

Maa-57.270 Fotogrammetrian, kuvatulkinnan ja kaukokartoituksen seminaari

## **Lumen kaukokartoitus mikroaaltotutkilla**

Kevät 2007

Lassi Tani

**AVAINSANOJA:** Synteettisen apertuurin tutka (SAR), lumen peittävä ala (SCA, Snow Covered Area)

## **ABSTRAKTI**

Kaukokartoitus on todistanut olevansa käyttökelpoinen monissa eri sovelluksissa. Lumipeitettä seurataan operatiivisesti pääosin optisista instrumenteista (NOAA AVHRR, Terra MODIS). Tämä seminaariesitelmä kertoo SAR-tutkien käytöstä lumen kaukokartoituksessa ja erityisesti sen sulamisen seurannassa. Lumen kaukokartoituksessa erityisen kiintoisa kohde on lumen peittävä ala eli lyhyesti SCA, jolle kehitettyjä metodeja SAR-datan C-kaistaa hyväksi käyttäen tässä seminaariesitelmässä käydään läpi. Myös laajan keilauskulman SAR-datan käyttöä estimoidaan tilastollisesti ja lopulta käydään myös läpi esitettyjen toimintatapojen soveltamista operatiiviseen lumetilanteen seurantaan. Tämä seminaariesitelmä pohjautuu Kari Luojuksen lisensiaattityöhön [1].

## **SISÄLLYSLUETTELO**

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>3</b>
<b>2 SAR-TUTKA JA TAKAISINSIRONTA ERI KOHTEISTA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Synteettisen apertuurin tutka .....	3
2.1.1 Optisten instrumenttien ja SAR-instrumenttien vertailu .....	4
2.2 Tutkan mittaama takaisinsironta .....	5
2.2.1 Takaisinsironta lumesta .....	6
2.2.1.1 Kuiva lumi .....	6
2.2.1.2 Märkä lumi .....	7
2.2.2 Takaisinsironta maakerroksesta .....	7
2.2.3 Takaisinsironta puustosta .....	7
<b>3 LUMEN PEITTÄMÄN ALAN ESTIMOINTI JA METODIT .....</b>	<b>7</b>
3.1 TKK:n metodi lumen peittämän alan estimointiin .....	8
3.1.1 Puuston kompensointi .....	8
<b>4 TARKKUUDEN ESTIMOINTI .....</b>	<b>9</b>
4.1 Tarkkuuden estimointi käyttäen ERS-2 sekä Radarsat SCW -dataa ...	9
<b>5 YHTEENVETO .....</b>	<b>11</b>
<b>6 LÄHDELUETTELO .....</b>	<b>12</b>

# 1 JOHDANTO

Kausittaisen lumipeitteen vaikutukset maanpinnan säteilemään tehoon sekä lämmön kiertoon maanpinnan ja ilmakehän välillä ovat huomattavia. Tieto lumipeitteestä auttaa jo sellaisenaan hahmottamaan ilmastoa sekä hydrologiaa vaikuttaen siten merkittävästi ihmisen toimintaan lumen peittämällä alueella ennen lumen tuloa, lumen ollessa maassa sekä lumen sulassa. Lumen sulaminen vaikuttaa erityisesti pohjoisilla leveysasteilla jokien virtaamiin, ja tieto tietyllä valuma-alueella sijaitsevasta lumipeitteestä auttaa tekemään ajoissa mm. tulvasuunnitelmia mutta ei pidä unohtaa vesivoimaloitakaan, joille tällainen tieto tuo säästöjä.

Kausittainen lumipeite rajoittuu pääosin pohjoiselle pallonpuoliskolle ja Pohjois-Euroopassa huomattava osa vuosittaisesta sadannasta tulee lumen muodossa, joka Suomessa tarkoittaa 27% vuosittaisesta sadannasta [3]. Pohjoisilla alueilla lumi saattaa edustaa jopa enemmän kuin puolta vuosittaisesta valumasta.

Lumen merkittävän roolin takia lumen kaukokartoitusta onkin tehty jo optisilta kuvilta Suomessa SYKE:n toimesta. Optisten kuvien käytössä on päästy suhteellisen hyvään tarkkuuteen ja kuviakin saadaan Suomesta jopa päivittäin, mutta optisessa kaukokartoituksessa tulee väistämättä rajat vastaan. Maan asennosta akseliinsa nähden johtuen pohjoisella pallonpuoliskolla on talvella suhteellisen lyhyt valoisa-aika, jolloin myös optisten instrumenttien toiminta-aika päivästä on lyhyt. Pilvet aiheuttavat myös haittaa optisen datan käytölle, jolloin lumien sulamisaikaan saattaa tulla sellaisia päiviä, jolloin ei ole mahdollista saada ollenkaan optista dataa. Tällöin voi myös jäädä estimoimatta esimerkiksi lumen peittämän alan laajuus ennen mahdollisia tulvia. Nämä ongelmat voidaan korjata käyttämällä sellaista aallonpituusaluetta, joka ei ole riippuvainen säästä tai auringonpaisteesta. Tämä onnistuu käyttämällä mm. radiometrejä ja mikroaaltotutkia, mutta tässä seminaariesitelmässä keskityn SAR-tutkiin.

Synteettisen apertuurin tutkan suurimmat hyvät puolet ovat korkea spatiaalinen resoluutio (5-100 metriä C-kaistalla), riippumattomuus säästä ja spatiaalinen peittävyys. Temporaalinenkin resoluutio vaihtelee päivästä viikkoon. Yksi suurimmista lumen operatiivisen kaukokartoituksen vaatimuksista on satelliittikuvien peittävyys, joka on mm. Radarsat:in ScanSAR Wide A (SCW) -kuvausmoodilla 500 km x 500 km. Yksi tällainen kuva kykenee peittämään koko Pohjois-Suomen.

## 2 SAR-TUTKA JA TAKAISINSIRONTA ERI KOHTEISTA

Tämä osuus käsittelee SAR-tutkan ja tutkaimpulssin takaisinsironnan teoreettista taustaa. Tutkaimpulssin takaisinsirontaan lumialueelta vaikuttaa lumen sisältämä vesimäärä, eli onko se kuivaa vai märkää lunta, tietenkin lumen peittämän alan määrä, lumen alla olevan maanpinnan ominaisuudet sekä lumen yläpuolella olevan puuston määrä. Käsittelemme tässä osuudessa tarkemmin näitä tekijöitä.

### 2.1 Synteettisen apertuurin tutka

Synteettisen apertuurin tutka on aktiivinen mikroaaltoalueella toimiva instrumentti, ja se toimii lähettämällä elektromagneettisia aaltoja ja mittaamalla kohteesta sironnutta signaalia. Satelliiteissa olevat tutkat ovat toimineet 1.2 GHz:stä 9.65 GHz:iin olevalla taajuusalueella eli L-kaistasta X-

kaistaan, jonka avulla voidaan saada dataa, joka on riippumaton auringon valosta ja pilvistä.

Tutkat voivat lähettää ja vastaanottaa samaa polarisaatiota tai lähettää eri polarisaatiolla kuin vastaanotossa. Tällä hetkellä Kari Luojuksen lisensiaattityössä [1] tutkituissa ERS-2 -satelliitin SAR-instrumentissa ja Radarsat-1:n SAR-instrumentissa käytetään lähettämisessä ja vastaanotossa samaa polarisaatiota, joka ERS-2:lla vertikaalisesti polarisoitunutta ja Radarsat-1:llä horisontaalisesti polarisoitunutta. Molemmat instrumentit toimivat C-kaistalla n. 5.3 GHz:n taajuudella.

SAR-instrumentti mittaa takaisinsironneen signaalin intensiteettiä (tehoa) ja vaihetta, mutta lumen kaukokartoitukseen tarvitaan vain tietoa signaalin intensiteetistä. Kaava tutkan vastaanottamalle teholle, jonka vastaanottoantenni on sama kuin lähetysantenni:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2-1)$$

missä  $P_t$  on lähetetty teho,  $P_r$  vastaanotettu teho,  $G$  antennin vahvistus,  $\lambda$  aallonpituus ja  $R$  antennin ja kohteen välinen etäisyys sekä  $\sigma$  tutkapaikkipinta-ala. Takaisinsironnan voimakkuus ilmoitetaan yleensä takaisinsirontakertoimenä, joka saadaan jakamalla tutkapaikkipinta-ala valaistun kohteen geometrisellä alalla  $A_{ill}$  seuraavasti:

$$\sigma^0 = \left\langle \frac{\sigma}{A_{ill}} \right\rangle \quad (2-2)$$

Takaisinsirontakerroin voidaan kirjoittaa myös muotoon:

$$\sigma^0 = \frac{P_r (4\pi)^3}{P_t \lambda^2} \cdot \frac{1}{\int_{(A_{ill})} \frac{G_n^2}{r^4}} \approx \frac{P_r (4\pi)^3 r'^4}{P_t \lambda^2 G^2 A'_{ill}} \quad (2-3)$$

missä  $G_n^2$  on antennin vahvistus,  $r'^4$  keskimääräinen etäisyys valaistulta alueelta ja  $A'_{ill}$  efektiivinen valaistu alue. Tuntiessa kaavan 2-3 parametrit takaisinsirontakerroin voidaan siis laskea, jota voidaan pitää signaalin intensiteetin estimaattina.

SAR-tutkalla on myös erittäin hyvä spatiaalinen resoluutio, joka tyypillisesti on metrejä tai kymmeniä metrejä. Radarsatin C-kaistaisella SAR-instrumentilla päästään parhaimmillaan 9 metriin sekä atsimuti että viistosuunnassa. Näin erinomaiseen spatiaaliseen resoluutioon päästään instrumentin teknisten ratkaisujen vuoksi, kun instrumentin pinta-alaa ikäänkuin kasvatetaan käyttämällä hyväksi instrumentin etenemistä lennonsuuntaisesti sekä doppler-siirtymää. Viistosuuntaiseen resoluutioon päästään käsittelemällä takaisinsirontapulssia pulssin kompressoititeknikalla.

### 2.1.1 Optisten instrumenttien ja SAR-instrumenttien vertailu

Seuraavassa on taulukko (taulukko 1) lumen kaukokartoitukseen soveltuvien instrumenttien ominaisuuksista.

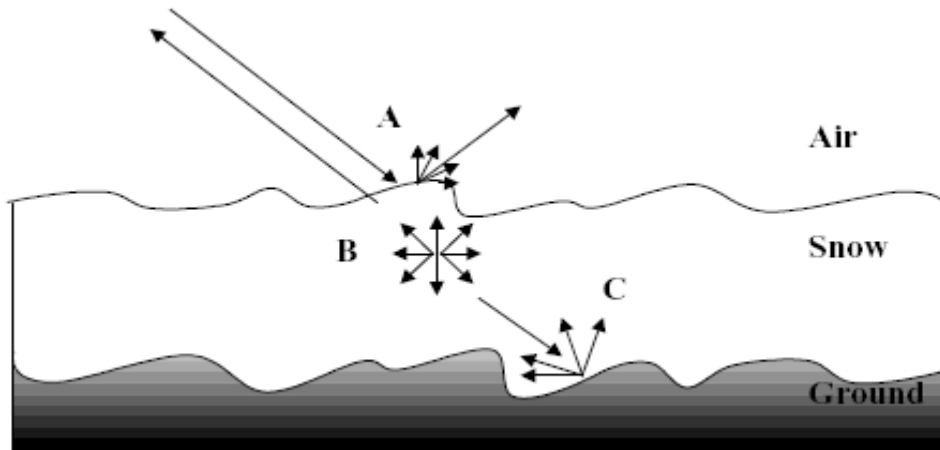
	<i>Terra tai Aqua Modis</i>	<i>NOAA AVHRR (kanava 1)</i>	<i>ERS-2</i>	<i>Radarsat-1 SCW</i>
Instrumentin tyyppi	optinen	optinen	SAR	SAR
Kuvakoko tai keilausalueen leveys	2330 km (keilausalueen leveys)	3000 km (keilausalueen leveys)	100 km x 100 km	500 km x 500 km
Maanpinnan erotuskyky	500 m	1.09 km (nadiiri)	30 m	100 m
Taajuus tai aallonpituus	0,41-14,4 mikrometriä (aallonpituus)	0.58-0.68 mikrometriä (aallonpituus)	5,3 GHz	5,3 GHz
Polarisaatio	-	-	VV	HH

*Taulukko 1: Taulukko eri instrumenttien ominaisuuksista*

## 2.2 Tutkan mittaama takaisinsironta

Tutkan mittaamaan takaisinsirontakertoimeen vaikuttavat monet kohteen ominaisuudet. Osa signaalista siroaa takaisin pintasirontana kahden aineen rajapinnasta ja osa siroaa takaisin aineen sisältä tilavuussirontana. Kuten kuvasta 1 näkyy suurin osa lumen peittämän maan takaisinsironnasta tapahtuu lumen ja ilman rajapinnassa (A), lumen sisällä (B) ja lumen ja maan rajapinnassa (C) [2]. Näiden takaisinsirontatyyppien lisäksi sirontaan vaikuttaa metsä. Takaisinsirontaa tapahtuu korkealta lehvästöstä ja puiden rungoista.

C-kaistalla metsien takaisinsironta on merkittävää ja kasvaa puuston biomassan kasvaessa. Tästä johtuen lumen kaukokartoituksessa metsien vaikutus tuloksiin on otettava huomioon, josta lisää myöhemmin.



Kuva 1: Takaisinsirontatyypit A,B ja C [2]

### 2.2.1 Takaisinsironta lumesta

Lumi koostuu pääosin jääkiteistä, vedestä ja ilmasta ja kokee muutoksia mm. sateen ja tuulen takia. Lumen tiheys kasvaakin tyypillisesti ajan kuluessa. Takaisinsirontaan lumesta vaikuttavat seuraavat parametrit [1]:

- nestemäisen veden pitoisuus
- lumikerroksen paksuus
- lumikerroksen tiheys
- lumen lämpötila
- lumen pinnan karkeus
- maanpinnan karkeus lumikerroksen alla
- lumihiutaleiden koko ja muoto

Lumi luokitellaan perinteisesti kahteen luokkaan märkään lumeen ja kuivaan lumeen sen sisältämän veden mukaan. Lumen vesipitoisuus vaikuttaa eniten takaisinsirontaan lumesta.

#### 2.2.1.1 Kuiva lumi

Suurin osa kuivan lumen takaisinsironnasta syntyy lumen tilavuussironnasta ja lumen ja maan rajapinnasta. Kun lumen tiheys kasvaa, lumen pintasironta kasvaa suurentaen takaisinsirontakerrointa, mutta kohtauskulman kasvaessa takaisinsirontakerroin pienenee. Lumen ja maan rajapinnassa tapahtuva takaisinsironta muodostaa kuitenkin suurimman osa koko takaisinsironnasta.

### 2.2.1.2 Märkä lumi

Lumikerroksessa olevan vesimäärän kasvaessa lumikerroksen absorptiokyky kasvaa ja maanpinnan osuus takaisinsirontaan pienenee. Tällöin takaisinsironta riippuu paljon lumikerroksen vesipitoisuudesta sekä lumen pinnan karkeudesta. Yleisesti märkä lumi laskee takaisinsirontaa.

### 2.2.2 Takaisinsironta maakerroksesta

Maakerroksen takaisinsirontaan vaikuttavat itse maanpinta ja kasvillisuus, mutta kasvillisuuden osuus tästä on tyypillisesti hyvin pieni, koska varsinkin havumetsävyöhykkeellä lumen alla olevaa kasvillisuutta on tavallisesti melko vähän. Maanpinnan takaisinsironta riippuu pääosin maaperän kosteudesta, maaperän eri ainesosista sekä pinnan karkeudesta. Käytettäessä tutkan C-kaistaa takaisinsironta kasvaa maaperän kosteuden kasvaessa.

Maanpinnan karkeus riippuu kohtauskulmasta. Pienillä kohtauskulmilla takaisinsironta pienenee pinnan karkeuden kasvaessa, kun taas suurilla kohtauskulmilla ja pinnan karkeuden kasvaessa havaittu takaisinsirontakin kasvaa.

C-kaistan takaisinsironta on tavallisesti useita desibelejä korkeampi märälle maalle kuin märälle lumelle ja on tällöin usein samalla tasolla kuin kuivan lumen takaisinsironta. C-kaistan yhden polarisaation kuvat eivät mahdollista märän maan ja kuivan lumen erottamista toisistaan [4].

### 2.2.3 Takaisinsironta puustosta

Puustosta tuleva takaisinsironta muodostaa yhden osan havumetsävyöhykkeeltä tulevasta takaisinsironnasta, joka olisi otettava huomioon lumen kaukokartoituksessa. Puuston takaisinsirontaan vaikuttavat eniten puuston kasvava biomassan määrä kasvattamalla takaisinsirontaa [4] sekä latvuston kosteus, jonka kasvaessa takaisinsirontakin kasvaa [5]. TKK:n SCA:n estimointimetodi tarvitsee tiedon puuston biomassasta, jotta puuston aiheuttama osuus takaisinsironnasta voidaan kompensoida.

## 3 LUMEN PEITTÄMÄN ALAN ESTIMOINTI JA METODIT

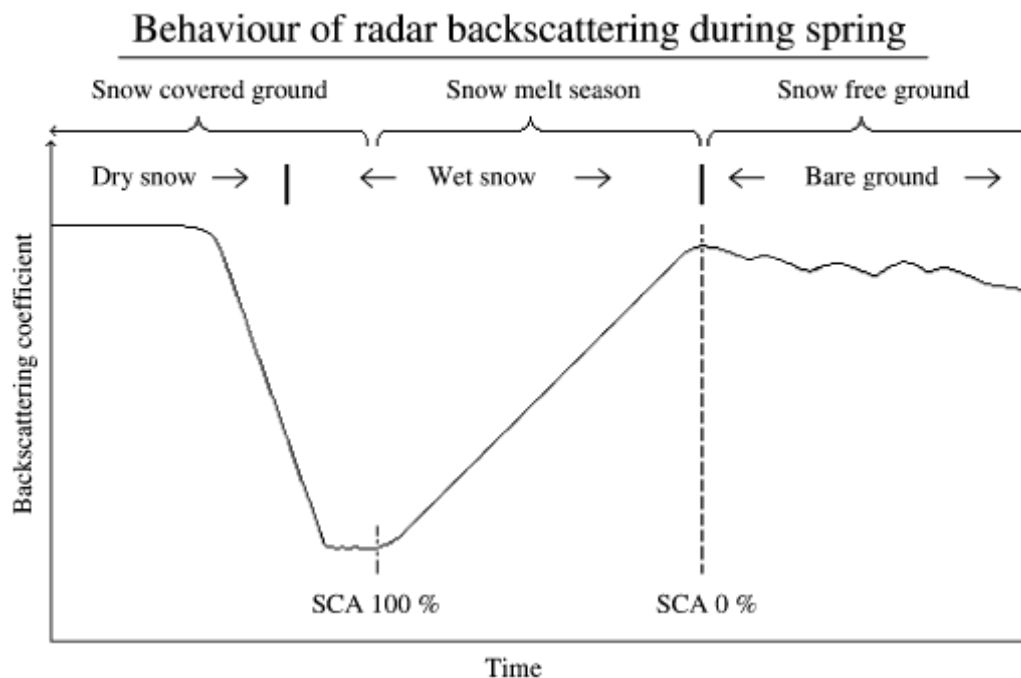
Takaisinsirontan käyttäytymisen tunteminen havumetsävyöhykkeellä luo pohjan lumen sulamisen seurantaan. C-kaistan SAR-instrumentin kyky erottaa märän lumen peittämät alueet havumetsävyöhykkeellä perustuu takaisinsirontakertoimen pienenemiseen lumen sisältämän kosteuden kasvaessa. Tämä on todettu sekä Kanadassa tehdyissä ERS-1:n SAR-instrumentin mittauksissa (N. Baghdadi ym., 1997) että Suomessa tehdyissä mittauksissa (Jarkko Koskinen ym., 1997) luoden pohjan TKK:n SCA-metodin syntymiselle. Kanadassa tehdyissä tutkimuksissa todettiin HH-polarisoituneet C-kaistan Radarsat:in SAR-mittaukset ja VV-polarisoitunut ERS –data käyttökelpoisiksi sulavan lumen kaukokartoitukseen (N. Baghdadi ym. 2000).

TKK:n algoritmi käyttää kahta referenssikuvaa samalla katselugeometrialla edustaen lumetonta tilannetta ja märän lumipeitteen tilannetta. Tutkimuksessa [1] algoritmia käytettiin suuremmille

alueille kuin yksittäisille pikseleille, ja nämä suuremmat alueet olivat valuma-alueita. Näiden käyttö algoritmissa onkin järjeenkäypää, koska lumitilanteen selvittäminen yksittäisiltä pikseleiltä ei palvelisi algoritmin käyttötarkoitusta: selvittää tietyn alueen lumen peittämän alan määrää.

### 3.1 TKK:n metodi lumen peittämän alan estimointiin

C-kaistalla märän lumen takaisinsironta on tyypillisesti pienempää kuin kuivan lumen tai paljaan maan, kuten kuvasta 2 [1] selviää. Ennen lumen sulamiskautta takaisinsironta on korkeimmillaan ja alkaa laskea lumen tiivistyessä, koska silloin myös lumen vesiarvo kasvaa. Lumipeitteen ollessa täydet 100% ja kevään koittaessa lumen sulamiskausi alkaa ja takaisinsirontakerroin pienenee lumen sulaessa. Takaisinsirontakerroin on taas korkea, kun kaikki lumi on sulanut. Tätä takaisinsirontakertoimen vaihtelua käytetään hyväksi lumen peittämän alan (SCA) estimointiin.



Kuva 2: Takaisinsirontakertoimen käyttäytyminen talvikaudella

TKK:n metodi tarvitsee tiedon kohdealueen puuston biomassajakaumasta sekä kaksi referenssikuvaa. Toinen edustaa märän lumen tilannetta lumen sulamiskauden alkaessa, kun lumi peittää täysin maan, ja toinen lumetonta tilannetta lumen sulamiskauden lopussa, kun kaikki lumi on sulanut ja maa on vielä märkää. Lumettoman referenssikuvan tilanteessa maan pitäisi olla kuitenkin vielä märkää, ettei maan kosteuden ja kasvillisuuden aiheuttamat ajalliset vaihtelut vaikuttaisivat lumipeitteen estimointiin.

#### 3.1.1 Puuston kompensointi

Puuston kompensoinnin metodista saatu estimaatti puuston aiheuttamalle osuudelle koko



takaisinsironnasta voidaan erottaa mitatusta takaisinsirontakertoimesta. Takaisinsirontakerroin biomassan funktiona [1]:

$$\sigma^0(V, a, \theta, \sigma_{surf}^0) = \sigma_{surf}^0 \cdot e^{\frac{p_1 \cdot a \cdot V}{\cos(\theta)}} + p_2 \cdot a \cdot \cos(\theta) \cdot [1 - e^{\frac{p_1 \cdot a \cdot V}{\cos(\theta)}}] \equiv \sigma_{surf}^0 \cdot t(V, a, \theta)^2 + \sigma_{can}^0(V, a, \theta) \quad (2-4)$$

Missä V on metsän biomassa (m<sup>3</sup>/ha), σ on takaisinsirontakerroin maasta tai lumikerroksesta ja θ on kohtauskulma. p<sub>1</sub> ja p<sub>2</sub> ovat polarisaatioertoimia. Biomassajakauma jaetaan biomassaluokkiin V<sub>i</sub>, ja minimoidaan seuraavaa funktiota:

$$\min_{a, \sigma_{surf}^0} \sum_{i=1}^n w_i \cdot (\langle \sigma_{OBSERVED, i}^0 \rangle - \sigma^0(V_i, a, \sigma_{surf}^0))^2 \quad (2-5)$$

Tästä funktiosta saadut parametrit a ja σ<sub>surf</sub><sup>0</sup> lisätään funktioon 2-4, kun puuston biomassa on 0 m<sup>3</sup>/ha. Tästä saatua metsäkompensoitua takaisinsirontakerrointa käytetään lineaarisessa interpoloinnissa [4], jonka mukaan mitattu pinnan takaisinsirontakerroin on lineaarinen kombinaatio lumen peittämän alan takaisinsironnasta ja lumettoman alan takaisinsironnasta. Siten voimme kirjoittaa SCA:n referenssikuvien ja

$$SCA = 100 \cdot \frac{\sigma_{surf}^0 - \sigma_{ground, ref}^0}{\sigma_{snow, ref}^0 - \sigma_{ground, ref}^0} \quad (2-6)$$

TKK:n SCA-metodi tuottaa lumen peittämän alan estimaatit erikseen avoimille ja metsäisille alueille. Tällöin kaavassa 2-6 käytetään joko avoimen maaperän takaisinsirontakertoimia tai metsäkompensoituja takaisinsirontakertoimia.

## 4 TARKKUUDEN ESTIMOINTI

Seuraavaksi käsittelemme kehitetyn metodin tarkkuutta sekä ERS-2 -datan että Radarsat SCW -datan kannalta.

### 4.1 Tarkkuuden estimointi käyttäen ERS-2 sekä Radarsat SCW -dataa

Testialueena käytettiin Pohjois-Suomessa Lokan aluetta ja SCA-estimaatit laskettiin testialueen jokaiselle valuma-alueelle erikseen. Puusto jaettiin viiteen biomassaluokkaan, joita sitten käytettiin kuvien SCA-estimaatioiden laskennassa. Osa kuvista valittiin lumen sulamiskauden alun referenssikuviksi ja osa lumen sulamiskauden lopun referenssikuviksi. Saatuja tuloksia verrattiin SYKE:n vesistömallijärjestelmän mallisimulaatioihin ja laskettiin RMSE (Root Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error), bias-luku sekä korrelaatiokerroin.

Taulukossa 2 näkyy metsäkompensoinnin merkitys ERS-2 -datalta lasketulle SCA-estimoinnille. RMSE:n kohdalla virhe huomattavasti pienenee. Tarkkuuden estimoinnissa päädyttiin myös siihen, että referenssikuvat voivat olla eri lumikausilta, jolloin kehitetty metodi toimii vielä paremmin.

Radarsatin SCW -dataa kattaen koko Pohjois-Suomen verrattiin optiseen dataan (NOAA/AVHRR ja Terra/MODIS) ja siitä saatuun SCA-estimaattiin ja todettiin, että virhe pienenee edelleen verrattuna ERS-2 -dataan (taulukko 3). Kuvassa 3 näkyy Radarsatin SCW -kuvilta estimoitua SCA:ta.

TABLE IV  
SIGNIFICANCE OF FOREST COMPENSATION

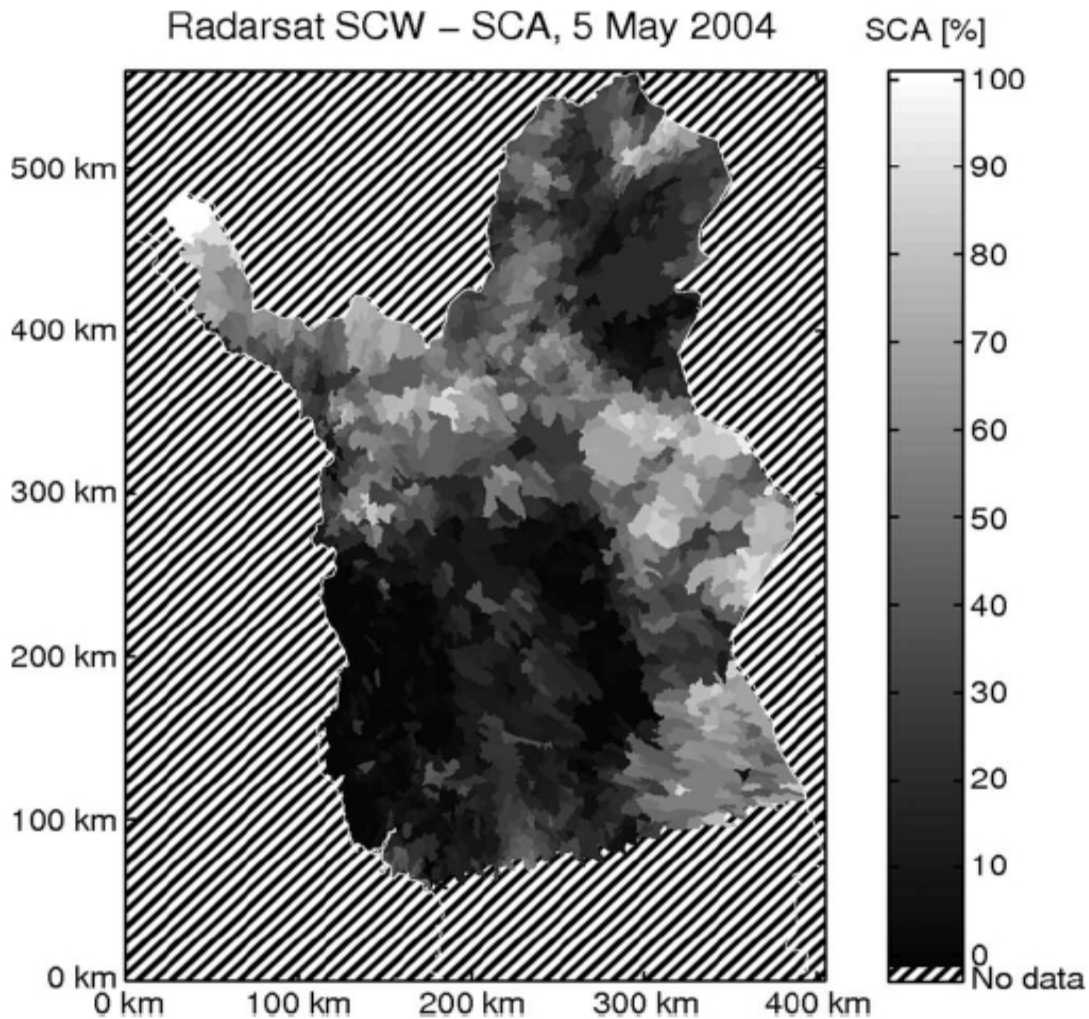
	All combinations		Best ref. image pair	
	No forest compensation	Forest compensation	No forest compensation	Forest compensation
RMSE	0.217	0.207	0.195	0.179
Mean abs. error	0.159	0.154	0.132	0.119
Bias	+0.039	+0.043	-0.038	-0.049
Correlation coefficient	0.841	0.860	0.871	0.896

*Taulukko 2: Tarkkuus metsäkompensaatiolla ja ilman ERS-2 -datalla [1]*

TABLE III  
OVERALL ACCURACY ANALYSIS FOR THE TKK SCA METHOD  
(OPTICAL DATA-DERIVED ESTIMATES USED AS REFERENCE)

	Yearly datasets		Complete dataset
	2004	2005	
RMSE	0.132	0.158	0.145
Mean abs. error	0.090	0.107	0.099
Bias	0.032	-0.050	-0.007
Correlation coefficient	0.948	0.885	0.923
No. of samples	2170	1997	4167

*Taulukko 3: Tarkkuus Radarsat SCW -datalle [1]*



Kuva 3: Radarsatin SCA-estimointia [1]

## 5 YHTEENVETO

Kuten virheanalyysissä todettiin, Radarsatin SCW-datan kuvat toimivat lumen sulamisen seurannassa oikeastaan paremmin kuin ERS-2 -data. Nähtiin myös, että puuston kompensointi kannattaa. Puuston kompensointi tosin vaatii tietoa puuston biomassasta, jonka hankkiminen kaikissa maissa ei välttämättä ole niin helppoa kuin Suomessa.

Tässä seminaariesitelmässä esitelty TKK:n metodi lumen sulamisen estimoinnille on ollut käytössä SYKE:ssä vuoden 2006 lumen sulamiskaudella. SAR-kuvat tuovat lumen kaukokartoitukseen varmuutta datan saatavuudelle. Nyt kesällä 2007 laukaistava Radarsat 2 tuo kiinnostavia ulottuvuuksia lumen kaukokartoitukselle. Se pystyy mittaamaan täydellä polarisaatiolla, jonka avulla pystytään mittaamaan lumen vesipitoisuutta. Tämän tiedon yhdistäminen esim. SCA-estimaatioon saattaisi auttaa aiemmin esille tuodun haitta puolen, kuivan lumen erottamisessa mörästä maasta, pienentämisessä.

## 6 LÄHDELUETTELO

- [1] Kari Luojus, "Operational Snow-Covered Area Estimation for Boreal Forest Zone Using Spaceborne Radar", lisensiaattityö, Teknillinen Korkeakoulu, 2007
- [2] Jarkko Koskinen, "Snow Monitoring Using Microwave Radars", tohtorin väitöskirja Teknillisen Korkeakoulun Avaruustekniikan laboratoriosta, 2001
- [3] J. Perälä ja M. Reuna, "The Areal and Time Variability of Snow Water Equivalent in Finland", Publication of the Water and Environment Administration, A56, s. 257, 1990
- [4] J. Koskinen ym., "The Use of ERS-1 SAR data in snow melt monitoring", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 35:601-610, 1997
- [5] F. Ulaby ym. "Microwave Remote Sensing, Active and Passive", Volume III, Artech House, s. 1100, 1986