee sironta- ja ekstinktiopoikkinat ja säteilykuljetusteorian avulla kerroksen ominaisuudet
displayDDA_results_V5.m	Apufunktio, joka muokkaa ja esittää tulokset kuvaajina. Tallentaa kuvat eri muodoissa.
buildPhase2.m	Toisen sulamisvaiheen partikkelien muodostusfunktio.
buildPhase3.m	Kolmannen sulamisvaiheen partikkelien muodostusfunktio.
water_epsilon.m	Veden permittiivisyyden laskentafunktio.
ice_epsilon.m	Jään permittiivisyyden laskentafunktio.
drySnowEpsilon.m	Kuivan lumen permittiivisyyden laskentafunktio.
buildSphere.m	Apufunktio, joka muodostaa laskenta-alkioista pallon muotoisen kappaleen parametrinä annetulla matriisin koolla ja pallon säteellä.
buildEllipsoid.m	Apufunktio, joka muodostaa laskenta-alkioista pyörähdys ellipsoidin muotoisen kappaleen parametrinä annetulla matriisin koolla ja puoliakselien pituuksilla.
reSampleParticles.m	Apufunktio, joka muuttaa kappaleen resoluution pienemmäksi pienentämällä laskentamatriisin kokoa ja suurentamalla laskentayksikön sivun pituutta.
randSpherePoint.m	Apufunktio, jota käytetään valitsemaan satunnaisesti piste halutun säteisen pallon pinnalta.
randSphereBottomPoint.m	Apufunktio, jota käytetään valitsemaan satunnaisesti piste halutun säteisen pallon pinnalta. Pallokoordinaateista kulman $\theta$ jakauma ei ole tasainen vaan painottuu pallon alapinnalle.
randSphereRadius.m	Arpoo satunnaisesti luvun, joka on annetun säteen $r$ ja nol- lan välillä. Jakauma on puolikas normaalijakauma, jonka odotusarvo on $r$ . Odotusarvoa ohjataan <i>keskihajontasuhteen</i> avulla. Keskihajontasuhte määritellään kappaleessa 5.2.
getPropertyPairs.m	Apufunktio, jota käytetään attribuutin nimi- ja arvotietojen poimimiseen funktioiden välisistä kutsuista.
printtaaKuva.m	Apufunktio, joka muokkaa kuvien viivan paksuutta ja fonttien kokoa sekä tallentaa kuvat kovalevylle <i>eps</i> ja <i>tiff</i> muodoissa.

## 4.4 Laskennan nopeus

DDA-mallinnuksessa laskennan tehovaatimukset kasvavat voimakkaasti laskentaelementtien määrän lisääntyessä, koska tuntemattomien suureiden määrä ratkaistavassa yhtälöryhmässä kasvaa nopeasti, kun kaikki laskentaelementtien keskinäiset vuorovaikutukset otetaan huomioon. Laskennan aikana tietokoneen muistissa on samaan aikaan suuri kappaletta kuvaava matriisi sekä eri laskentavaiheissa tarvittavat apusuureet ja vektorit. Matlab on muistinkin käytössä melko tehoton ohjelma ainakin, jos sitä verrataan suoraan jollain varsinaisella ohjelmointikielellä, kuten esimerkiksi Fortranilla tehtyyn ohjelmaan.

Kun DDA:ssa luodut yhtälöryhmät ratkaistaan käyttämällä *Conjugate Gradient* ja *Fast Fourier Transformation* -menetelmiä, laskennassa tarvittavien numeeristen operaatioiden lukumäärä  $N_{\text{oper}}$  on verrannollinen laskenta-alkioiden lukumäärästä  $N$  kaavan (52) mukaisesti [44]:

$$N_{\text{oper}} \sim O(N^{3+3\alpha} \log N), \quad (52)$$

jossa  $M$  on conjugate gradient -menetelmän iteraatioiden lukumäärä ja  $0 < \alpha < 1$ . Tässä työssä yhtälöryhmän ratkaisuun on käytetty *gmres*-algoritmia [46], joka vastaa matemaattisesti conjugate gradient -menetelmää, joten yhtälö (52) kuvaa siis ainakin suuruusluokaltaan tässä työssä käytetyn DDA-laskennan operaatioiden lukumäärää.

Tässä työssä laskentaan käytettiin tavallista pöytäkonetta<sup>2</sup>, jota käytettiin kaikkeen muuhunkin työskentelyyn. Laskenta-ajat pyrittiin pitämään korkeintaan muutaman tunnin mittaisina, jotta muu työskentely ei kohtuuttomasti häiriintyisi. Kun käytettyä matriisin kokoa kasvatettiin noin 70x70x70 tasolle, ohjelman suoritus muuttui todella hitaaksi. Hidas toiminta johtui muistinkin loppumisesta DDA-laskennassa, ja siitä, että tällöin tietokone käytti huomattavasti keskusmuistia hitaampaa kovalevyä laskennan aikaiseen muuttujien tallentamiseen. Suurin osa laskennan ajasta kului DDA-laskennassa muodostettujen lineaaristen yhtälöryhmien ratkaisuun Matlabin sisäänrakennetulla *gmres*-funktiolla, joten laskentavaiheiden välissä tapahtuva tiedostojen tallentaminen kovalevylle ja uudelleen muistiin lataaminen eivät vaikuttaneet merkittävästi suorituskykyyn.

## 4.5 Ohjelman validointi

Mallin toiminta ja tulosten järkevyyden varmistettiin taajuudella  $f = 5,6$  GHz vertaamalla DDA-mallinnuksella saatuja takaisinsironta- ja ekstinktiopoikkipintoja teoreettisiin arvoihin pallomaisilla sirottajilla käyttäen materiaaleina jäätä ( $\epsilon_r = 3,19 - 0,0006j$ ) ja vettä ( $\epsilon_r = 64,6 - 37,2j$ ). DDA:lla mallinnetut pallot eivät olleet täydellisen pallomaisia vaan kuution muotoisista osasista kohtalaisen heikolla resoluutiolla koottuja kappaleita. Sironnan kannalta tilavuus on merkitsevempi kuin rakenteen

---

<sup>2</sup>Pentium 4 (2 GHz), 1 GB RAM

aallonpituutta huomattavasti pienemmät yksityiskohdat. Vertailua varten laskettiin kunkin kappaleen todellista tilavuutta  $V = Ns^3$  vastaava säde  $r_{\text{eff}}$ .

Mie-sirontateoria on pallomaisille siroittajille analyttisesti laskettu sarjamainen sirontaratkaisu [38]. Mie-ratkaisu on toisin sanoen todellinen, ”oikea” tulos pallomaisen kappaleen sironnalle. Vertailussa DDA-mallinnukseen on käytetty Christian Mätzlerin Bernin yliopistossa julkaisemia [47] Matlabille tehtyjä Mie-laskentakoodeja.

Rayleigh-sironta on aallonpituuteen nähden pienille pallomaisille kappaleille tehty approksimaatio, joka perustuu oletukseen, että sähkökenttä kappaleen lähellä ja sisällä käyttäytyy kuten elektrostaattinen kenttä. Rayleigh-sirontan laskennan suorittavat koodit ohjelmoitiin käyttämällä viitteessä Ishimarun kirjassa [38] esitettyjä kaavoja.

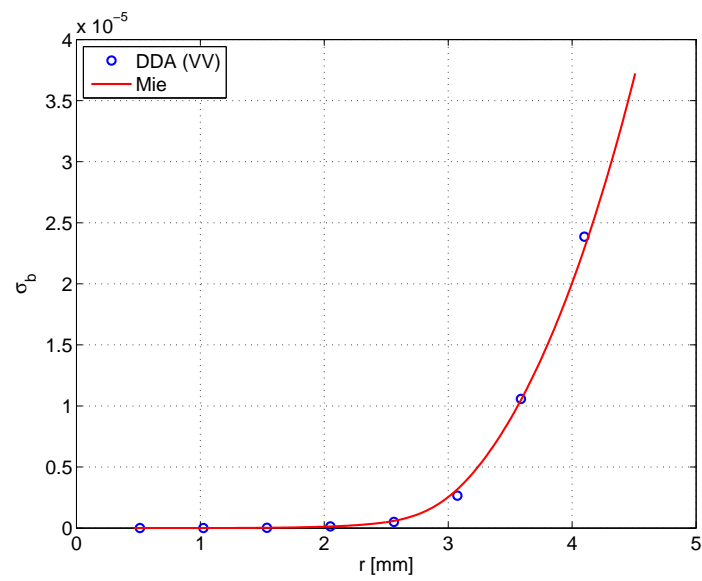
#### 4.5.1 Validoinnin tulokset vedelle

Veden korkean permittiivisyyden, ja siten myös korkean taitekertoimen on todettu vaikeuttavan DDA-laskentaa [44]. Tässä työssä käytetty modifioitu DDA-malli poikkeaa perinteisestä DDA-mallista toisiaan lähellä olevien laskentaelementtien käsittelyssä, joka toteutetaan integroimalla numeerisesti yli koko laskentaelementin tilavuuden käyttämällä Gaussin kvadratuuri-menetelmää. Tällä laskentakoodilla ei oltu mallinnettu vettä aikaisemmin, joten oli epäselvää, kuinka hyvin käytetty malli soveltuu veden mallintamiseen. Osoittautui, että vedelle joudutaan käyttämään melko isoja matriisikokoja, jotta päästään kelvolliseen tarkkuuteen.

Validointia varten tehtiin pallomaisia vesipisaroita, joiden koko vaihteli 0,5 mm – 4 mm. Seuraavaksi esitettäviä validointituloksia laskettaessa matriisikoko on ollut  $51 \times 51 \times 51$ , jolloin laskentaelementin koko on vaihdellut välillä  $20,8 \mu\text{m}$  ( $0,0004\lambda$ ) –  $167 \mu\text{m}$  ( $0,0031\lambda$ ). Validointikuvissa on esitetty tulokset vain VV-polarisaatiolle, koska näissä simuloinneissa tulokset olivat identtisiä VV- ja HH polarisaatioiden tapauksissa. Ristipolarisaatiokomponenteilla HV ja VH sironta oli vähäistä, eli kohteessa ei tapahtunut merkittäviä muutoksia polarisaatioiden välillä.

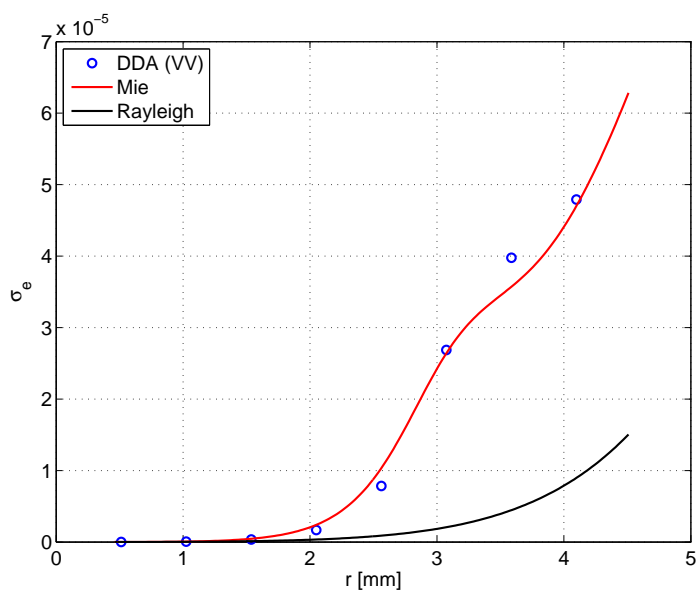
Kuvasta 8 nähdään, että takaisinsirontapoikkipinta noudattaa Mie-teorian arvoja lähes täydellisesti. Vastaavanlaiseen tulokseen päästiin myös huomattavasti pienempiä laskentamatriiseja käytettäessä, eikä takaisinsirontan mallintamisen tarkkuudesta muodostunut ongelmaa missään vaiheessa.

Kuvassa 9 on esitetty ekstinktiopoikkipinnan vertailu DDA-mallinnuksen, Mie- ja Rayleigh-teorian välillä. Kuvassa 10 on laskettu kunkin mallinnetun partikkelin ja vastaavan kokoisin partikkelin Mie-teoriasta lasketun arvon suhde, jolloin voidaan tarkemmin tutkia laskennan suhteellisia virheitä. Suhteellinen virhe vaihteli jonkin verran partikkelista toiseen, mutta tuloksia voidaan kuitenkin pitää kohtuullisina. Pahimmillaan virhe oli 2,0 mm:n partikkelille noin 30 %, joka vastaisi  $0,14 \frac{dB}{km}$ :n suuruista virhettä luvussa 5.3.2 esitetyille vesipisaran etenemisvaimennustuloksille. Tulokset, joille virhe laskettiin, on esitetty kuvassa 35, ja virhe on laskettu HH-polarisaatiolle käyttämällä  $\rho$ :n arvoa  $1000 \frac{1}{m^3}$ . Luvun 5.3.2 mallinnukset tehtiin partikkelille, jonka isoakselin puolikas oli 1.0 mm, jolloin virhe oli kuvan 10 mukaan

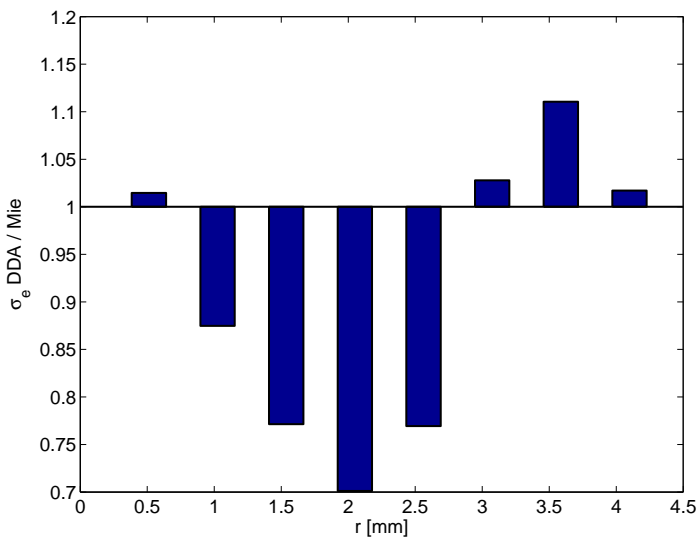


**Kuva 8:** DDA:lla mallinnetun takaisinsirontapoikkipinnan vertailu Mie-sirontaan vesipalloilla säteen funktiona. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51$ .

edellä esitettyä arvoa pienempi.



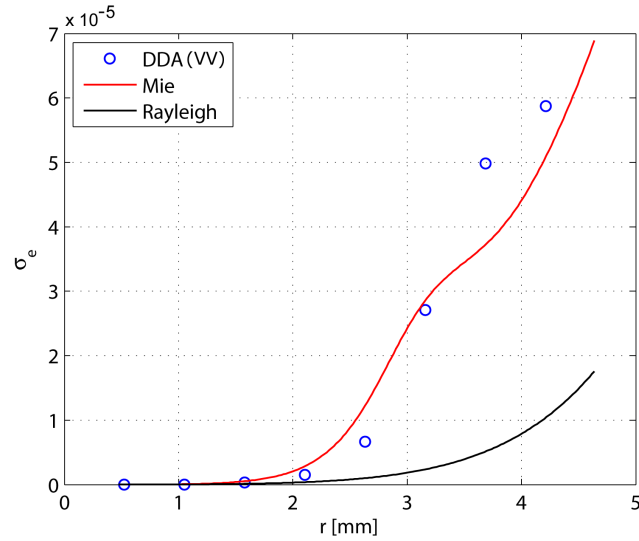
**Kuva 9:** DDA:lla mallinnetun ekstinktiopoikkipinnan vertailu Mie- ja Rayleigh-sirontaan vesipalloilla säteen funktiona. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51 \times 51$ .



**Kuva 10:** DDA:lla mallinnetun ekstinktiopoikkipinnan tarkkuus säteen funktiona suhteessa Mie-sirontaan vesipalloilla. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51 \times 51$ .

Kuvissa 11 ja 12 on esitetty tulokset laskettuna vastaavan kokoisille partikkeleille kuin edellä kuvissa 9 ja 10 esitetyissä tuloksissa, mutta tässä on käytetty pienempää laskentamatriisin kokoa ( $25 \times 25 \times 25$ ) ja siten epätarkempaa kuvausta pallomaisista kohteista. Veden DDA-mallintamisen ongelmat näkyivät selvemmin näissä

pienemmällä matriisin koolla lasketuissa tuloksissa, jotka ovat selvästi huonompia kuin suuremmalla matriisin koolla ( $51 \times 51 \times 51$ ) laskettaessa.



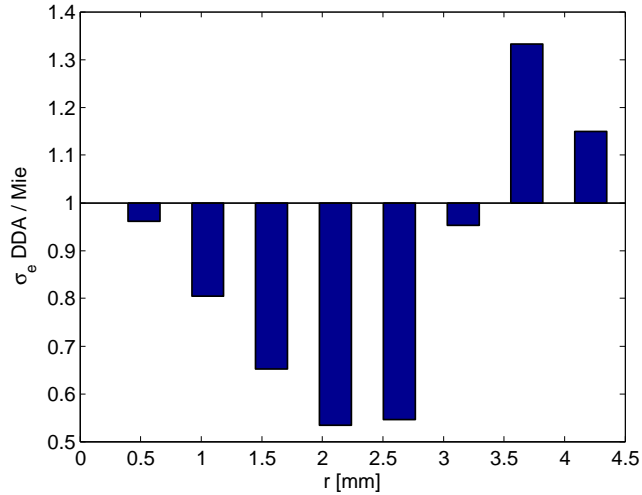
**Kuva 11:** DDA:lla mallinnetun ekstinktiopoikkipinnan vertailu Mie- ja Rayleigh-sirontaan vesipalloilla säteen funktiona käytettäessä  $25 \times 25 \times 25$  laskentamatriisia.

Kuvissa 13 ja 14 on esitetty esimerkin vuoksi kerroksen läpäisy eli transsiivisuus ja takaisinsirontakerroin kerroksen paksuuden funktiona, kun partikkelien tiheytenä kerroksessa on pidetty arvoa  $10000 \frac{1}{m^3}$ . Kuvista havaitaan, että valituilla kerroksen paksuuden ja tiheyden arvoilla läpäisy muuttuu pienimmän partikkelin lähes täydellisestä läpäisystä suurimpien lähes täydelliseen vaimenemiseen. Vaimenemisen takia takaisinsirontakerroin saturoituu suurimmilla partikkeleilla jo muutaman metrin kerrospaksuudella. Kuvissa 15 ja 16 on vastaavasti esitetty mallinnetuille vesipalloille laskettu kokonaisvaimennuskerroin yksiköissä  $\frac{1}{m}$  ja  $\frac{dB}{m}$ . Kokonaisvaimennuskertoimien kuvat vahvistavat käsitystä siitä, että tällä validointia varten valitulla tiheydellä vaimennus on suurilla vesipalloilla hyvin suurta jo lyhyellä matkalla.

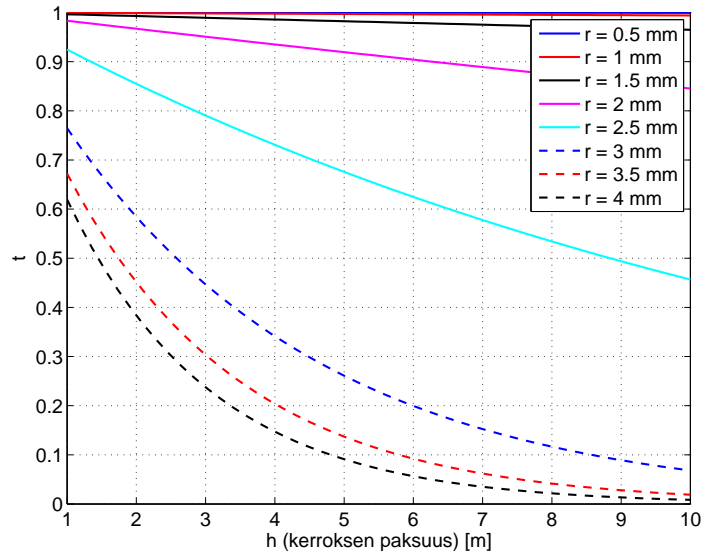
#### 4.5.2 Validoinnin tulokset jäälle

Aikaisemmissa tutkimuksissa [40] on testattu tässäkin työssä käytettyä DDA-laskentakoodia ja tulokset ovat olleet tarkkoja. Jään siis oletettiin noudattavan teoreettisia arvoja suurella tarkkuudella. Veteen verrattuna jään permittiivisyys on huomattavasti pienempi, mikä kirjallisuuden mukaan helpottaa DDA-laskentaa, ja myös sen takia jäälle tehdyistä mallinnoista oli odotettavissa tarkempia tuloksia kuin vedelle.

Validointitulokset jäälle on esitetty kuvissa (17)–(23). Tulokset on laskettu vastaavalla tavalla kuin edellisessä kappaleessa esitetyt veden validointitulokset. Laskentamatriisin kokona on käytetty kokoa  $51 \times 51 \times 51$ , vaikka pelkkää jäätä mallinnettaessa



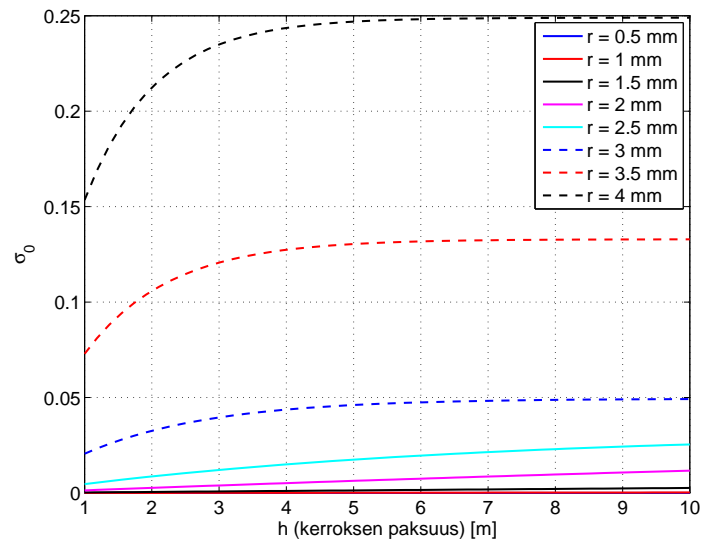
**Kuva 12:** DDA:lla mallinnetun ekstinktiopoikkipinnan tarkkuus säteen funktiona suhteessa Mie-sirontaan vesipalloilla käytettäessä  $25 \times 25 \times 25$  laskentamatriisia.



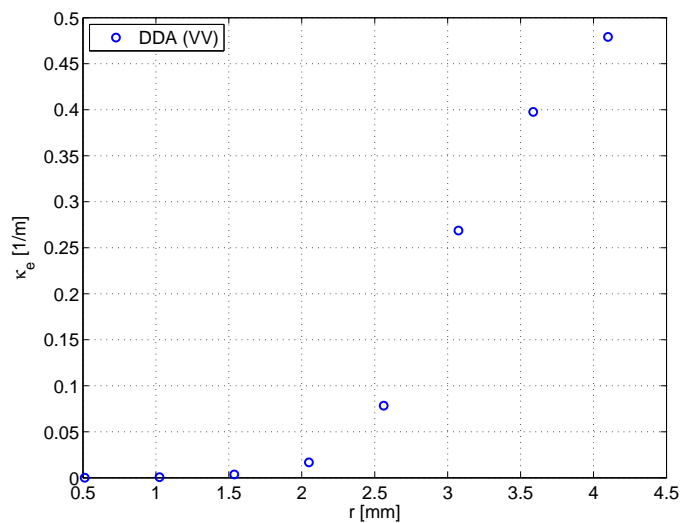
**Kuva 13:** Homogeenisen vesipalloista tiheydellä  $10000 \frac{1}{m^3}$  koostuvan kerroksen transmissiivisyys kerroksen paksuuden funktiona. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51 \times 51$ .

ei olisi ollut tarvetta näin suureen matriisikokoon. Kuvat (17)–(23) osoittavat, että ohjelma pystyy mallintamaan jäätä koostuvia partikkeleita hyvällä tarkkuudella. Kuvista huomataan myös, että jäälle vaimennus on selvästi pienemmällä tasolla kuin vedellä.

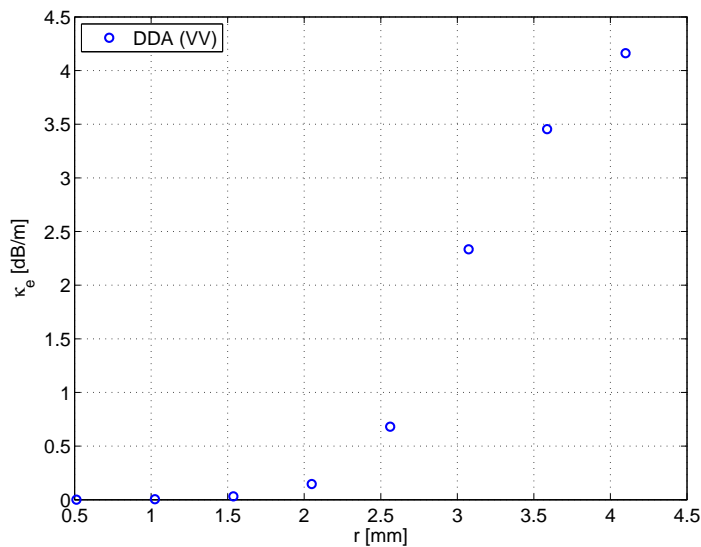




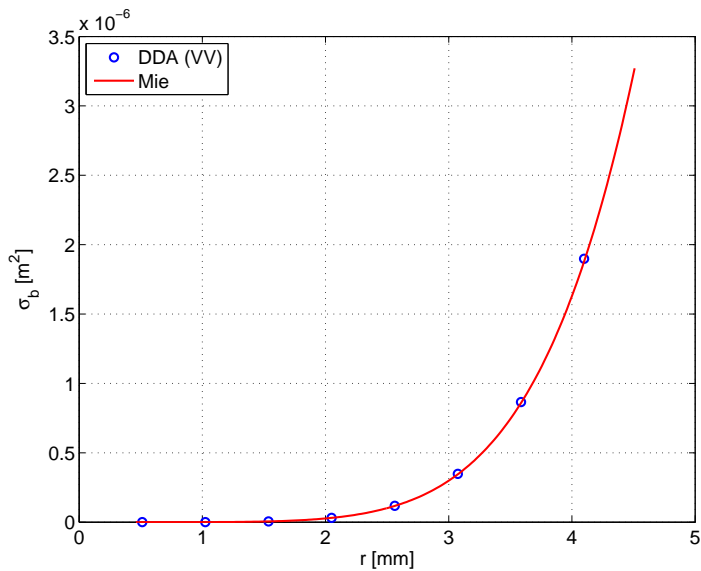
**Kuva 14:** Homogeenisen vesipalloista tiheydellä  $10000 \frac{1}{m^3}$  koostuvan kerroksen taikaisinsirontakerroin kerroksen paksuuden funktiona. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51 \times 51$ .



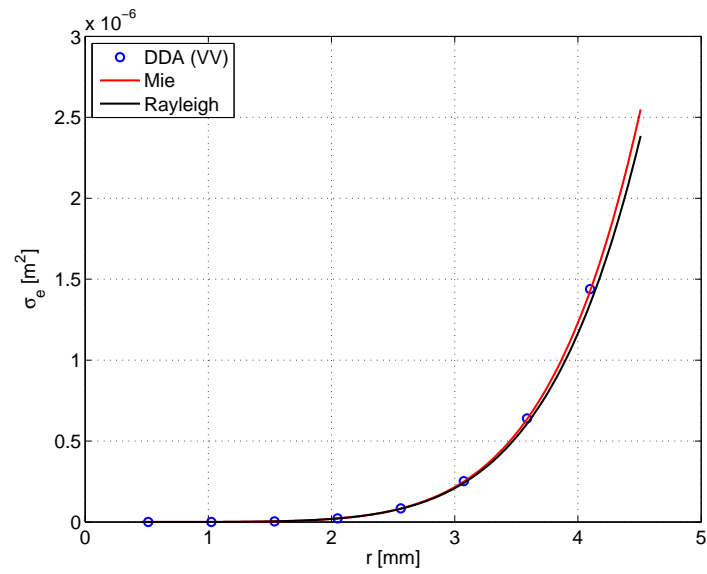
**Kuva 15:** Homogeenisen vesipalloista tiheydellä  $10000 \frac{1}{m^3}$  koostuvan kerroksen kokonaisvaimennuskerroin säteen funktiona. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51 \times 51$ .



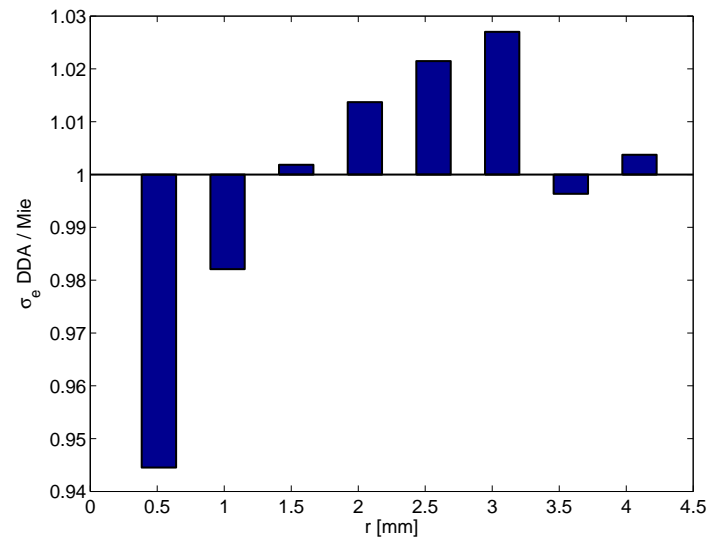
**Kuva 16:** Homogeenisen vesipalloista tiheydellä  $10000 \frac{1}{m^3}$  koostuvan kerroksen kokonaisvaimennuskerroin (yksikössä  $\frac{dB}{m}$ ) säteen funktiona. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51 \times 51$ .



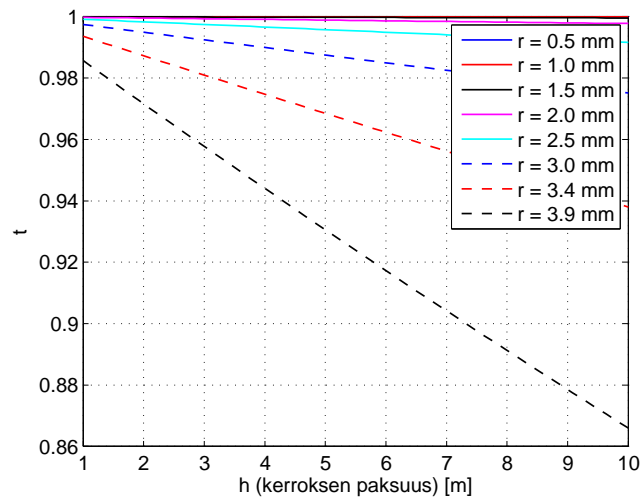
**Kuva 17:** DDA:lla mallinnetun takaisinsirontapoikkipinnan vertailu Mie-sirontaan jääpaloilla säteen funktiona. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51$ .



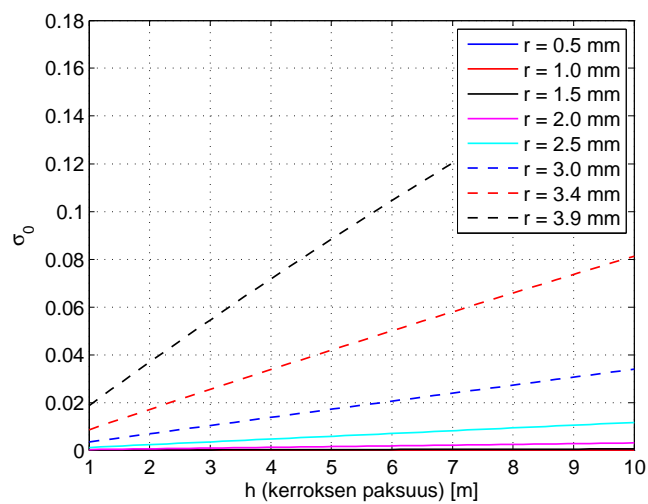
**Kuva 18:** DDA:lla mallinnetun ekstinktiopoikkipinnan vertailu Mie- ja Rayleigh-sirontaan jääpaloilla säteen funktiona. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51 \times 51$ .



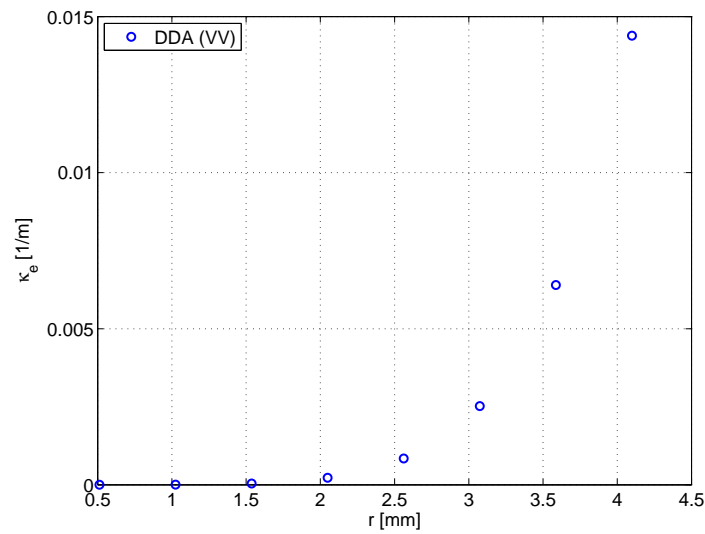
**Kuva 19:** DDA:lla mallinnetun ekstinktiopoikkipinnan tarkkuus säteen funktiona suhteessa Mie-sirontaan jääpaloilla. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51 \times 51$ .



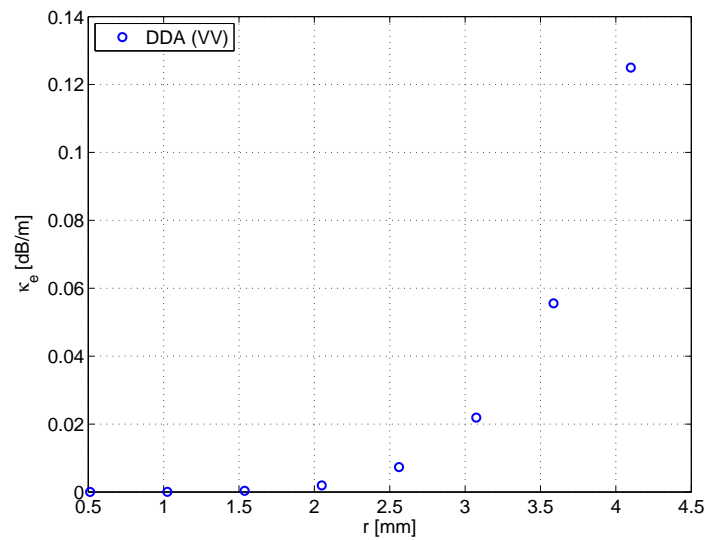
**Kuva 20:** Homogeenisen jääpalloista tiheydellä  $10000 \frac{1}{m^3}$  koostuvan kerroksen transmissiivisyys kerroksen paksuuden funktiona. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51 \times 51$ .



**Kuva 21:** Homogeenisen jääpalloista tiheydellä  $10000 \frac{1}{m^3}$  koostuvan kerroksen takaisinsirontakerroin kerroksen paksuuden funktiona. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51 \times 51$ .



**Kuva 22:** Homogeenisen jääpalloista tiheydellä  $10000 \frac{1}{m^3}$  koostuvan kerroksen kokonaisvaimennuskerroin säteen funktiona. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51 \times 51$ .



**Kuva 23:** Homogeenisen jääpalloista tiheydellä  $10000 \frac{1}{m^3}$  koostuvan kerroksen kokonaisvaimennuskerroin (yksikössä  $\frac{dB}{m}$ ) säteen funktiona. Käytetty laskentamatriisin koko oli  $51 \times 51 \times 51$ .

## 5 Hydrometeorien mallinnus ja vaimennusmallinnuksen tulokset

Tämän diplomityön puitteissa mallinnusohjelmaa käytettiin etenemisvaimennuksen laskemiseen vettä ja erilaista räntää eli sulavia lumihiutaleita kuvaaville kohteille. Tarkoituksena oli esittää esimerkki ohjelman käyttämisestä todellisten kappaleiden mallintamiseen. Tutkimuksessa, johon tämä diplomityö liittyy, oltiin kiinnostuneita nimenomaan sulamiskerroksen hydrometeorien etenemisvaimennuksesta, joten tässä yhteydessä ei ole esitetty laskettuja takaisinsirontatuloksia. Sulamiskerroksen kappaleille luotiin yksinkertaiset mallit, joiden etenemisvaimennusta tutkittiin eri polarisaatioilla. Tämän työn ulkopuolelle jätettiin mallinnustapa, jossa sulamisvaiheiden välillä olisi suora yhteys siten, että partikkelin massa säilyisi ja kaikki vaiheet seuraisivat toisiaan täysin johdonmukaisesti. Massan säilyminen vaatisi kappaleen tilavuuden muuttumista sulamisvaiheiden välillä, veden ja lumen tiheyserojen mukaan, ja muutenkin kappaleen luominen muuttuisi tämän työn kannalta liian monimutkaiseksi.

### 5.1 Lumen sulaminen

Putoavan lumen sulaminen tapahtuu Russchenbergin ym. artikkelin [20] mukaan neljässä vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa lumihiutaleen kärkiin muodostuu vesipisaroita kaikille puolille lumihiutaleelta suurimman osan kertyessä kuitenkin kappaleen alapinnalle. Toisessa vaiheessa sulavaa vettä imeytyy lumihiutaleen sisään. Kolmannessa vaiheessa lumihiutaleen sisäosatkin alkavat sulaa ja hiutaleen rakenne muuttuu. Neljännessä vaiheessa sulava partikkeli romahtaa pelkäksi vesipisaraksi. Kappale sulaa voimakkaimmin alapinnalta

Sulamattomia lumihiutaleita voi mallintaa pallomaisilla kappaleilla, koska yksittäiset lumihiutaleet voivat olla melko vaihtelevan muotoisia ja niiden orientaatiot ovat satunnaisia. Pallomaisia lumihiutaleita ei siis yksinään ole olemassa, mutta ison hiutalejoukon vaikutusta kuvaavat parhaiten juuri pallomaiset sirottajat [20, s. 5]. Lumihiutaletyyppejä on valtavasti erilaisia, joten kaikkien tyyppien ja niiden erilaisten orientaatioiden mallintaminen on jätetty tämän työn ulkopuolelle. Pallomainen lumipartikkeli kuvaa myös sulamiskerroksessa tapahtuvaa lumihiutaleiden yhteenliittymistä.

Toisen sulamisvaiheen kappaleet ovat suurimmaksi osaksi edelleen lunta, mutta ulkopinnalle on kertynyt jonkin verran nestemäistä vettä yksittäisinä pisaroina. Kappaleen sisäosien tiheydelle ja permittiivisyydelle voidaan vielä käyttää lumen vastaavia arvoja. Kolmannen vaiheen kappaletta voisi kuvailla ylösalaisin putoavaksi berliininmunkiksi, jonka alapinnalla on runsaasti puhdasta vettä ja sisäosat ovat kosteaa ja alkuperäistä lumihiutaleelta tiiviimpää lunta. Viimeisen vaiheen vesipisara on muodoltaan vaakatasossa oleva kiekkomainen ellipsoidi, jonka akselisuhde on noin 0.9 [48].

## 5.2 Mallinnettavat partikkelit

Lumesta ja nestemäisestä vedestä koostuvien sulamisen toisen ja kolmannen vaiheen kappaleiden muodostus aloitettiin tekemällä pallomainen, lumesta koostuva taustakappale. Seuraavaksi pallon lunta kuvaavista elementtikuutioista korvattiin haluttua veden tilavuusosuutta vastaava määrä vesikuutioilla. Veden tilavuusosuus on tässä lähestymistavassa tärkeä kappaleita karakterisoiva parametri, jolle ei kuitenkaan löydy kirjallisuudesta vertailuarvoja. Yleisesti kirjallisuudessa kappaleen veden määrä määritellään sulaneen veden massaosuudella. Tässä työssä veden massaosuuden käyttö olisi vaatinut monimutkaisempaa lähestymistapaa, jossa kappaleen tilavuus muuttuu jatkuvasti sulamisen edetessä, mutta tämä päätettiin jättää tämän työn ulkopuolelle. Korvattavat elementit valittiin arpomalla pallon sisältä satunnaisesti halutun jakauman mukaiset pallokoordinaatiston koordinaatit. Näistä pallokoordinaateista siirryttiin suorakulmaisiin koordinaatteihin, joita vastaavan elementtikuution dielektrisyysarvoksi vaihdettiin veden suhteellinen permittiivisyys.

Etäisyys pallon keskipisteestä eli koordinaatti  $r$  muodostettiin puolikkaasta normaali-jakaumasta, jonka odotusarvona oli kyseessä olevan pallon säde, ja keskihajontaa ohjattiin muuttujan *keskihajontasuhte* avulla:

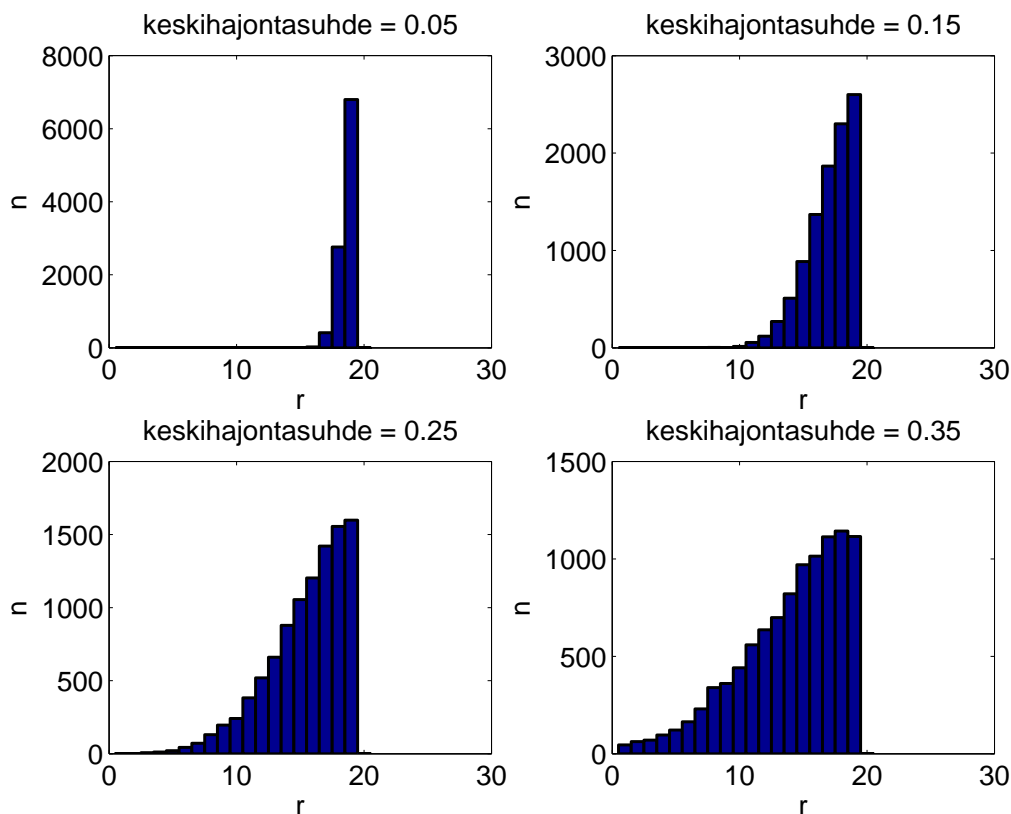
$$\sigma_r = r_{\text{pallo}} \cdot \text{keskihajontasuhte}, \quad (53)$$

jossa  $\sigma_r$  on jakauman keskihajonta ja  $r_{\text{pallo}}$  on pallon säde, joka samalla toimi jakauman ylärajana. Keskihajontasuhteen vaikutusta  $r$ -muuttujan jakaumaan havainnollistetaan kuvassa 24. Veden osuuden kasvaessa suureksi (yli 50 %) täytyi keskihajontasuhdetta alkaa kasvattaa asteittain, eli vettä täytyi laittaa yhä syvemmälle kappaleeseen.

Veden tilavuusosuuden mallintamisen yhteydessä testattiin myös miten sironta käyttäytyy kokonaan lumesta tai vedestä koostuvilla kappaleilla. Tässä yhteydessä nämä on muodostettu kuten toisen ja kolmannen sulamisvaiheen kappaleet. Ne koostuvat siis samankokoisista pallomaisista kappaleista, eikä veden tilanteessa kappaleita ole yritetty muuttaa vastaamaan vesipisaran lievästi elliptistä muotoa.

Molempien sulamisvaiheiden kappaleet ovat symmetrisiä z-akselin ympäri tapahtuvan pyörähdyksen suhteen, jolloin  $\phi$ -kulma muodostetaan välillä  $[0, 2\pi]$  olevasta tasaisesta jakaumasta.

Toisen sulamisvaiheen kappaleille määriteltiin, että vesi-inkluisioita on tasaisesti eri puolilla palloa myös pystysuunnassa, eli koordinaattien  $\theta$ -kulman arvot ovat jakautuneet tasaisesti välille  $[0, 2\pi]$ . Kolmannen sulamisvaiheen kappaleita luotaessa puolet lisättävistä vesikuutioista sijoitettiin kappaleeseen toisen sulamisvaiheen jakaumien mukaan ja loppuosa vedestä muutettujen jakaumien mukaan. Kolmannen sulamisvaiheen kappaleissa vettä on kertynyt enemmän erityisesti kappaleen alapinnalle. Tämä mallinnettiin käyttämällä veden loppuosan  $\theta$ -kulmalle kappaleen pohjaa painottavaa jakaumaa välillä  $[\pi, 2\pi]$ .  $\theta$ -kulmalle käytettyjä jakaumia on havainnollistettu kuvassa 25.



**Kuva 24:** Histogrammi keskihajontasuhteen vaikutuksesta  $r$ -muuttujan jakaukseen.

Kuvassa 26 näytetään esimerkin vuoksi kolmannen sulamisvaiheen kappaleen läpileikkaus pohjasta alkaen. Kuvasta nähdään miten turkoosilla värillä kuvattu vesi on kertynyt kappaleen pohjalle ja satunnaisesti kappaleen sisälle.

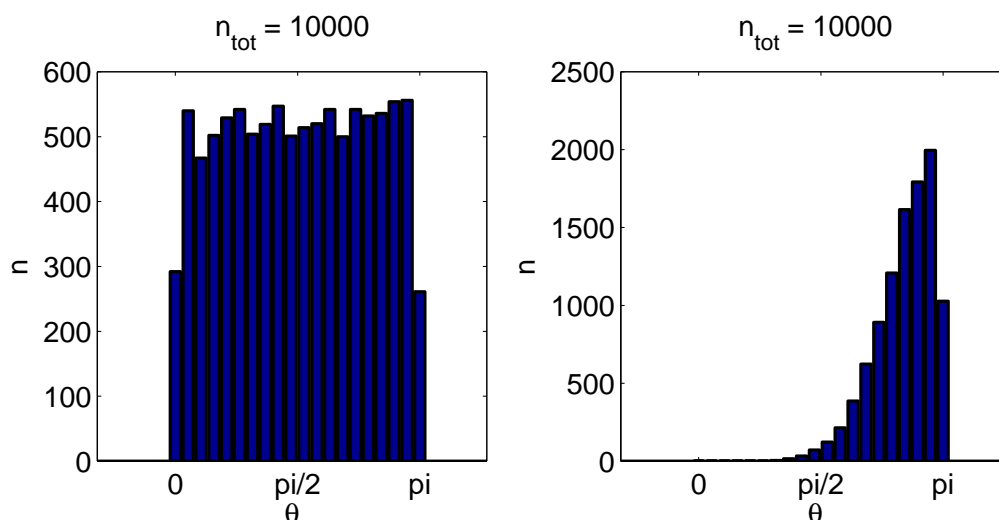
### 5.3 Vaimennusmallinnuksen tulokset

Sulamiskerroksen hydrometeorien aiheuttamaa etenemisvaimennusta mallinnettiin käyttämällä modifioitua DDA-laskentaa ja nollannen asteen säteilykuljetusteoriaa. Sulamiskerroksen räntäpartikkelin sulamista kuvattiin neljällä sulamisvaiheella, joissa pallomaiseen taustakappaleeseen lisättiin nestemäistä vettä.

Tulokset on esitetty pelkästään HH- ja VV-polarisaatioille, koska ristipolarisaatio-komponentit HV ja VH olivat kaikissa tuloksissa merkityksettömän pieniä. Tuloksissa merkittävää on se, miten HH- ja VV-polarisaation vaimennustulokset eroavat toisistaan eri sulamisvaiheiden välillä.

Kaikissa tämän luvun mallinnustuloksissa on käytetty laskentamatriisin kokoa  $51 \times 51$ .



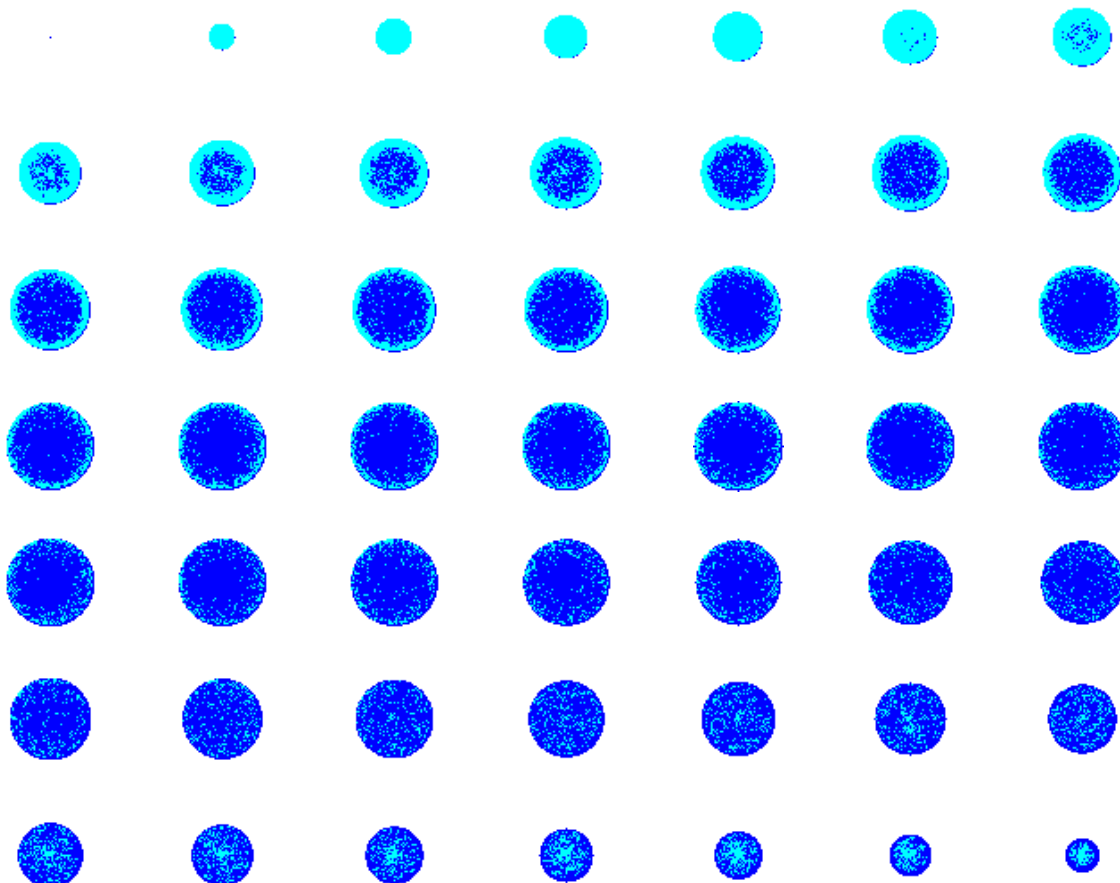


**Kuva 25:**  $\theta$ -kulmalle käytettyjen jakaumien histogrammikuvat toisen sulamisvaiheen kappaleille (vasemmalla) ja kolmannen sulamisvaiheen kappaleille (oikealla).

### 5.3.1 Mallinnus ja tulokset veden tilavuusosuuden funktiona toisen ja kolmannen sulamisvaiheen hydrometeoreille

Tässä kohtaa tutkittiin, miten toisen ja kolmannen sulamisvaiheen kappaleiden muodostaminen toimi erilaisilla veden tilavuusosuuksilla ja miten yksittäiselle partikkelille modifioidun DDA-laskennan avulla mallinnetut ekstinktiopokkipinnat muuttuivat veden tilavuusosuuden kasvaessa. Tässä kohtaa esitettyjen toisen ja kolmannen sulamisvaiheen hydrometeorien mallinnuksen pohjana oli pallomainen, kuution muotoisista lunta kuvaavista laskenta-alkioista muodostunut kappale. Lunta kuvaavista laskenta-alkiosta korvattiin veden tilavuusosuutta vastaava määrä laskenta-alkioilla, jotka kuvasivat nestemäistä vettä. Mallinnettujen pallojen säde oli 0,5 mm.

Kuvassa 27 esitetään toisen sulamisvaiheen hydrometeorien ekstinktiopokkipinta  $\sigma_e$  veden tilavuusosuuden funktiona. Toisen sulamisvaiheen kappaletta muodostettaessa on pyritty saamaan vettä sisältävien laskenta-alkioiden jakauma pyörähdyssymmetriseksi, jolloin VV- ja HH polarisaatioilla ekstinktiopokkipinnan tulisi olla samansuuruinen. Kuvasta havaitaan, että täysin homogeenisille tapauksille, eli kun pallon jokainen alkio koostuu lumesta tai vedestä,  $\sigma_e$ :n suuruus on täsmälleen yhtäsuurta eri polarisaatioille. Mallinnuksen kannalta tärkeällä alueella 0:n ja 50 %:n veden tilavuusosuuden välillä havaitaan teorian vastaisesti jonkinlaista eroa polarisaatioiden välillä. Polarisaatioiden eroja pyrittiin saamaan pienemmiksi muuttamalla laskentamatriisin kokoa, laskemalla keskiarvoja useammasta identtisestä laskenta-ajosta ja muokkaamalla vesialkioiden sijoittelussa käytettyjä satunnaisjakaumia, mutta merkittävää muutosta tulokseen ei saatu aikaiseksi. Itse modifioitu DDA-laskenta ja pallomaisten kappaleiden muodostaminen kerroksittain eivät vaikuttaisi olevan virheen syynä, koska homogeenisille kappaleille tulokset vastasivat täydellisesti toisiaan



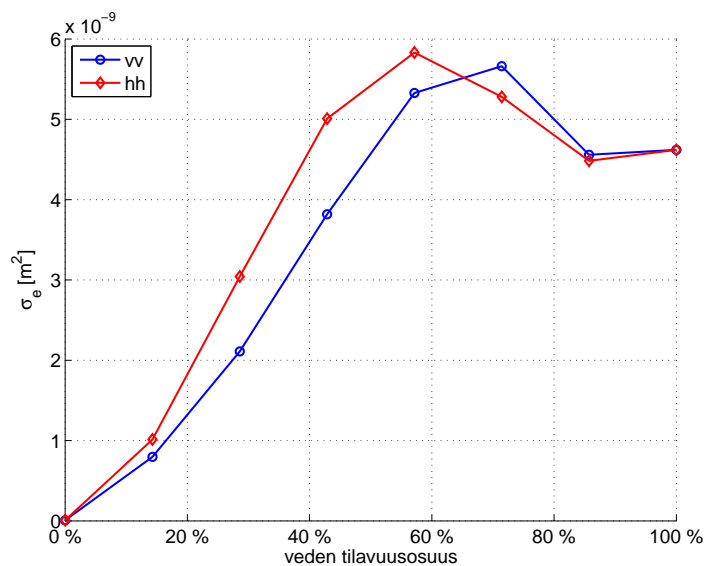
**Kuva 26:** Kerroksittainen kuvaus kolmannen sulamisvaiheen kappaleen rakenteesta (veden tilavuusosuus = 30 %). Kuvassa kerrokset on järjestetty pohjasta alkaen. Turkoosi väri kuvaa vettä ja sininen väri lunta.

eri polarisaatioilla.

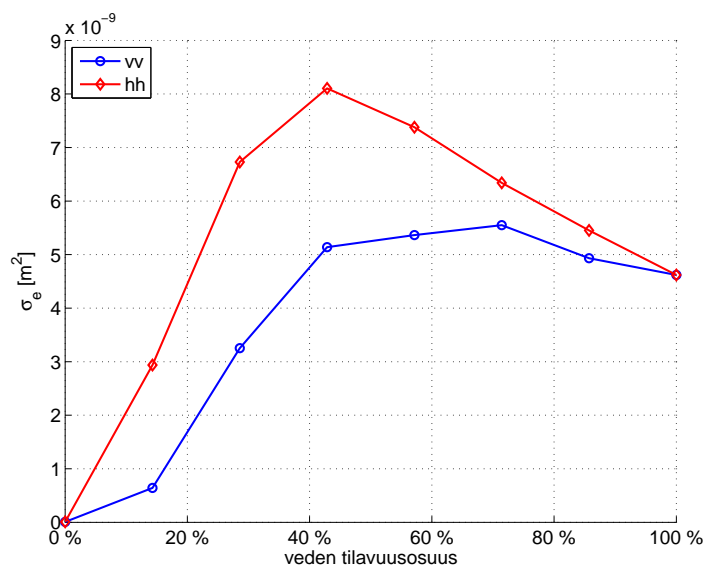
Tässä työssä esitetyssä mallinnuksessa kolmannen sulamisvaiheen partikkeleihin kertynyt nestemäinen vesi on painottunut enemmän kappaleen pohjalle veden  $\phi$ -kulman jakauman ollessa edelleen tasainen. Koska nestemäinen vesi dominoi kappaleen sirontaominaisuuksia lumeen nähden, kappaleen efektiivinen koko on suurempi leveysuunnassa kuin pystysuunnassa. Kuvassa 28 esitetään  $\sigma_e$  kolmannen sulamisvaiheen hydrometeoreille, samalla tavalla kuten edellä, veden tilavuusosuuden funktiona. Kuvasta huomataan, että tällä kertaa ekstinktio on selvästi suurempaa HH-polarisaatiolla kuin VV-polarisaatiolla, kuten oletuksen mukaan tilanteen pitäisi olla.

Molempien sulamisvaiheiden tuloskuvista huomataan, että veden tilavuusosuuden kasvaessa yli noin 50 %:n ekstinktio alkaa lievästi laskemaan. Tähän laskuun ei ole saatu selville mitään yksiselitteistä syytä. Osaltaan siihen voi vaikuttaa todelliset kappaleen sisäiset heijastukset tai kappaleiden muodostamisesta johtuvat syyt. Suurilla veden tilavuusosuuksilla keskihajontasuhte ja vesialkioiden jakaumat eivät ole

enää mielekkäitä käsitteitä, koska suurin osa todennäköisistä lumialkioista on jo korvattu vedellä, ja satunnainen valinta voi kohdistua vain jäljellä oleviin lumialkioihin kappaleen keskellä ja yläpuoliskolla. Kolmannen sulamisvaiheen kappaleilla huomataan selvästi, että suurilla veden tilavuusosuuksilla HH- ja VV-polarisaatioiden  $\sigma_e$ -arvot alkavat lähentyä toisiaan, koska kappaleen efektiivinen muoto muuttuu enemmän pallomaiseksi.



**Kuva 27:** Toisen sulamisvaiheen kappaleen ekstinktiopoikkipinta veden tilavuusosuuden funktiona.



**Kuva 28:** Kolmannen sulamisvaiheen kappaleen ekstinktiopoikkipinta veden tilavuusosuuden funktiona.

### 5.3.2 Mallinnus ja tulokset partikkelien kappalemääräisen tiheyden funktiona

Mallinnettavien partikkelien kappalemääräiseksi tiheydeksi valittiin vaihteluväli 0–4000  $\frac{1}{m^3}$  Steinerin ym. [49] artikkelin perusteella. Steiner ym. viittaa aikaisempiin tutkimuksiin ja esittää uusia havaintoja mm. vesisateen eri vaiheiden pisaroiden kappalemääräisistä tiheyksistä ja keskimääräisistä partikkelien halkaisijoista. Sateen pisaratiheys vaihtelee suuresti voimakkaiden myrskysateiden poikkeuksellisesta lähes 9000  $\frac{1}{m^3}$ :n tiheydestä tasaisten sateiden keskimääräiseen 375  $\frac{1}{m^3}$ :n tiheyteen. Suurin osa havainnoista jää 1000  $\frac{1}{m^3}$ :n tiheyden alapuolelle. Barthazyn ym. [50] artikkelissa esitetyn johtopäätöksen perusteella sulamiskerroksen partikkelien kappalemääräiset tiheydet vastaavat hyvin vesisateen vesipisaroiden kappalemääräistä tiheyttä.

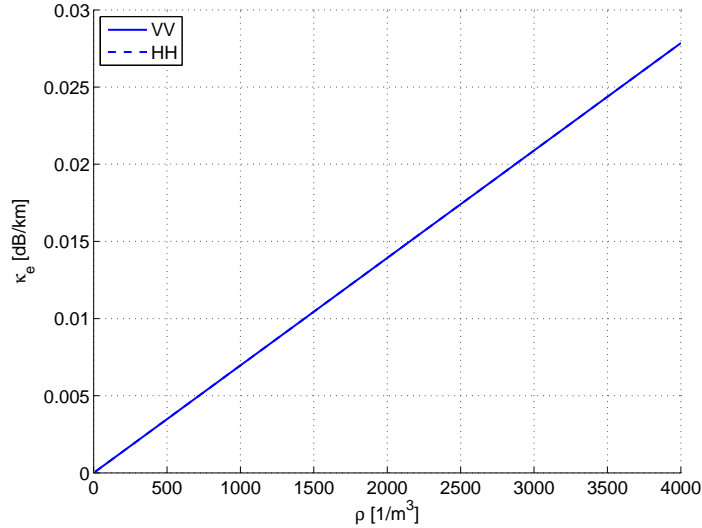
Kappalemäärän funktiona tehdyt mallinnukset tehtiin kappaleille joiden säde oli 1,0 mm riippumatta sulamisvaiheesta. Sulamiskerroksessa partikkelien koot vaihtelevat suuresti, mutta tämän voisi olettaa olevan mahdollinen koko keskimääräiselle partikkelille. Neljännen sulamisvaiheen vesipisaralla säde 1,0 mm vastaa iso-akselin puolikasta. Bringin ym. [13] julkaiseman artikkelin ja aikaisemmin mainitun Steinerin ym. artikkelin [49] mukaan tämä on vesipisaroiden kokojakauman yläpäässä, joten oletuksena tässä oli, että 1,0 mm:n koko on riittävän hyvä kompromissi erilaisten partikkelityyppien säteille.

Ilmakehän hydrometeorien mallinnuksen varsinaiset tulokset, eli kokonaisvaimennuserroin  $\kappa_e$  kaikille neljälle sulamisvaiheelle kerroksen kappalemääräisen tiheyden  $\rho$  funktiona on esitetty kuvissa 29, 30, 32 ja 35. Toiselle ja kolmannelle sulamisvaiheelle mallinnus tehtiin kahdelle veden tilavuusosuudelle; kappaleissa vettä oli 15 % tai 30 % laskentaelementeistä loppujen laskentaelementtien ollessa lunta. Tulokset on esitetty muodossa  $\frac{dB}{km}$ , joka laskettiin kaavan (49) avulla. Toiselle, kolmannelle ja neljännelle sulamisvaiheelle laskettiin myös differentiaalinen vaimennuserroin  $\kappa_{diff}$ , joka tässä työssä määriteltiin desibeleissä esitetyille vaimennuskertoimille seuraavasti:

$$\kappa_{diff} = \kappa_{e,HH} - \kappa_{e,VV} \quad (54)$$

Ensimmäisen sulamisvaiheen kappale kuvasi lunta pallomaisella kappaleella. Kappale on homogeeninen ja pyörähdyssymmetrinen ja aivan teorian mukaisesti kuvasta 29 nähdään, että HH ja VV- polarisaatioiden etenemisvaimennustulokset ovat täsmälleen yhtäsuuret. Vaimennuksen taso on melko pientä, eli pitkilläkään mittausetäisyyksillä etenemisvaimennus ei ole merkittävää. On huomioitavaa, että pallomainen lumipartikkeli edustaa tässä sulamisen alkutilannetta, ja varsinaisten lumihitaleiden tilavuudet ovat huomattavasti pienempiä kuin tässä työssä käytettyjen partikkelien tilavuudet. Tällöin niiden etenemisvaimennukset ovat myös selvästi tässä työssä esitettyjä mallinnustuloksia pienempiä.

Kuvassa 30 on esitetty toisen sulamisvaiheen kappaleen etenemisvaimennusta. Kappaleesta pyrittiin tekemään pyörähdyssymmetrinen, jolloin HH- ja VV-polarisaatioiden  $\kappa_e$ :n arvojen tulisi olla samansuuruiset. Kuvassa 32 esitetään vuorostaan kolmannen



**Kuva 29:** Ensimmäisen sulamisvaiheen kokonaisvaimennuskerroin esitettynä kappalemääräisen tiheyden funktiona.

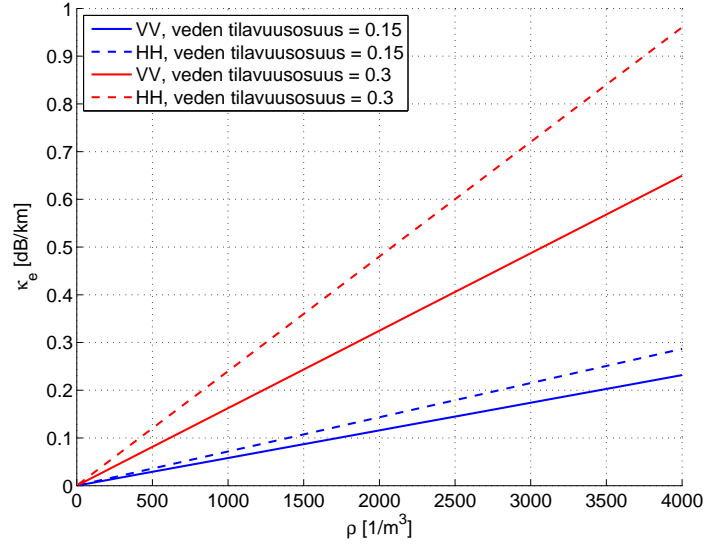
sulamisvaiheen vastaavat tulokset. Kolmannen sulamisvaiheen kappaleiden efektiivinen muoto poikkeaa pallosta, jolloin polarisaatioiden välillä pitäisi olla selvä ero. Kuvista havaitaan sama tilanne kuin kappaleessa 5.3.1 esitetyistä tuloksistakin, eli toisen sulamisvaiheen tuloksissa VV- ja HH-polarisaatioiden välillä on jonkinlaista eroa, ja kolmannen sulamisvaiheen tuloksissa ero on selvästi suurempaa. Kuvissa 31 ja 33 esitetään differentiaaliset vaimennuskertoimet, ja niistä nähdään, että 15 %:n veden tilavuusosuudelle differentiaalinen vaimennustulos desibeleinä on yli kymmenen kertaa suurempaa kolmannen sulamisvaiheen partikkeleille verrattuna toisen sulamisvaiheen partikkelien tulokseen. Veden tilavuusosuuden kasvaessa 30 %:iin tämä ero pienenee.

Toisen sulamisvaiheen partikkelien teorian vastaisen mallinnustuloksen voidaan olettaa jollain tavalla johtuvan kappaleen diskreetistä rakenteesta ja tavasta, jolla vesinkluusiot kappaleen sisälle ovat jakautuneet. Tätä päätelmää tukee se, että homogeenisille palloille tehdyille mallinuksille vaimennustulokset ovat täsmälleen samansuuruiset, ja havainto siitä, että HH- ja VV-polarisaatioiden erot kasvavat veden tilavuusosuuden kasvaessa.

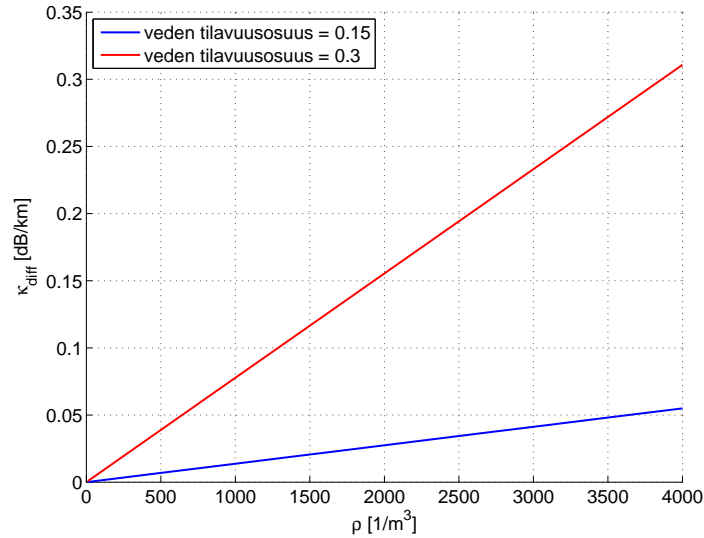
C-taajuusalueelle tehtyjä sulamiskerroksen etenemisvaimennuksen mittausta tai mallinnustuloksia ei kirjallisuudesta löytynyt. Zhang ym. [22] esittämän sulamiskerroksen etenemisvaimennusta kuvaavan likimääräisen potenssilain (2) avulla laskettiin vertailutuloksia tässä työssä esitetyille mallinnustuloksille. Vertailutulokset on esitetty kuvassa 34, ja niitä varten laskettiin partikkelien kappalemääräisen tiheyttä  $\rho$  ja partikkelien tilavuutta  $V$  vastaava sademäärä  $R$  kaavalla:

$$R = \rho V v_t, \quad (55)$$

missä  $v_t$  on putoavien hydrometeorien terminaalinopeus, jolle käytettiin artikkelis-



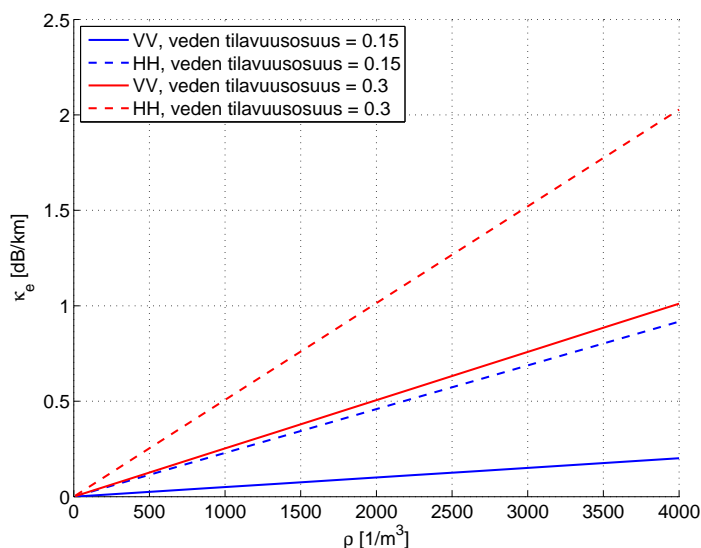
**Kuva 30:** Toisen sulamisvaiheen kokonaisvaimennuskerroin esitettynä kappalemääräisen tiheyden funktiona.



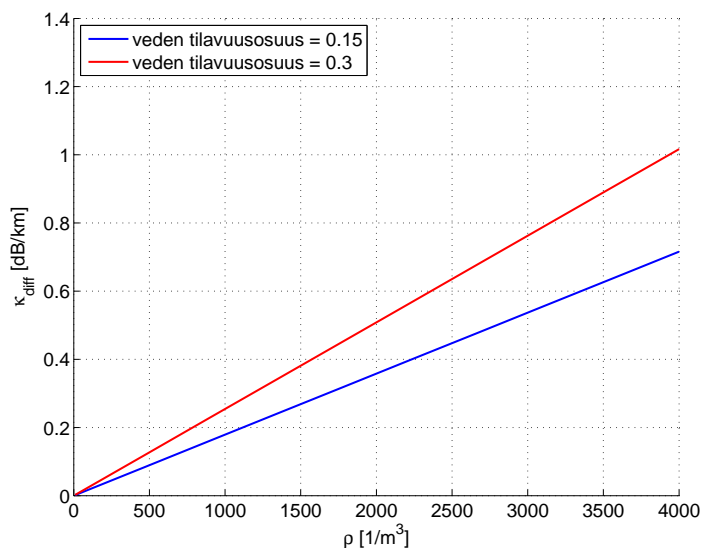
**Kuva 31:** Toisen sulamisvaiheen differentiaalinen vaimennuskerroin esitettynä kappalemääräisen tiheyden funktiona.

sa [51] esitetyn taulukon avulla laskettua arvoa  $v_t = 6,45 \frac{m}{s}$ . Vertailutulokset ovat desibeleinä ilmaistuna kolmin- tai kaksinkertaisia tässä työssä laskettuihin, niitä parhaiten vastaaviin, toisen ja kolmannen sulamisvaiheen vaimennustuloksiin (kuvat 30 ja 32) verrattuna. Mallinnustulokset vastaavat kuitenkin suuruusluokaltaan melko hyvin vertailutuloksia, joten tässä työssä esitetyjä etenemisvaimennuksen mallinnustuloksia voidaan pitää hyvinä.

Kuvassa 35 esitetään viimeisen sulamisvaiheen, eli pelkästä vedestä koostuvan partikkelin vaimennuskertoimen mallinnustulokset. Kappaleen muoto on lievästi litistyy-

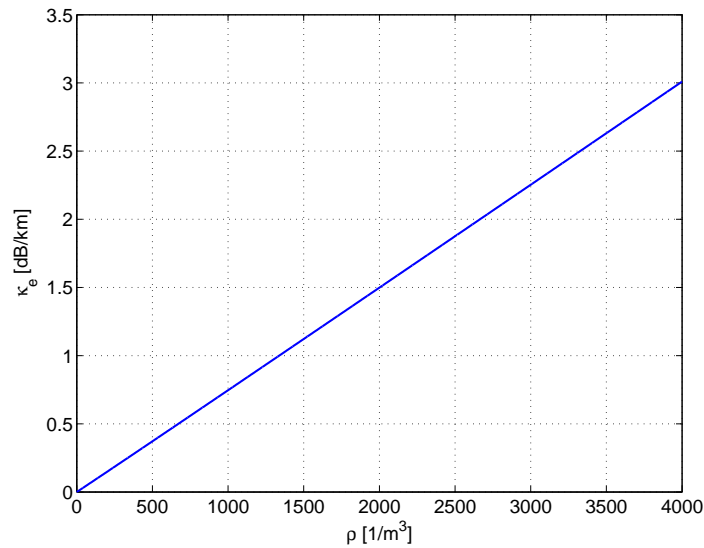


**Kuva 32:** Kolmannen sulamisvaiheen kokonaisvaimennuskerroin esitettynä kappalemääräisen tiheyden funktiona.



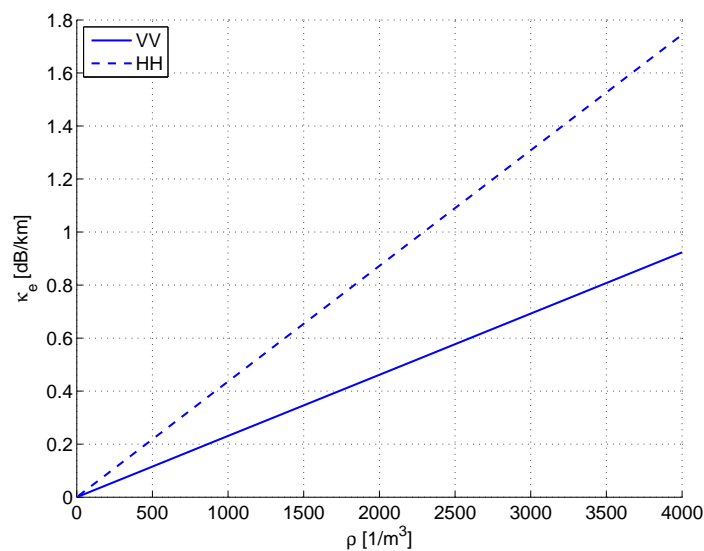
**Kuva 33:** Kolmannen sulamisvaiheen differentiaalinen vaimennuskerroin esitettynä kappalemääräisen tiheyden funktiona.

nyt pystysuunnassa, joten tulos, jossa HH-polarisaation vaimennus on suurempaa, on odotusten mukainen. Kuvassa 36 esitetystä differentiaalisesta vaimennustuloksesta havaitaan, että polarisaatioiden erot vastaavat tasoltaan kolmannen sulamisvaiheen 15 %:n veden tilavuusosuuden partikkeliä differentiaalisia tuloksia ja ovat vesipisaralle pienempiä kuin 15 %:n tilavuusosuuden partikkeleille. 30 %:n tilavuusosuudella kappale ilmeisesti efektiivisesti näyttää litteämmältä kuin akselisuhteella 0.9 muodostettu vesipisara. Kuvassa 37 esitetään neljännen sulamisvaiheen partikkeliä mallinnettu etenemisvaimennus kaavan (1) avulla laskettujen tutkaheijastuvuuksien



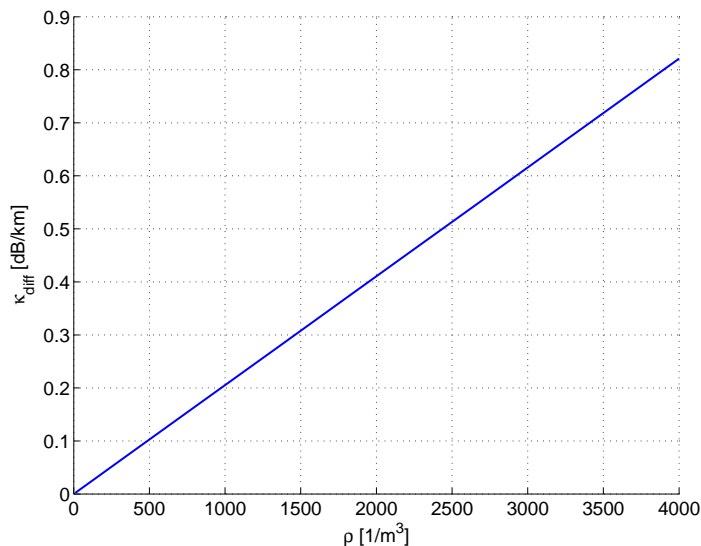
**Kuva 34:** Potenssilain avulla laskettu vertailutulos, jota tässä työssä parhaiten vastaa toisen ja kolmannen sulamisvaiheen kokonaisvaimennuskertoimen mallinnustulokset [22].

funktiona. Tässä muodossa esitettyjä vesisateen vaimennustuloksia löytyy yleisesti kirjallisuudesta. Tässä työssä laskettuja tuloksia verrattiin esimerkiksi Bringin ym. artikkelissa [13] esitettyihin tutkimus- ja mallinnustuloksiin, jolloin havaittiin tulosten vastaavan toisiaan melko hyvin. Tämän työn vaimennustulokset ovat jonkin verran suurempia kuin Bringi ym. esittämät tulokset.

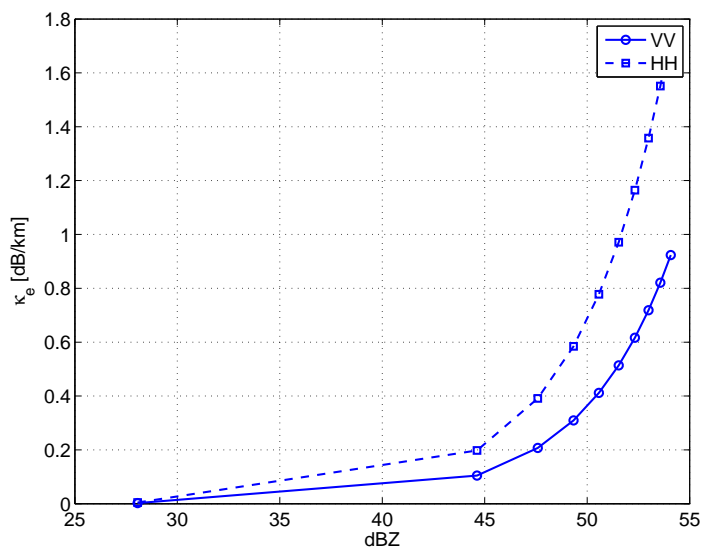


**Kuva 35:** Neljännen sulamisvaiheen kokonaisvaimennuskertoimen esitettyinä kappalemääräisen tiheyden funktiona.





**Kuva 36:** Neljännen sulamisvaiheen differentiaalin vaimennuskerroin esitettynä kappalemääräisen tiheyden funktiona.



**Kuva 37:** Neljännen sulamisvaiheen kokonaisvaimennuskerroin esitettynä tutkaheijastuvuuden funktiona.

Yleisesti sulamiskerroksen etenemisvaimennusta kuvaavista tuloksista huomattiin, että etenemisvaimennus on merkittävää ja se saattaa aiheuttaa virheitä säätutkamittauksiin. Tuloksista havaittiin, että kolmannen sulamisvaiheen räntäpartikkelien vaimennus oli suurempaa kuin muilla sulamisvaiheilla, mistä johtuen Suomen oloissa matalalla olevalla sulamiskerroksella on vaikutusta mittaustuloksiin. Tutkamittauksen tarkkuutta voisi parantaa ottamalla huomioon tutkasäteen kulkusuunnassa tapahtuva vaimennus tutkasäteen kulkiessa pitkän matkan sulamiskerroksessa.

## 6 Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa kehitettiin mallinnusohjelma ja ohjelmatyökaluja, joiden avulla voidaan tutkia erilaisten ilmakehän hydrometeorien sironta- ja vaimennusominaisuuksia. Modifioitua DDA-mallinnusta käyttämällä pystyttiin saamaan riittävän tarkka kuva yksittäisen sirottajan sirontaominaisuuksista jäätä ja vedestä koostuville hydrometeoreille. Yksittäisten kappaleiden mallinnustulosten oikeellisuus todettiin vertaamalla pallomaisten kappaleiden mallinnettuja tuloksia Mie-sirontateorian antamiin todellisiin tuloksiin. Takaisinsirontapoikkipinnalle tulokset olivat todella hyviä sekä vedelle että jäälle. Eteenpäinsironnasta lasketuissa vesipallon ekstinktiopoikkipinnan tuloksissa huomattiin jonkinlaista poikkeamaa verrattaessa Mie-tuloksiin, mutta tulosten voi silti sanoa olevan kohtuullisia. Jäälle myös ekstinktiopoikkipinnan tulokset seurasivat täydellisesti Mie-sirannon tuloksia. Nollannen asteen säteilykuljetusteorian avulla pystyttiin yleistämään yksittäisen partikkelin sirontatulokset näistä sirottajista koostuvan kerroksen sironta-, transmissiivisyys- ja vaimennusominaisuuksiin.

Mallinnusohjelmaa käytettiin sulamiskerroksen hydrometeorien etenemisvaimennuksen tutkimiseen. Mallinnusta varten luotiin yksinkertainen malli satavan lumen sulamisesta sulamiskerroksessa. Mallissa lumen sulaminen on luokiteltu neljään eri sulamisvaiheeseen, joista ensimmäisessä kappale koostuu pelkästä lumesta, toinen ja kolmas koostuvat lumesta muodostetusta taustakappaleesta, jonka sisälle kertyy erilaisten jakaumien ohjaamana nestemäistä vettä ja neljäs sulamisvaihe koostuu pelkästä vedestä. Neljännen sulamisvaiheen kappale on kiekkomainen ellipsoidi, ja muiden sulamisvaiheiden kappaleet ovat pallomaisia.

Mallinnuksessa oltiin kiinnostuneita etenemisvaimennuksesta lähinnä HH- ja VV-polarisaatiokomponenteille, koska osoittautui, että sironta- ja vaimennus ristipolarisaatiokomponenteilla HV- ja VH oli merkityksettömän pientä. Tästä voidaan päätellä, että mitkään mallinnetuista kappaleista eivät saa aikaan heijastuksia tai muita ilmiöitä, joissa lähetetyn sähkömagneettisen aallon polarisaatio kääntyisi. Ensimmäisen ja toisen sulamisvaiheen kappaleet ovat pyörähdyssymmetrisiä, joten niiden vaimennustulosten pitäisi olla samalla tasolla molemmille polarisaatioille. Kolmannen sulamisvaiheen partikkeleille HH-polarisaatiolla vaimennuksen tulisi olla suurempaa kuin vaimennuksen VV-polarisaatiolla, koska kappaleet ovat niiden pohjalle kertyneen veden takia efektiivisesti suurempia leveysuunnassa kuin korkeusuunnassa. Neljännen sulamisvaiheen partikkelien litteän muodon takia myös niiden vaimennuksen oletettiin olevan voimakkaampaa HH-polarisaatiolla.

Vaimennusmallinnuksen tuloksista havaittiin seuraavat asiat:

1. Toisen sulamisvaiheen partikkeleilla oli pyörähdyssymmetrisyydestä seuranneen oletuksen vastaisesti eroa HH- ja VV-polarisaatioiden välillä jonkin verran. Tämän oletetaan johtuvan siitä, että yrityksistä huolimatta lumiseen taustaan lisättyjä vesi-inkluusioita ei saatu kappaleeseen täysin symmetrisesti, mihin viittaa myös se, että veden tilavuusosuuden kasvaessa ongelma korostui.

Modifioitua DDA-laskentaa käyttävä sirontamallinnusohjelma itsessään kuitenkin vaikutti toimivan, koska homogeenisillä pallomaisilla kappaleilla HH- ja VV-tulokset yhtyivät.

2. Kolmannen ja neljännen sulamisvaiheiden kappaleilla vaimennus HH-polarisaatiolla oli selvästi suurempaa kuin VV-polarisaatiolla. Ero oli merkittävästi suurempaa kuin toisen sulamisvaiheen kappaleilla havaittu ero polarisaatioiden välillä. Riippuen veden tilavuusosuudesta kolmannen sulamisvaiheen partikkeleilla tämä ero oli yhtä suurta tai suurempaa kuin neljännen sulamisvaiheen vesipisaraa kuvaavalla kappaleella. Tämän oletettiin johtuvan siitä, että kolmannen sulamisvaiheen partikkelit oli luotu siten, että vesi kertyy niissä melko voimakkaasti kappaleen pohjalle, jolloin kappale on efektiivisesti litteämpi kuin 0.9 akselisuhteella luotu neljännen sulamisvaiheen vesipisara.

Sulamiskerroksen hydrometeorien etenemisvaimennusta pystyisi kehittämään mallintamalla tarkemmin kappaleiden sulamista. Todellista kappaletta mallinnettaessa voisi soveltaa tapaa, jossa kappaleen tilavuutta ohjaavat lumen ja veden tiheyserot kappaleen massan pysyessä vakiona. DDA-mallinnus on herkkä kappaleen tilavuuden muutoksille ja olisi mielenkiintoista tutkia kuinka paljon kappaleen koon pieneneminen sulamisen edistyessä vaikuttaa sen sirontaan ja vaimennukseen. Tulevaa tutkimusta varten tulisi kehittää kappaleen muotoa, kokoa ja veden kertymistä kuvaavat kaavat, joiden avulla kappaleen koostumus muuttuisi jatkuvasti sulamisen edistyessä. Mallinnusta pitäisi soveltaa suureen joukkoon erilaisia partikkeleita, jolloin saataisiin kattava kuva sulamiskerroksen ominaisuuksista.

Tämä diplomityö esitteli uuden tavan mallintaa satavien lumi-, räntä- ja vesipartikkelien sirontaa ja etenemisvaimennusta. Tämän työn pohjalta on hyvä jatkaa tutkimuksessa eteenpäin, jolloin saadaan paljon uutta tietoa polarimetrinen säätutkien uusien ja entistä tarkempien mittaustulosten pohjaksi.

## Viitteet

- [1] O. Klemola ja A. Lehto, *Tutkatekniikka*. Otatieto Oy, 1998.
- [2] K. Salonen, "Towards the use of radar winds in numerical weather prediction," väitöskirja, Helsingin yliopisto, 2009.
- [3] Ilmatieteen laitos, "Suomen tutkaverkko," [WWW-dokumentti], <[http://www.fmi.fi/saa/havainto\\_94.html](http://www.fmi.fi/saa/havainto_94.html)> (luettu 17.5.2009).
- [4] S. Raghavan, *Radar Meteorology*. Springer, 2003.
- [5] V. N. Bringi ja V. Chandrasekar, *Polarimetric Doppler Weather Radar Principles and Applications*. Cambridge University Press, 2001.
- [6] M. Huuskonen, "Ilmatieteen laitos uusii säätutkansa," Helsingin Sanomat, 3.3.2009.
- [7] T. Puhakka, M. Leskinen, P. Puhakka, S. Niemi, L. Konkola, ja N. Tollman, "University of Helsinki research radar setup," *4th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology*, Barcelona, Espanja, 2006.
- [8] T. Puhakka, P. Puhakka, ja F. O'Hora, "On the performance of NLFM pulse compression with polarimetric Doppler radar," *4th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology*, Barcelona, Espanja, 2006.
- [9] M. Inkinen, "Sateen intensiteetti suomen kesäsateissa säätutkamittausten mukaan," pro gradu, Fysikaalisten tieteiden laitos, Helsingin yliopisto, 2003.
- [10] H. Pohjola, "Tutkaheijastuvuustekijän pystyjakauma Suomessa ja sen vaikutus tutkan sademittauksen tarkkuuteen," pro gradu, Fysikaalisten tieteiden laitos, Helsingin yliopisto, 2003.
- [11] W. Szyrmer ja I. Zawadzki, "Modeling of the melting layer. part I: Dynamics and microphysics," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 56, s. 3573–3592, 1999.
- [12] P. M. Austin ja A. C. Bemis, "A quantitative study of the "bright band" in radar precipitation echoes," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 7, s. 145–151, 1950.
- [13] V. N. Bringi, T. D. Keenan, ja V. Chandrasekar, "Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: A self-consistent method with constraints," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, s. 1906–1915, 2001.
- [14] S. Mitra, O. Vohl, M. Ahr, ja H. Pruppacher, "A wind tunnel and theoretical study of the melting behavior of atmospheric ice particles. IV: Experiment and theory for snow flakes," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 47, s. 584–591, 1990.

- [15] W. Klaassen, "Radar observations and simulation of the melting layer of precipitation," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 45, s. 3741–3753, 1988.
- [16] H. Russchenberg ja L. Ligthart, "A Doppler-polarimetric backscatter model of the melting layer," *8th Int. Conf. Antennas and Propagation*, Edinburgh, U.K., 1993, s. 877–880.
- [17] W. Zhang, J. Tervonen, ja E. Salonen, "Backward and forward scattering by the melting layer composed of spheroidal hydrometeors at 5-100 GHz," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44, s. 1208–1219, 1996.
- [18] F. Fabry ja W. Szyrmer, "Modeling of the melting layer. Part II: Electromagnetic," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 56, s. 3593–3600, 1999.
- [19] C. Bohren ja L. Battan, "Radar backscattering of microwaves by spongy ice spheres," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 39, s. 2623–2628, 1982.
- [20] H. Russchenberg ja L. Ligthart, "Backscattering by and propagation through the melting layer of precipitation: a new polarimetric model," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, s. 3–14, 1996.
- [21] J. Vivekanandan, V. Bringi, M. Hagen, ja P. Meischner, "Polarimetric radar studies of atmospheric ice particles," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 1, s. 1–10, 1994.
- [22] W. Zhang, S. Karhu, ja E. Salonen, "Predictions of radiowave attenuations due to a melting layer of precipitation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, s. 492–500, 1994.
- [23] I. Lindell, *Sähkötekniikan historia*. Otatieto, 1994.
- [24] A. Räisänen ja A. Lehto, *Radiotekniikan perusteet*. Otatieto, 2003.
- [25] I. Lindell ja A. Sihvola, *Sähkömagneettinen kenttäteoria: 1. Staattiset kentät*. Otatieto, 1995.
- [26] F. T. Ulaby, R. K. Moore, ja A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing: Active And Passive*. Addison-Wesley, 1981, vol. 1.
- [27] C. Malmberg ja A. Maryott, "Dielectric Constant of Water from 0° C to 100° C," *Journal of research of the National Bureau of Standards*, vol. 56, s. 1–8, 1956.
- [28] A. Stogryn, "Equations for calculating the dielectric constant of saline water (correspondence)," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 19, s. 733–736, 1971.
- [29] C. Mätzler ja U. Wegmüller, "Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 20, s. 1623–1630, 1987.

- [30] G. Hufford, "A Model for the complex permittivity of ice at frequencies below 1 THz," *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 12, s. 677–682, 1991.
- [31] O. Mishima, D. Klug, ja E. Whalley, "The far-infrared spectrum of ice Ih in the range 8–25  $\text{cm}^{-1}$ . Sound waves and difference bands, with application to Saturn's rings," *Journal of Chemical Physics*, vol. 78, s. 6399–6404, 1983.
- [32] M. Tiuri, A. Sihvola, E. Nyfors, ja M. Hallikainen, "The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 9, no. 5, s. 377–382, Dec 1984.
- [33] C. Mätzler, "Microwave dielectric properties of surface snow," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. OE-9, s. 366–371, 1984.
- [34] M. Hallikainen, F. Ulaby, ja M. Abdelrazik, "Dielectric properties of snow in the 3 to 37 GHz range," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 11, s. 1329–1340, 1986.
- [35] A. Sihvola, "Analysis of microwave structures and mixing formulae with applications to remote sensing measurements," väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu, 1986.
- [36] D. Polder ja J. H. van Santen, "The effective permeability of mixtures of solids," *Physica*, vol. 12, s. 257–271, 1946.
- [37] C. Mätzler, "Microwave permittivity of dry snow," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, s. 573–581, 1996.
- [38] A. Ishimaru, *Wave Propagation and Scattering in Random Media*. Academic Press, 1978.
- [39] A. Sihvola ja I. Lindell, *Sähkömagneettinen kenttäteoria: 2. Dynaamiset kentät*. Otatieto, 1996.
- [40] A. Lerber, J. Sarvas, ja J. Pulliainen, "Modeling snow volume backscatter combining the radiative transfer theory and the discrete dipole approximation," *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2006, IGARSS 2006.*, Denver, Yhdysvallat, 2006, s. 481–484.
- [41] F. M. Kahnert, "Numerical methods in electromagnetic scattering theory," *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, vol. 79–80, s. 775–824, 2003.
- [42] H. DeVoe, "Optical properties of molecular aggregates. I. Classical model of electronic absorption and refraction," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 41, s. 393–400, 1964.
- [43] E. M. Purcell ja C. R. Pennypacker, "Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains," *Astrophysical Journal*, vol. 186, s. 705–714, 1973.

- [44] B. T. Draine ja P. J. Flatau, “Discrete-dipole approximation for scattering calculations,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 11, no. 4, s. 1491–1499, 1994.
- [45] J. Pulliainen, “S-92.405 kaukokartoitushavaintojen mallinnus- ja tulkintamenetelmät,” julkaisematon opetusmoniste, Teknillinen korkeakoulu, Avaruustekniikan laboratorio, 2006.
- [46] Y. Saad ja M. H. Schultz, “GMRES: A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems,” *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 7, s. 856–869, 1986.
- [47] C. Mätzler, “Matlab functions for Mie scattering and absorption,” Institute of Applied Physics, University of Bern, Tekninen raportti, 2002.
- [48] T. Oguchi, “Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 71, s. 1029–1078, 1983.
- [49] M. Steiner ja J. A. Smith, “A microphysical interpretation of radar reflectivity – Rain rate relationships,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 61, s. 1114–1131, 2004.
- [50] E. Barthazy, W. Henrich, ja A. Waldvogel, “Size distribution of hydrometeors through the melting layer,” *Atmospheric Research*, vol. 47–48, s. 193–208, 1998.
- [51] H. Pruppacher ja R. Pitter, “A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drops,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 28, s. 86–94, 1971.

## A Pääohjelman koodi

```
% This is the main file for Attenuation calculation for melting layer
% particles
dbstop if error
clear variables
close all

% Find the folder where user is currently (program will go back there at
% the end)
original_folder = pwd;

% Folder settings
files_folder = 'Z:\My Documents\UUSIMMAT\DDA_uusi\V5';
subfolders = {'params', 'particles', 'F_files', 'results', 'pictures'};

% Jump to files folder
cd(files_folder)

% Set witch melting phases are included in the calculation
phases = [true true true true];

% Number of particles in each phase
n_particles = 2;

% Number of different calculation runs (differen particle for each
% particle type)
n_calc_runs = 1;

% List of possible calculation modes
calc_modes_all = {'vol_fract', 'rho', 'std_ratio'};

% Choose calculation mode
calc_mode = calc_modes_all{2};

% If true, the subtask will be carried out
save_parameters = true;
generate_particle = true;
calculate_DDA = true;
calculate_results = true;
display_results = true;
save_pictures = true;

% Name of the test (will generate folder with this name in files-folder)
casename = 'V5_muuttujatesti2';

% Generate test folder
mkdir(casename);
cd(casename)
```



```

% Generate subfolders
for index = 1:length(subfolders)
    mkdir(subfolders{index});
end

% Some basic parameter that won't be changed often
% Radar frequency
const.f = 5.6e9;

% define constants
const.eps0 = 8.854187820000000e-012;
const.mu0 = 1.256637061435917e-006;
const.c = 299792458;
const.k0 = 2*pi*const.f/const.c;

% Calculation parameters (see vinteqfastfar.m)
const.tol = 0.01;
const.maxit = 15;
const.restart = 10;
const.res = 1;
const.speed = 2;

% temperature (C)
const.T = 0;

% Matrix size
const.mat_size = [51 51 51];

part_min = 0.5e-3; % If only one particle size, this is used
part_max = 3.0e-3; % This is from older version

% Size of the ellipsoid in calc_units (major axis). Larger of these is used
% for spherical particles.
size_ellipsoid = [25 18];

size_sphere = [max(size_ellipsoid) max(size_ellipsoid)];

% Sizes of the particles in each phase
size_cubes(:, :, 1) = size_sphere;
size_cubes(:, :, 2) = size_sphere;
size_cubes(:, :, 3) = size_sphere;
size_cubes(:, :, 4) = size_ellipsoid;

% Save parameters
param_file = [subfolders{1} '\' casename '_params'];
if save_parameters
    save(param_file, 'const');
else
    load(param_file);
end

```

```

% Set filenames
particle_files = cell(length(phases),n_particles,n_calc_runs);
F_files = cell(length(phases),n_particles,n_calc_runs);
result_files = cell(length(phases),n_particles,n_calc_runs);

for calc_run = 1:n_calc_runs
    for phase = 1:length(phases)
        for part = 1:n_particles;
            particle_files{phase,part,calc_run} = [subfolders{2} '\ ' ...
                casename '_phase' num2str(phase) '_part' num2str(part) ...
                '_run' num2str(calc_run)];
            F_files{phase,part,calc_run} = [subfolders{3} '\ ' casename...
                '_phase' num2str(phase) '_part' num2str(part) '_F' ...
                '_run' num2str(calc_run)];
            result_files{phase,part,calc_run} = [subfolders{4} '\ '...
                casename '_phase' num2str(phase) '_part' num2str(part)...
                '_R' '_run' num2str(calc_run)];
        end
    end
end

% Check calculation mode and generate particles accordingly
switch calc_mode
    case 'vol_fract'
        if phases(1) || phases(4)
            warning(['This calculation mode is only suitable for'...
                'melting phases 2 and 3.']);
            phases(1) = false;
            phases(4) = false;
        end

        s = part_min/max(max(size_cubes));
        s = ones(size(particle_files))*s;

        water_vol_ratio_min = 0;
        water_vol_ratio_max = 1;
        water_vol_ratio = linspace(water_vol_ratio_min,...
            water_vol_ratio_max,n_particles);

        if generate_particle
            makeLayer_attenuation(const,s,particle_files,...
                size_cubes,phases,water_vol_ratio,calc_mode)
        end

        % Layer parameters
        n_layers = 1; % Only one layer present in this calculation mode

        layer.rho = 1e4*ones(n_layers,1); % number density
        layer.h = 100;

```

```

case 'rho'

    s = part_min/max(max(size_cubes));
    s = ones(size(particle_files))*s;

    water_vol_ratio_min = 0.15;
    water_vol_ratio_max = 0.3;
    water_vol_ratio = linspace(water_vol_ratio_min,...
        water_vol_ratio_max,n_particles);

    % Generate particles
    if generate_particle
        makeLayer_attenuation(const,s,particle_files,...
            size_cubes,phases,water_vol_ratio,calc_mode)
    end

    % Layer parameters
    n_layers = 10;
    rho_min = 5000;
    rho_max = 50000;

    layer.rho = linspace(rho_min,rho_max,n_layers);
    layer.h = 100*ones(n_layers,1);

case 'std_ratio'
    % This mode is supposed to work only with phase2 (at least for
    % now)
    if phases(1) || phases(3) || phases(4)
        warning(['This calculation mode (' calc_mode...
            ') is only suitable for melting phase 2']);

        phases(1) = false;
        phases(3) = false;
        phases(4) = false;
    end
    s = part_min/max(max(size_cubes));
    s = ones(size(particle_files))*s;

    std_ratio_min = 0.05;
    std_ratio_max = 0.40;

    std_ratio = linspace(std_ratio_min,std_ratio_max,n_particles);
    water_vol_ratio = 0.15*ones(1,n_particles);

    % Generate particles
    if generate_particle
        makeLayer_attenuation(const,s,particle_files,...
            size_cubes,phases,water_vol_ratio,calc_mode,'std_ratio',...
            std_ratio)
    end

```

```

end

% Layer parameters

n_layers = 1; % Only one present in this calculation mode

layer.rho = 1e4*ones(n_layers,1); % number density
% layer.h = linspace(1,10,n_layers)'; % depth of layer [m]
layer.h = 100;
otherwise
    error('Calculation mode unknown.');
```

end

```

% Calculate DDA-results
if calculate_DDA
    for calc_run = 1:n_calc_runs
        for phase=1:length(phases)
            if phases(phase)
                for part=1:n_particles
                    const.s = s(phase,part,calc_run);

                    disp('')
                    disp(['Calculate phase ' num2str(phase) ' particle '...
                        num2str(part) '/' num2str(n_particles) ' run '...
                        num2str(calc_run) '/' num2str(n_calc_runs)]);
                    disp('')
                    POMO_DDA_V5(const,particle_files{phase,part,calc_run},...
                        F_files{phase,part,calc_run});
                end
            end
        end
    end
end

% Calculate backscattering cross-sections and layer transmissivity results
if calculate_results
    for calc_run = 1:n_calc_runs
        for phase=1:length(phases)
            if phases(phase)
                for part=1:n_particles
                    const.s = s(phase,part,calc_run);
                    DDA_results_V5(const,F_files{phase,part,calc_run},...
                        result_files{phase,part,calc_run},layer);
                end
            end
        end
    end
end

% Display results
if display_results
    if strcmp(calc_mode,'std_ratio')
```

```
        displayDDA_results_V5(water_vol_ratio,result_files,particle_files,...
            phases,casename,const,s,calc_mode,layer,save_pictures,std_ratio)
    else
        displayDDA_results_V5(water_vol_ratio,result_files,particle_files,...
            phases,casename,const,s,calc_mode,layer,save_pictures)
    end
end

end

% Move the Current Directory back to previous one
cd(original_folder)
```

## B Pääohjelman muuttujat

Muuttuja	Kategoria	Muuttujan tyyppi	Kuvaus
<code>const</code>	laskentaparametrit	struct	Suuri määrä laskentaa ohjaavia parametrejä ja vakioita yhdistettynä. Näistä on säännöllisesti muokattu vain laskentamatriisin kokoa
<code>const.f</code>	laskentaparametrit	luku	Taajuus (työssä käytetty arvoa 5.6 GHz)
<code>const.eps0</code>	laskentaparametrit	luku	Tyhjiön permittiivisyys (vakio)
<code>const.mu0</code>	laskentaparametrit	luku	Tyhjiön permeabiliteetti (vakio)
<code>const.c</code>	laskentaparametrit	luku	Valon nopeus tyhjiössä (vakio)
<code>const.k0</code>	laskentaparametrit	luku	Aaltoluku ( $\frac{2\pi}{\lambda}$ )
<code>const.tol</code>	laskentaparametrit	luku	<code>gmres</code> -funktion ohjausparametri (ratkaisun toleranssi)
<code>const.maxit</code>	laskentaparametrit	luku	<code>gmres</code> -funktion ohjausparametri (iteraatioiden maksimimäärä)
<code>const.res</code>	laskentaparametrit	luku	Tämä on vanhaa perua, ei käytössä tässä versiossa
<code>const.speed</code>	laskentaparametrit	luku	<code>vinetqfastfar</code> -funktion ohjausparametri (1 = hitaampi, 2 = nopeampi, tässä työssä käytetty <code>speed = 2</code> )
<code>const.T</code>	laskentaparametrit	luku	Lämpötila [ $^{\circ}C$ ]
<code>const.mat_size</code>	laskentaparametrit	1x3 matriisi	Matriisin koko x-, y- ja z-suunnassa
<code>layer</code>	laskentaparametrit	struct	Kerroksen ominaisuudet yhdistettynä yhteen tietueeseen
<code>layer.rho</code>	laskentaparametrit	luku	Kerroksen kappalemääräinen tiheys
<code>layer.h</code>	laskentaparametrit	luku	Kerroksen paksuus [m]
<code>n_calc_runs</code>	laskentaparametrit	luku	Keskiaarvoistettavien laskenta-ajojen lukumäärä
<code>n_layers</code>	laskentaparametrit	luku	Erialaisten kerrosten lukumäärä
<code>n_particles</code>	laskentaparametrit	luku	Kappaleiden lukumäärä kutakin laskettua sulamisvaihetta kohden
<code>part_max</code>	laskentaparametrit	luku	Kappaleen säteen suurin koko (etenemisvaiemisen mallinnuksessa tämä käytössä)
<code>part_min</code>	laskentaparametrit	luku	Kappaleen säteen pienin koko (vanhaa perua)
<code>rho_max</code>	laskentaparametrit	luku	Kerroksen tiheyden maksimiarvo
<code>rho_min</code>	laskentaparametrit	luku	Kerroksen tiheyden minimiarvo
<code>s</code>	laskentaparametrit	luku	Laskenta-alkion sivun pituus
<code>size_cubes</code>	laskentaparametrit	1x2x4 matriisi	Eri sulamisvaiheiden kappaleiden koot
<code>size_ellipsoid</code>	laskentaparametrit	1x2 matriisi	Ellipsoidin pääakselien puolikkaiden koot laskenta-alkioissa
<code>size_sphere</code>	laskentaparametrit	1x2 matriisi	Pallomaisen kappaleen säde laskenta-alkioissa (molemmat ovat samat)
<code>water_vol_ratio</code>	laskentaparametrit	luku	Veden tilavuusosuus kappaleessa (välillä [0,1])
<code>water_vol_ratio_max</code>	laskentaparametrit	luku	Suurin käytetty veden tilavuusosuus
<code>water_vol_ratio_min</code>	laskentaparametrit	luku	Pienin käytetty veden tilavuusosuus
<code>calc_run</code>	laskuri	luku	Ohjelman sisäinen laskuri
<code>index</code>	laskuri	luku	Ohjelman sisäinen laskuri
<code>part</code>	laskuri	luku	Ohjelman sisäinen laskuri
<code>phase</code>	laskuri	luku	Ohjelman sisäinen laskuri

jatkuu seuraavalla sivulla ...

jatkoa edelliseltä sivulta

Muuttuja	Kategoria	Muuttujan tyyppi	Kuvaus
casename	nimi	teksti	Suorituskerran nimi, joka tulee osaksi kappaleiden nimiä yms. kovalevyille.
calc_mode	suorituksen ohjaus	teksti	Sisältää valitun laskentamoodin
calculate_DDA	suorituksen ohjaus	looginen	Ohjauskomento, joka määrää suoritetaanko kyseinen ohjelmavaihe (TRUE tai FALSE)
calculate_results	suorituksen ohjaus	looginen	Ohjauskomento, joka määrää suoritetaanko kyseinen ohjelmavaihe (TRUE tai FALSE)
display_results	suorituksen ohjaus	looginen	Ohjauskomento, joka määrää suoritetaanko kyseinen ohjelmavaihe (TRUE tai FALSE)
generate_particle	suorituksen ohjaus	looginen	Ohjauskomento, joka määrää suoritetaanko kyseinen ohjelmavaihe (TRUE tai FALSE)
save_parameters	suorituksen ohjaus	looginen	Ohjauskomento, joka määrää suoritetaanko kyseinen ohjelmavaihe (TRUE tai FALSE)
save_pictures	suorituksen ohjaus	looginen	Ohjauskomento, joka määrää tallennetaanko luodut kuvat kovalevyille (TRUE tai FALSE)
phases	suorituksen ohjaus	4x1 looginen	Valinta siitä, mitkä sulamisvaiheet ovat mukana laskennassa (TRUE tai FALSE)
original_folder	tiedostonimet	teksti	Hakemistopolku, jossa käyttäjä oli laskennan alussa (Tähän palataan laskennan päätyttyä)
files_folder	tiedostonimet	teksti	Hakemistopolku, mihin laskennan muodostamat tiedostot tallennetaan
param_file	tiedostonimet	teksti	Tiedostonimi laskentaparametrit sisältävään tiedostoon
F_files	tiedostonimet	cell array	Tiedostonimet kappaleiden sirontamatriisit sisältäville tiedostoille
particle_files	tiedostonimet	cell array	Tiedostonimet kappaleet sisältäville tiedostoille
result_files	tiedostonimet	teksti	Tiedostonimet laskentatulokset sisältäville tiedostoille
subfolders	tiedostonimet	cell array	Laskentatapausta varten luotavien alihakemistojen nimet