



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Kaukokartoitus lumen vesiarvon seurannan tukena

Aalto-yliopiston insinöörیتieteiden korkeakoulun
maankäyttötieteiden laitoksella tehty diplomityö

Espoo, toukokuu 2014

Tekniikan kandidaatti
Mikko Moisander

Valvoja: Professori Henrik Haggrén
Ohjaajat: Diplomi-insinööri Heidi Sjöblom
Tekniikan Tohtori Sari Metsämäki

Tekijä Mikko Moisander

Työn nimi Kaukokartoitus lumen vesiarvon seurannan tukena

Laitos Maankäyttötieteiden laitos

Professuuri Fotogrammetria ja kaukokartoitus**Professuurikoodi** Maa-57

Työn valvoja Professori Henrik Haggrén

Työn ohjaaja(t) DI Heidi Sjöblom, TkT Sari Metsämäki

Päivämäärä 22.5.2014**Sivumäärä** 75**Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Lumen vesiarvoa kertoo, kuinka paljon vettä muodostuisi, jos lumikerros sulaisi välittömästi ja kokonaan nykyisellä paikallaan. Tietoa lumen vesiarvosta tarvitaan muun muassa tulvien ennakoimiseen, vesistöjen pintojen säännöstelyyn, maa- ja metsätalouden suunnitteluun sekä ympäristö- ja ilmastotutkimuksen tarpeisiin. Lumen vesiarvoa mitataan perinteisesti maastohavainnoilla tai interpoloimalla sääasemahavainnointoja, mutta havaintoverkot ovat harvoja ja mittauskertojen välit pitkiä. Tietoa lumen vesiarvosta voidaan saada myös avaruudesta käsin tehtävillä mikroaaltohavainnoilla. Satelliittinstrumenteilla on mahdollista saada havainnointoja päivittäin ja kattaa koko maapallo muutamassa päivässä. Radiometrihavainnot yksinään ovat melko epätarkkoja, koska kaikkea havaintojen oikeaan tulkitsemiseen tarvittavaa tietoa on harvoin saatavilla. Estimaattien tarkkuuden lisäämiseksi radiometrihavainnot voidaan yhdistää sääasemahavainnoista interpoloitavaan taustatietoon lumen vesiarvon spatiaalisesta jakautumisesta. Tässä työssä on tutkittu radiometrihavaintojen soveltuvuutta Suomen ympäristökeskuksen operatiivisen seurantatyön tarpeisiin. Data-assimilaatioon ja HUT lumen säteilymalliin perustuvia estimaatteja lumen vesiarvosta verrattiin lumilinjoilta tehtyihin maastohavaintoihin sekä näistä laskettuihin lumen aluevesiarvoihin. Työssä selvitettiin virheen suuruus sekä spatiaalinen ja ajallinen jakautuminen vuosina 2011–2013. Työssä on myös selvitetty eroihin vaikuttavat tärkeimmät tekijät sekä annettu ideoita, miten eri tavalla tuotetut estimaatit lumen vesiarvosta saataisiin lähemmäs toisiaan.

Avainsanat lumen vesiarvo, passiiviset mikroaallot, satelliittikaukokartoitus, operatiivinen hydrologia, mallintaminen, AMSR-E, SSM/I, lumilinjat, data-assimilaatio, HUT lumen säteilymalli

Author Mikko Moisander

Title of thesis Supporting operational observations of snow water equivalent with remote sensing data

Department Department of Real Estate, Planning and Geoinformatics

Professorship Photogrammetry and Remote Sensing **Code of professorship** Maa-57

Thesis supervisor Professor Henrik Haggrén

Thesis advisor(s) M.Sc.(Tech) Heidi Sjöblom, D.Sc.(Tech) Sari Metsämäki

Date 22.5.2014 **Number of pages** 75 **Language** Finnish

Abstract

Snow water equivalent (SWE) is used to measure how much water would form should whole of a snow pack melt instantly at its current location. Information about snow water equivalent is needed in many applications e.g. flood forecasting, controlling water level of power plant reservoirs, planning for forestry and crop irrigation and as input and control variable for many environment research purposes including climate change research. Traditionally snow water equivalent has been measured with in-situ samples or by interpolating weather station observations. Observation networks however tend to be quite sparse and time intervals between sampling can be long. Another option to provide information on snow water equivalent is by using space-borne microwave observations. Satellite instruments make it possible to have observations each day, and thanks to large swath of the instruments, global coverage can be reached within few days. Standalone radiometer observations can be somewhat imprecise. Correct interpretation of the brightness temperatures observed by the radiometer requires accurate information on attributes of the snow pack itself, on vegetation cover and about composition of atmosphere over the observed area. Rarely are all this data available for the entire area observed by the instrument. To increase the reliability and the accuracy of snow water equivalent estimates, radiometer observations can be assimilated with background information about the spatial distribution of snow depth. This information can be derived from synoptic weather station network. In this thesis work the suitability of radiometer data for purposes of the Finnish environment institute's operational observations of snow water equivalent is investigated. Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E) and Special Sensor Microwave / Imager (SSM/I) data interpreted with Helsinki University of Technology (HUT) snow emission model and assimilated with snow depth data from Finnish Meteorological synoptic weather stations from years 2011 to 2013 are compared with in-situ observations from Finnish snowline network and with areal snow water equivalents calculated thereof. Error rates and spatial and temporal distribution of differences in snow water equivalent between products are investigated, and factors affecting the difference and suggestions how to narrow down the difference are given.

Keywords snow water equivalent, passive microwaves, satellite remote sensing, operative hydrology, modelling, AMSR-E, SSM/I, snow lines, data-assimilation, HUT snow emission model

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	Teoria.....	3
2.1	Työn motivaatio	3
2.2	Työn tavoitteet	3
2.3	Hydrologia.....	3
2.3.1	Valuma-alue.....	4
2.3.2	Lumen ominaisuudet ja morfologia.....	4
2.3.3	Lumen vesi-arvon mittaaminen.....	4
2.3.4	Vesistömallijärjestelmä.....	7
2.4	Kaukokartoitus ja mikroaaltoradiometria	8
2.4.1	Näkymä, erotuskyky ja resoluutio	11
2.4.2	Mikroaallot ja lumi	12
2.4.3	Käytetyt instrumentit	14
3	Tutkimusaineistot ja laskentamenetelmät.....	18
3.1	Valitut lumilinjat	19
3.2	Lumen vesi-arvon laskenta lumilinjahavainnoista	19
3.3	Lumilinjahavaintojen aikainterpolointi lumilinjamallin avulla.....	20
3.4	Hilakartta.....	22
3.5	Lumen vesi-arvon laskenta radiometriahavainnoista.....	23
3.6	Lumen vesi-arvokartan tuottaminen radiometriahavainnoista.....	24
3.6.1	Assimilaatiotekniikka	24
3.6.2	Tutkimuksessa käytetty algoritmin versio	25
3.7	Säähavainnot	26
3.7.1	Lumilinjalaskennassa käytettävät sääasemat	26
3.7.2	Lumen syvyys	27
3.7.3	Lumilinjaluokitus.....	27
3.7.4	Metsäisyyskartta	28
3.7.5	Corine-land cover-maankäyttöluokitus.....	29
4	Tulosten analysointi ja johtopäätökset	30
4.1	Metodit	31
4.2	Analyysin työvaiheet.....	31
4.3	Erot tutkimussuunnitelmaan.....	32
4.4	Vesi-arvokarttojen vertailu	32
4.5	Lumilinja- ja radiometriahavaintojen vertailu	35
4.5.1	Erot lumen vesi-arvossa keskimäärin koko aineistossa	35

4.5.2	Erot lumen vesiarvossa valituilla lumilinjoilla	36
4.6	Erojen syyt	41
4.6.1	Tiheys.....	42
4.6.2	Lumen syvyys	42
4.6.3	Lumilinjahavaintojen virheet ja lumilinjalaskennan oletukset	44
4.6.4	Lumilinjalaskennan erot teoriaan nähden	45
4.6.5	Havainto- ja laskentaympäristön laajuus	48
4.6.6	Inversiomallin oletukset ja radiometrihavainnon virheet	50
4.6.7	Hilakartan epävarmuudet	53
4.7	Tapaus: Lauhavuori.....	54
4.8	Laskennan parantaminen alueellisesti sovitettujen tiheysfunktioiden avulla	55
4.8.1	Tiheysfunktiot	55
4.8.2	Vaikutus vesiarvoon	55
4.9	Johtopäätökset ja pohdintaa	59
5	Kehitys- ja jatkotutkimusideoita.....	62
5.1	Lumen syvyys	62
5.1.1	Sääasemalistan suodatuksen poistaminen.....	62
5.1.2	Puuttuvan sääasematiedon korvaaminen edellispäivän lukemalla	62
5.1.3	Lumen syvyysmittausten täydentäminen lumilinjahavainnoilla.....	63
5.2	Lumen tiheys	63
5.2.1	Käytetyn oletustiheyden päivittäminen lumilinjamittauksiin perustuen	64
5.2.2	Tiheyden muutoksen mallintaminen.....	64
5.3	Lumilinjalaskenta	64
5.3.1	Maastotyyppien määrittelyt	64
5.3.2	Laskennan yhdenmukaistaminen	65
5.3.3	Maastotietojen parempi hyödyntäminen.....	65
5.3.4	Lumilinjojen edustavuuden tarkistus	65
5.4	Topologia ja maanpeite	65
5.4.1	Maanpeitteen huomiointi hilakartan laskennassa	66
5.4.2	Hilakartassa käytettävä tuulensuuntakertoimien päivitys.....	66
5.4.3	Rinnekorjauskertoimien suuruuden tarkistus.....	66
5.4.4	Topologiavaikutusten huomiointi radiometrikartan assimiloinnissa.....	66
5.5	Inversioalgoritmin kehittäminen	67
5.5.1	Hangen kerroksellisen rakenteen huomiointi	67
5.5.2	Matalampien taajuuksien käyttö	67
5.5.3	Maaperän ja lumihangen lämpötilojen huomiointi	67

6 Yhteenveto.....	68
Lähteet	71
Sähköiset lähteet	73
Julkaisemattomat lähteet.....	74

Liitteet (4 kpl)

Liite 1	Puuttuvien maastotyyppien vaikutus korjauskertoimiin	4 sivua
Liite 2	Muunnossäännöt Corine land cover → Lumilinjoilla käytettävät 6 maastotyyppiä	3 sivua
Liite 3	Jakaumien vaikutus tuotteiden väliseen eroon	4 sivua
Liite 4	Lumensyvyys interpoloinnista puuttuvilla sääasemilla 2–5.2.2012	2 sivua

Työssä esiintyvät lyhenteet

Lyhenne	Englanninkielinen nimi	Suomenkielinen nimi
ASMR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observation Systems	
AMSR2	Advanced Microwave Scanning Radiometer 2	
CORINE	Coordination of information on the environment	
DMSP	Defence Meteorological Satellite Program	
EEA	European Environment Agency	Euroopan ympäristökeskus
GEO, LEO, MEO	Geosynchronous, Low, Medium Earth Orbit	Geosynkroniset, matalat ja keskikorkeat kiertoradat
HUT	Helsinki University of Technology	Teknillinen korkeakoulu
IFOV	Instantaneous field of view	Hetkellinen näkymä
IL	Finnish Meteorological Institute	Ilmatieteen laitos
METLA	The Finnish Forest Research Institute	Metsäntutkimuslaitos
RMSE	Root Mean Squared Error	Jäännösneliövirhe
SSM/I	Special Sensor Microwave / Imager	
SSM/S	Special Sensor Microwave Imager / Sounder	
SWE	Snow Water Equivalent	Lumen vesiarvo
SYKE	Finnish Environment Institute	Suomen ympäristökeskus
WSFS	Watershed Simulation and Forecasting System	Vesistömallijärjestelmä

Kuvat

kuva 1: Reittikartta Raudanjoen lumilinjalalle	s5
Kuva 2: Lumen tiheyden määrittäminen lumipuntarin avulla	s5
Kuva 3: Lumilinjamittauksen havaintolomake	s6
Kuva 4: SYKE:n aktiivisessa käytössä olevat lumilinjat	s7
Kuva 5: Hilakartta, lumitilanne 10.2.	s7
Kuva 6: Vesistömallin simuloima hydrologinen kierto	s8
Kuva 7: Sähkömagneettisen säteilyn alueet ja ilmakehän läpäisevyys eri aallonpituuksilla	s10
Kuva 8: Tärkeimmät säteilylähteet, joista lumen määrää havaitsevan radiometrin signaali koostuu.	s11
Kuva 9: Kartiokeilaimen kuvausasetelma	s12
kuva 10: SSM/I:n kuvausgeometria	s15
kuva 11: SSM/I:n 24 h:n kuvausala	s16
Kuva 12: Tutkimusta varten valitut lumilinjat	s19
Kuva 13: Valuma-aluejako	s20
Kuva 14: Lumen vesiarvokäyrät	s22
Kuva 15: Data-assimilaatio vuokaaviona	s25
Kuva 16: Lumensyvyysasemien verkko	s26
Kuva 17: Lumilinjoilla käytetyt sääasemat	s26
kuva 18: Lumen syvyyden mittausmenetelmiä	s27
Kuva 19: Puuston keskimääräiset runkotilavuudet Suomessa	s29
Kuva 20: Lumen vesiarvot tuotettuna radiometrihavainnoista ja hilapisteistä tihennetyistä arvoista	s32
Kuva 21: Radiometri- ja lumilinjahavaintojen välisen keskimääräisen eron kehittyminen kevään edistyessä.	s34
Kuva 22: Radiometri- ja lumilinjahavaintojen väliset keskimääräiset erot 2011–2012	s35
kuva 23: Radiometri- ja lumilinjatuotteiden arvot lähellä toisiaan, lumilinjalla 1041401 Savitaipale	s39
Kuva 24: Radiometridatasta tuotettu ja lumilinjalla havaittu lumen vesiarvo kaukana toisistaan, Rautalampi	s40
Kuva 25: Interpoloinnista puuttuneiden sääasemien sijainti suhteessa radiometrillä ja lumilinjamittauksilla saatujen lumen vesiarvojen välisiin eroihin	s43
Kuva 26: Sääasemilla havaitut lumen syvyydet ja puuttuvien sääasemahavaintojen vaikutus interpoloituun lumen syvyyteen	s44

Kuva 27: Pienten valuma-alueiden lumilinjat ja ero lumen vesiarvokarttojen välillä	s48
Kuva 28: Laskenta-alueen vaikutus	s50
Kuva 29: Talven 2011 kuvaajat lumilinjalle 1490501 Ullava, Alikylä	s57
Kuva 30: Talven 2011 kuvaajat lumilinjalle 1673701 Kattilamaa, Kolari	s57
kuva 31: Talven 2011 kuvaajat lumilinjalle 1020101 Tohmajärvi	s58
Kuva 32: Talven kuvaajat lumilinjalle 1654801 Salla, Kellosele	s59

Taulukot

Taulukko 1: Lumimallissa käytetyt K:n arvot (mm/°C)	s21
Taulukko 2: Analyyseissä käytettävät termit ja muuttujat	s30
Taulukko 3: Työn eteneminen	s31
Taulukko 4: Radiometrihavaintojen ja lumilinjojen valuma-aluearvojen välisten erojen keskiarvot, keskihajonnat, vaihteluvälit ja jäännösneliövirheet (RMSE) koko aineistolle	s36
Taulukko 5: Radiometrihavaintojen ja lumilinjojen valuma-aluearvojen välisten erojen keskiarvot, vaihteluvälit ja keskihajonnat valituille 21 linjalle sekä radiometrihavaintojen jäännösneliövirheet (RMSE) suhteessa lumilinjoilta eri ympäristöissä laskettuun lumen vesiarvoon.	s37
Taulukko 6: Lumilinja 1041401 Savitaipale tunnusluvut 2011	s39
Taulukko 7: Rautalampi 2011, tunnusluvut	s41
Taulukko 8: Lumen syvyys maastotyyppin mukaan ja sääasemilla havaitut lumensyvyydet ja niistä interpoloitu keskiarvo lumilinjan 1041401 Savitaipale ympäristössä.	s47
Taulukko 9: Radiometrihavaintoihin perustuvien ja eri laskentaympäristössä laskettujen lumen vesiarvojen jäännösneliövirheiden erot	s49
Taulukko 10: Lumen syvyydet sääasemilla Lauhavuoren lumilinjan ympäristössä	s54
Taulukko 11: Tiheysfunktioiden erot maastohavaintoihin nähden	s56
Taulukko 12: Tiheysfunktioiden vaikutus vesiarvoon	s56

1 Johdanto

Joka vuosi suurella osaa pohjoista pallonpuolisko lämpötila laskee kuukausien ajaksi pak-
kasen puolelle, meret, järvet ja joet jäätyvät ja maan peittää vähintään muutaman sentin,
enimmillään jopa yli kahden metrin paksuinen lumivaippa. Lumi heijastaa auringon valoa
voimakkaasti ja on yksi tärkeimmistä planeettamme energiatasetta ja ilmastoa säätelevistä
tekijöistä. Lumi vaikuttaa paitsi eläinten ja kasvien ravinnonhankintaan ja pesimiseen,
myös ihmisen kykyyn liikkua ja hyödyntää ympäristöään. Monilla alueilla merkittävä osa
juomakelpoisesta vedestä on peräisin lumen ja jään jokakevähäisestä sulamisesta, ja toisaalla
taas sulamisen nopeus voi aiheuttaa ongelmia liian suurten vesimäärien muodossa.

Vuosina 1981–2010 Suomessa satoi keskimäärin 400–750 mm vettä vuodessa [sähköiset
lähteet: Ilmatieteen laitos 2014a]. Noin puolet tästä sadannasta tuli lumena. Sateen määrä
Suomessa vaihtelee maantieteellisesti siten, että maan eteläosissa sataa enemmän mutta
pohjoisessa suurempi osa sateesta tulee kiinteässä muodossa. Keväällä lumen sulaessa va-
pautuvat vesimassat voivat aiheuttaa tulvia. Hankeen sitoutuneen veden maksimimäärä
ennen kevätulannan alkamista onkin tärkeä lähtötieto tulva- ja vesistömalleihin. Lisäksi
tieto on tärkeä vesitalouden suunnittelun ja maanviljelyn sekä ilmastotutkimuksen kannal-
ta. Lumen määrä on oleellinen tieto myös rakennusten lumikuormavaroituksia ja metsän-
hoidon suunnittelua varten.

Lumen määrän mittana käytetään termiä lumen vesiarvo (engl. snow water equivalent /
SWE), joka saadaan lumen syvyyden ja tiheyden tulona ja kertoo kuinka paksu kerros vettä
saataisiin, jos lumi sulaisi paikallaan. Vesiarvon yksikkö on mm, jonka lukuarvo vastaa
yhtä suurta lumikuormaa yksikössä kg/m^2 . Perinteisesti vesiarvoa on mitattu maastoha-
vainnoilla sekä arvioitu sääasemien sadanta- ja lämpötilatietojen avulla. Ongelmaksi muo-
dostuu yleensä havaintojen ajallinen tiheys sekä mittausverkon ja sääasemien maantieteel-
linen kattavuus. Havainnot ovat myös luonteeltaan pistemäisiä, ja niiden soveltaminen laa-
jempaan ympäristöön vaatii työtä ja lisää tuloksien epävarmuutta.

Yksi lupaavimmista keinoista puuttuvien havaintojen tuottamiseen on kaukokartoitus. Sa-
telliitteihin sijoitetulla mikroaltradiometrillä vesiarvosta voidaan saada havaintoja laa-
joilta alueilta ja parhaimmillaan useita kertoja vuorokaudessa. Mikroaltradiometriin perustuvien
havaintomenetelmien hyvänä puolena ovat riippumattomuus sää- ja valaistusoloista, eli
havaintoja saadaan kerättyä myös pilvien läpi ja yöllä. Radiometriin tyypillinen pyyh-
käisyveys on 1000–2000 km, ja naparataisilla satelliiteilla koko maapallo saadaan katet-
tua yleensä muutamassa vuorokaudessa. Suuren havaintopinta-alan kääntöpuolena on suh-
teellisen karkea erotuskyky, joka vaihtelee muutamasta kilometristä useisiin kymmeniin
kilometreihin. Lisäksi mikroaltradiometrihavainnot ovat herkkiä nestemäiselle vedelle, mikä rajoit-
taa havaintojen käyttökelpoisuutta määrän lumen aikana, esimerkiksi keväällä sulamisen
alettua.

Vesiarvon arvioimiseen mikroaltradiometrihavaintojen avulla on kehitetty useita menetelmiä, ja
globaalissa mittakaavassa saadut alueelliset ja ajalliset keskiarvot ovat olleet erittäin hyviä.
Mallintamiseen liittyy kuitenkin vielä epävarmuuksia varsinkin, kun siirrytään maantieteel-
lisesti rajatulle alueelle. Operatiivisen käytön kannalta päivittäishavaintojen niin satunnai-
set kuin systemaattisetkin virheet voivat olla liian suuria.

Jotta kaukokartoituksesta saataisiin työkalu vesiarvon operatiiviseen päivittäisseurantaan,
on selvítettävä radiometrihavaintojen ja niitä hyödyntävän laskennallisen menetelmän

tarkkuudet. Lisäksi on selvitettävä, minkälaisilla sääoloilla, lumen ominaisuuksilla ja havaintoalueen koolla saadut arvot pätevät ja miten tarkkuuksia voitaisiin tarvittaessa parantaa.

Tässä työssä keskitytään radiometrihavainnoista tuotettujen ja maastossa mitattujen lumen vesiarvojen välisiin eroihin Suomen alueella kolmena keväänä vuosina 2010–2013. Tarkastelun kohteena ovat virheen maantieteellinen ja ajallinen jakautuminen sekä havaintojen välisten erojen syyt. Lisäksi tarjotaan ehdotus, radiometrihavaintojen käyttökelpoisuuden lisäämiseksi maastohavainnoista kerättyjen lumen paikallisten ominaisuustietojen avulla.

Työ on osa laajempaa maa- ja metsätalousministeriön sekä ympäristöministeriön yhdessä rahoittamaa hanketta, jonka tarkoituksena on tutkia Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) operatiivisen toiminnan tehostamismahdollisuuksia kaukokartoitusdatan ja paikkatiedon avulla.

Luvussa kaksi esitellään tähän tutkimukseen liittyvät tieteenalat ja käydään läpi, miten lumen vesiarvoa Suomessa havaitaan. Tutustutaan myös lumen ominaisuuksiin ja lumen radiometrimittausten fysikaalisiin perusteisiin sekä lopuksi esitellään tutkimusmateriaalin tuottamiseen käytetyt satelliitti-instrumentit.

Luvussa kolme esitellään käytetyt havainto- ja laskentamenetelmät ja kerrotaan, kuinka maastossa tehtävistä syvyysmittauksista ja punnituksista sekä satelliittihavainnoista voidaan määrittää päivittäiset lumen vesiarvot.

Neljännessä luvussa verrataan eri mittausmenetelmillä tuotettujen lumen vesiarvojen eroja ja analysoidaan niiden suuruutta sekä maantieteellistä ja ajallista jakaumaa. Keskitymme myös havaittujen erojen syihin ja siihen, kuinka virhelähteet suhtautuvat toisiinsa. Lopuksi näytämme esimerkin avulla, kuinka radiometrituloksia voidaan tarkentaa maastohavainnoista kerättyjen lumen paikallisten ominaisuustietojen avulla.

Viidennessä luvussa annetaan ehdotuksia siitä, miten SYKellä käytössä olevia tuotteita ja menetelmiä voisi parantaa. Edellisen luvun tulosten ja esimerkkien perusteella hahmotellaan kuinka maastohavainnot saisi integroitua kaukokartoitukseen siten, että laskennassa käytettävät parametrit paremmin vastaisivat todellisia maasto-oloja myös lumilinjojen mitauspäivien välissä.

Luku kuusi kokoaa yhteen ja kertaa käsitellyt asiat.

2 Teoria

Tässä luvussa esitellään työn tavoitteet, työhön oleellisesti liittyvät tieteenalat sekä käytetyt mittausten menetelmät ja instrumentit.

2.1 Työn motivaatio

Tämä työ on osa GeoMon-hanketta, joka on maa- ja metsätalous ministeriön ja ympäristöministeriön yhdessä rahoittama kehityshanke SYKEn operatiivisten seuranta-prosessien tehostamiseksi ja kehittämiseksi kaukokartoituksen ja geoinformatiikan keinoin. Hankkeessa halutaan selvittää, voidaanko kaukokartoituksen avulla täydentää tai korvata nykyisiä havaintomenetelmiä, sekä tutkia mahdollisuuksia havaintojen tekemisen nykyistä suurempaan automatisointiin. Uuden informaation ja mahdollisten taloudellisten säästöjen lisäksi tämä tutkimus on muodostunut ajankohtaiseksi myös sen takia, että viime aikoina joillakin alueilla pätevän ja motivoituneen henkilöstön löytäminen maastohavaintojen tekemiseen on osoittautunut vaikeaksi.

2.2 Työn tavoitteet

Selvitetään lumilinjamittauksiin perustuvien lumen vesi-arvon aikasarjojen ja näistä tuotettujen vesi-arvokarttojen erot vastaavaan radiometrihavainnoista tuotettuun tietoon. Määritetään erojen suuruus, maantieteellinen ja ajallinen esiintyminen sekä etsitään syyt erojen takana. Tulosten perusteella arvioidaan, voidaanko SYKEn operatiivista lumen vesi-arvon seuranta parantaa kaukokartoitustuotteiden avulla.

Tutkitaan, miten laskentaympäristön laajuus vaikuttaa lumilinjahavainnoista laskettuun lumen vesi-arvon painotettuun keskiarvoon ja toisaalta tämän keskiarvon ja radiometrihavainnon eroon. Selvitetään kaukokartoitushavainnon herkkyyttä säähavaintojen tiheydelle sekä yleistä herkkyyttä eli sitä, miten kaukokartoitettu vesi-arvo muuttuu päivästä toiseen, jos kuitenkin ei sada eikä sulaa. Verrataan myös radiometrihavainnon herkkyyttä käytetyille instrumenteille, eli kuinka paljon eri instrumenteilla tehdyt havainnot samasta kohteesta ja samalla ajanjaksolla eroavat toisistaan ja mikä on käytetyn instrumentin vaikutus eroon maastohavaintoihin nähden.

Selvitetään, onko radiometrihavaintoja käyttävän laskennallisen kaukokartoitusmenetelmän tarkkuus riittävä lumen vesi-arvon operatiivisen seurannan tarpeisiin SYKEssä ja miten tarkkuutta voitaisiin tarvittaessa parantaa. Olettaen, että riittävä tarkkuus on saavutettavissa, tutkitaan, voidaanko lumen vesi-arvon seuranta parantaa perinteisiä menetelmiä ja kaukokartoitusta yhdistämällä. Tutkitaan mahdollisuuksia ajallisen ja spatiaalisen interpoloinnin parantamiseen eli siihen, voidaanko estimaatteja lumilinjojen ja havaintopäivien väliin jääville alueille ja jaksoille tarkentaa ja toimivatko mahdolliset parannukset koko maassa vai ainoastaan osalle linjoista.

2.3 Hydrologia

Hydrologia eli veden tiede on geofysiikan osa-alue, joka tutkii veden esiintymistä, ominaisuuksia ja kiertokulkua maapallolla. Erityisesti keskitytään veden kiertokulun eri vaiheisiin ja niiden välisiin kytköksiin erilaisten ilmasto-olojen ja fysiograafisten olojen vallitessa [Mustonen (toim.) 1986]. Tässä työssä ollaan kiinnostuneita lumesta ja sen ominaisuuksien, erityisesti vesi-arvon, mittaamisesta.

2.3.1 Valuma-alue

Valuma-alue määrittää maantieteellisen alueen, jolta vesi virtaa samaan vesistöön. Suomessa on käytössä neliportainen valuma-aluejako, jossa on määritelty päävesistöalueet ja sen alle kolme jakovaihetta (katso luku 3.2, kuva 13). Tässä työssä puhutaan usein valuma-alueen lumen vesiarvosta, jolla viitataan lumen keskimääräiseen vesiarvoon sillä 2. jakovaiheen valuma-alueella, jolla käsiteltävä lumilinja sijaitsee.

2.3.2 Lumen ominaisuudet ja morfologia

Lumi on sekoitus jääkiteitä, nestemäistä vettä ja ilmaa. Lumivaipan ominaisuudet määrittyvät pitkälti näiden kolmen raaka-aineen suhteellisten osuuksien perusteella.

Vastataneen lumen tiheyden määrittää ensisijaisesti tuulennopeus lähellä maanpintaa satamishetkellä. Suurilla tuulennopeuksilla jääkiteet hajoavat pienemmiksi ja pyöristyvät ja lumi kasautuu tiiviimmin kuin vastaavissa oloissa muuten. [Gray & Male toim. 1981] Toinen määräävä tekijä on satavan lumen lämpötila. Jos lämpötila on lähellä nollaa tai plussan puolella, sateen joukossa ja jääkiteiden pinnalla voi olla vesimolekyylejä, jotka toimivat ikään kuin voiteluaineena, jolloin jääkiteet liukuvat toistensa lomaan ja pakkautuvat tiukemmin. Pienillä tuulen nopeuksilla ja selkeästi pakkasen puolella olevassa säässä jääkiteiden välinen kitka pysäyttää ne heti, kun ne tulevat kosketuksiin toistensa kanssa, jolloin muodostuu kevyt, harva peite, jossa on välissä paljon ilmaa.

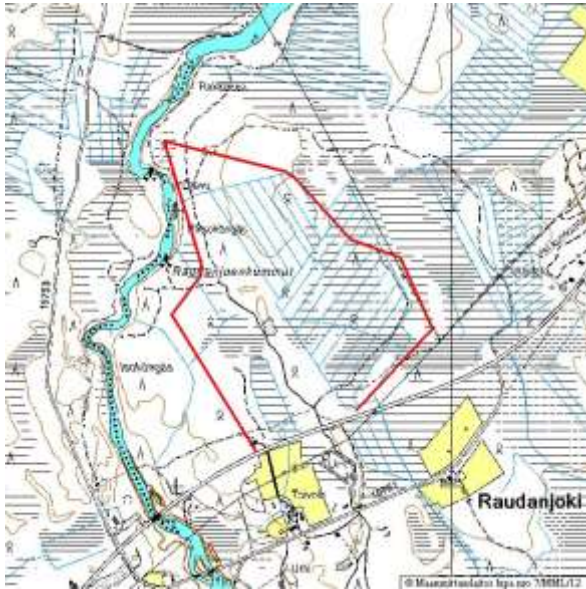
Ikääntyessään lumivaippa painuu kasaan. Sen tiheys kasvaa painovoiman ja tuulen vaikutuksen sekä termisen metamorfoosin seurauksena, kun jääkiteet osittain sulavat ja jäätyvät uudestaan ja muodostavat raekooltaan suurempia kiteitä. Koska sääolot vaihtelevat eri sadekertojen välillä, hankeen muodostuu sen vanhetessa useita keskenään erilaisia kerroksia, joiden välillä jääkiteiden raekoko ja lumen tiheys voivat vaihdella hyvinkin paljon. Lisäksi keskenään erilaiset kerrokset toimivat eristeinä, minkä seurauksena auringon säteilemä tai maaperään varastoitunut lämpö johtuvat eri tavalla kerrosten välillä. Tämä aiheuttaa sen, että myös lämpömuutokset ovat erilaisia hangen eri osissa.

2.3.3 Lumen vesiarvon mittaaminen

Lumen vesiarvo on hankeen sitoutuneen vesimäärän mitta ja tärkeä tieto niin tieteellisen tutkimuksen kuin usean käytännön sovelluksenkin kannalta. Ilmastotutkimus tarvitsee tietoa lumen vesiarvosta muutosmalliensa tarkkuuden arviointiin, vesistömallit käyttävät sitä syötetietona tulvien ennustamiseen, ja voimalaitokset tarvitsevat sitä altaiden pinnankorkeuksien säätelyä varten. Lisäksi lumen vesiarvon seurantaan käytettävä lumilinjaverkosto on hyödyllinen useiden lunta koskevien tutkimusten tulosten validointiin. Myös kattojen lumikuormavaroitukset perustuvat lumilinjahavaintoihin.

Lumen vesiarvo on perinteisesti mitattu SYKEssä lumilinjamittauksilla, joissa 2–4 km pitkällä reitillä tehdään yleensä 80 syvyysmittausta ja lumen tiheyden määrittämiseksi kahdeksan punnitusta. SYKE havainnoi yhteensä noin 150 lumilinjaa ympäri Suomea. Linjojen sijainti on esitetty kuvassa 4. Mittaukset suoritetaan talvikuukausina kerran kuussa ja osalla lumilinjajoista keväisin kahdesti kuussa. Reitit on suunniteltu siten, että ne edustavat kattavasti ympäristönsä maastotyyppisiä. Kuvassa 1 on pohjakartalle piirretty esimerkki lumilinjan reitistä. Mittausten perusteella lasketaan maastotyyppikohtaiset lumen vesiarvot, joita painotetaan lumilinjan vesiarvoa laskettaessa havaintojen lukumäärän mukaan ja valuma-alueen tai muun ympäristön vesiarvoa määritettäessä maankäyttöaineistosta määritetyn kiinteän maastotyyppijakauman mukaan.

Lumilinjojen ohjeellinen havaintotapa on ottaa syvyyshavainto aina 50 m välein ja yksi punnitus jokaista kahdeksaa syvyyshavaintoa kohti kuitenkin niin, että jokaisesta linjalla esiintyvistä maastotyypistä saataisiin vähintään yksi tiheyspunnitus. Punnitukset tehdään lumipuntarilla, johon kuuluu pohjapinta-alaltaan 100 cm²:n lieriö sekä liukupainovaaka (kuva 2). Havainnot kirjataan havaintolomakkeelle, johon merkitään havaitun syvyyden tai punnitustuloksen lisäksi myös mittauspaikan maastotyyppi, metsän tiheys tai metsänaukon läpimitta sekä mahdollisen rinteen viettosuunta ja jyrkkyys (kuva 3).



kuva 1: Reittikartta Raudanjoen lumilinjalle [Ympäristöhallinto 2014].



Kuva 2: Lumen tiheyden määrittäminen lumipuntarin avulla (kuva: Esko Kuusisto)

LUMENMITTAUS.....10..... p:nä ...JUUU.... kuuta 2000.....

Lumen syvyyssmittaus:									
Mittauspaikka No	Maaston muoto, Rinteen viettosuunta ja jyrkkyys	Metsäaukon läpimitta (likim.)	Metsän tiheys	Päiviprosentti	Sauvalla mitatut syvyydet cm				
					Aukealla	Metsäaukossa	Mäntyvalle- nsessa metsässä	Kuusivalle- nsessa metsässä	Lehtipuuvälle- nsessa metsässä
1	EI		3	5			28		
2	EI		3	5			21		
3	-		3	5			37		
4	E2		3	30			30		
5	E2		3	30			35		
6	-		3	20			50		
7	S2		3	70			15		
8	-		2	10			30		
9	N1		2	5			45		
10	N1		1	3			32		
11	N1		1	3			28		
12	N1		2	2			43		
13	NW1		2	2			62		
14	-		2	3			51		
15	NW1		1	3			36		
16	NW1		1	3			35		
17	NW1		1	3			32		
18	-		2	3			33		
19	-		2	5			28		
20	-		2	5			30		

Lumen tiheysmittaus:						
Paikka	Lienon asteikosta luetut lumen syvyydet cm	Puntarilukemat		Maa- rajassa jäätä cm	Paikka	Lienon asteikosta luetut lumen syvyydet cm
		Lieriö tyhjänä	Lieriössä lunta			
3	37	0	98	-	13	30
					13	34
						0
						80
						85
						2

Muut ilmoitukset merkitään viimeiselle sivulle
10

LUMENMITTAUS.....16..... p:nä ...huhti.... kuuta 2000.....

Lumen syvyyssmittaus:									
Mittauspaikka No	Maaston muoto, Rinteen viettosuunta ja jyrkkyys	Metsäaukon läpimitta (likim.)	Metsän tiheys	Päiviprosentti	Sauvalla mitatut syvyydet cm				
					Aukealla	Metsäaukossa	Mäntyvalle- nsessa metsässä	Kuusivalle- nsessa metsässä	Lehtipuuvälle- nsessa metsässä
21	NW1		2	3			27		
22	-	25		2			49		
23	-	25		1			50		
24	-	25		1			52		
25	N1		2	1			33		
26	-		2	1			49		
27	-		2	1			42		
28	-		2	1			35		
29	E2		2	1			29		
30	S1		2	10			16		
31	S1		2	20			33		
32	S1		2	20			43		
33	S1		2	15			61		
34	NE2		3	5			46		
35	-		3	4			38		
36	W1		3	4			36		
37	W1		3	4			47		
38	W1		3	4			35		
39	S1		3	4			32		
40	S1		3	7			49		

Lumen tiheysmittaus:						
Paikka	Lienon asteikosta luetut lumen syvyydet cm	Puntarilukemat		Maa- rajassa jäätä cm	Paikka	Lienon asteikosta luetut lumen syvyydet cm
		Lieriö tyhjänä	Lieriössä lunta			
23	42	0	90	-	33	38
					33	20
						0
						38
						70
						38
						-

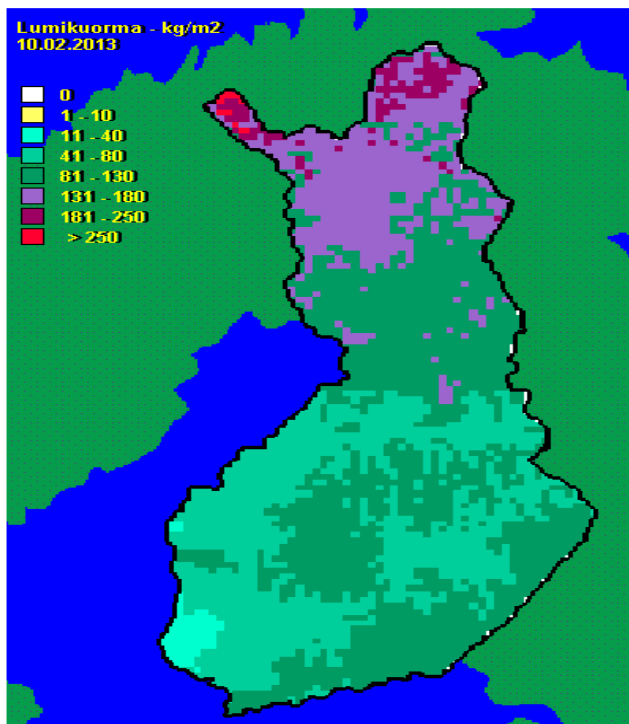
Muut ilmoitukset merkitään viimeiselle sivulle
11

Kuva 3: Lumilinjamittauksen havaintolomake (kuvan lähde: SYKE:n havaintovihko 7131, Lumipeitteen linjamittauksia)

Maastohavainnoista SYKE:ssä lasketaan lumilinjamallin avulla päivittäiset vesi-arvot mittauspäivien väliin käyttäen apuna läheisten sääasemien lämpötila- ja sadantatietoja. Päivittäisistä arvoista interpoloidaan erityisesti lumetilannetiedotuksen tarpeisiin koko Suomen kattava vesi-arvokartta 10 km:n hilassa. Kartasta käytetään lyhyesti nimitystä hilakartta (kuva 5). Hilakartassa on yhteensä 3858 pistettä ja lumen vesi-arvo kussakin pisteessä lasketaan neljän lähimmän lumilinjan etäisyydellä painotettuna keskiarvona, jossa otetaan huomioon linjojen ja laskettavan pisteen väliset korkeuserot, meren läheisyyden tuoma lisä sademäärin sekä kuinka usein tietystä ilmansuunnasta tuulee. Hilakartta ja sen laskeminen on esitelty tarkemmin luvussa 3.4.



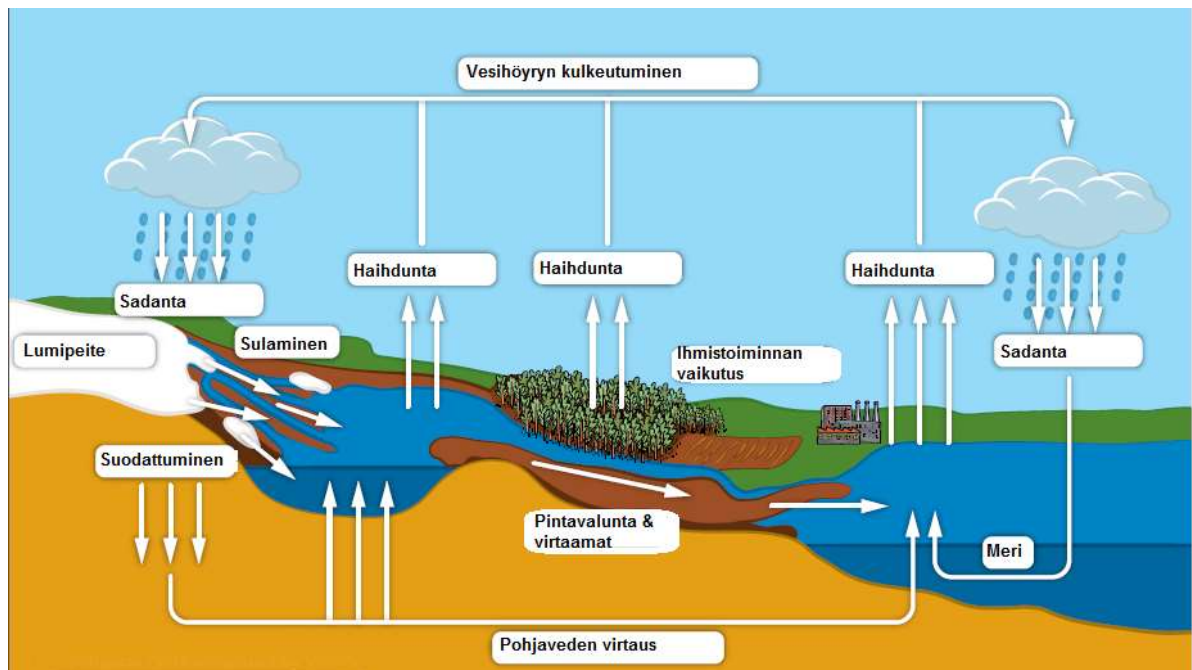
Kuva 4: SYKEN aktiivisessa käytössä olevat lumilinjat 30.4.2013.



Kuva 5: Hilakartta, lumitilanne 10.2.2013 [sähköiset lähteet: SYKE 2013a

2.3.4 Vesistömallijärjestelmä

SYKellä on kehitetty koko Suomen ja sen rajaseudut kattava vesistömallijärjestelmä (engl. Watershed Simulation and Forecasting System, WSFS), jolla mallinnetaan veden hydrologista kiertoa (kuva 6) ja ravinteiden sekä haitallisten aineiden kulkeutumista tämän kierron läpi. Järjestelmällä ennustetaan mm. vesistöjen vedenkorkeuksia ja virtaamia sekä pohjaveden korkeuksia, varoitetaan tulvista ja kattojen lumikuormista sekä lasketaan ravinnekuormitusta Itämereen [SYKE 2014a].



Kuva 6: Vesistömallin simuloima hydrologinen kierto. Kuvan [sähköiset lähteet:SYKE 2013b] pohjalta muokattu.

Yhteensä noin puolet Suomen vuosittaisesta sateesta tulee lumen muodossa, ja lumipeitteen sitoutuneen veden määrä onkin tärkeä syötetieto vesistömallin toiminnan kannalta. Maantieteellisesti sadanta jakautuu siten, että maan eteläosassa sataa enemmän mutta pohjoisessa suurempi osa siitä tulee lumen muodossa [sähköiset lähteet: Ilmatieteen laitos 2014a]. Mallia varten lumilinjoilta saatavaa tietoa lumen vesiarvosta on korjattu siten, että mallinnetut ja havaitut virtaamat on saatu sovitettua yhteen.

SYKEN johtavan hydrologin Bertel Vehviläisen mukaan, radiometrihavainnot tulisi luotettavasti saada 10–15 %:n sisään lumilinjoilta havaituista lumen vesiarvoista, jotta niistä saataisiin käyttökelpoinen lähtötieto vesistömallin tarpeisiin. Hän näkee vesistömallin kannalta kaikkein ongelmallisimpina radiometrihavainnoissa ja vähäisemmässä määrin myös lumilinjahavainnoissa esiintyvät piikit lumen maksimivesiarvossa juuri ennen kevätulan alkamista. [julkaisemattomat lähteet: Vehviläinen 2014a]

Myös satelliittihavainnoista saadut estimaatit lumen vesiarvosta ovat näkyneet vesistömallissa vertausarvoina jo muutaman vuoden ajan, mutta ainoastaan niitä ei ole toistaiseksi uskallettu käyttää koska havaintojen luotettavuudesta ei ole ollut riittävää varmuutta. Alueellisemman luonteensa puolesta radiometrihavainnot sopisivat lumilinjoja paremmin vesistömallin syötteenä, ja havainnot ovat nykyiselläänkin arvokkaita, erityisesti sellaisissa tilanteissa, joissa lumilinjahavainnot ja mallin antamat virtaustulokset eivät sovi yhteen havaittujen virtaamien kanssa. Lisäksi erikoistilanteissa kuten tulvissa kaikki mahdollinen lisätieto on tarpeen. [julkaisemattomat lähteet: Vehviläinen 2014a ja Vehviläinen 2014b]

2.4 Kaukokartoitus ja mikroaaltoradiometria

Kaukokartoitus on informaation keräämistä kohteesta ilman fyysisistä kontakteja. Yleensä termillä kuitenkin tarkoitetaan kohteen tarkkailua ilmasta tai avaruudesta käsin havaitsemalla kohteen emittoimaa tai heijastamaa sähkömagneettista säteilyä. Havaitsemiseen käytettävät mittalaitteet voivat olla joko aktiivisia tai passiivisia.

Aktiiviset laitteet lähettävät kohteeseen energiapulssin ja mittaavat heijastuneen pulssin voimakkuutta ja/tai vaihemuutosta suhteessa lähetettyyn pulssiin. Aktiivisia mikroaaltoalueen laitteita kutsutaan tutkiksi. Passiivisia laitteita kutsutaan radiometreiksi ja ne havaitsevat kohteen tietyllä aallonpituudella emittoimaa tai heijastamaa energiamäärää eli kirkkauslämpötilaa.

Passiivisten instrumenttien kannalta oleellinen on mustan kappaleen säteilyteoria. Musta kappale on teoreettinen kohde, joka absorboi ja myöhemmin säteilee kaiken siihen osuvan energian. Yksikään luonnollinen kohde ei ole täydellinen musta kappale. Mustan kappaleen emissiivisyys on 1 ja kaikkien muiden kohteiden säteilymäärää verrataan suhteessa tähän teoreettiseen maksimiarvoon.

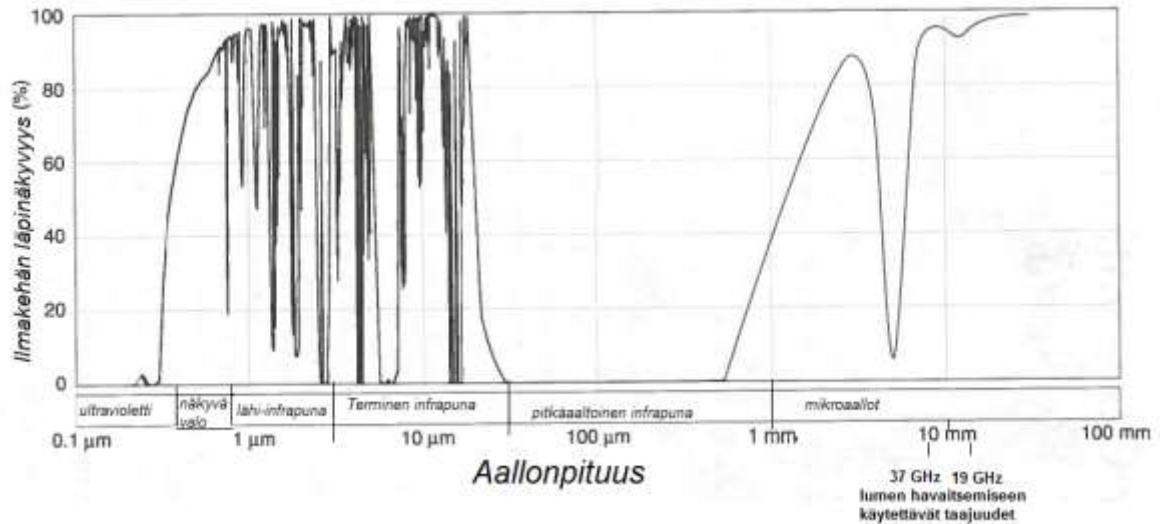
Instrumentin soveltuvuuden tiettyyn käyttötarkoitukseen määrittävät havaittavat taajuudet, instrumentin spatiaalinen ja radiometrinen erotuskyky, havaintokaistan leveys, se onko laite passiivinen vai aktiivinen, sekä toisto aika eli se, kuinka usein sama kohde saadaan kuvattua. Toistoajan määrittää havaintokaistan leveys sekä se, minkälaisella radalla instrumentin alustana toimiva satelliitti kulkee.

Useimmat ympäristö- ja kaukokartoitussatelliitit kulkevat matalilla aurinkosynkronisilla naparadoilla (engl. low earth orbit, LEO). LEO-radoiksi luetaan kaikki alle 1000 km:n korkeudella olevat kiertoradat. Tällaiset radat eivät ole pysyviä, koska yläilmakehän kaasujen aiheuttama vähäinen vastus hidastaa satelliitteja, ja satelliittien rataa onkin ajoittain korjattava rakettimoottoreiden avulla. Naparadat kulkevat suurin piirtein maapallon etelä- ja pohjoisnapojen ylitse.

Aurinkosynkroninen rata tarkoittaa sitä, että satelliitti on maapallon tietyn kohdan yllä aina samaan kellonaikaan. Tämä mahdollistaa tutkimusalueiden seuraamisen lähes vakioina pysyvissä valaistusolosuhteissa. Ajan kuluessa kellonaika, jona satelliitti on tietyn kohdealueen yllä, muuttuu hitaasti. Ilmiötä seurataan ilmoittamalla kellonajat, joihin alus ylittää päiväntasaajan nousevilla eli etelästä pohjoiseen kulkevilla ja laskevilla eli pohjoisesta etelään kulkevilla radoillansa.

Muita ratavaihtoehtoja ovat muun muassa korkealla sijaitsevat geosynkroniset (GEO) radat, joilla satelliitti pysyy jatkuvasti suuriin piirtein saman päiväntasaajalla sijaitsevan kohdan yläpuolella, sekä GEO- ja LEO- ratojen väliin jäävät keskikorkeat radat (engl. medium earth orbit, MEO). GEO-ratoja käyttävät lähinnä tietoliikenne- ja sääsatelliitit ja MEO-ratoja navigaatio- ja satelliitit.

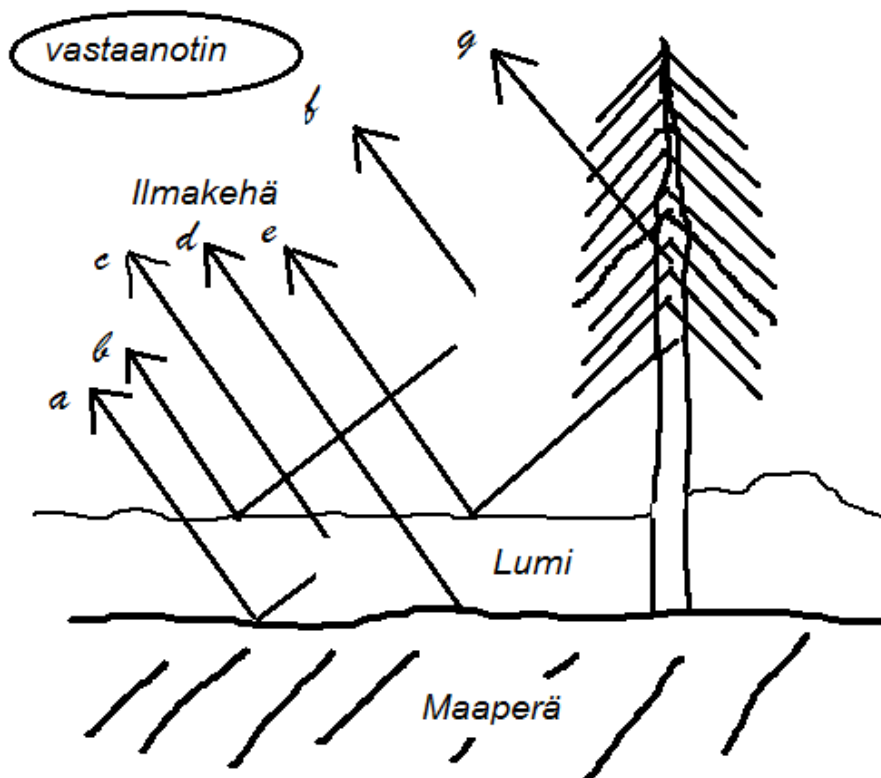
Mikroaaltoradiometria on kaukokartoituksen osa-alue, joka keskittyy havaitsemaan sähkömagneettisen spektrin mikroaaltoaluetta eli aallonpituuksia väliltä 1 mm – 1 m. Mikroaallot ovat pitkäaaltoista, vähäenergistä säteilyä, mikä tuo mukanaan sekä etuja että haittoja. Pidempi aallonpituus tarkoittaa, etteivät ilmakehän molekyylit (lähinnä happi, hiilidioksidi ja vesihöyry) juurikaan haittaa säteilyn kulkua ja että säteily myös läpäisee pilvet. Havainnot eivät myöskään ole riippuvaisia heijastuneesta auringon säteilystä, eli instrumentteja voidaan käyttää myös yöllä. Kuvassa 7 on merkitty lumen havaitsemiseen käytettäviä taajuuksia vastaavat aallonpituudet ja esitetty, miten hyvin sähkömagneettinen säteily läpäisee ilmakehän eri aallonpituuksilla.



Kuva 7: Sähkömagneettisen säteilyn alueet ja ilmakehän läpäisevyys eri aallonpituuksilla. Kuvan [Rees 2006 s. 24 kuva 2.1] pohjalta muokattu.

Passiivisten havaintolaitteiden kerralla havaitsemat näkymät ovat yleensä melko laajoja ja vastaanottimeen saapuva säteily tulee useista lähteistä itse tarkkailtavan kohteen lisäksi. Tärkeimmät säteilylähteet havaitun radiometrisignaalin kannalta on esitetty kuvassa 8.

Lumen määrän arvioiminen radiometrihavainnoista perustuu maaperästä lähtevän säteilyn vaimenemiseen lumihangessa. Maaperän lisäksi myös lumi itse, kasvillisuus sekä ilmakehä säteilevät, ja eri lähteistä tuleva säteily voi myös heijastua useamman kerran ennen sensoriin saapumista. Lisäksi myös puiden latvusto ja ilmakehä vaimentavat havaittavaa säteilyä. Halutun informaation irrottaminen saapuneesta signaalista vaatii säteilyn fysiikan tuntemista sekä huolellista mallintamista, jotta saadaan selville kuinka suuri osa havaitusta kirkkauslämpötilasta on peräisin tutkittavasta kohteesta. Lisäksi on tunnettava, miten tutkittavan kohteen fyysiset ominaisuudet muuttuvat suhteessa havaitun kirkkauslämpötilan määrään. Tämän selvittäminen vaatii joko laboratoriokokeita tai kattavaa empiiristä aineistoa.



Kuva 8: Tärkeimmät säteilylähteet, joista lumen määrää havaitsevan radiometrin signaali koostuu. a) Lumen säteilemä, maasta heijastunut b) Ilmakehän säteilemä, alas kulkeutunut ja heijastunut c) Lumen säteilemä d) Maaperän säteilemä, lumen läpi kulkeutunut e) Kasvillisuuden säteilemä, lumesta tai maasta heijastunut f) Ilmakehän säteilemä, ylöskulkeutunut säteily g) Kasvillisuuden, lähinnä puiden latvuston, säteilemä

2.4.1 Näkö, erotuskyky ja resoluutio

Spatiaalinen erotuskyky määrittää pienimmän yksittäisen kohteen koon, joka instrumentin näkemältä alalta voidaan erottaa, ja se määräytyy käytetyn aallonpituuden, vastaanottimen ominaisuuksien ja kuvan geometrian perusteella. Erotuskyky on parempi havaintonadiirissa eli suoraan instrumentin alapuolella ja heikkenee mitä viistommin kohdetta katsotaan.

Kun yksittäiset, erotuskyvyltään poikkeavat havainnot prosessoidaan kuvaksi, saadaan säännöllisellä pistevälillä oleva matriisi, jonka resoluutio kertoo kuvan yksittäisen elementin koon maastossa ja määrittää kuvan näennäisen tarkkuuden. Kuvapisteen arvo ei enää suoraan vastaa tehtyä havaintoa mutta on yleensä lähellä sitä. Se voi olla tarkempi tai heikompi kuin instrumentin erotuskyky.

Jos kuvia on mahdollista ottaa tiheämmällä välillä kuin käytettävän instrumentin erotuskyky, voidaan kuvan erotuskykyä hieman parantaa matemaattisesti. Lisäksi on mahdollista interpoloida arvot havaintojen keskipisteiden väliin jolloin kuvan resoluutio kasvaa ja kuvasta saadaan pehmeämpi. Tällöin saatetaan kuitenkin menettää sellaisten kohteiden erotuvuus, joilla on voimakkaasti naapureistaan poikkeava arvo.

Pitkääaltoisen säteilyn pienen energiamäärän takia havainto on kerättävä suhteessa suuremmalta alueelta, jotta saataisiin havaittavissa oleva signaali [Lillesand & Kiefer 2000 s. 6]. Radiometrin spatiaalista erotuskykyä rajoittaa instrumentin kulmaerotuskyky (engl.

angular diffraction limit) θ , joka on verrannollinen käytettyyn aallonpituuteen λ jaettuna antennin halkaisijalla D .

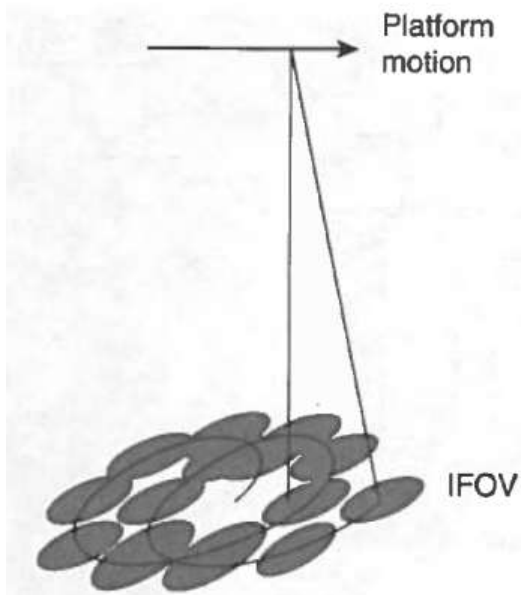
$$\theta(\text{rad}) = \frac{\lambda(\text{mm})}{D(\text{mm})}$$

Kaava 1

Varsinainen spatiaalinen erotuskyky määrittyy kohteen ja sensorin välisen etäisyyden (yleensä lentokorkeus) ja kulmaerotuskyvyn tangentin tulona. Pitkä aallonpituus yhdistettynä suureen lentokorkeuteen, joka satelliittien tapauksessa on satoja kilometrejä, tarkoittaa joko hyvin suurta antennia tai karkeaa erotuskykyä.

Useimmat passiiviset instrumentit havaitsevat aallonpituuksia väliltä 3–60 mm ja niitä vastaavia taajuuksia 5–100 GHz [Rees 2006, s. 46]. Tyypillisellä 0,5 m:n antennikoolla ja 700 km:n lentokorkeudella tämä vastaa 4–85 km:n erotuskykyä maanpinnalla. Erotuskykyä voidaan hieman parantaa tiheällä näytteenottovälillä.

Kartiokeilain on radiometri, joka alustan liikuessa pyörii sen pysty akselin ympäri pyyhkien maanpinnalla ympyrän muotoista havaintojälkeä. Instrumentin yksittäiset hetkelliset näkymät (engl. instantaneous field of view, IFOV) muodostavat alustan edetessä tasaisen maton, jossa yksittäiset näkymät usein menevät toistensa päälle. Päällekkäisistä havainnoista voidaan interpoloida arvot tiheämmälle välille kuin mitä instrumentin kulmaerotuskyky yksinään mahdollistaisi. Kuvassa 9 on havainnollistettu tyypillisen kartiokeilaimen kuvausasetelma.



Kuva 9: Kartiokeilaimen kuvausasetelma [Rees 2006 s. 48]

2.4.2 Mikroaallot ja lumi

Lumen vesiarvon havaitseminen passiivisilla mikroaaltoalueen instrumenteilla perustuu lumen alla olevan maan säteilemän energian vaimenemisen mittaamiseen. Se, kuinka paljon säteily vaimenee, riippuu hangen ominaisuuksista ja havaitusta taajuudesta. Eri taajuuudet läpäisevät lumivaipan eri tavalla. Taajuuksien välinen ero kasvaa raekoon, lumen ti-

heyden ja lumivaipan paksuuden kasvaessa siten, että korkeat taajuudet vaimenevat matalia enemmän. Matalana taajuutena käytetään yleisesti joko 18,7 tai 19,3 GHz ja korkeana taajuutena 37 GHz käytetystä instrumentista riippuen. Mitä suuremmaksi havaintojen välinen ero kasvaa, sitä suurempi on lumen vesiarvo.

Myös lumi itse säteilee jonkin verran, ja instrumentin havaitsema lukema on summa lumen ja sen alla olevan maan säteilystä. Lumivaipan emittoiman säteilyn määrä on kuitenkin tyypillisillä lumen syvyyksillä vähäinen verrattuna maan emittoimaan säteilyyn. Kuivalla lumella ja alle metrin paksuisella lumivaipalla hanki on usein lähes läpinäkyvää havaitsemiseen käytetyillä matalammilla taajuuksilla ja pidemmällä aallonpituuksilla (~19 GHz / 0,016 m).

Taajuuseroon perustuva menetelmä toimii hyvin kuivalle lumelle, jonka paksuus on noin 0,05–1 m. Hyvin pienillä lumen syvyyksillä kirkkausero kanavien välillä on niin vähäinen, että lumen määrän arviointi on vaikeaa. Suuremmilla syvyyksillä maan säteilemä energia käytetyillä taajuuksilla ei enää läpäise lumivaippaa. Pienikin määrä nestemäistä vettä sotkee vaimennuseroon perustuvan havainnon ja estää menetelmän käytön.

Säteilyn kulkeutumista materian läpi vaimentavat absorptio eli energian imeytyminen materiaan ja sironta eli energian heijastuminen eri suuntiin. Vaimennussyvyys kertoo, kuinka paksun materiakerroksen läpi säteily voi kulkea, ennen kuin absorptio ja sironta yhdessä vähentävät sen intensiteettiä $1/e$:n verran eli noin 63 % alkuperäisestä [Rees 2006, s. 110]. Tässä e on Neeperin luku. Lumen vaimennussyvyys riippuu raekoosta, havaitusta aallonpituudesta sekä hankeen sitoutuneen veden määrästä. Kun maasta tuleva säteilyn osa kulkee riittävän paksun hangen läpi, käytännössä kaikki säteily siroaa tai absorboituu hankeen. Tällaista lumen syvyyttä kutsutaan saturaatiosyvyudeksi. Se riippuu hangen ominaisuuksista mutta on suunnilleen havaitun säteilyn aallonpituus kerrottuna sadalla.

Lumen dielektrisyysvakion imaginääriosa, joka määrittää absorption määrän, on kuivalle lumelle hyvin pieni läpi koko mikroaaltoalueen. Tästä syystä säteilyn vaimeneminen lumivaipassa määrittyy pitkälti sironnan mukaan. [Rees 2006, s. 109] Kaukokartoitussovellusten kannalta sironta on hyvä jakaa pinta- ja tilavuussirontaan.

Säteilyn sirontaa kahden aineen välisestä rajapinnasta säätelee säteilyn tulokulma, pinnan karkeus säteilyn aallonpituuteen nähden sekä aineiden dielektrisyysvakioiden reaaliosan suhteellinen ero. Mitä suurempi on ero dielektrisyysvakioiden välillä, sitä suurempi on heijastuskerroin. Jään dielektrisyysvakio pysyy koko mikroaaltoalueella lähes muuttumattomana arvossa 3,17. Tämän seurauksena lumen dielektrisyysvakion reaaliosa $\epsilon_{r,lumi}$ määrittyy yksinomaan lumen tiheyden perusteella kaavalla

$$\epsilon_{r,lumi} = 1,9 * \rho_{lumi}, \quad \text{kaava 2}$$

missä ρ_{lumi} on lumen tiheys yksikössä 1000 kg/m^3 . [Rees 2006, s. 109] Ellei lumen pinta ole poikkeuksellisen karkea (esim. epätasainen jääkuori), pintasirontaan vaikuttavat tekijät ovat käytetyille aallonpituuksille samat eivätkä siten vaikuta taajuuksien väliseen eroon.

Tilavuussironnassa materian epätasaisuudet, lumen tapauksessa jääkiteet, sirottavat säteilyä. Mikroaaltoalueella, jolla aallonpituudet ovat yleensä suurempia tai samaa kokoluokkaa kuin sirottavien jääkiteiden halkaisija, sironnan määrä kasvaa voimakkaasti raekoon kasvaessa. Lukuun ottamatta kaikkein pienimpiä raekokoja tilavuussironta lumen havaitsemiseen käytetyillä taajuuksilla kasvaa taajuuden kasvaessa.

Nestemäisessä muodossa oleva vesi muuttaa mikroaaltojen kulkeutumista lumen läpi voimakkaasti. Kosteuden lisääntyessä absorptiosta tulee sirontaa määräävämpi tekijä säteilyn vaimenemisessa. Kuivalla lumella mikroaaltojen läpäisyvyvyys on luokkaa 1 m. Hieman kostella lumella, jossa vettä on noin 2 % tilavuudesta, absorptiopituus putoaa nopeasti muutamaan senttimetriin. [Rees 2006, s. 110] Tällöin havaittu kirkkausarvo tulee vain lumen pintakerroksesta. Lisäksi koska käytetty korkeampi taajuus vaimenee matalaa taajuutta nopeammin, kosteuden lisääntyessä, kasvaa havaittu ero taajuuksien välillä, mikä saattaa johtaa lumen määrän yliarvioimiseen, jos hanki on ohut.

2.4.3 Käytetyt instrumentit

Tässä työssä käytetyt radiometriaineistosta tuotetut lumen vesiarvokartat on tehty käyttäen havaintoja kahdesta eri satelliitti-instrumentista. Vuoden 2011 kartat on tuotettu Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOSin (AMSR-E) ja vuosien 2012 ja 2013 kartat on tuotettu Special Sensor Microwave / Imagerin (SSM/I) tekemistä havainnoista. Instrumentit on esitelty alla.

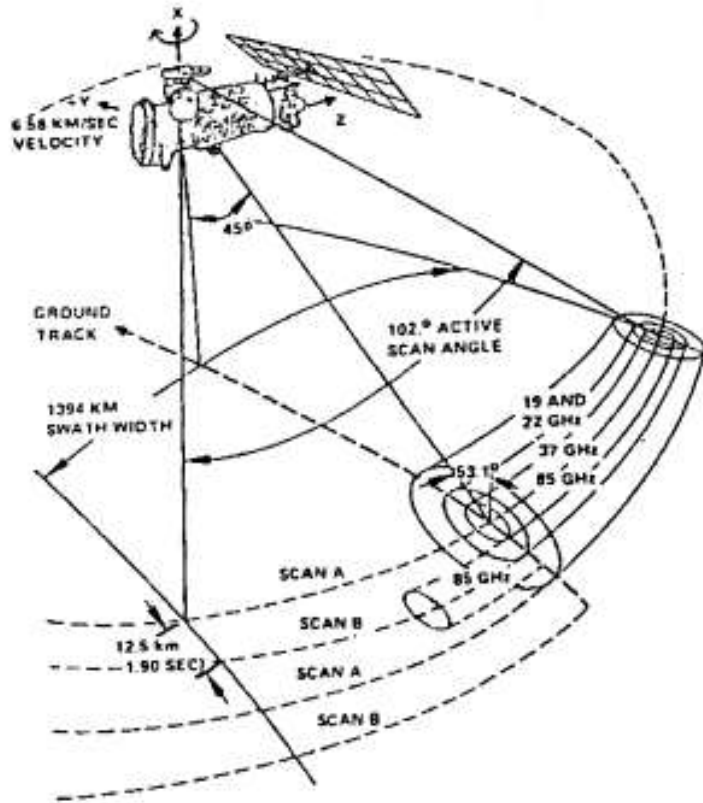
SSM/I

Special Sensor Microwave / Imager, SSM/I, on nelikanavainen, seitsemäntaajuuksinen, passiivinen instrumentti. Instrumentti havaitsee taajuuksia 19,3, 22,2, 37,0 ja 85,5 GHz. Kanavaa 22,2 GHz havaitaan pystypolarisaatiossa ja muita kanavia sekä pysty- että vaakapolarisaatiossa. Käytetyt polarisaatiot ovat lineaarisia. [Hollinger, Peirce, Poe 1990]

SMM/I on osa Yhdysvaltojen ilmavoimien Defence Meteorological Satellite Program -ohjelmaa (DMSP), ja instrumenttia on operoitu sarjan 5D-2 satelliiteissa F8 ja F10–F15 lähes jatkuvatoimisesti vuodesta 1987 lähtien. Sarjan satelliitit kiertävät maata aurinkosynkronisella napaläheisellä radalla noin 833 kilometrin korkeudessa 98,8°:n inkliinaatiokulmalla. Yksi rata kierros kestää 102 minuuttia, mikä tuottaa 14,1 täyttä kierrosta vuorokaudessa. [Hollinger, Peirce, Poe 1990]

Instrumentin kuvanta pyyhkäisee maanpinnalla 1400 km leveän alueen satelliitin kulkuun vastaan 53,1°:n kulmassa maan pinnalta katsoen. Sensori pyörii jatkuvasti vastapäivään satelliitin paikallisen pystyakselin ympäri. Yhden 1,9 s kestävä kierroksen aikana satelliitti etenee 12,5 km, mikä vastaa 85,5 GHz:n kanavan resoluutiota maanpinnalla. Kanava 85,5 GHz näytteistetään jokaisella pyyhkäisyllä, ja muut pidempiaaltoiset kanavat, joiden resoluutio on heikompi, näytteistetään joka toisella pyyhkäisyllä. SSM/I:n kuvausgeometria on esitelty kuvassa 10. [Hollinger, Peirce, Poe 1990]

Tällainen jatkuvasti pyörivä kuvausasetelma on muodostunut passiivisten mikroaaltosenso-
reiden standardiksi. Samaa tekniikkaa käyttävät muun muassa SSM/I:n seuraajiksi rakennetut Special Sensor Microwave Imager / Sounder (SSMIS) sekä Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E).



kuva 10: SSM/I:n kuvausgeometria [Hollinger, Peirce, Poe 1990]

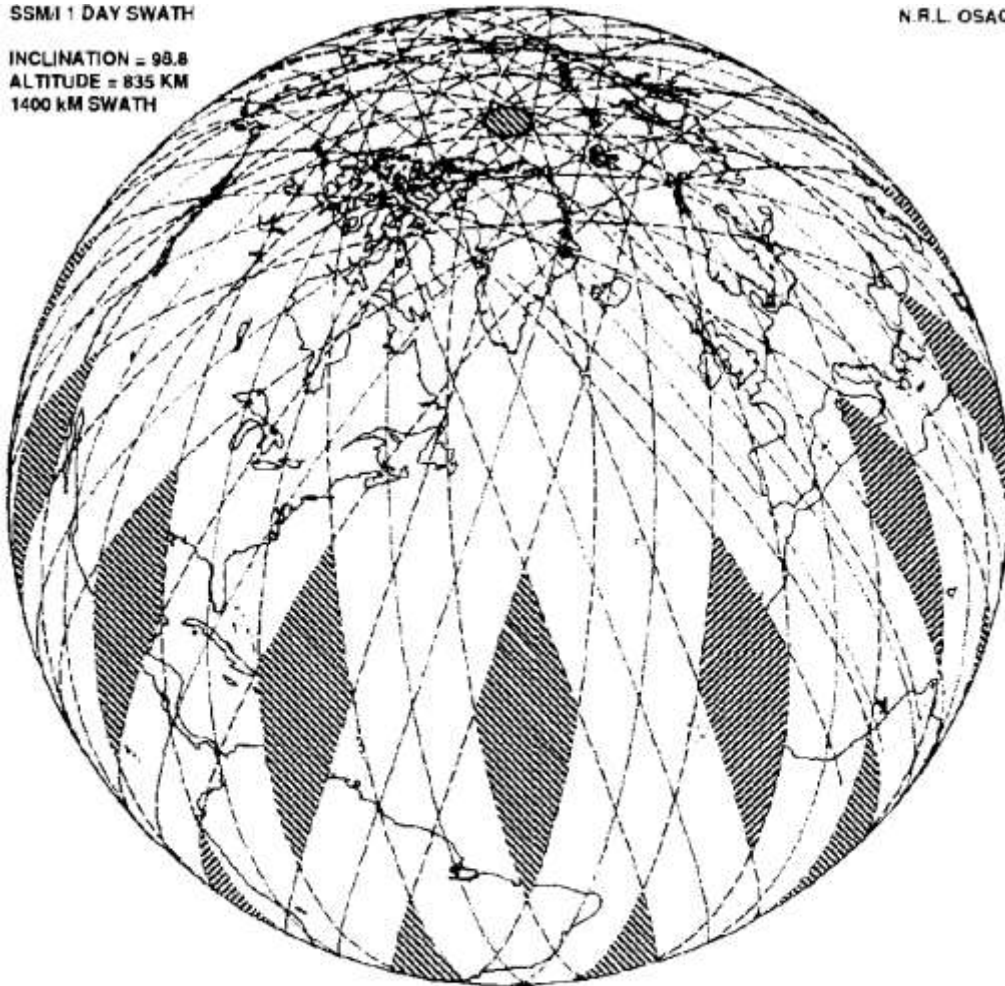
SSM/I:n kuvausgeometrialla alueet 58°:n leveysasteilta napojen suuntaan kuvataan vähintään kahdesti vuorokaudessa, pois lukien molempien napojen ympärillä olevat säteeltään 280 km:n ympyränmuotoiset alueet, joita ei havaita lainkaan johtuen satelliitin inkliinaatiosta. Alueet 72°:sta napojen suuntaan ylitetään vähintään kahdesti sekä nousevien että laskevien ratojen aikana vuorokautta kohden.

Päiväntasaajan molemmin puolin jää vinoneliön muotoisia alueita (katso kuva 11), joita yksittäinen instrumentti ei havaitse kertaakaan yhden vuorokauden aikana. Nämä alueet siirtyvät päivittäin siten, että koko napojen välinen alue katetaan kertaalleen kolmessa vuorokaudessa (72 tuntia) [Hollinger, Peirce, Poe 1990].

SSM/I 1 DAY SWATH

N.R.L. OSAC

INCLINATION = 98.8
ALTITUDE = 835 KM
1400 KM SWATH



kuva 11: SSM/I:n 24 h:n kuvausala [Hollinger, Peirce, Poe 1990]

AMSR-E

Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS, AMSR-E, on 12-kanavainen, kuusi-taajuuksinen, passiivinen instrumentti, joka havaitsee taajuuksia 6,9, 10,7, 18,7, 23,8, 36,5 ja 89,0 GHz sekä pysty- että vaakapolarisaatiossa. Se on yksi NASAn hallinnoiman AQUA-satelliitin kuudesta instrumentista. [Parkinson Claire / NASA (2002)] AQUA kiertää maata ratakorkeudella 705 km, 98,14°:n inkliinaatiokulmalla. Yksi ratakierrös kestää 98,4 min, mistä seuraa 14,6 täyttä kierrosta vuorokaudessa.

AMSR-E oli tarkoitettu SSM/I:n seuraajaksi, ja se käytti samaa kuvausasetelmaa kuin edeltäjänsä mutta seuraavilla eroilla: pyyhkäisyleveys 1445 km satelliitin rataa vastaan katsontakulmalla 55° maanpinnalta. Lisäksi AMSR-E pyöri satelliitin akselin ympäri 40 kertaa minuutissa, kun taas SSM/I tekee noin 31,5 kierrosta minuutissa. Suurempi pyörintänopeus yhdessä isomman antennin ja matalamman lentokorkeuden kanssa johtivat parempaan spatiaaliseen resoluutioon. AMSR-E:n resoluutio lumihavainnoissa käytetyllä 18,7 GHz:n taajuudella oli 21 km, SSM/I:n 19,3 GHz:n taajuudella toimivan kanavan 25 km. Lisäksi ilmakehä aiheuttaa vähemmän häiriötä tälle hieman matalammalla taajuudella toimivalle kanavalle [Parkinson Claire / NASA (2002)].

AMSR-E:n suurempi pyyhkäisyveys yhdessä pienemmän inkliinaatiokulman kanssa muuttivat instrumentin kuvausala edeltäjänsä nähden siten, että sokeat pisteet napojen ympärillä hieman kasvoivat mutta päiväntasaajan ympäristöön jäävät vinoneliön muotoiset katveet vastaavasti hieman kutistuivat. Samoin kuin SSM/I:n kanssa, päiväntasaajan ympäristöön jäävät vuorokausikatveet siirtyivät siten, että koko napojen väliin jäävä alue saatiin kuvattua kertaalleen noin kolmessa vuorokaudessa.

AMSR-E:n kiertoakseliin tuli vika ja instrumentti jouduttiin poistamaan toiminnasta 4.10.2011, koska sen aiheuttama värinä uhkasi koko muun satelliitin toimintaa. Vikaa ei saatu korjattua, ja korvaava instrumentti AMSR2 saatiin operatiiviseksi vasta 25.1.2013. Väliin jäävän hieman reilun vuoden ajalta vastaavaa dataa tarvitsevat tutkijat joutuvat tulemaan toimeen SSM/I:n ja SSMI/S:n tuottamilla hieman heikomman resoluution tuotteilla. Instrumentti käynnistettiin myöhemmin uudelleen huomattavasti hitaammalla pyörimisnopeudella. Uudessa toimintatilassa tuotettu havaintosarja on liian hajanainen operatiivisiin tarkoituksiin, mutta instrumentin yksittäisiä mittauksia voidaan käyttää muiden samoja taajuuksia mittaavien radiometrien havaintojen validointiin.

3 Tutkimusaineistot ja laskentamenetelmät

Tässä luvussa esitellään työssä käytetyt aineistot sekä radiometri- ja lumilinja-aineistojen osalta niiden tuottamiseen käytetyt laskentamenetelmät. Työssä käytetyt aineistot on listattu alla ja niiden tarkemmat kuvaukset löytyvät luvuista 3.2–3.8. Radiometrituotteen prosessointi on suoritettu Ilmatieteen laitoksella ja SYKEN tietokeskuksessa ja lumilinjahavaintojen jatkokäsittelyt on laskettu osana tätä työtä.

- Lumen syvyydet Ilmatieteen laitoksen sääasemilta ja näistä interpoloidut lumen syvyyskartat tammikuusta 2011 toukokuuhun 2013. Tiedot haettu SYKEN Meteorietokannasta.
- Radiometrihavainnoista ja sääasemien lumen syvyyshavainnoista tuotetut lumen vesiarvokartat resoluutiossa 0,05 desimaaliastetta kevätkausilta 2011, 2012 ja 2013 sekä syksyltä 2012. Tästä eteenpäin näistä kartoista käytetään termiä radiometrikartta. Käytetyt radiometrihavainnot on saatu Ilmatieteen laitokselta, jossa niille on tehty geometrinen korjaus ja uudelleennäytteistys WGS-84-koordinaatistoon. Havaintojen prosessointi kartoiksi on suoritettu SYKEN tietokeskuksesta.

Kartat on tuotettu käyttäen assimiloitimenetelmää, jossa lumen syvyyskartoista vakiotiheydellä kertomalla laskettua lumen vesiarvoa on korjattu radiometrin kirkkausarvosta tulkitulla lumen vesiarvolla. Tietolähteiden painotus perustuu havaintojen varianssiin. Kaikki kartat laskettiin käyttämällä vakiotiheyttä mutta kevätkausien kartoja korjattiin jälkilaskentana kalenteriin sidotun muuttuvan tiheysfunktion avulla.

Korjaukseen käytetty funktio oli SYKEN lumilinjahavaintoihin kevätkausilta 2007–2011 sovitettu toisen asteen polynomi. Validointiin ja käyrän sovittamiseen käytetyt datat olivat kunkin kuun 1. ja 16. päiville osuvien mittauspäivien havaintoja väliltä tammikuu–huhtikuu, yhteensä 898 havaintoa [Julkaisematon lähde: Kärnä (2011)]. Tulosten perusteella tämä pienentää tuotteiden välisen eron keskiarvoa ja jäännösneliövirhettä. Tässä työssä käytetyt radiometriarvot ovat juuri tällä menetelmällä korjattua dataa.

- Keskimääräiset päivittäiset valuma-aluepohjaiset vesiarvot lumilinjoilta tammikuusta 2011 toukokuuhun 2013. Lisäksi lähempään tarkasteluun valituilta 21 linjalta lumen syvyys- ja tiheyshavainnot mittauspäiviltä (272 havaintopäivää) sekä näistä lasketut lumen vesiarvon linjakohtaiset keskiarvot ja laajennukset radiometrikartan pikselikokoon. Tiedot haettu SYKEN Hydro-tietokannasta.
- Päivittäiset hilakartat (SYKEN Hyd-valikko) ja näistä radiometrikartan resoluutioon tihennetyt lumen vesiarvokartat
- Corine 2006 –aineisto maankäytöstä ja maanpeitteestä 25 m:n resoluutiolla
- Keskimääräiset runkotilavuudet (m^3/ha) Metlan aineistosta 20 m:n resoluutiolla vuodelta 2009

3.1 Valitut lumilinjat

Työtä varten otettiin lähempään tarkasteluun yhteensä 21 lumilinjaa. Noin puolet tarkasteltavista linjoista valittiin siten, että mukaan saatiin esimerkkejä paikoista, joissa radiometri- ja maastohavainnot erosivat voimakkaasti, sekä paikkoja joissa ero pysyi tarkastelujaksolla keskimäärin pienenä (katso kuva 22 luvusta 4.4).

Vajaa puolet linjoista valittiin sillä perusteella, että päästiin tutkimaan maastotyyppin vaikutusta tuotteiden eroihin (kuusi-, mänty- ja lehtimetsä, sekä aukea ja suo). Lisäksi valittiin kaksi linjaa, yksi Päijät-Hämeestä ja yksi Itä-Lapista, siten, että tutkittavien linjojen maantieteellinen jakauma saatiin tasaisemmaksi. Valittujen linjojen maantieteellinen sijainti on esitetty kuvassa 12.

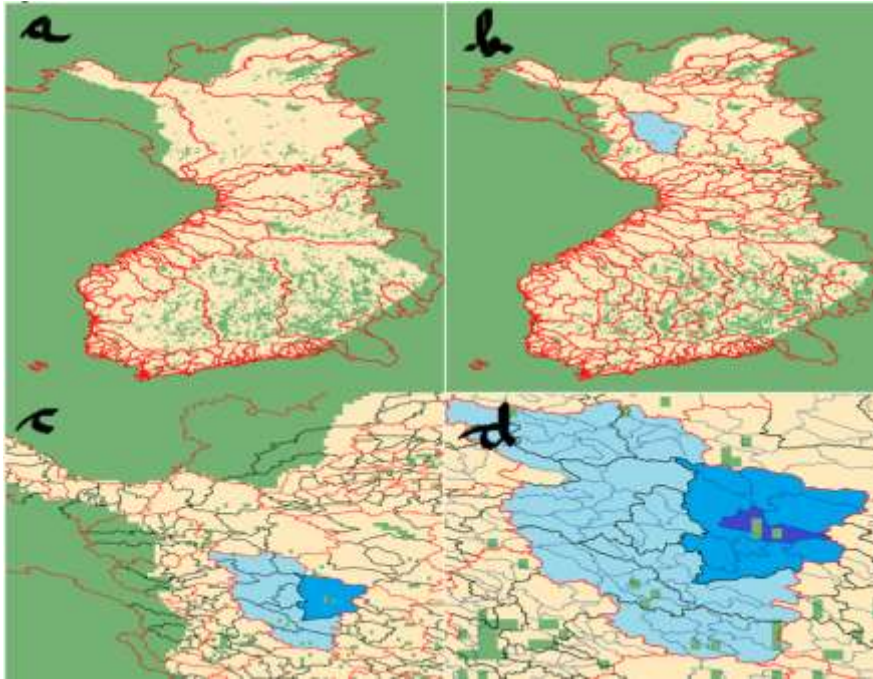
Yksi valituista lumilinjoista oli Lauhavuoren linja Etelä-Pohjanmaalla. Kyseisellä linjalla esiintyvät erot radiometriaineistoon nähden ovat suurimpien joukossa koko havaintoaineistossa. Lisäksi kyseinen linja kuuluu pienten valuma-alueitten linjoihin, joiden näytteenotto ja laskenta suoritetaan hieman eri tavalla kuin muiden linjojen (katso luku 4.6.4).



Kuva 12: Tutkimusta varten valitut lumilinjat

3.2 Lumen vesiaron laskenta lumilinjahavainnoista

Kevääseen 1991 asti lumilinjojen keskimääräiset vesiaron laskenta on laskettu manuaalisesti, eri maastotyypeissä tehtyjen havaintojen määrällä painotettuna keskiarvona. Arvot laskettiin aina havaintopäivälle yleensä kerran tai kaksi kuussa. Syksyllä 1991 otettiin käyttöön vesistömallin valuma-alueelaskennan avuksi tarkoitettu ohjelma, jossa keskimääräinen vesiaron laskettiin käyttäen valuma-aluekohtaisia painoja eri maastotyypeille. Painot perustuivat satelliittikuvalta tehtyyn tulkintaan maastotyyppien esiintymisestä 2. jakovaiheen valuma-alueilla (kuva 13c.). Kun mittaustulokset yleistettiin koskemaan koko valuma-alueita, lumilinjan välittömän ympäristön sijaan, saattoi alueella esiintyä maastotyyppisiä, joita linjalta ei oltu lainkaan havaittu. Näillekin maastotyypeille piti kuitenkin laskennassa saada arvio lumen vesiaron, mitä varten ohjelmaan oli määritelty korjauskertoimet, joilla puuttuva vesiaron voitiin laskea muista maastotyypeistä tehtyjen havaintojen avulla.



Kuva 13: Valuma-aluejako: a) päävaluma-alueet, b) 1. jakovaihe, c) 2. jakovaihe, d) 3. jakovaihe.

Maastotyyppikohtaiset vesiarvot laskettiin kertomalla ko. maastotyyppissä havaittu keskimääräinen lumensyvyys vastaavien tiheyshavaintojen keskiarvolla. Jos maastotyyppistä oli syvyyshavaintoja, mutta ei punnituksia, käytettiin vesiarvon laskemiseen muista maastotyypeistä saatujen tiheyksien keskiarvoa. Jos kyseistä maastotyyppiä ei ollut havaittu reitillä lainkaan, laskettiin sen vesiarvo korjauskerrointen avulla muista maastotyypeistä [julkaisemattomat lähteet: Tuntematon 1]. Korjauskertoimet näyttäisivät perustuneen eri maastotyyppien välisiin pitkäaikaisiin keskiarvoihin, mutta varmuutta asiasta ei ole, sillä ohjelman koodia ei ole dokumentoitu ja menetelmää esittelevässä artikkelissakin on annettu kertomille vain lukuarvot.

Jo ennen tämän työn aloittamista oli käynyt selväksi, että laskentaohjelmassa oli ongelmia ja että joidenkin lumilinjojen kohdalla tulokset eivät olleet enää järkeviä. Tästä johtuen syksyllä 2013 laskentamallia muutettiin siten, että maastojakaumista ja korjauskertoimista luovuttiin ja palattiin käyttämään havaintojen määrällä painotettua keskiarvoa.

Tässä työssä vuosina 1991–2013 käytössä olleen menetelmän ongelmia ja niiden syitä on selvitetty. Vertailut radiometrihavaintoihin on tehty käyttäen molemmilla laskentatavoilla tuotettuja vesiarvoja. Erot laskentatapojen ja radiometrihavaintojen välillä valituilla linjoilla on esitetty liitteessä 3.

3.3 Lumilinjahavaintojen aikainterpolointi lumilinjamallin avulla

Lumilinjamallin avulla lumilinjoille interpoloidaan lumen vesiarvot myös havaintokertojen välisille päville. Malli ottaa syötteekseen Ilmatieteen laitoksen sääasemilta saatavat lämpötila- ja sadantatiedot. Kullekin linjalle valitaan yhdeksän mahdollisimman lähellä ja keskenään eri suunnissa olevaa sääasemaa, ja kunkin päivän sadanta ja lämpötila lumilinjalla lasketaan sääasemilta saatujen lukemien painotettuna keskiarvona. Painot ovat asemien ja linjan välisten etäisyyksien käänteislukuja. Kunkin linjan laskennassa käytettävät asemat

valitaan, kun linja perustetaan, ja niitä tarvitsee muuttaa vain, jos linjan sijainti muuttuu tai joku sääasemista poistetaan käytöstä pysyvästi.

Lähitulevaisuudessa päivittäisten lumen vesiarvojen laskentaa on tarkoitus uudistaa niin, että sääasemien valinta automatisoidaan. Tällöin asemajoukko päivittyy tarvittaessa myös sääasemien lyhytaikaisten käyttökatkosten yhteydessä tai kun uusia asemia otetaan käyttöön tai vanhoja lakkautetaan. [Julkaisemattomat lähteet: Sjöblom 2013]

Astepäivämalli

Astepäivämallia käytetään sulavan lumen määrän estimointiin. Auringon muuttuvan kulman takia auringonvalon maanpinnalle tuoma energiamäärä vaihtelee läpi vuoden. Tämän takia lämpötilan nousu 1 °C:lla sulattaa eri määrän lunta tammikuussa kuin esimerkiksi toukokuussa. Sulanta M yksikössä mm/vrk, kun lämpötila on yli sulamisen rajalämpötilan, määritetään kaavalla

$$M = K * (T - T_{raja}) \quad , \quad \text{Kaava 3}$$

missä T on vuorokauden keskilämpötila, T_{raja} on määritetty sulamispiste (esim. 0 °C) ja K on astepäivätekijä. Astepäivätekijä kuvaa, miten paljon sulamista tapahtuu yhden vuorokauden aikana jokaista yli sulamispisteen olevaa lämpöastetta kohti. K :n arvot on määritetty empiirisesti. Taulukossa 1 on esitetty SYKEN lumimallissa käytettävät arvot K :lle. Kesä- ja syyskuun väliset arvot vaikuttavat hieman pieniltä ja laskennan toimintaa kuvaavassa artikkelissa [julkaisemattomat lähteet: tuntematon 2] on määritetty arvot vain lokakuusta toukokuulle, joten puuttuvat arvot lienee lisätty jälkikäteen. Oletusta tukee se, että käytetty 3,5 on keskiarvo lokakuusta toukokuuhun käytetyistä arvoista.

Oletusta tukee se, että käytetty 3,5 on keskiarvo välillä lokakuu–toukokuu käytetyistä arvoista.

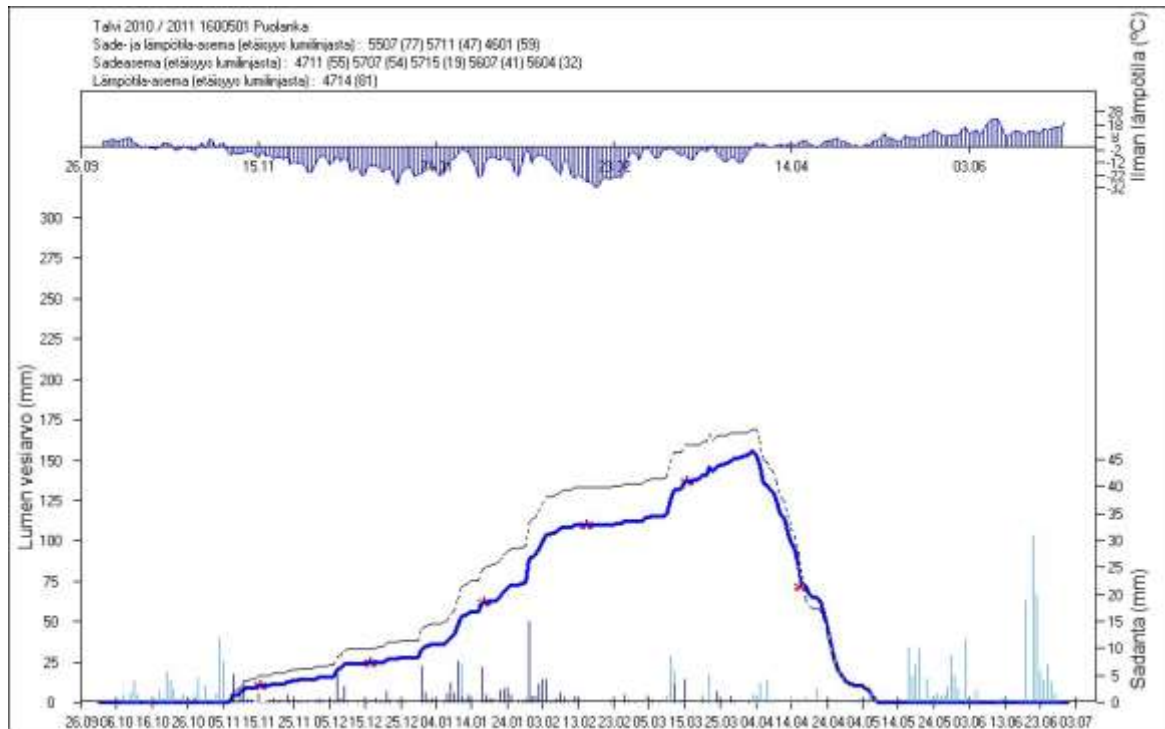
Taulukko 1: Lumimallissa käytetyt K :n arvot (mm/°C)

tam- mikuu	helmi- kuu	maa- liskuu	huhti- kuu	touko- kuu	kesä- kuu	heinä- kuu	elo- kuu	syys- kuu	loka- kuu	mar- raskuu	joulu- kuu
2,5	2,5	3,0	4,0	6,0	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	3,0	3,0

Parametrien sovitus

Lumilinjamallin laskemat päivittäiset lumen vesiarvot lumilinjalle sovitetaan kerran tai kahdesti kuukaudessa tehtäviin todellisiin havaintoihin muuttamalla lumi- ja vesisateen osuuksia sekä sulamisen alkamista sääteleviä rajalämpötiloja. Joskus mallin sovitusta talven mittauksiksi ei saada jollakin lumilinjalla järkevien virherajojen sisään millään parametrien arvoilla ja kyseinen linja joudutaan jättämään pois hilakartan laskennasta.

Kuvassa 14 on lumilinjan 1600501 Puolanka vesiarvokäyrä talvelta 2010–2011. Kuvan yläosassa näkyy lumilinjalle arvioitu ilman lämpötila, alaosassa sadanta ja keskellä näiden perusteella laskettu vesiarvo mustalla. Punaiset tähdet kuvaavat tehtyjä maastohavaintoja ja sininen viiva on niihin sovitettu vesiarvokäyrä.



Kuva 14: Lumien vesiarvokäyrät: Sääasemahavainnoista lasketut arvot on merkitty mustalla ja korjattu, linjahavaintoihin pakotettu käyrä sinisellä. [sähköiset lähteet: SYKE 2013d]

3.4 Hilakartta

Tietokonelaskentaan siirtymisen mukanaan tuoma uudistus oli myös havaintojen spatiaalinen interpolointi. Aikaisemmin lumilinjoilta mitatut lumensyvyydet ja vesiarvot laajennettiin ympäröiville valuma-alueille isohyeettimenetelmällä, jossa vesiarvot piirrettiin kartalle käsin tasa-arvokäyrinä. Kun vesiarvoja automatisoidun laskennan ansiosta ruvettiin saamaan päivittäin, olisi menetelmä käynyt liian työlääksi. Tämän takia rinnan uuden laskentamenetelmän kanssa kehitettiin hilakarttaohjelma, jossa 10 km:n välein oleville pisteille lasketaan vesiarvot läheisten lumilinjojen painotettuna keskiarvona. Uuden pistearvoihin perustuvan menetelmän etuna oli myös se, että korkeuseroista ja meren läheisyydestä johtuvat vaihtelut sadannassa ja siten vesiarvossa oli helpompi ottaa huomioon.

Lumilinjojen päivittäisistä vesiarvoista lasketaan koko maan kattava vesiarvokartta 10×10 km²:n hilalla. Kunkin hilapisteen vesiarvo lasketaan 1–4 lumilinjan keskiarvona siten, että kustakin ilmansuuntaneljänneksestä valitaan lähin lumilinja. Linjojen vesiarvoja painotetaan tuuliolosuhteilla ja maastotekijöillä. Hilapisteen vesiarvo lasketaan linjojen vesiarvon painotettuna keskiarvona, painoina laskennassa toimivat hilapisteen ja linjojen väliset etäisyydet. Jos jossakin neljänneksessä lähin linja on yli 100 km päässä, jätetään kyseinen linja huomiotta. Jos kaikki linjat ovat yli 100 km päässä, otetaan hilapisteen vesiarvoksi suoraan lähimmän linjan korkeuserolla korjattu vesiarvo.

Sadanta voi lyhyellä matkalla vaihdella paljon paikallisten korkeusvaihteluiden sekä merien ja järvien läheisyyden vuoksi. Maaston muodot vaikuttavat sadantaan siten, että este (korkeampi kohta maastossa, esimerkiksi vaara tai harju) kerää tuulen puolelle enemmän sadetta kuin taakseen. Yksittäisen hilapisteen topologinen korjauskerroin lasketaan rinne- ja rannikkovaikutuksen yhteisvaikutuksena.

Rinnevaikutus eli hilapisteiden välisistä korkeuseroista johtuva muutos sadannan määrään pisteessä (i,j) lasketaan pisteen ja sen kahdeksan naapurin korkeuserojen painotettuna keskiarvona. Painoina käytetään tuulijakauman arvoja, jotka on laskettu keskiarvoina koko maalle välillä lokakuu–huhtikuu, ja jotka perustuvat Korhosen tutkimukseen vuodelta 1942.

Rannikon läheisyys vaikuttaa sadantaan siten, että rantavyöhykkeellä 0–40 km rannasta sataa enemmän. Sateen määrä kasvaa lineaarisesti sisämaahan siirryttäessä ja saavuttaa maksimiarvonsa +40 % 20 km:n päässä rannasta ja vähenee taas lineaarisesti kohti 40 km:n etäisyyttä, jonka jälkeen vaikutus on olematon. Sateen määrää korjataan mereltä puhaltavien tuulien yleisyydellä.

Kun kaikkien hilapisteiden topologiset korjauskertoimet on laskettu, voidaan lumilinjojen topologiakorjaukset laskea neljän lähimmän hilapisteen korjauskertoimien etäisyyksien käänteisluvulla painotettuna summana. Tämän jälkeen hilapisteiden vesiarvot lasketaan neljän eri sektorissa sijaitsevan lähimmän lumilinjan topologiakertoimilla korjattujen vesiarvojen painotettuna keskiarvona. Painoina toimivat hilapisteen ja lumilinjojen välisten etäisyyksien käänteisluvut.

3.5 Lumen vesiarvon laskenta radiometrihavainnoista

Radiometrikartan laskemiseen on käytetty instrumenttien AMSR-E ja SSM/I 18,7/19 ja 37 GHz:n kanavien pystypolarisaatioita. Korkeampitaajuuksinen 37 MHz:n säteily siroaa ja vaimenee merkittävästi läpäistessään lumivaipan, kun taas matalampiin 18,7 ja 19 GHz:n taajuuksiin lumi vaikuttaa vähemmän. Kun tiedetään, mikä on kirkkausero kanavien välillä ilman lumipeitettä, voidaan lumipeitteen paksuus laskea kirkkauslämpötilojen suhteellisesta muutoksesta. Mitä suurempi on havaittu ero kanavien välisessä kirkkauslämpötilassa, sitä enemmän on lunta.

Tällaisten lineaaristen, suhdevakioihin perustuvien laskentamenetelmien etu on niiden helppo käytettävyys. Ongelmaksi muodostuu se, että kun lumivaipan ominaisuudet talven edetessä muuttuvat, ei kanavien välinen kirkkausero enää muutu lineaarisesti hangen paksuuden kasvaessa. Lisäksi kasvillisuuden ja topografian vaikutusten huomiointi on vaikeaa ja käytettävät suhdekertoimet on käytännössä määritettävä, empiirisiin havaintojen perusteella jokaiselle kohdealueelle erikseen.

Toinen vaihtoehto on mallintaa lumen säteilykäyttäytyminen sekä ilmakehän ja kasvillisuuden vaikutus signaaliin ja muuntaa havaitut kirkkausarvot suoraan estimaateiksi lumen vesiarvosta. Tällaisten inversioalgoritmien etuna on se, että ne ovat paremmin yleispäteviä ja paikallisten empiiristen kertoimien käyttö voidaan välttää, tai ainakin niiden tarvetta vähentää [Pulliainen 2006]. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin se, että emissiomallit ovat usein laskennallisesti raskaita ja saattavat kunnolla toimiakseen tarvita hyvinkin tarkkoja tietoja lumen ominaisuuksista kuten raekoosta, tiheydestä ja hangen kerroksellisuudesta.

Operatiivisen käytön kannalta näiden tietojen hankkiminen ei ole käytännöllistä, koska usein samalla vaivalla voitaisiin suorittaa näytteenotto suoraan tutkittavasta kohteesta. Tämän takia tarkat ominaisuustiedot korvataan yleensä pitkiin havaintosarjoihin perustuvilla keskiarvoilla.

Tässä työssä käytettävät materiaalit on tuotettu menetelmällä, jossa laskennallisesti suhteellisen kevyttä inversioalgoritmiä tuetaan sääasemahavaintoihin perustuvalla estimaatilla lumen syvyydestä ja vesiärvosta.

Inversioalgoritmi perustuu Teknillisessä korkeakoulussa (engl. Helsinki University of Technology, HUT, nykyinen Aalto-yliopisto) kehitettyyn, säteilykuljetusteoriaan perustuvaan emissiomalliin (HUT snow microwave emission model). Malli kuvaa homogeenisen, yksikerroksisen lumivaipan emissioikäytymistä vesiärvon, lumen tiheyden ja näennäisen raekoon funktiona. Lisäksi mallissa otetaan huomioon ilmakehän, puiden latvuston ja maanpinnan vaikutus havaintuihin kirkkausarvoihin. [Pulliainen, Grandell ja Hallikainen 1999]

Kasvillisuuden vaikutus havaittuun kirkkausarvoon lasketaan ottaen huomioon puuston latvuksen aiheuttama signaalin vaimeneminen ja emissio, jotka ovat ensisijaisesti riippuvaisia metsän keskimääräisestä runkotilavuudesta. Mallissa lasketaan erikseen kirkkausarvot avoimelle maalle ja metsän peittämille kohteille, ja yksittäisen havainnon kirkkausarvoa korjataan kohteen metsäisyysprosentilla. Metsän peittämien kohteiden kirkkausarvot korjataan läpäisevyysmallin avulla. [Kruopis ym. 1999]

Lumen vesiärvon laskeminen havaitusta kirkkauslämpötilojen erosta perustuu maksimi a posteriori todennäköisyyden (MAP) laskemiseen joka on Bayesin teorian sovellus. Siinä pienimmän neliösumman menetelmää käyttäen etsitään iteratiivisesti lumen vesiärvon ja raekoko, jotka yhdessä minivoivat kustannusfunktion. Jos käytettävissä on aikasarjatietoa vesiärvon muutoksista, voidaan yhtälöön ottaa mukaan vuorokausimuutoksen maksimi suurten hetkellisten poikkeamien vähentämiseksi. Koska raekoon säätäminen minimoi mallinnetun ja havaitun kirkkauslämpötilan välistä eroa, mukaan tulevat myös lumen tiheyden ja puuston runkotilavuuden estimoinnissa tapahtuneet virheet. Optimointiprosessi kompensoi myös näiden virhelähteiden vaikutusta [Takala ym. 2011].

3.6 Lumen vesiärvokartan tuottaminen radiometrihavainnoista

Radiometrin kirkkaushavainto muunnetaan estimaateiksi lumen vesiärvosta edellä kuvatulla inversioalgoritmilla, ja sitä korjataan sääasemilta saatavalla tiedolla lumen syvyydestä. Sääasema- ja radiometrihavainnoille lasketaan virhearviot ja havainnot muutetaan kartaksi painottamalla eri tietolähteitä arvioitujen virheiden suhteellisella suuruudella. Tässä työssä tällaista karttaa kutsutaan tästä eteenpäin radiometrikartaksi.

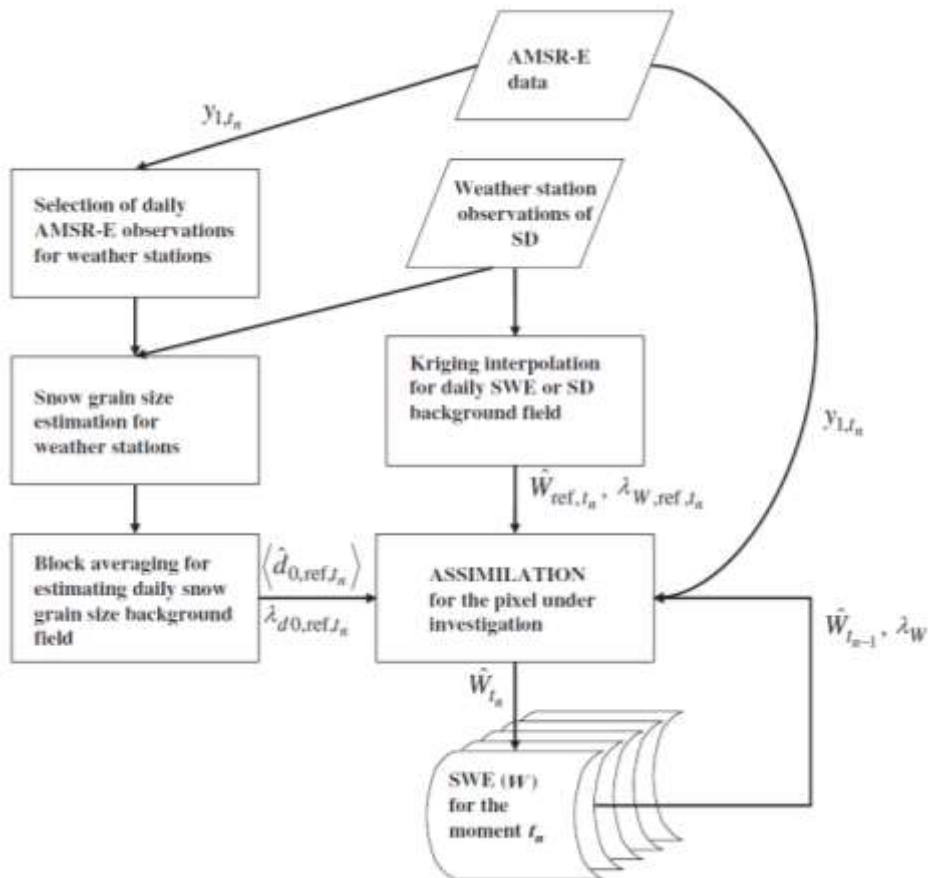
3.6.1 Assimilaatiotekniikka

Tässä tutkimuksessa käytetty menetelmä on kehitetty Teknillisen korkeakoulun Avaruustekniikan laboratoriossa ja perustuu edellä esitettyyn inversioalgoritmiin. Menetelmän tarkempi kuvaus löytyy Pulliaisen (2006) artikkelista. Alla on lyhyesti selostettuna menetelmän päävaiheet.

Radiometrillä havaittu kirkkausarvo sovitetaan sääasemalla havaittuun lumensyvyyteen muuttamalla raekokoa. Parhaasta sovituksesta saadaan raekoko sääaseman kohdalla. Sääasemien väliin jääville pikseleille lasketaan raekoot N lähimmän sääaseman keskiarvona. N voidaan säätää käytettävissä olevien sääasemien määrän ja tiheyden mukaan. Tässä tutkimuksessa käytetyssä sovelluksessa $N=9$. Kullekin pikselille lasketaan myös raekokojen keskihajonta ja varianssi.

Sääasemilta havaituista lumensyvyyksistä interpoloidaan lumensyvyyskartta normaalilla Kriging-interpolointimenetelmällä interpolointi, joka ottaa huomioon lumen syvyyden spataalisen autokorrelaation eli sen, että samankaltaiset arvot ovat maantieteellisesti lähellä toisiaan. Lumen syvyyden varianssit saadaan suoraan Kriging-menetelmään tarvittavasta semivariogrammista.

Lopuksi lasketaan lumivaipan lumen vesi-arvo kussakin pikselissä sekä radiometrihavainnon että lumensyvyystiedon avulla käyttäen vakiotiheyttä. Tiheytenä käytetään lumilinjoiilla mitattujen tiheyksien pitkän aikavälin keskiarvoa. Pikselin lopullinen vesi-arvo on saatujen tulosten painotettu keskiarvo. Painoina käytetään aiemmin laskettuja variansseja. Kuvassa 15 menetelmä on esitetty vuokaaviona, radiometrinä AMSR-E.



Kuva 15: Data-assimilaatio vuokaaviona. [Pulliainen 2006, kuva 1]

3.6.2 Tutkimuksessa käytetty algoritmin versio

SYKEssä käytössä oleva versio inversioalgoritmista ja sen assimiloinnista sääasemadataan seuraa Pulliainen, Grandellin ja Hallikaisen (1999) sekä Pulliainen (2006) artikkeleissa esitettyä menetelmää, mutta seuraavin poikkeuksin: radiometrihavainnon sovituksessa sääasemalta havaittuun lumen vesi-arvoon on käytetty vakiotiheyttä $0,24 \text{ g/cm}^3$ ja saadut vesi-arvot korjataan jälkilaskentana käyttäen kalenteriin sidottua ajan mukaan muuttuvaa tiheyttä. Puuston aiheuttaman vaimennuksen laskemiseen käytetään Metsän tutkimuslaitoksen (Metla) tuottamaa, koeloihin perustuvaa runkotilavuuskarttaa 20 m:n resoluutiolla, josta kullekin radiometripikselille on laskettu keskimääräinen runkotilavuus. Käytetty Metlan aineisto on vuodelta 2009. Lumensyvyyskartan interpoloinnissa oli maaliskuuhun 2014 asti käytössä karsittu sääasemalista (kuva 16).

3.7 Säähavainnot

Lumilinjojen aikainterpolatio ja radiometrihavaintojen tulkitseminen tarvitsevat molemmat tuekseen havaintoja säätilasta. Lumilinjoille lasketaan arviot lumen päivittäisestä sadannasta tai sulamisesta sade- ja lämpötilatietojen avulla. Radiometrihavaintojen tulkitsemiseen ja kalibrointiin tarvitaan puolestaan tietoa ilman lämpötilasta, sekä keskimääräisestä lumen syvyydestä havaittavalla alueella.



Kuva 16: Lumensyvyysasemien verkko. Laskennasta suodatetut asemat on merkitty kolmioilla, tilanne 17.4.2011.



Kuva 17: Lumilinjoilla käytetyt sääasemat (ympyrät) vs. radiometrilaskennassa käytetyt sääasemat (kolmiot)

3.7.1 Lumilinjalaskennassa käytettävät sääasemat

Lumilinjoille valitaan niiden perustamisen yhteydessä yhdeksän sääasemaa, joiden tulisi olla keskenään eri suunnassa, mutta kuitenkin mahdollisimman lähellä. Lumen vesiarvojen aikainterpoloinnissa tarvitaan tietoa sekä lämpötilasta että sateen määrästä, joten molempia asematyyppejä on oltava valittujen asemien joukossa vähintään yksi, mieluummin enemmän. Sääasemien valinnassa suositaan asemia, joilta on saatavissa sekä sadanta- että lämpötilatieto.

3.7.2 Lumen syvyys

Radiometrikarttaa varten tarvittava lumen syvyystieto interpoloidaan synoptisilla sääasemilla tehtävistä automaattisista havainnoista. Havainnot perustuvat ultraäänipulssin kulkuaikaan lähettimen, kohteen ja vastaanottimen välillä. Äänen kulkunopeus riippuu ilman lämpötilasta, joten havaittua kulkuaikaa on korjattava lämpötilan mukaan. Synoptinen tarkoittaa laajaa kuvaa, tulee englannin kielen sanoista surface synoptic observations ja on nimitys ympäri maailmaa samanaikaisesti, kolmen tunnin välein tehtäville säähavainnoille.

Tyypillisestä ultraäänianturin mittauserästä on esitetty kuvan 18 vasemmassa puoliskossa. Sensori on pitkän varren päässä ja havaittava kohta on peitetty keinonurmella rikkaruohojen kasvun estämiseksi. Kuvan oikeassa puoliskossa on nähtävissä lumisauva, joita käytetään lumen syvyyden mittaamiseen manuaalisilla sadeasemilla.



kuva 18: Lumen syvyyden mittausmenetelmiä: vasemmalla ultraäänianturi, oikealla lumisauva [sähköiset lähteet: Ilmatieteen laitos 2014b]Maanpeite- ja maankäyttöaineistot

Lumi kasautuu eri tavalla erilaisiin maastotyyppisiin. Maanpeitejakaumien avulla pieneltä alueelta kerätystä lumilinjahavainnosta voidaan laskea keskimääräinen lumen vesi-arvo ympäröivälle valuma-alueelle. Vastaavasti havainto voidaan laajentaa radiometristä laske-
tun vesi-arvokartan pikselikokoon tuotteiden vertailemista varten. Metsän peitteisyys vaikuttaa myös radiometrin havaitsemaan kirkkausarvoon. Maanpeitetietoja, varsinkin metsän suhteellista pinta-alaa ja runkotilavuutta, tarvitaan, jotta radiometrihavainto saadaan tulkit-
tua (=muunnettua vesi-arvoksi) oikein.

3.7.3 Lumilinjaluokitus

Lumilinjat on jaettu kuuteen maastotyyppiin, koska lumen kasautuminen, sulaminen ja syntyvän kinoksen rakenne vaihtelevat erilaisilla maanpeitteillä. Latvuspeitto ja puuston antama tuulensuoja ovat suurimmat maanpeitteistä johtuvat lumen kasautumiseen vaikuttavat tekijät. Latvuspeitto estää lumen pääsemisen maanpinnalle, eli metsässä maahan kertyy keskimäärin vähemmän lunta kuin aukealla. Tiheä metsä puolestaan toimii tuulensuojana ja estää lumen pintakulkeutumisen pois. Keskimäärin eniten lunta kertyy pienille metsäaukeille, joille lumi pääsee esteettä satamaan ja joille se myös jää ympäröivän metsän antaman tuulensuojan vuoksi. Lisäksi tuulen kohdatessa metsän reunan syntyy turbulenssia, mikä voi lisätä aukon reunalle kertyvän lumen määrää.

Kuusisto (1984) on työssään käsitellyt lumen kasautumiseen ja ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä Suomen alueella ja yleisemminkin. Lumen erilaista kasautumista aukeille ja niitä ympäröivään metsään ovat tutkineen ainakin Golding ja Swanson (1986) sekä Metsämäki ym. (2011).

Lumilinjamittauksissa käytettävät luokat ovat:

1. aukea
2. metsänaukko
3. mäntyvaltainen metsä
4. kuusivaltainen metsä
5. lehtipuuvaltainen metsä
6. suo.

Aukealle (1.) ja metsänaukoille (2.) kertyy keskimäärin enemmän lunta kuin metsäluokkiin (3.-5.). Metsäluokkien kesken lumen kerääntyminen jakaantuu siten, että mitä tiheämpi metsä, sitä vähemmän lunta pääsee maahan saakka. Vastaavasti metsäluokissa lumi pysyy maassa pidempään keväällä, koska puiden varjo ja tuulensuoja estävät lunta sulamasta. Luokka (6.), suo voi olla niin avosuota kuin metsää kasvavaa ojitettua suotakin. Luokka on erotettu omakseen sen takia, että kosteampi maaperä voi vaikuttaa kinoksen rakenteeseen ja maanpintaan ja hangen alle voi helposti muodostua jäätä. Lisäksi soinen maaperä toimii lämpövarastona, joka voi alkutalvesta aiheuttaa lumivaipan sulamista altapäin.

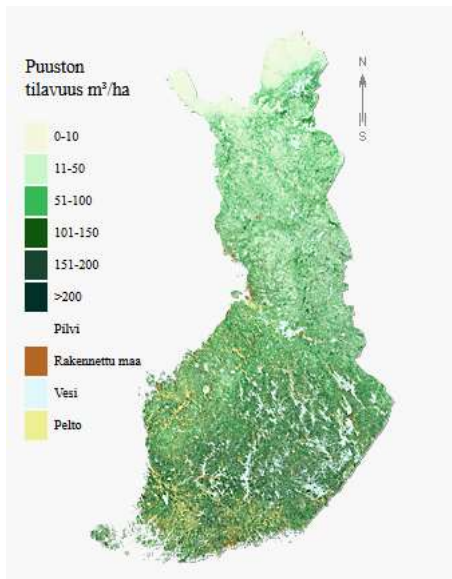
Lumilinjojen mittausohjeessa [SYKE 7131] luokat on rajattu siten, että metsä on lehtipuuvaltaista, jos lehtipuiden osuus on yli 50 %. Jos lehtipuita on vähemmän, metsä on joko kuusi- tai mäntyvaltaista riippuen siitä, kumpaa näistä on enemmän.

Ojitettu suo voi herkästi mennä sekaisin vastaavaa puulajia kasvavan metsäluokan kanssa, koska roudassa olevaa lumen peittämää maata voi olla vaikea erottaa soistuneeksi. Lisäksi riittävän pitkään ojitettuna ollut suo ei enää ominaisuuksiltaan juurikaan eroa metsästä. Metsänaukko luokkaa (2.) ei ole tarkasti määritelty, vaan on jätetty havaittujen vastuulle päättää, minkä kokoinen aukko on metsää, minkä aukkoa ja milloin aukko on riittävän iso, jotta se pitää tulkita aukeaksi. Metsänaukon määritelmänä on kuitenkin, että sen tulisi olla metsän ympäröimä joka puolelta, jotta tuulensuojan kriteeri täytyisi.

3.7.4 Metsäisyyskartta

Koska yksittäiseen radiometrihavaintoon mahtuu sekä metsän peittämiä että puuttomia alueita, on näiltä havaittu säteily mallinnettava erikseen. Maanpeiteaineistosta arvioidaan radiometrihavainnon alueelle jäävien metsän peittämien ja puuttomien alueiden suhteelliset pinta-alat ja havaintoa painotetaan näiden osuuksilla, jotta metsän vaikutus havaittuun kirkkasarvoon saadaan huomioitua.

Inversioalgoritmin kehittäjän, Ilmatieteen laitoksen tutkimusprofessori Jouni Pulliainen mukaan radiometrikartan laskemiseen käytettävä metsäisyyskartta perustuu NASAn vuoden 2001 MODIS-satelliittikuvista (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) tuotettuun globaaliin maankäyttöaineistoon 1 x 1 km²:n resoluutiossa [julkaisemattomat lähteet: Pulliainen 2013]. SYKEN käyttämässä versiossa pikselien metsäisyysprosentit ja algoritmissa käytettävät runkotilavuudet (kuva 19) on saatu Metsäntutkimuslaitoksen (Metla) aineistosta, joka on laskettu ympäri Suomea sijaitsevilta koealoilta. Käytetty aineisto on vuodelta 2009.



Kuva 19: Puuston keskimääräiset runkotilavuudet Suomessa [sähköiset lähteet: Metla 2014]

3.7.5 Corine-land cover-maankäyttöluokitus

Corine (Coordination of information on the environment) on alun perin Euroopan komission käynnistämä yhteiseurooppalainen tiedonkeruu ja -hallintaohjelma. Sitten Corine-ohjelma siirtyi Euroopan Ympäristökeskus EEA:n koordinoimaksi ja on nykyään osa GMES/GIO land -ohjelmaa. Ohjelman tärkeä osa on Corine-land cover -hankkeet, joiden tarkoituksena tuottaa yhdenmukaista maanpeite- ja ympäristötietoa koko Euroopan alueelta. Tähän mennessä on toteutettu kolme vuosien 1990, 2000 ja 2006 aineistoihin perustuva Corine hanketta. Vuoden 2012 aineistoon perustuva neljäs hanke on paraikaa käynnissä ja olisi tarkoitus valmistua tämän vuoden (2014) puolella. [sähköiset lähteet, SYKE 2013b].

Corine land cover -hankkeiden ideana on satelliitti- ja ilmakuva-aineistoa, kansallisia maankäyttörekestereitä sekä muita tietolähteitä yhdistämällä tuottaa keskenään vertailukelpoista, jäseneltyä maanpeitetietoa. Toinen kantava idea on seurata, miten maanpeite ja maankäyttö muuttuvat hankkeiden välillä.

Corine-hankkeita varten kukin jäsenmaa tuottaa 25 m:n resoluutiolla olevan rasteriaineiston Maakohtaisista aineistoista yleistetään koko Euroopan kattava vektoriaineisto siten, että kuvion minimikoko on 25 ha. Molemmat aineistot on jaettu hierarkiatasoihin. Maankäyttö on ensin jaettu neljään päätyyppiin: rakennettuihin, maanviljelyskäytössä oleviin, luonnontilaisiin ja vesistöalueisiin. Kullakin tasolla aineisto on jaettu tarkemmin käyttötarkoituksen ja ominaisuuksien mukaan. Rasteriaineistoissa on neljä tarkkuustasoa ja vektoriaineistossa kolme. [sähköiset lähteet, SYKE 2014b] Tässä työssä on käytetty vuoden 2006 Suomen kansallista rasteriaineistoa, jossa on neljännellä eli tarkimmalla hierarkiatasolla 44 maankäyttöluokkaa.

4 Tulosten analysointi ja johtopäätökset

Tässä luvussa esitellään tehdyt analyysit ja niiden tulokset sekä pohditaan tulosten merkitystä työlle asetettujen tavoitteiden valossa. Taulukkoon 2 on listattu analyyseissä käytetyt termit ja niiden selitykset. Suurin osa termeistä on avattu jo aikaisemmin luvuissa 2 ja 3, mutta ne on koottu tässä yhteen kokonaiskuvan hahmottamisen helpottamiseksi.

Taulukko 2: Analyyseissä käytettävät termit ja muuttujat

lumilinja	Maastoon suunniteltu mittausreitti lumen vesiarvon määrittämiseksi. Yleensä reitillä tehdään 80 syvyysmittausta sekä tiheyden määrittämiseksi 8 punnitusta, joista lasketaan maastotyyppikohtaiset lumen vesiarvot linjalla, sekä koko linjan keskimääräinen vesiarvo.
lyhyet lumilinjat	Pienten valuma-alueiden mittausreitit. Syvyyshavainnot tehdään 50 kappaletta, joista joka kymmenes routahavaintopisteeltä. Havaintopaikkojen maastotyyppiä ei merkitä muistiin, vaan näille linjoille lasketaan lumen vesiarvo kaikkien havaintojen keskiarvona.
lumilinjaluokitus	Lumilinjoilla käytettävä kuusiluokkainen maastotyyppikuvaus. Käytettävät luokat ovat avoin maasto, metsänaukko, mäntymetsä, kuusimetsä, lehtipuuvaltainen metsä sekä suo.
lumilinjalaskenta	Käytetään keskimääräisen lumen vesiarvon määrittämiseen lumilinjalle maankäyttöjakaumiin tai pelkkiin maastohavaintoihin perustuen.
lumilinjamalli	Käytetään lumen vesiarvojen laskentaan lumilinjalle havaintopäivien välisille päville. Laskenta perustuu sääasemilta interpoloituihin sadantoihin ja lämpötiloihin.
hilalaskenta	Käytetään lumen vesiarvojen laskemiseen lumilinjojen väliin jääville alueille 10 x 10 km ² :n hilassa. Neljän lähimmän, keskenään eri ilmansuunnassa sijaitsevan lumilinjan päivittäistä arvoa korjataan korkeuserojen ja meren läheisyyden aiheuttamilla muutoksilla sadantaan.
hilakartta	Hilapisteiden arvot kartalla värikoodeilla esitettyinä.
inversiomalli	Matemaattinen malli, jolla radiometrin havaitsema kirkkausarvo saadaan muutettua estimaatiksi lumen vesiarvosta.
assimilaatio	Radiometrihavainnoista lasketun lumen vesiarvotiedon yhdistäminen sääasemilta saatavaan tietoon.
radiometrikartta	Radiometrihavaintoihin ja assimilaatioon perustuva kartta lumen vesiarvosta.
5×5-ympäristö	Radiometrikartan resoluutiota 0,05×0,05 desimaaliastetta vastaava alue lumilinjan ympärillä.
SWE, pistekeskiarvo / pelkät linjahavainnot	Lumen vesiarvo, joka on laskettu lumilinjalla tehtyjen havaintojen määrällä painotettuna keskiarvona.
SWE, radiometri	Lumen vesiarvo, lumilinjan koordinaatteja vastaavassa radiometrikartan pikselissä.
SWE, valuma-alue	Maastohavaintojen pohjalta laskettu lumen vesiarvo, jota on painotettu valuma-alueen maastotyyppijakaumalla.

Havaintojen välisen yhteensopivuuden mittana käytetään jännösneliövirhettä (engl. root mean squared error, RMSE), joka lasketaan kaavalla

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Parametri, estimoitu_k - Parametri, havaittu_k)^2}, \quad \text{Kaava 4}$$

missä N on havaintojen lukumäärä, *Parametri, estimoitu* on radiometrilaskennassa käytettävä verrattava suure ja *Parametri, havaittu* on maastomittauksella todennettu arvo.

4.1 Metodit

Työn metodiikaksi valikoitui aineistolähtöinen tarkastelu. Etukäteen ei ollut tietoa, eroaako kaukokartoituksella tuotettu aineisto maastohavainnoista, ja jos eroaa, kuinka paljon. Vaihtoehtoksi jäi tarkastella tuotteiden välisiä eroja ja lähteä hakemaan niille syitä molempien havaintomenetelmien teorioista sekä käytännön sovelluksien aiheuttamista rajoituksista.

4.2 Analyysin työvaiheet

Tehdyt analyysit ja niiden valmistelevat työvaiheet on esitetty taulukossa 3. Ensimmäisessä sarakkeessa on lyhyt kuvaus työvaiheesta, ja toisessa sarakkeessa on listattuna mahdolliset tietotekniset ohjelmat, joita työvaiheessa on tarvittu tai hyödynnetty. Varsinaiset aineistovertailut on esitelty yksityiskohtaisemmin luvuissa 4.3–4.6, joissa on käyty läpi havaintoaineistojen eroja ja näiden syitä.

Taulukko 3: Työn eteneminen

Työvaihe	Käytetyt ohjelmat
Lumilinjahavaintojen ja sääasematietojen haku tietokannoista (1) sekä (2) hila-pistetietojen haku	MS SQL HYD-valikko
Koordinaatistomuunnos lumilinja-, sääasema- ja hilatiedoille KJ:stä WGS-84-koordinaatistoon	KoMuWin
Tietojen muokkaaminen jatkokäsittelyä varten	MS Excel
Lumilinjajaskennan koodin läpikäynti ja laskentavaiheiden toistaminen koodin ja teorian välisten erojen tunnistamiseksi	MS Excel
Löydettyjen virheiden vaikutusten selvittäminen	MS Excel
Karttojen laatiminen pisteaineistosta	ArcGIS
Karttojen vertailu kiinnostavien kohteiden ja ongelma-alueiden tunnistamiseksi	ArcGIS
Linjojen valinta lähempää tarkastelua varten	
Muunnoksen laatiminen Corine-maankäyttöluokituksen ja lumilinjajoilla käytettyjen maastotyyppien välille	
Maastotyyppijakaumat valittuja linjoja vastaaville radiometrikartan pikseleille	ArcGIS
Pelkkiin linjahavaintoihin ja radiometrikartan pikselien jakaumiin perustuvien vesiarvojen laskeminen valituille linjoille ja eri tavalla laskettujen arvojen vertailu	MS Excel
Radiometrikarttojen vesiarvo- ja lumen syvyystietojen poimiminen vertailua varten	ArcGIS
Lumen vesiarvo-, syvyys- ja tiheyserojen vertailu tuotteiden välillä numeerisesti sekä visuaalisesti laadittujen kuvaajien avulla	MS Excel
Sopivan maantieteellisen jaon tunnistaminen tiheyden vaikutuksen vertailemista varten	ArcGIS
Uusien tiheyskäyrien sovitukset maantieteellisesti jaetuille osajoukoille	MS Excel
Karttavertailut uusilla tiheystiedoilla lasketuilla radiometrikartoilla	ArcGIS
Erojen vertaaminen	MS Excel
Tilastolliset tunnusluvut	MS Excel

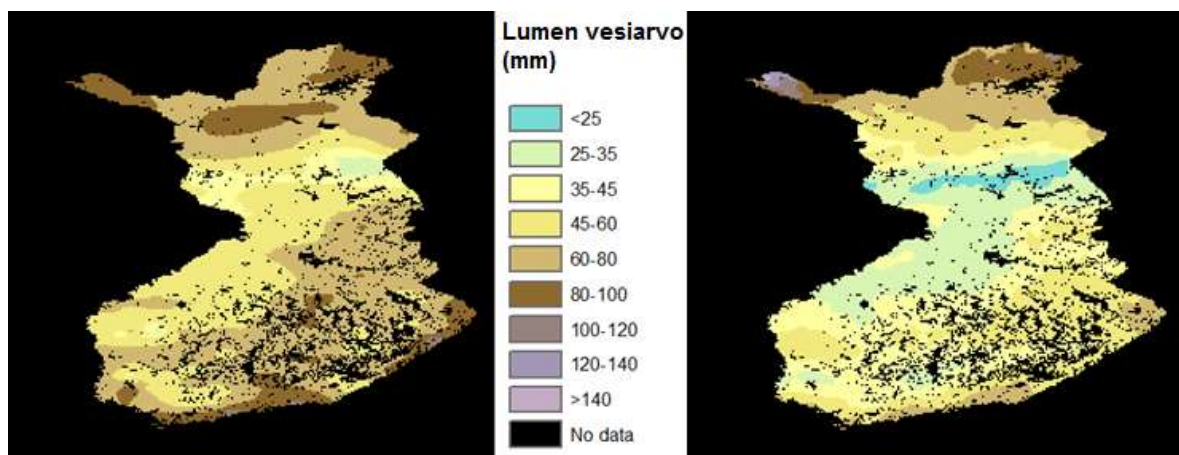
4.3 Erot tutkimussuunnitelmaan

Suunnitellut vertailut radiometridatan yleisestä herkkyudesta sekä herkkyudesta käytetylle instrumentille jouduttiin jättämään pois työstä. Instrumentin vaikutusten vertailusta luovuttiin, koska sekä SSM/I:n että ASMR-E:n dataa ei ollut käytettävissä samalta ajanjaksolta. Radiometrihavaintojen yleisen herkkyyden vertaamisessa tuotteiden väliseen eroon ei taas ollut mieltä, koska lukuun ottamatta syksyn 2012 dataa, radiometrituotteet oli laskettu käyttäen kalenteriin sidottua muuttuvaa tiheyttä. Kun vakiotiheydellä laskettuja syksyn 2012 radiometrihavainnoista tuotettuja lumen vesiarvoja verrattiin valituilla lumilinjoilla havaittuihin vesiarvoihin, huomattiin, että radiometrihavainnot saattoivat vaihdella hyvinkin rajusti jaksoilla, joilla lumilinjoilla havaitut arvot pysyivät lähes vakioina. Tämä ei kuitenkaan anna kovin edustavaa kuvaa, sillä radiometrilaskennassa käytetty vakiotiheys oli suurimmalla osalla linjoista aivan liian suuri, usein yli kaksinkertainen linjoilla havaittuihin tiheyksiin nähden. Tämän seurauksena pienikin heilahtelu interpoloidussa lumen syvyydessä näkyi suurena vaihteluna estimoidussa lumen vesiarvossa.

Toisaalta työn aikana havaittiin aihetta lisätutkimuksiin, joita ei voinut ennakoida tutkimussuunnitelmassa. Tällaisia tutkimuskohteita olivat havaitut erot lumilinjälaskennan teorian ja toteutuksen välillä sekä pienten valuma-alueiden lumilinjojen muista linjoista poikkeava laskentatapa ja sen vaikutus havaintomenetelmien välisiin eroihin. Näitä tutkimalla saatiin todennukaisempi kuva eroista havaittujen ja radiometridatasta estimoitujen lumen vesiarvojen välillä. Lisätutkimusta tarvittiin myös lumilinjälaskennan vertailun toteuttamiseen erikokoisissa ympäristöissä. Tätä varten oli kehitettävä muunnos Corine-maankäyttöaineiston ja lumilinjoilla käytettävien maastotyyppien välillä.

4.4 Vesiarvokarttojen vertailu

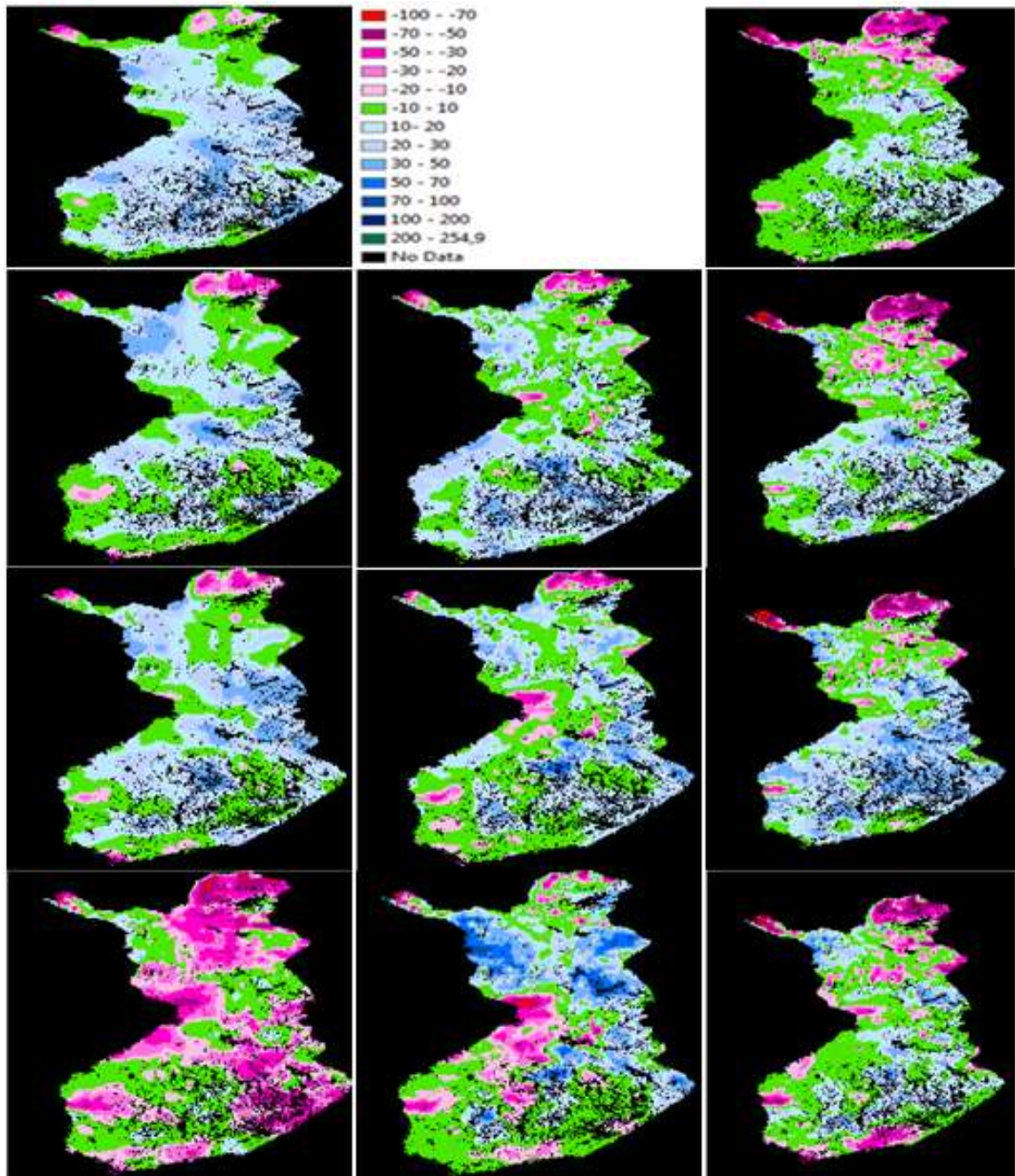
Tuotteiden vertailemista varten sekä lumilinjahavainnot että näistä laskettu pistehila muunnettiin radiometrilaskennassa käytettyyn WGS84-koordinaatistoon. Pistehila on hilakartan taustalla oleva numerotieto ilman esittämiseen käytettävää grafiikkaa ja luokitusta. Hilan väleihin jäävät arvot saatiin interpoloimalla. Vertailuaineiston pikselikokona käytettiin radiometrikartan 0,05 desimaaliastetta ja interpolointi -menetelmänä normaalia Kriging-interpolointia. Havaintojakson kullekin päivälle laskettiin erotuskartat vähentämällä hilatarvoista interpoloitu kartta vastaavan päivän radiometrikartasta. Kuvassa 20 on esimerkit eri menetelmillä tuotetuista lumen vesiarvokartoista.



Kuva 20: Lumen vesiarvot tuotettuna radiometrihavainnoista (vasen) ja hilapisteistä tihennetyistä arvoista (oikea). Kuvan arvot päivältä 1. tammikuuta 2011.

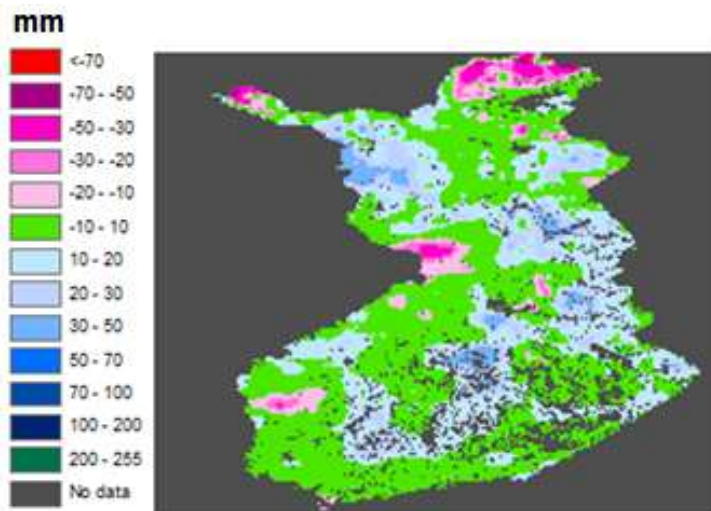
Hilakartoista radiometridatan pikselikokoon tiennetyt päivittäiset lumen vesiarvot ovat keskiarvoistettua ja useampaan kertaan interpoloitua tietoa ja kelpaavat siten itsessään huonosti radiometrituotteen laadun arviointiin. Erot eri tavoilla tuotettujen lumen vesiarvokarttojen välillä kuitenkin kertovat paljon virheen spatiaalisesta ja ajallisesta jakautumisesta ja auttavat tunnistamaan tutkimuksen kannalta kiinnostavia ongelma-alueita. Varsinaiset virheen suuruutta koskevat arvioinnit tehtiin vertailemalla radiometripikselien arvoja suoraan lumilinjahavaintoihin, ja niitä on käsitelty tarkemmin seuraavassa luvussa (4.5).

Vertailemalla erotuskarttoja ja näiden keskiarvoja huomattiin, että tuotteiden väliset erot ovat vuodesta toiseen samansuuntaisia lumen kertymis- tai sulamiskauden vaiheesta riippuen. Alku- ja keskitalvella, kun lunta sataa paljon, radiometrihavainnoista tuotettu kartta yleensä jonkin verran yliarvioi lumen vesiarvoa maastohavaintoihin verrattuna. Sulamiskauden edetessä ero kääntyy toisin päin. Kuvassa 21 esitetään eron kehittyminen kevätkausilla 2011, 2012 ja 2013.



Kuva 21: Radiometri- ja lumilinjahavaintojen välisen keskimääräisen eron kehittyminen kevään edistytessä. Vasemmalla ylhäältä alas tammikuu–huhtikuu 2011, keskellä helmikuu–huhtikuu 2012 ja oikealla tammikuu–huhtikuu 2013. Siniset värit tarkoittavat, että radiometri yliarvio ja punaiset värit että radiometri aliarvioi lumen vesiaron suhteessa maastohavainnoista interpoloituun karttaan. Vihreä väri taas kertoo että tuotteet ovat lähellä toisiaan.

Karttoja vertailtaessa havaittiin myös, että tietyillä alueilla ero pysyy vuodesta riippumatta samansuuntaisena. Pohjoisimmassa Lapissa, Käsivarressa ja Kemien ympäristössä sekä etelässä Lauhavuoren ympäristössä radiometrinen menetelmällä tuotetut vesi-arvot ovat läpi talven pienempiä kuin lumilinjalla mitatut. Vastaavasti Länsi-Lapissa Tornio- ja Ounasjokien välisellä alueella sekä Oulujärven ja Kuopion ympäristöissä radiometrillä tulkitut arvot ovat lähes poikkeuksetta suurempia kuin maastossa havaitut arvot. Nämä kohteet tulevat hyvin esiin, kun erotuskuvista ottaa pitkän ajan keskiarvon (kuva 22).



Kuva 22: Radiometri- ja lumilinjahavaintojen väliset keskimääräiset erot 2011–2012. Siniset värit tarkoittavat, että radiometri yliarvioi, ja punaiset värit, että radiometri aliarvioi lumen vesiaron suhteessa maastohavainnoista interpoloituun karttaan. Vihreä väri taas kertoo, että tuotteet ovat lähellä toisiaan.

4.5 Lumilinja- ja radiometrihavaintojen vertailu

Lumilinjalla tehdyistä maastohavainnoista on perinteisesti laskettu maastotyyppikohtaiset vesi-arvot sekä valuma-aluekohtainen keskiarvo. Tätä tutkimusta varten laskettiin valituille 21 linjalle myös havaintojen määrään perustuvat linjakohtaiset keskiarvot sekä radiometri-tuotteen pikselin maastojakaumaan perustuvat keskiarvot.

Yksittäinen lumilinja kattaa keskimäärin yhden neljänneksen radiometrituotteen pikselistä ja saattaa jatkua useamman pikselin alueelle. Valuma-alueiden koko vaihtelee (katso kuva 13), mutta yleensä ne ovat huomattavasti suurempia kuin radiometrituotteen pikseli. Eriko-kaisen havaintoalueen vaikutuksen huomioimiseksi lumilinjoiden koordinaatteja vastaaville radiometrituotteen pikseleille laskettiin Corine-maankäyttöluokituksen ja Metlan puustotietojen avulla maanpeitejakaumat käyttäen lumilinjoiden kuutta maastotyyppiä (liite 2).

Jakaumiin perustuvat laskennat kuitenkin lisäävät vertailun epävarmuutta, sillä lumilinjoi-la käytetyn kuusiportaisen maastotyyppien ja radiometrituotteen maastojakaumien selvit-tämiseen käytetyn Corine-maankäyttöluokituksen välillä ei ole olemassa yksiselitteistä muunnosta. Lisäksi lumilinjalla käytetty tieto valuma-alueiden maastojakaumasta perus-tuu vuonna 1991 valmistuneeseen luokitteluun, jota ei ole käyttöönoton jälkeen päivitetty. Tästä syystä maastohavaintoihin perustuvaa pistekeskiarvoa pidettiin totuutena vertailtaes-sa tuotteiden välisiä lumen vesi-arvoja.

Ero eri ympäristöissä laskettujen lumilinjahavaintojen välillä toimii kuitenkin hyvänä mar-ginaalina radiometrin suuremman havaintoalueen aiheuttamalle erolle tuotteiden välillä. Jos ero radiometri- ja lumilinjahavainnon välillä on huomattavasti suurempi kuin lumilin-jan pistekeskiarvon ja laajennetussa ympäristössä lasketun vesi-arvon ero, kannattaa syytä havaintojen erolle etsiä muista tekijöistä kuin erikokoisista havaintoalueista.

4.5.1 Erot lumen vesi-arvossa keskimäärin koko aineistossa

Keskimääräiset vuosittaiset erot radiometridatasta ja lumilinjahavainnoista johdettujen lumen vesi-arvojen välillä olivat tutkittavassa aineistossa pieniä (<10 mm), mutta erojen kuukausikeskiarvot vaihtelivat hyvin pienistä kohtuullisen suuriin. Keskiarvo yksinään on

kuitenkin huono mittari päivittäistä operatiivista käyttöä ajatellen. Parempi kuva radiometrihavaintojen yhteensopivuudesta maastohavaintojen kanssa saadaan, kun otetaan tarkasteluun päivittäisten erojen keskihajonnat, vaihteluvälit ja jäännösneliövirheet. Taulukossa 4 on esitetty tutkitun aineiston tunnusluvut kevätkausille 2011–2013. Taulukosta nähdään, että vaikka keskiarvot vaihtelevat keskihajonnat, erojen vaihteluvälit ja jäännösneliövirheet kasvavat kevään edetessä. Ilmiö toistuu samanlaisena vuodesta toiseen, mistä voidaan päätellä, että tuotteiden välisiin eroihin vaikuttaa jokin voimakkaasti ajasta riippuvainen tekijä. Sama asia havaittiin jo karttoja vertailtaessa.

Taulukko 4: Radiometrihavaintojen ja lumilinjojen valuma-aluearvojen välisten erojen keskiarvot, keskihajonnat, vaihteluvälit ja jäännösneliövirheet (RMSE) koko aineistolle

		Erojen keskiarvo (mm)	Suurin ero radiometri > linjat (mm)	Suurin ero radiometri < Linjat (mm)	Keskihajonta (mm)	RMSE (mm)
2011	Tammikuu	17,3	61,1	-41,1	14,3	23,1
	Helmikuu	11,2	71,8	-53,0	20,1	23,0
	Maaliskuu	13,8	91,6	-64,2	22,7	26,6
	Huhtikuu	-12,7	85,3	-132,8	29,7	32,2
	Koko kevät	5,7			26,4	27,1
2012	Helmikuu	13,8	86,1	-69,2	19,0	23,5
	Maaliskuu	7,4	85,5	-104,3	24,3	25,4
	Huhtikuu	3,4	147,5	-176,9	34,3	34,5
	Toukokuu	-2,3	144,2	-138,7	26,9	27
	Koko kevät	7,3			27,2	28,2
2013	Tammikuu	4,3	49,4	-69,0	17,2	17,7
	Helmikuu	9,1	66,7	-97,6	22,2	24,0
	Maaliskuu	16,6	100,8	-88,0	25,5	30,4
	Huhtikuu	1,2	86,0	-134,7	34,1	34,1
	Koko kevät	7,9			25,6	26,8

4.5.2 Erot lumen vesiarvossa valituilla lumilinjoilla

Lähempään tarkasteluun valituille 21 linjalle haettiin SYKEN tietokannasta havaintopäivien mittausraportit, joiden perusteella laskettiin linjahavainnon vesiarvo sekä pelkkiin havaintoihin perustuen että painokertoimien avulla laajennettuna radiometrituotteen pikselikokoon(5×5-ympäristö) ja valuma-aluekokoon. Näistä voitiin arvioida, miten laskenta-alueen koko vaikuttaa tuotteiden väliseen eroon. Radiometrihavaintojen jäännösneliövirheet suhteessa pelkkiin linjahavaintoihin ja 5×5-ympäristöön perustuviin lumen vesiarvoihin ovat pienempiä kuin erot valuma-aluepohjaisiin arvoihin. Tämä viittaa siihen, että pelkät linjahavainnot vastaavat maanpeitteen puolesta paremmin radiometrituotteen pikselin alalle jäävää maastoa kuin laajempi ja osin jo vanhentunut valuma-aluekarttoitus. Laskentaympäristön vaikutusta on käsitelty tarkemmin luvussa 4.6.5.

Jäännösneliövirheet valituilla linjoilla ovat kauttaaltaan suuremmat kuin koko aineistossa, mutta tämä oli odotettavissa koska suuri osa linjoista valittiin nimenomaan niiden suuren

eron perusteella suhteessa radiometrihavaintoihin. Koko aineistossa huomattu aikariippuvuus eron suuruuteen on havaittavissa myös tässä pienemmässä osajoukossa. Taulukossa 5 on esitetty valituille linjoille samat tunnusluvut kuin edellä taulukossa 4 koko aineistolle sekä lisäksi radiometrihavaintojen vuosittaiset jäännösvirheet suhteessa eri havaintoympäristöissä laskettuihin lumen vesiarvoihin.

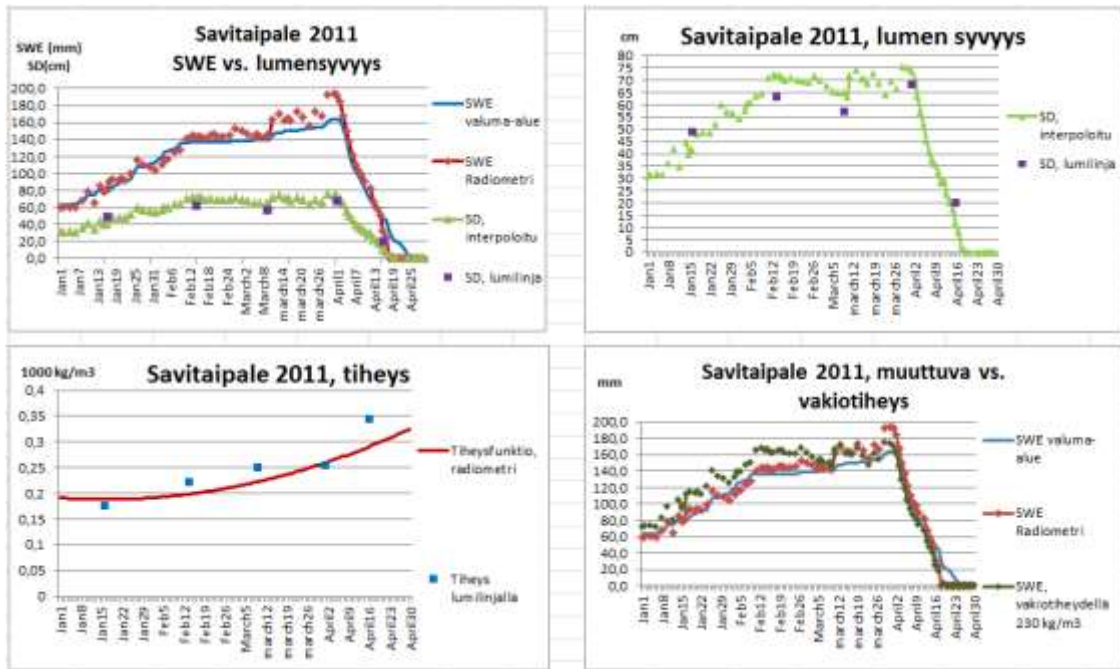
Taulukko 5: Radiometrihavaintojen ja lumilinjojen valuma-aluearvojen välisten erojen keskiarvot, vaihteluvälit ja keskihajonnat valituille 21 linjalle sekä radiometrihavaintojen jäännösneliövirheet (RMSE) suhteessa lumilinjoilta eri ympäristöissä laskettuun lumen vesiarvoon.

		Erojen keskiarvo (mm)	Suurin ero radiometri > linjat (mm)	Suurin ero radiometri < Linjat (mm)	Keskihajonta (mm)	RMSE valuma-alue vs radiometri (mm)	RMSE pelkät linjahavainnot vs radiometri (mm)	RMSE 5×5-ympäristö vs radiometri (mm)
2011	Tammi-kuu	18,6	61,1	-41,1	20,9	27,9		
	Helmi-kuu	12,5	71,8	-50,9	27,5	30,2		
	Maalis-kuu	12,5	91,6	-64,2	27,8	30,5		
	Huhti-kuu	-17,5	85,3	-114,7	32,3	36,7		
	koko kevät	4,4			31,7	32,0	26,1	29,2
2012	Helmi-kuu	13,8	86,1	-55,5	22,1	26,1		
	Maalis-kuu	5,0	67,6	-104,3	28,7	29,1		
	Huhti-kuu	3,4	147,5	-116,5	42,1	42,2		
	Touko-kuu	-2,4	139,4	-138,7	32,7	32,7		
	koko kevät	6,6			32,7	33,3	28,4	29,6
2013	Tammi-kuu	2,9	49,4	-47,6	22,0	22,2		
	Helmi-kuu	6,3	58,2	-67,4	24,4	25,2		
	Maalis-kuu	11,4	74,7	-72,8	29,4	31,6		
	Huhti-kuu	-5,5	71,8	-128,1	38,1	38,4		
	koko kevät	4,1			29,2	29,5	25,1	25,8

Lumilinjojen mittausraporteista selviävät maastotyyppikohtaiset lumen keskisyvytydet ja -tiheydet, joista laskettiin koko linjalle mittauspäiväkohtaiset keskiarvot. Näin saatuja linjojen keskisyvyyksiä verrattiin sääasemahavainnoista interpoloituun lumensyvyyteen jota käytetään radiometrituotteen laskennassa. Vastaavasti lumen keskitiheyttä linjalla verrattiin radiometrituotteen laskennassa käytettäviin vakiotiheyteen ja mallinnettuun tiheyteen, joka kasvaa ajan funktiona yhden kevätkauden kuluessa. Erot linjoilla havaituissa lumen syvyyksissä ja tiheyksissä suhteessa radiometrilaskennassa käytettyihin estimaatteihin vaihtelivat paljon linjojen välillä ja vuodesta toiseen, mutta erot ovat paikoitellen merkittävän suuria ja selittävät suuren osan lumen vesiarvotuotteiden välisistä eroista. Lumen tiheyden ja syvyyden vaikutusta radiometri- ja lumilinjatuotteiden välisiin eroihin on käyty tarkemmin läpi luvuissa 4.6.1 ja 4.6.2.

Kuvassa 23 on esimerkkikuvaajat lumilinjalle 1041401 Savitaipale. Radiometrituotteen arvot ovat läpi vuoden hyvin lähellä lumilinjalle laskettuja, pois lukien piikki maksimiarvossa juuri ennen sulamisen alkamista. Radiometrituotteen ero suhteessa valuma-alueelle laskettuun lumen vesiarvoon lumilinjan neljännen havaintopäivän kohdalla 1.4.2011 on 29 mm. Jos verrataan, radiometrituotteen arvoa pelkistä maastohavainnoista laskettuun vesiarvoon, ero kaventuu 20 mm:iin. Neljännen mittauspäivän kohdalla radiometrituotteen laskennassa käytetty tiheys 259 kg/m^3 on hyvin lähellä lumilinjalla havaittu lumen keskitiheyttä, ja ero interpoloidun lumen syvyyden ja lumilinjalla havaitun keskisyvyyden välillä on hieman alle 6 cm. Tämä jättää muiden tekijöiden vaikutukseksi noin 5 mm lumen vesiarvossa.

Sääasemilta interpoloitu lumen syvyys alenee liian nopeasti sulamisen alettua ja linjan viimeisen mittauspäivän kohdalla radiometrituotteen arvo on kääntynyt 13 mm valuma-alueelle yleistettyä lumilinjahavaintoa pienemmäksi ja 20 mm pelkkiin linjamittauksiin perustuvaa arvoa pienemmäksi. Ero linjalla havaitun ja interpoloidun lumen syvyyden välillä on 9 cm, joka radiometrilaskennassa käytetyllä 291 kg/m^3 :n tiheydellä vastaisi 26 mm:n eroa vesiarvossa. Suhteellinen ero linjalla havaittuun 345 kg/m^3 tiheyteen laskee vaikutuksen noin 21 mm:iin. Erosta jää muiden tekijöiden kuin lumen syvyyden ja tiheyden selitettäväksi vain 1 mm. Taulukossa 6 on esitetty tunnusluvut tuotteiden välisille eroille lumen vesiarvossa ja radiometrituotteen laskennassa käytettyjen lumen tiheyksien ja syvyyksien erot suhteessa Savitaipaleen lumilinjalla keväällä 2011 havaittuihin arvoihin.



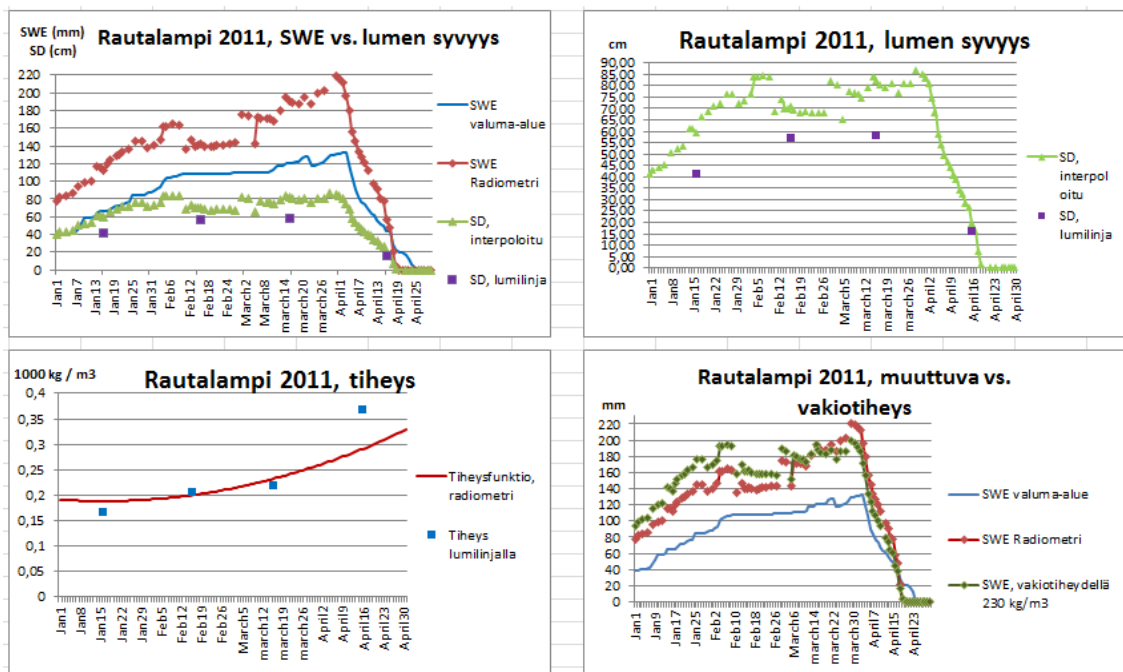
kuva 23: Radiometri- ja lumilinjatuotteiden arvot lähellä toisiaan, lumilinjalalla 1041401 Savitaipale

Taulukko 6: Lumilinjan Savitaipale tunnusluvut 2011

2011			
Nimi	Savitaipale	koko kevät	
		SWE, max linja (mm)	163
Tunnus	1041401	SWE, max radiometri (mm)	194
lat, kky	6786936	RMSE (mm)	12,3
long, kky	3528960	erojen keskiarvo (mm)	3,89
lat	61,1903	max ero (mm)	32,5
long	27,5352	keskihajonta (mm)	11,6
korkeus	100	erojen vaihteluväli (mm)	-31 - 32,5
		erojen mediaani (mm)	5,09
		lumensyvyyksien keskiero, itseisarvot (cm)	7,66
		lumensyvyyksien keskiero (cm)	1,14
		Tiheyksien keskiero, itseisarvot (kg/m ³)	24,2
		tiheyksien keskiero (kg/m ³)	-17,5
		tiheyksien keskihajonta (kg/m ³)	23,7
		Havaintopäivät	
		keskiero, valuma-alue (mm)	5,1
		keskiero, linjahavainnot (mm)	-0,62
		keskiero, 5x5 jakauma (mm)	-1,29

Lumilinja 1147101 Rautalampi on esimerkki paikasta, jossa tuotteiden estimaatit lumen vesi-arvosta eroavat voimakkaasti. Taulukossa 7 on esitetty radiometrituotteen ja sen laskennassa käytettyjen lumen syvyyden ja tiheyden keskimääräisten erojen tunnusluvut suhteessa Rautalammen lumilinjalta havaittuihin arvoihin ja niistä laskettuun valuma-alueen lumen vesi-arvoon. Kuvan 24 kuvaajat näyttävät samat asiat graafisessa muodossa. Radiometrituote estimoiv vesi-arvon liian suureksi. Ero lumilinjamittauksista valuma-alueelle yleistettyyn arvoon vaihtelee välillä 15–65 mm syystalvesta lumilinjan kevään viimeiseen mittauspäivään 16,4 asti. Tämän jälkeen radiometripohjainen estimaatti putoaa nopeasti nolnaan, kun taas lumilinjalaskennan mukaan linjalta vielä on lunta.

Suurin osa lumen vesi-arvon erosta selittyy lumen syvyyden arvoilla. Sääasemilta interpoloitu arvo on estimoitu Rautalammilla koko tarkastelujaksolla 2011–2013 selvästi liian suureksi verrattuna lumilinjalta havaittuihin syvyyksiin. Syvyyksien ero vaihtelee 3 ja 24 cm:n välillä, ja erojen mediaani on noin 14 cm. Ympäröivät sääasemat sijaitsevat hie-man korkeammalla kuin järven rannassa sijaitseva lumilinja, mutta korkeusero ei ole niin huomattava, että se selittäisi eroa havaituissa lumen syvyyksissä. Todennäköisesti syvyyksien ero selittyy erilaisella maaston peitteisyydellä ja vaihtelevilla tuulioloilla sääasemien sijaintipaikoissa. Noin kolmannes lumilinjasta sijaitsee kohtuullisen tiheässä kuusimetsäs-sä, jossa havaitut lumen syvyydet ovat huomattavasti pienempiä kuin sääasemilla havaitut arvot. Myös muissa maastotyypeissä syvyydet ovat lumilinjalta pienempiä kuin sääasemil-la, mutta erot ovat pienempiä.



Kuva 24: Radiometridatasta tuotettu ja lumilinjalta havaittu lumen vesi-arvo kaukana toisistaan, Rautalampi 2011

Taulukko 7: Lumilinjan Rautalampi tunnusluvut 2011

		koko kevät 2011	
Nimi	Rautalampi	SWE, maksimi linja (mm)	133
Tunnus	1147101	SWE, maksimi radiometri (mm)	221
lat, kky	6945960	RMSE (mm)	51,6
long, kky	3484324	erojen keskiarvo (mm)	45,1
lat	62,618	erojen maksimi (mm)	91,6
long	26,6912	keskihajonta (mm)	25,1
korkeus	99,9	erojen vaihteluväli (mm)	-20 - 91,6
		erojen mediaani (mm)	50,6
		lumensyvyyksien keskiero, itseisarvot (cm)	14,9
		lumensyvyyksien keskiero (cm)	14,9
		Tiheyksien keskiero, itseisarvot (kg/m ³)	28,8
		tiheyksien keskiero (kg/m ³)	-11,6
		tiheyksien keskihajonta (kg/m ³)	38,8
		Havaintopäivät	
		keskiero, valuma-alue (mm)	41,2
		keskiero, linjahavainnot (mm)	33,3
		keskiero, 5x5 jakauma (mm)	37,5

4.6 Erojen syyt

Vertailtaessa lumilinjamittauksista ja radiometrihavainnoista tuotettuja lumen vesi-arvokarttoja on havaittavissa neljäntyyppisiä virhelähteitä, jotka aiheuttavat poikkeamaa tuotteiden välille:

1. Kummankin mittaustapahtuman virhelähteet, jotka aiheuttavat hajontaa tuotteen havainnoissa.
2. Virheet ja epävarmuudet vesi-arvokarttojen ja niiden tausta-aineistojen interpoloinneissa.
3. Tuotteiden erilainen resoluutio ja käyttötarkoitus.
4. Teoroissa tehdyt oletukset ja yksinkertaistukset, esimerkiksi radiometrilaskennassa käytetyt vakiotiheys ja oletus lumivaipan yksikerroksisuudesta.

Suurimmat selittävät tekijät lumilinja- ja radiometrihavaintojen välisiin eroihin ovat radiometritulosten assimiloinnissa käytettävät lumen tiheydet ja lumen syvyudet, inversiomallissa tehdyt yksinkertaistukset lumilinjalaskennan toteutuksessa olleet poikkeamat teoriaan nähden sekä radiometrin ja lumilinjojen erikokoiset havainto- ja laskentaympäristöt. Myös yksittäisten havaintotapahtumien satunnaisvirheet voivat aiheuttaa eroa tuotteiden välille. Näiden vaikutus on kuitenkin yleensä kertaluokkaa pienempää, molemmissa laskentamenetelmissä käytettyjen keskiarvoistuksien vuoksi.

Lopullinen ero tuotteiden välille määräytyy eri virhelähteiden yhteisvaikutuksesta. Jos poikkeamat ovat samaan suuntaan, vahvistavat ne toistensa vaikutusta. Eri suuntaan ollessaan suuretkin virheet saattavat lähes kumota toistensa vaikutuksen, jolloin lopputulos voi olla harhaanjohtavan hyvä. Tämä pitää paikkaansa varsinkin lumen tiheyden ja syvyyden kohdalla, jotka ovat saman kertolaskun tekijöinä vesi-arvoa laskettaessa.

4.6.1 Tiheys

Käytetty lumen tiheys vaikuttaa radiometrilaskentaan prosessin kahdessa kohdassa. Ensinnäkin satelliitista havaitut kirkkausarvot sovitetaan sääasemahavaintoihin perustuviin lumen vesiarvoihin, jotka lasketaan havaitun lumen syvyyden ja oletetun tiheyden tulona. Sovituksesta saatavat raekoot ja niiden hajonta sääasemien välillä määrittävät miten paljon radiometri- ja sääasemahavaintoja painotetaan lopullisessa assimilaatioissa. Toiseksi käytetty tiheys vaikuttaa sääasemilta interpoloidun lumen vesiarvokartan arvoihin, jotka yhdessä radiometrihavaintojen kanssa muodostavat lopullisen estimaatin lumen vesiarvosta.

Kärnä ym. [2012] ovat tutkineen assimilaatiotuloksen parantamista ajan mukaan muuttuvan tiheyskäyrän avulla jälkilaskentana. Menetelmässä assimilaation vesiarvoa korjataan laskennassa käytetyn tiheyden vakioarvon ja polynomifunktiosta saadun luvun suhteella. Korjaus ei kuitenkaan vaikuta radiometri- ja sääasemadatan väliseen painotukseen.

Vaikka assimilaatiotuloksen korjaaminen kalenteriin sidotulla tiheysfunktiolla parantaa tuotteiden yhteensovitusta jonkin verran, aikasarjaan sovitetun funktion kyky kuvata tiheyden ajallista vaihtelua on rajallinen. Talven alkamisajankohta ja kesto vaihtelevat voimakkaasti vuodesta toiseen, mitä funktiossa ei huomioida. Tasaisesti kasvava käyrä ei myöskään millään lailla ota huomioon sään aiheuttamaa voimakasta vaihtelua tiheydessä. Kun sataa uutta lunta, lumivaipan keskimääräinen tiheys yleensä laskee, ja sään mennessä suojan puolelle tiheys puolestaan voi kasvaa huomattavasti nopeammin kuin käyrä ennustaa.

Suurin ongelma on kuitenkin lumiolojen maantieteellinen vaihtelu. Suomi on eteläpohjoissuunnassa pitkä maa, jossa talvi ja pakkasen yleensä tulevat pohjoiseen huomattavasti etelää aiemmin. Talvi myös kestää pohjoisessa pidempään. Myös itä-länsisuunnassa sisämaan ja rannikon välillä on vastaava ero talven kestossa. Vaikka tiheyden kehitys etenisi muuten mallin mukaisesti, voi talvi olla eri vaiheissaan eri osissa maata.

Etelässä voi talven kuluessa olla useita lauhkeita jaksoja pakkaskausien välillä, kun taas pohjoisessa talvi on useammin yhtäjaksoinen. Hetkellisten lauhtumisten seurauksena tapahtuvat lumen sulamiset ja uudelleenjäätymiset aiheuttavat sen, että lumi on yleensä tiheämpää etelässä kuin vastaavana ajankohtana pohjoisessa.

Edellä mainittujen syiden takia on mahdoton saada aikaiseksi funktiota, joka kuvaisi lumen tiheyden käyttäytymistä kovin hyvin niin laajalla ja ilmasto-oloiltaan heterogeenisellä alueella kuin Suomi. Tässä työssä käsitelystä aineistosta kävi ilmi, että sulamiskauden alkuun saakka jälkilaskennassa käytetty tiheysfunktio yleensä yliarvioi lumen tiheyttä pohjoisilla lumilinjoilla ja vastaavasti aliarvio sitä eteläisillä linjoilla. Sulamiskauden lopulla tiheys oli lähempään tarkasteluun valituilla linjoilla niin etelässä kuin pohjoisessakin suurempi ja jyrkemmin kasvava kuin funktion antama arvo.

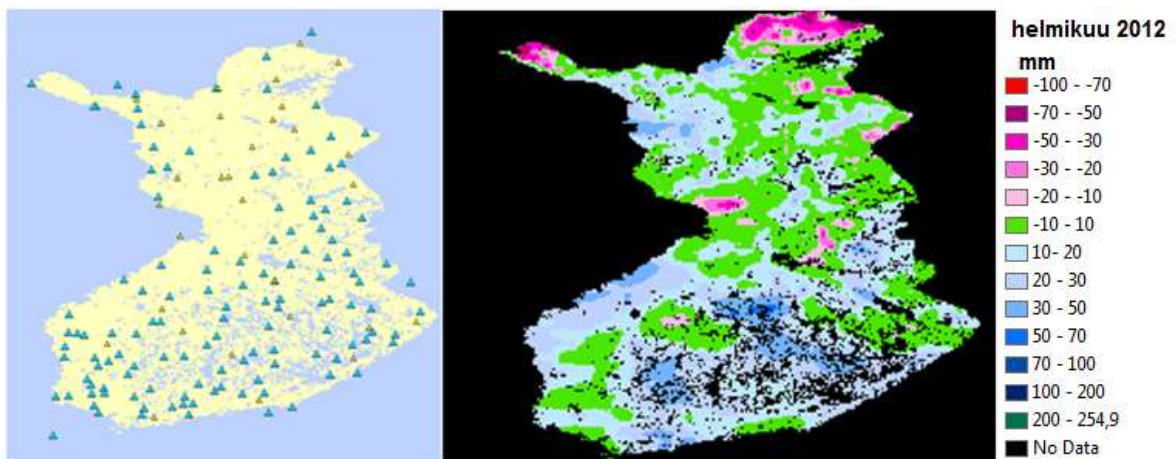
4.6.2 Lumen syvyys

Lumen kertymistä erilaisiin maastotyyppeihin sivuttiin kappaleessa [3.8.1]. Lumen syvyyden arvioinnin kannalta on tärkeä ymmärtää, että latvuspeiton takia metsiin kertyy keskimääräisesti vähemmän lunta kuin aukeille paikoille. Toisaalta puuston antama varjo ja tuulensuoja hidastavat keväällä lumen sulamista. Yleensä lunta on kertymiskaudella ja keski-talvella aukeilla alueilla enemmän kuin metsässä, ja keväällä sulamisen käynnistyttyä ero kääntyy päinvastaiseksi.

Säähavaintoasemat, joiden havainnoista radiometrilaskennassa käytettävät lumen syvyydet interpoloidaan, sijaitsevat pääasiassa aukeilla paikoilla. Tämän seurauksena radiometri-tuote usein yliarvio lumensyvyyttä ja siten vesiarvoa kertymäkaudella ja vastaavasti aliarvioi niitä keväällä sulamiskaudella.

Havaintoverkon aukot tai epätasainen kattavuus ovat käytetyn Kriging-interpoloinnin kannalta ongelmallisia. Kaksi lähekkäin olevaa pistettä, joilla on erilainen arvo, tulkitaan laskevaksi tai kasvavaksi trendiksi, ja suuri etäisyys näistä seuraavaan pisteeseen voi aiheuttaa ison virheen interpoloituun arvoon.

Tämän työn yhteydessä havaittiin, että SYKEssä käytetyssä radiometrilaskennan versiossa oli syötteenä alun perin vesistömallia varten tarkoitettu karsittu sääasemalista. Listasta puuttuivat ne sääasemat, joiden sadantoja ei ole voitu lähinaapurien puuttumisen tai niiden pienen määrän takia tarkistaa. Tämä kriteeri jätti pois monta sellaista asemaa, jotka olisivat olleet varsin oleellisia lumen syvyyden interpoloinnin kannalta. Ongelma korostui varsinkin Pohjois-Lapissa, jossa etäisyydet sääasemien välillä ovat pitkiä. Asia on sittemmin korjattu ja kevästä 2014 lähtien lumen syvyyden interpolointi on suoritettu käyttäen lumensyvyyshavaintoja kaikilta Ilmatieteen laitoksen tarjolla olevilta sääasemilta.

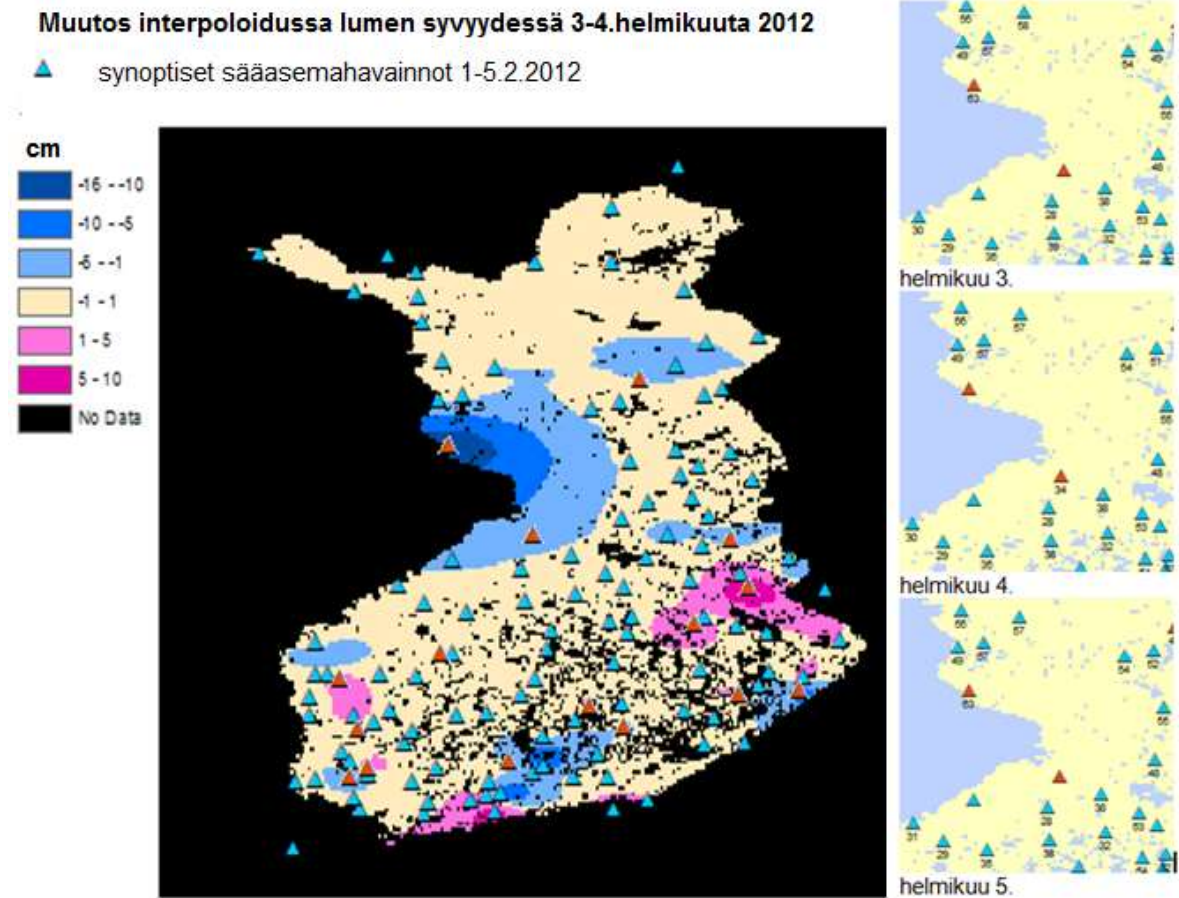


Kuva 25: Interpoloinnista puuttuneiden sääasemien (keltaiset kolmiot) sijainti suhteessa radiometrillä ja lumilinjamittauksilla saatujen lumen vesiarvojen välisiin eroihin. Siniset värit tarkoittavat, että radiometri yliarvio ja punaiset värit että radiometri aliarvioi lumen vesiarvon suhteessa maastohavainnoista interpoloituun karttaan. Vihreä väri taas kertoo että tuotteet ovat lähellä toisiaan.

Kuvan 25 vasempaan puoliskoon on merkitty keltaisella interpoloinnista ajanjaksolla 1.–5.2.2012 puuttuneet sääasemat. Kuvan oikeassa puoliskossa näkyvät radiometri- ja lumilinjamittauksien väliset lumen vesiarvojen erot värikoodattuina. Kuvia tarkastelemalla huomataan, että ainakin Pohjois-Lapissa ja Perämeren pohjukassa Kemin ympäristössä puuttuneiden sääasemien sijainti osuu yksiin niiden alueiden kanssa joissa tuotteiden välinen ero vesiarvossa on suuri. Liitteeseen 4 on koottu taulukko siitä, miten interpoloitu lumen syvyys eroaa puuttuneilla sääasemilla havaituista syvyyksistä.

Kuvassa 26 on esitetty, miten sääasemahavainnon puuttuminen vaikuttaa interpoloituun lumen syvyyteen. Väriskaalalla on merkitty miten interpoloitu lumen syvyys muuttuu helmikuun 3. ja 4. päivän välillä vuonna 2012. Sääasemat, joilta puuttuu havainto jommaltapäivältä, on merkitty oranssilla värillä. Tornionjoen suulla sääaseman puuttuminen aiheuttaa 10–16 cm eron interpoloituun lumen syvyyteen. Vaikutus heijastuu sää-

asemalta ulospäin pienentyen kohti seuraavia asemia, joilta havainnot on saatu normaalisti. Länsirannikolla puuttuvien neljän havainnon vaikutus on huomattavasta pienempi (< 5 cm), koska sääasemaverkko on siellä tiheämpi.



Kuva 26: Sääasemilla havaitut lumen syvyydet oikealla ja puuttuvien sääasemahavaintojen vaikutus interpoloituun lumen syvyyteen vasemmalla. Asemat joilta puuttuu havainto on merkitty oranssilla värillä.

Lumen syvyyden mittaamisessa tai interpoloinnissa olevan virheen suhteellinen vaikutus lumen vesiarvon laskentaan, on sitä suurempi, mitä pienempi lumivaipan todellinen paksuus on. Mittaustapahtumassa tyypillinen +/- 1 cm:n virhe tai interpoloinnin +/- 5 cm vaikuttaa huomattavasti enemmän 10 cm:n kuin 50 cm:n paksuisella hangella.

4.6.3 Lumilinjahavaintojen virheet ja lumilinjalaskennan oletukset

Lumilinjoilla tehtävät syvyysmittaukset ja punnitukset on suunniteltu niin, että mahdollisuus varsinaisen havaintovirheen syntymiseen on pieni. Havaintojen käsittelyyn vaikuttavien olosuhteiden määrittäminen perustuu kuitenkin inhimilliseen tulkintaan. Lisäksi oletetaan, että laskennassa käytettävät maastojakaumat edustavat hyvin lumilinjan todellista ympäristöä ja että päivän keskilämpötila riittää sulamisen ja sateen olomuodon selvittämiseen. Näin ei kuitenkaan aina ole.

Pälvisyyden ja maastotyyppin tulkinta

Lumilinjan kullekin mittauspisteelle kirjattu maastotyyppi ja pälvien määrä perustuvat havaitsijan omaan tulkintaan. Pälvisyyden määrittämiseen ja maastotyyppien tulkintaan on annettu ohjeet [SYKEN havaintovihko 7131 lumipeitteen linjamittauksia], mutta kahden eri

havaittajan tulokset samasta tilanteesta voivat poiketa toisistaan. Tämä vaikeuttaa eri linjojen havaintojen vertaamista toisiinsa ja aiheuttaa epävarmuutta hilakartan laskentaan. Lisäksi havaittajan vaihtuminen voi aiheuttaa sen, etteivät edes samalla linjalla eri vuosina tehdyt havainnot välttämättä ole täysin vertailukelpoisia.

Kirjaus- ja huolimattomuusvirheet

Toinen puhtaasti inhimillinen virhetekijä on kirjaus- ja huolimattomuusvirheet. Joskus havaittaja voi katsoa lumipuntarin tai mittakepin näyttämän arvon väärin tai kirjoittaa mittaus tuloksen havaintokirjaan tai -lomakkeelle virheellisesti. Lisäksi niillä linjoilla, joiden tulokset vielä toimitetaan SYKEn paperisina, voidaan epäselvä merkintä tulkita väärin, kun se siirretään tietokantaan. Sähköistä lomaketta käyttäessä taas ovat näppäilyvirheet mahdollisia.

Valuma-alueiden maastojakaumat

Lumilinjamittausten tulosten laskennassa käytetyt maastojakaumaproositit perustuivat vuonna 1991 valmistuneeseen satelliittikuvatulkintaan. Kuittisen ja Sucksdorffin (1987) mukaan tulkinta pitäisi uusien noin viiden vuoden välein, jotta voitaisiin olla varmoja sen ajantasaisuudesta. Tietokannassa olevia maasto-osuuksia ei ollut päivitetty systeemin käyttöönoton jälkeen, ja esimerkiksi suuret hakkuut sekä uusien peltojen ja asuma-alueiden perustaminen olivat voineet muuttaa valuma-alueen maastojakaumia merkittävästi.

Lisäksi alkuperäinen tulkinta ei kaikkien valuma-alueiden kohdalla ollut onnistunut kovin hyvin. Ainakin Lapista löytyy valuma-alueita, joiden pinta-alasta noin 80 % oli tulkittu olleen metsänaukkoa, mikä on fyysikaalinen mahdottomuus. Ongelman syyt voivat tosin olla enemmän käytetyn kuusiportaisen jaon karkeudessa kuin itse tulkinnassa. Kyseiset alueet sijaitsivat lähinnä Lapin harvapuuisilla tunturiylängöillä, jotka eivät ominaisuuksiltaan suoraan vastaa yhtäkään käytetyistä luokista.

Lämpötilahavainnot

Sulamis- ja jäätyismäärien sekä lumi- ja vesisateen osuuksien laskemiseen käytettävät lämpötilat ovat vuorokauden keskiarvoja. Laskentaan voi tulla virhettä esimerkiksi, jos suoja-aer ja aurinko sulattavat lunta päivällä mutta kylmä yö pitää vuorokausikeskiarvon pakkasen puolella. Samoin sateen olomuoto ja siten lumen kertyminen voidaan tulkita väärin, jos sade tulee siinä osassa vuorokautta, jolloin lämpötila on eri puolella nollarajaa kuin vuorokauden keskiarvo.

4.6.4 Lumilinjalaskennan erot teoriaan nähden

SYKEssä otettiin syksyllä 1991 käyttöön tietokoneohjelma lumen vesiarvon laskemisen tueksi. Lumilinjalla tehdyistä syvyyshavainnoista ja tiheyspunnituksista laskettiin maastotyyppikohtaiset vesiarvot ja näistä linjakohtainen keskiarvo perustuen ympäröivän valuma-alueen maastotyyppien jakaumaan. Ohjelman toteutus poikkeaa useassa kohtaa siitä miten laskennan vaiheet on esitetty menetelmää kuvaavissa teknisissä selosteissa [julkaisemattomat lähteet: tuntematon 1 ja tuntematon 2]. Osa ohjelman ja teorian välisistä eroista saattaa olla huolimattomuusvirheitä ja osa senaikaisten tietorakenteiden ja tallennuskapasiteetin aiheuttamia rajoituksia. Osa on saattanut syntyä, kun ohjelma jossain vaiheessa siirrettiin ohjelmointikieliltä toiselle. Itse koodi on kommentoimaton, joten erojen syntyä on vaikea jäljittää. Alla on esitelty suurimmat erot ja mahdollisuuksien mukaan myös annettu arvio aiheutuvan virheen määrästä.

Keskiarvon laskenta

Vanhassa valuma-aluekohtaisessa lumilinja-laskennassa oli käytössä kaksi erilaista tapaa keskiarvon laskemiseen. Laskettaessa maastotyyppin keskitiheyttä käytettiin perinteistä keskiarvoa eli havaintojen summaa jaettuna niiden lukumäärällä. Laskettaessa koko linjan keskitiheyttä käytettiin sarakesummiin perustuvaa painotettua keskiarvoa. Tällainen laskentatapa antoi suuremman painon sellaiselle yksittäishavainnolle, jossa lumen syvyys oli suurempi. Ero tavalliseen keskiarvoon voi olla huomattava. Tutkittavassa aineistossa oli tapauksia, joissa vaikutus yksittäisen maastotyyppin vesi-arvoon oli jopa 5 %. Lumilinja-keskimääräiseen vesi-arvoon, joka muodostui maastotyyppien painotettuna keskiarvona, vaikutus oli yleensä pienempi (0–2,5 %). Lumilinja-laskennan teknisessä selosteessa (Julkaisemattomat lähteet: tuntematon 1) tätä poikkeavaa laskentatapaa ei ole mainittu. Kyse saattoi olla laskentakoodiin jääneestä virheestä.

Maastotyyppien painolukujen summa

Valuma-aluekohtaisen lumen vesi-arvon laskemiseen käytetyssä koodissa oli virhe. Maastotyyppikohtaiset painokertoimet oli annettu kahden desimaalin tarkkuudella, mutta summalauseke, joka toimii painotetun keskiarvon jakajana, oli koodattu käyttäen tietotyyppiä kokonaisluku. Seurauksena painoluvut pyöristettiin lähimpään kokonaislukuun ennen yhteenlaskua. Teoreettinen maksimivirhe on kolme yksikköä painosummassa, olettaen että kaikki maastokohtaiset painot olisivat lähellä puolikasta ja pyöristyisivät samaan suuntaan.

Linjojen painosumat vaihtelevat välillä 37,79–100 ja suurin osa summista on yli 70. Kolmen yksikön virhe pienimmässä painosummassa aiheuttaisi 7,5 %:n virheen lumen vesi-arvoon koko linjalla. Käytännössä näin suuria virheitä ei tietokannasta löytynyt. Tässä työssä käytetyssä otoksessa suurin pyöristyksen aiheuttama virhe oli luvun 98,98 pyöristäminen lukuun 97 Inarin Repojoen linjalla. Tämä pyöristys aiheutti sen, että lumen vesi-arvot olivat linjalla 2 % liian suuria.

Korjauskertoimet

Puuttuvien havaintojen varalle oli kullekin maastotyyppille määritelty korvaavuustaulukko ja korjauskertoimet sen mukaan miten hyvin maastotyyppit muistuttavat toisiaan lumen kertymisen suhteen. Kertoimet perustuivat tilastollisiin eroihin eri maastotyyppisiin kerääntyvän lumen määrästä. Havainnon puuttuessa olisi korvaavuustaulukko pitänyt käydä järjestyksessä läpi ja puuttuva vesi-arvo laskea ensimmäisen sellaisen maastotyyppin vesi-arvosta, josta oli tehty sekä syvyys että tiheyshavainnot.

Lumilaskentakoodissa oli kuitenkin virhe puuttuvan maastotyyppin vesi-arvon laskentaan käytetyssä funktiossa, ja tarkistus punnitukseen olemassaolosta puuttui osasta koodia. Tarkistus tehtiin maastotyyppin aukea kohdalla, mutta se puuttui muista maastotyypeistä. Seurauksena oli, että jos havainnot puuttui kahdesta tai useammasta maastotyyppistä, saatettiin korjaus tehdä väärällä kertoimella. Kyse on voinut olla virheestä alkuperäisessä ohjelmoinnissa, tai virhe on syntynyt, kun ohjelma siirrettiin alkuperäiseltä Fortran-alustaltaan nykyiseen Delphi-ympäristöön.

Kaikkiaan kuudesta maastotyyppistä kahdesta viiteen maastotyyppiä voivat puuttua kombinatoriikan mukaan 56 eri tavalla. Läheskään kaikkia puuttuvien maastotyyppien kombinaatioita ei löydy käytössä olevilta lumilinjailta, mutta niiden teoreettinen vaikutus on käyty läpi liitteessä (liite1).

Korjauskertoimien järkevyys käytetyllä mallilla voidaan kyseenalaistaa. Kertoimet perustuivat aikasarjoista kerättyihin havaintoihin eri maastotyyppien välisistä keskimääräisistä eroista. Kuitenkin myös maastotyyppien sisällä on paljon vaihtelua, ja esimerkiksi metsän tiheys tai rinteiden suunta saattaa vaikuttaa lumen kertymiseen paljon enemmän kuin se, mitä puulajia metsässä kasvaa eniten. Lisäksi myöhään sulamiskaudella ero sulamisnopeudessa aiheutti sen, että kertoimet vaikuttivat väärään suuntaan. Kertymiskaudella aukeat ja aukot keräävät maastotyypeistä keskimääräisesti eniten lunta, mutta sulamiskaudella lumi myös häviää kyseisistä maastotyypeistä ensimmäisenä. Myöhään keväällä laskettaessa metsän aukon ja aukeiden alueiden vesi-arvoa metsässä tehdyistä havainnoista saadaan liian suuri arvo ja toiseen suuntaan laskettaessa liian pieni arvo.

Taulukossa 8 on esitetty lumen syvyydet eri maastotyypeissä Savitaipaleen lumilinjalla, sekä läheisillä sääasemilla havaitut arvot ja näistä linjan kohdalle interpoloitu lumen syvyys keväällä 2011. Eri maastotyypeistä lasketun keskiarvon ja sääasemilta interpoloidun lumen syvyyden suhde noudattaa melko hyvin yllä esitettyä, mutta ero kerääntyvän lumen määrässä maastotyyppien välillä ei ole yhtä helposti tulkittavissa. Suolle ja lehtimetsään kertyvän lumen määrä näyttäisi olevan yhtä suuri, kuin aukeille ja metsänaukkoihin kertyvän, ja lumi myös näyttäisi viipyvän näissä maastotyypeissä pitkään. Kohtuullisen harva lehtimetsä saattaa hyvin olla ominaisuuksiltaan lähellä metsänaukkoa, mutta suolle kerääntyvän lumen suuri määrä on hienoinen yllätys. Kyseisen linjan reitillä tehdään vain yksi mittaus suolla, joten voi olla mahdollista että kyseinen havaintopiste ei edusta maastotyyppiä kovin hyvin.

Taulukko 8: Lumen syvyys maastotyyppin mukaan sekä sääasemilla havaitut lumensyvyudet ja niistä interpoloitu keskiarvo lumilinjan 1041401 Savitaipale ympäristössä.

		16.1.	14.2.	9.3.	1.4.	16.4.
Maastotyyppi	Aukea	53	68	60	78	15
	Aukko	54	71	62	79	25
	Mänty	49	63	56	61	20
	Kuusi	43	55	52	59	17
	Lehti	54	65	64	79	32
	Suo	55	76	53	70	38
	lumen keski- syvyys lin- jalla	51,3	66,3	57,9	71,0	24,5
	sääasemilta interpoloitu lumen syvyys	42,7	71,7	65,4	74	11
Sääaseman tunnus (LPNN)	1521	41	68	56	60	0
	1529	61	76	72	86	22
	1612	44	73	74	83	25
	1711	32	50	50,5	66	5,5
	2614	51	69		67	17

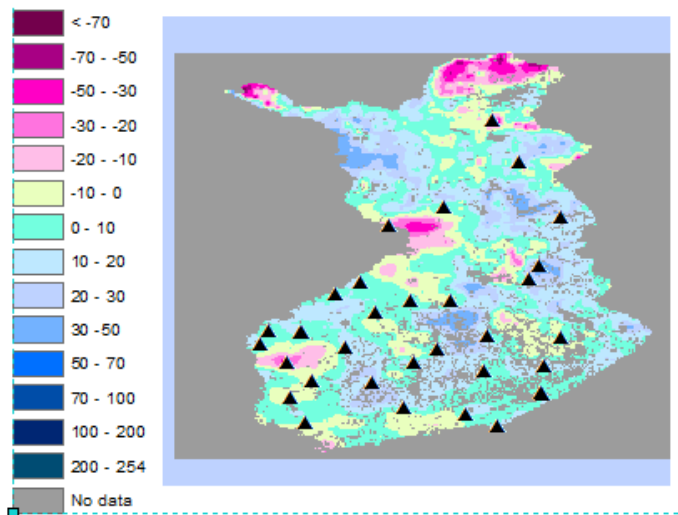
Pienten valuma-alueiden lumilinjat

Pienten valuma-alueiden lumilinjoilla ei kirjata ylös mittaus- ja punnituspisteiden maastotyyppejä. Ohjeellinen tapa on lumen vesi-arvon laskeminen kaikkien punnitusten ja kaikkien syvyyshavaintojen keskiarvojen tulona. Lumilaskennan koodissa tämä oli toteutettu niin, että maastotyyppin aukea vesi-arvo laskettiin yllä olevalla tavalla, ja kaikki muut maastotyyppit laskettiin tästä korjauskertoimien avulla. Tämän jälkeen vesi-arvo koko linjalle laskettiin maastotietokannan painojen mukaan kuten muillakin linjoilla.

Jos enemmistö linjan pisteistä kuitenkin sijaitsi jossain muussa maastotyyppissä, kuin aukealla, laskentatapa vääristi tuloksia. Esimerkiksi Lauhavuoren linjalla tulkitsemalla ilmakehää, sekä routaputkien maastokortteja, kolme neljännestä havaintopisteistä sijaitsee mäntymetsässä. Kun näistä pääasiassa metsässä tehdyistä havainnoista laskettiin aukean vesi-arvo, ja mäntymetsän vesi-arvo tästä kertomalla 0,9:llä, aiheutui tulokseen harha alaspäin.

Tutkintajaksolla 1.1.2011–31.5.2013 ero punnituksista ja syvyyshavainnosta lasketun keskiarvon ja tietokantaan pienille linjoille merkityn vesi-arvon välillä oli keskimäärin 7,5 %, pienimmän eron ollessa 1,3 % ja suurimman 14,1 %. Ero yksittäisellä linjalla pysyy tarkastelujaksolla suurin piirtein vakiona ja johtuu tietokannassa linjalle määritettyjen painojen jakaumasta, sekä vesi-arvon todellisesta vaihtelusta maastotyyppien välillä.

Verrattaessa radiometrin ja lumilinjojen välisiä eroja edellä mainittu ei kuitenkaan näkyneet voimakkaana selittävänä tekijänä. Kuvassa 27 esitetään pienten lumilinjojen sijainti suhteessa keskimääräiseen virheeseen vuosilta 2011–2012.



Kuva 27: Pienten valuma-alueiden lumilinjat ja ero lumen vesi-arvokarttojen välillä. Siniset värit tarkoittavat, että radiometri yliarvioi ja keltainen, sekä punaiset värit että radiometri aliarvioi suhteessa lumilinjoilta havaittuihin arvoihin.

4.6.5 Havainto- ja laskentaympäristön laajuus

SSM/I:n nominaalinen resoluutio on $25 \times 25 \text{ km}^2$ ja siitä tuotetun vesi-arvokartan resoluutio $0,05^\circ \times 0,05^\circ$. Tämä tästä eteenpäin 5×5 -ympäristöksi kutsuttu alue, vastaa Suomen leveysasteilla $2,5\text{--}3,5 \times 5 \text{ km}^2$ aluetta maastossa. Yksittäinen lumilinja vastaa olemattoman pientä osaa yksittäisestä radiometrihavainnosta ja on laajimmillaankin noin $\frac{1}{4}$ radiometridatasta tuotetun vesi-arvokartan pikselistä. Tämä tekee kyseenalaiseksi lumilinja- ja radiometrihavaintojen vertailukelpoisuuden.

Lumilinjat on suunniteltu siten, että niiden pitäisi maastonsa puolesta suhteellisen hyvin edustaa useamman kilometrin laajuista aluetta itse linjojen ympärillä. Jotta voidaan arvioida, miten havaintoympäristön koko vaikuttaa lumilinjojen ja satelliittihavaintojen vertailtavuuteen, laskettiin maastojakaumat lumilinjoilla käytetyssä kuudessa luokassa niille radiometrituotteen pikseleille, joissa lumilinjat sijaitsivat. Lumilinjan osuessa kahden pikselin rajalle laskettiin muunnokset molemmille pikseleille ja käytettiin sitä jonka jakauma erosi enemmän lumilinjalla havaittujen maastotyyppien jakaumasta.

Valituilla lumilinjoilla oli havaintojaksolla 2011–2013 yhteensä 272 mittauspäivää. Lumilinjoilta havaittu vesi-arvo laajennettiin radiometrituotteen pikselikokoon painottamalla linjoilta havaittuja maastotyyppikohtaisia vesi-arvoja radiometrituotteen pikseleiden maastojakaumilla. Keskimääräiset erot laskentatapojen välillä olivat pieniä, jäännöseliövirheen jäädessä noin 8 mm:iin. Joukossa oli kuitenkin yksittäisiä havaintopäiviä joille laajennettun ympäristön vesi-arvo poikkesi huomattavasti linjalla havaitusta.

Suhteellisen virheen jäännöseliövirhe oli 13,2 %. Loppukevästä vesi-arvojen ollessa pieniä ja erojen maastotyyppien välillä suuria jo muutaman millimetrin ero vesi-arvossa voi tuottaa suuren suhteelliseen eron. Kun 272 havainnon havaintosarjasta poistettiin viisi suhteellisesti suurinta eroa, suhteellisen eron neliövirhe putosi 9,3 %:iin. Kaikki poistetut havainnot olivat kevään viimeisiä havaintoja ja näistä kolme olivat samalta lumilinjalta Vaala Niska, tunnus 1592101. Kaksi kyseiseltä linjalta poistetuista kolmesta havainnosta olivat myös kymmenen absoluuttisesti suurimman eron joukossa arvoilla -32 ja -21 mm.

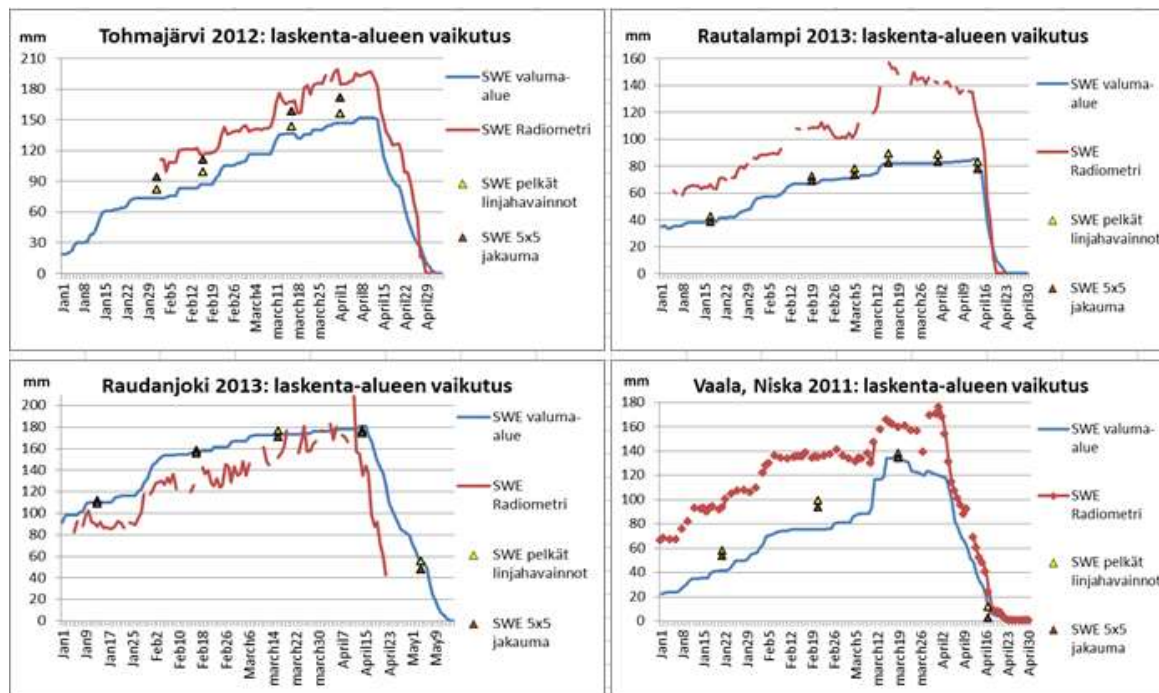
Yllä olevan perusteella voidaan esittää, että jos radiometrihavaintojen jäännöseliövirheet suhteessa lumilinjahavaintoihin ovat paljon suurempia kuin 10 mm, löytyvät syyt eroihin muista tekijöistä kuin havaintoympäristön koosta.

Vaihtelu radiometrihavaintojen eroissa eri laskentatapoihin nähden on pienempää. Taulukossa 9 on esitetty radiometrihavaintoihin perustuvan ja erikokoisissa ympäristöissä lumilinjoille laskettujen lumen vesi-arvojen väliset jäännöseliövirheet. Pelkkiin maastohavaintoihin perustuvan ja radiometrituotteen välisen eron jäännöseliövirhe on keskimäärin 2–3 mm pienempi, kuin ero valuma-alueen maastojakaumaan perustuvan arvon ja radiometrituotteen välillä. 5×5-ympäristön ero radiometrituotteeseen nähden jää yleensä linjahavaintojen ja valuma-aluepohjaisen laskennan väliin, tosin poikkeuksiakin löytyy.

Taulukko 9: Radiometrihavaintoihin perustuvien ja eri laskentaympäristössä laskettujen lumen vesi-arvojen jäännöseliövirheiden erot

	valuma-alue	vain linja-havainnot	5×5 jakauma
2011	30	26,1	29,2
2012	30,6	28,4	29,6
2013	28,2	25,1	25,8
koko jakso	29,6	27,3	28,3

Kuvassa 28 on esitetty eri ympäristöissä laskettu lumen vesiarvo suhteessa radiometrituotteen antamaan arvoon neljällä eri lumilinjalla. Eri ympäristöissä lasketut arvot ovat yleensä melko lähellä toisiaan, mutta esimerkiksi linjalla Tohmajärvi 5×5-ympäristössä laskettu tulos on huomattavasti lähempänä radiometrilaskennalla saatua arvoa kuin valuma-aluepohjainen tai pelkkiin linjahavaintoihin perustuvat arvot. Raudanjoen lumilinjalla näkyvä piikki radiometrilaskennan osoittamassa lumen vesiarvossa, juuri ennen kevään neljättä havaintopäivää, johtuu läheisen säähavaintoaseman havaintokatkosta. Interpoloituun lumensyvyyteen tulee aseman puuttumisen vuoksi 14 cm hyppäys edellispäivään nähden, mikä johtaa noin 40 mm piikkiin assimiloitituloksessa.



Kuva 28: Laskenta-alueen vaikutus

4.6.6 Inversiomallin oletukset ja radiometrihavainnon virheet

Lumen vesiarvon määrittäminen radiometrihavainnoista perustuu havaittuun eroon kirkkausarvossa matalamman ja korkeamman taajuuden välillä. Jotta lumivaipan havaintoon aiheuttama vaimennus tulkitaan oikein, on muut kirkkausarvoon vaikuttavat tekijät kyettävä eliminoimaan laskennasta. Virheet muiden tekijöiden huomioimisessa vaikuttavat kirkkausarvoon, jonka pohjalta vesiarvoa lähdetään estimoimaan. Koska korkeampi taajuus vaimenee enemmän, mitä suurempi on havaittu kirkkauslämpötila, sitä pienempi on taajuuksien välinen ero ja sen perusteella estimoitu lumen vesiarvo. Hollinger, Peirce, Poe [1990] artikkeliin perustuen SSM/I:n instrumentin kohinasta aiheutuva maksimi ero lämpötilassa perättäisten havaintojen välillä on noin 2 K. Kuivalla lumella tämä vastaa noin 3 mm lumen vesiarvossa.

Raekoko

Voimakkain kuivan lumen emissiivisyyteen ja vaimennukseen vaikuttava tekijä on hangen jääkiteiden raekoko. Raekoko vaihtelee voimakkaasti lumen eri kerroksissa, mutta laskennassa sille estimoidaan keskimääräinen arvo. Käytetty inversioalgoritmi on toteutettu siten, että havaittu kirkkausarvo sovitetaan malliin laskennassa käytettävää raekokoa säätämällä. Tämän seurauksena kaikki kirkkausarvoon vaikuttavat erot laskennassa käytettyjen arvojen ja lumen todellisten ominaisuuksien välillä, sekä maanpeitteestä (puusto ja järvet) aiheutu-

vat virheet havaitussa kirkkausarvossa, joita ei ole saatu muulla tavoin huomioitua, kasautuvat raekokoon. Tämä kompensoi jonkun verran muiden virhelähteiden vaikutuksia. Jos erot ovat suuria, kasvaa raekoon varianssi, ja radiometrihavaintojen painoarvo assimilointiprosessissa vähenee.

Ilmakehä

Säteilyn kulku ilmakehän läpi riippuu käytettävästä taajuudesta sekä ilmakehän kaasujen konsentraatioista, jotka muuttuvat ajan kuluessa sääolojen (lämpötila, ilmanpaine) mukana. Eri kaasut absorboivat eri taajuuksia ja näiden kaasujen määrä läpäistävässä ilmakehän osassa määrää kuinka suuri osa maanpinnalta lähtevästä säteilystä saavuttaa instrumentin. Ilmakehän tarkan hetkellisen koostumuksen määrittäminen tietyn maanpinnan kohdan yläpuolella on haastavaa, mutta läpäisevyydestä tietyllä katselukulmalla ja aallonpituudella on mahdollista laatia tilastollinen malli.

HUT inversioalgoritmissa käytetään Pulliaisen, Kärnän ja Hallikaisen (1993) artikkelin perustuvaa tilastollista mallia, jonka mukaan lumen havaitsemiseen käytettävillä taajuuksilla ilmakehän läpäisevyys on 95 % varmuudella vähintään 0,85 19 GHz taajuudelle ja 0,78 37 GHz taajuudelle. Algoritmissa ilmakehän läpäisevyys on laskettu käyttäen saman artikkelin 55 % varmuusarvoja, jolloin läpäisevyydet ovat 0,93 19 GHz taajuudelle ja 0,87 37 GHz taajuudella. Malli soveltuu käytettäväksi leveyspiirien 50 ja 70 väliselle alueelle.

Jos ilmakehän läpäisevyys havaintohetkellä poikkeaa voimakkaasti käytetystä arvosta, korjataan havaitut kirkkausarvot väärin, mikä johtaa virheeseen lumen vesiarvon tulkinnassa. Jos Läpäisevyys on suurempi kuin käytetty arvo, tulkitaan lumen vesiarvo liian pieneksi ja vastaavasti liian suureksi läpäisevyyden ollessa käytettyä arvoa pienempi.

Maaperän dielektrisyysvakio

Dielektrisyysvakion imaginäärinen osa vaikuttaa suoraan kappaleen emissiivisyyteen ja siten havaitun kirkkauslämpötilan suuruuteen. Sulan maan dielektrisyysvakio määrittyy sen vesipitoisuuden, sekä maaperässä olevien maalajien suhteellisten osuuksien ja maaperän lämpötilan perusteella. Johtuen veden dielektrisistä ominaisuuksista sulan maan emissiivisyys vaihtelee voimakkaasti havaittavan taajuuden mukaan. Jään dielektrisyysvakio on lähes vakio halki mikroaltoaueen, mikä voimakkaasti vähentää jäätyneen maaperän emissiivisyyden riippuvuutta havaitusta taajuudesta [Hallikainen ja muut 1985].

Jäätyneen maan dielektrisyydelle on inversioalgoritmissa käytetty vakioarvoa kaikille maalajeille ja taajuuksille perustuen Hallikaisen ja muiden (1985) tutkimukseen. Samaisen tutkimuksen mukaan maalajien dielektrisyys muuttuu voimakkaasti lämpötilan funktiona kun lämpötila laskee -11° asteesta -24 asteeseen Celsiusta. Tämä aiheuttaa epävarmuutta havaittuun kirkkauslämpötilaan ja siitä tulkittuun lumen vesiarvoon.

Vakioarvon käyttö on kuitenkin perusteltua, sillä tarkan maaperäkoostumuksen ja maaperän lämpötilan määrittäminen kaikille radiometrikartan pikseleille on käytännön mahdottomuus. Myös maaperän lämpötilan arvioiminen puhtaasti ilman lämpötilan perusteella olisi haastavaa, koska lumihanki toimii eristeenä, ja routainen maa reagoi muutenkin verrattain hitaasti ilman lämpötilan muutoksiin.

Kinoksen rakenne ja kerroksellisuus

Yleensä mallinnusalgoritmit olettavat kinoksen ominaisuuksiltaan homogeeniseksi. Todellisuudessa hanki on lähes aina lämpötilanvaihtelujen aiheuttamien sulamis- ja jäätyprosessien, sekä sadannan aikaisten erilaisten sääolojen (mm. tuulen nopeus ja suunta) seurauksena hyvinkin kerroksellista. Nämä ominaisuudet kuitenkin vaihtelevat voimakkaasti niin maantieteellisesti kuin ajallisestikin. Tämä tekee hangen rakenteen arvioinnista hyvin vaikeaa. Käytännössä hanki oletetaan yksikerroksiseksi, ja eri kerrosten erilaisille tiheyksille ja raekoille yritetään estimoida keskiarvot, jotka antaisivat mahdollisimman lähellä oikeaa olevan tuloksen.

Sekoittuneen pikselit

Passiivisten mikroaaltoradiometriä kuten SSM/I:n spatiaalinen resoluutio lasketaan kymmenissä kilometreissä. Tämän seurauksena havaittu kirkkausarvo koostuu useista säteilyominaisuuksiltaan erilaisista maastotyypeistä ja kohteista. Tätä kutsutaan sekoittuneiden pikselien (engl. mixed pixels) ongelmaksi. Vaikka yksittäisille kohteille olisi mahdollista kehittää malleja, jotka erittäin tarkasti kuvaisivat niiden ominaisuuksia suhteessa säteilyarvojen muutoksiin, sekoittuneiden pikselien takia näitä malleja ei voida käyttää, vaan joudutaan turvautumaan yleistävämpiin malleihin, jotka antavat keskimäärin oikean tuloksen instrumentin yksittäisen mittauksen kattamalta alalta.

Jos on käytettävissä tieto maanpeitteen jakautumasta tutkittavalla pinta-alalla, voidaan sekoittuneiden pikselien ongelmaa kiertää. Laskemalla kirkkausarvoa vastaavat lumen vesiarvot kullakin mallilla tai eri parametreilla erikseen, ja painottamalla tuloksia maanpeiteluokkien osuuksilla, voidaan arviota lumen vesiarvosta parantaa. Tämä ei poista ongelmaa kokonaan, sillä kaikille kohteille ei ole omaa säteilymallia. Lisäksi myös maanpeitekarttojen resoluutiassa kärsitään siitä, että todellinen maasto harvoin kuuluu täydellisesti mihinkään yhteen mallinnettavissa olevaan luokkaan.

Vesistöt

Havaittaessa lumen vesiarvoa yksi suurimmista pikselien sekoittumista aiheuttava tekijä ovat vesistöt. Vesistöjen päällä oleva lumipeite on usein rakenteeltaan voimakkaan kerrostunutta ja lisäksi jään ja sen alla olevan veden dielektrisyys on erilainen kuin paljaan jäässä olevan maan [Rees ym. 2006].

Kun vesi jään murtumakohdissa pulppuaa jään päällä olevan lumen sekaan (uhkuminen), syntyy kohvajäätä, joka on ominaisuuksiltaan hyvin erilaista kuin ympäröivien maanalueiden kuiva lumipeite. Lemmetyinen ym. (2011) ovat artikkelissaan tutkineet makeavetisten järvien vaikutusta radiometrikselin kirkkausarvoon ja esittäneet parannuksia HUT inversioalgoritmiin. Näitä parannuksia ei tähän työhön ehditty ottaa mukaan, vaan aineistot on käsitelty SYKEssä käytössä olleella algoritmin edellisellä versiolla.

Kasvillisuus

Metsä, kuten lumihankikin, sekä säteilee mikroaaltoalueella että vaimentaa maasta tulevan säteilyn voimakkuutta, jonka havaitsemiseen lumen määrän arviointi perustuu. Metsäisillä alueilla puuston vaikutus on usein dominoiva radiometrisignaalin voimakkuuteen vaikuttava tekijä, ja se on otettava huomioon jotta lumen määrä saadaan arvioitua oikein.

Puuston latvusto säteilee voimakkaasti lumen havaitsemiseen käytettävillä taajuuksilla ja sen emissiivisyys on lähes sama, kuin paljaan jäätyneen maan. Täten tiheä metsä nostaa instrumentin havaitsemaa kirkkauslämpötilaa ja kaventaa kanavien välistä lämpötilaeroa, mikä voi johtaa lumen määrän aliarvioimiseen.

Samoin kuin järvien tapauksessa, maanpeitekarttojen avulla arvioidaan kuinka suuri osa radiometri-pikselin pinta-alasta on metsien peitossa. Lisäksi tarvitaan arvio metsän keskimääräisestä biomassasta tai runkotilavuudesta pikselin alueella. Mallilla lasketaan havainto täysin metsäiselle alueelle ja täysin avoimelle maastolle, ja yksittäisen pikselin metsäkorjattu vesi-arvo saadaan painottamalla näitä arvoja kyseisen pikselin metsäisyysprosentilla.

4.6.7 Hilakartan epävarmuudet

Hilakartalla lasketaan estimaatit lumen vesi-arvosta havaintoverkoston väliin jääville alueille. Laskenta perustuu korjauskertoimiin, joilla pyritään mallintamaan miten korkeuserot ja rannikon läheisyys vaikuttavat kertyvän lumen määrään. Kertoimien määrittämisessä on kuitenkin tehty paljon yleistyksiä ja paikoitellen niiden edustavuus suhteessa todellisiin maasto-oloihin on kyseenalainen.

Topologiamallinnuksen tarkkuus

Topologian vaikutusta sadantaan mallinnetaan rinnekorjauskertoimien avulla. Hilanpisteiden korkeudet on otettu kunkin pisteen keskeltä ja lumilinjoille on arvioitu keskikorkeudet maastokartan korkeuskäyristä. Pisteiden väliin jäävistä maastonmuodoista ei ole tietoa. 10 km pistevälillä on mahdollista, että hilan väleihin jää harjanteita, joiden vaikutusta sadantaan ei saada huomioitua.

Tuulten suunnat

Hilakartan topologisten korjauskerrointen laskentaan käytetyt tuulen suunnan yleisyydet ovat Korhosen tutkimuksesta vuodelta 1942. Lienee mahdollista, että tuulen suuntien yleisyyksissä on tapahtunut pieniä muutoksia seitsemässäkymmenessä vuodessa, yleisen ilmaston lämpenemisen seurauksena. Lisäksi korjauskertoimien laskentaan käytetyt arvot ovat koko maalle ja läpi koko talven laskettuja keskiarvoja, jotka varmasti poikkeavat paikallisista arvoista jonkun verran.

Rinnekorjauksen suuruus

Hilakartan laskenta korjaa yksittäiseen hilapisteeseen estimoitua lumen vesi-arvoa lähimpien lumilinjojen ja hilapisteen suhteellisella korkeuserolla. Pohjoisimmassa Lapissa ja Käsivarressa erot radiometrihavaintoihin pysyvät hyvin suurina halki koko tarkastelujakson (katso kuvat luvussa 4.4). Lumilinjoja ei ole sijoitettu tunturiin vaan sijaitsevat yleensä matalammalla, muuta maastoa paremmin edustavissa paikoissa. Täten korkeuserot ja niiden perusteella tehtävä korjaus hilapisteen vesi-arvoon voivat muodostua suuriksi. Vaikka aukot lumen syvyyden interpoloinnissa käytetyssä sääasemaverkossa selittävät osan erosta, on perusteltua kysyä onko vesi-arvoon tehtävä korjaus ehkä liian suuri? Tuuli voi pitää tunturien laet lähes lumettomana, mutta hilalaskennan puhtaasti korkeus eroon perustuva korjaus laskee suurimmat vesi-arvot juuri huipuille. Lumen vesi-arvosta tunturien ylärinteillä ja huipuilla ei valitettavasti ollut tätä työtä varten tarjolla tuoretta vertailutietoa.

4.7 Tapaus: Lauhavuori

Lauhavuoren pienen valuma-alueen lumilinja Etelä-Pohjanmaalla muodostaa kiinnostavan esimerkkitapauksen, jossa monta osatekijää yhdessä aiheuttavat koko havaintoaineistossa suurimpien joukkoon kuuluvat erot radiometrihavaintoihin nähden.

Ensinäkin kohde on noin 100 m ympäröivää maastoa korkeammalla. Tämän seurauksena linjalle kerääntyy huomattavasti enemmän lunta, kuin tasamaalla sijaitseville sääasemille Lauhavuoren ympäristössä. Sääasemilta interpoloitu lumen syvyys onkin halki kolmen vuoden tarkastelujakson 10-30 cm pienempi kuin lumilinjalta mitatut syvyydet. Erot lumen syvyydestä korostuvat varsinkin loppukeväällä, sillä maasto Lauhavuoren laella on pääasiassa kohtuullisen tiheää mäntymetsää, jossa on yleensä vielä useampi kymmenen senttiä lunta, kun hanki aukeilta sääasemien ympäristöstä on jo lähes hävinnyt. Linjalla ja lähiympäristön sääasemilla mitatut lumen syvyydet on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10: Lumen syvyydet sääasemilla Lauhavuoren lumilinjan ympäristössä

LPNN	Lumen syvyys sääasemilla						Lumen syvyys Lauhavuoren lumilinjalla		
	2003	2004	2008	2101	2116	2117	min	keski-arvo	max
Nimi	Merikarvia, Tuorila Alakylä	Isojoki, Kärjenkoski	Teuva, Kauppilankylä	Kankaanpää, Niinisalo, Puolustusvoimat	Kauhajoki Kaupunki	Jalasjärvi Hirvijärvi			
mittauspäivä									
2011									
30.1.	62	50	44	45	57	37	60	67	75
28.2.	67	57	50	58	57	40	55	66	76
18.3.	86	70	65	63	68	44	73	84	96
2.4.	74	51	53	53	58	30	61	74	86
17.4.	25	0	0	0	0	0	9	25	42
2012									
31.1.	29	25	26	32	24	13	28	34	46
29.2.	66	57	52	43	46	26	55	63	76
15.3.	45	38	34	33	29	11	42	54	66
31.3.	20	1	2	7	0	1	42	36	49
15.4.	2	0	0	1	0	0	9	22	35
2013									
1.2.	27	23	17	38	22	24	40	50	64
28.2.	39	28	22	46	31	29	43	55	69
29.3.	51	34	34	52	45	35	59	66	76
14.4.	37	20	20	39	31	22	42	57	66

Toiseksi myös lumen tiheys on aliarvioitu halki tarkastelujakson. Kun Lauhavuorelta mitattuja lumen tiheysarvoja vertaa 15 km päässä sijaitsevan Karvian lumilinjalla (tunnus 1719801) mitattuihin arvoihin, ovat saman ajankohdan tiheydet Lauhavuorella yleensä

hieman suurempia. Olettavasti ympäristöä runsaampi lumen määrä yhdessä huipun tuuliolojen kanssa aiheuttavat sen, että lumi myös pakkautuu tiiviimmin.

Kolmanneksi Lauhavuoren lumilinjan kymmenestä lähimmästä sääasemasta neljä kuului käytössä olleelle suodatuslistalle. Tämä vähensi radiometrikartan laskennassa käytetyn lumen syvyyden luotettavuutta lumilinjan ympäristössä entisestään.

Aliarvioidut lumen tiheys ja syvyys yhdessä aiheuttavat sen, että Lauhavuoren linjan kohdalla lumen vesi-arvo aliarvioidaan radiometrilaskennassa läpi koko tarkastelujakson 2011–2013. Todellinen ero tuotteiden välillä on kuitenkin vieläkin suurempi. Tietokantaan linjalle tallennetut lumen vesi-arvot ovat noin 9 % liian pieniä, johtuen pienten valuma-alueiden lumilinjojen virheellisestä käsittelystä lumilinjalaskennassa (katso kohta 4.6.4).

4.8 Laskennan parantaminen alueellisesti sovitettujen tiheysfunktioiden avulla

Kohdassa 4.6.1 todettiin, että ajan mukaan muuttuvalla tiheysfunktiolla on mahdollista korjata radiometrihavaintoja jälkilaskentana siten, että ero maastomittauksiin pienenee. Todettiin myös, että korjauksesta saatavaa hyötyä rajoittaa maantieteellinen vaihtelu talven pituudessa ja alkamisajankohdassa. Looginen ratkaisu ongelman kiertämiseksi on laskea omat tiheydenmuutosfunktiot pienemmille maantieteellisille alueille, joiden sisällä vaihtelu talven ajankohdassa ja pituudessa ovat pienempiä.

Tätä työtä varten tarkasteltiin lumilinjoilla havaittuja tiheysarvoja keväällä 2011 sekä koko aineistossa että valituilla linjoilla erikseen. Huomattiin, että karkeasti rajan 63,5 astetta pohjoista leveyttä pohjoispuolella tiheysarvot olivat keskimäärin pienempiä ja pysyivät kevään läpi lähempänä toisiaan, kuin rajan eteläpuolella. Lumilinjahavainnot jaettiin kahteen osaan, ja molemmille dataseteille laskettiin omat tiheysfunktiot sovittamalla havaintoihin toisen asteen polynomi. Lähempään tarkasteluun valituista linjoista 10 jäi eteläiseen ja 11 pohjoiseen osajoukkoon.

4.8.1 Tiheysfunktiot

Taulukossa 11 on esitetty vanhan koko havaintoaineistolle lasketun tiheyskäyrän ja uusien pienemmille maantieteellisille alueille sovitettujen tiheyskäyrien erot lumilinjoilla tehtyihin tiheyshavaintoihin nähden. Taulukosta nähdään, että vanha koko maan aineistoon sovitettu käyrä keskimäärin aliarvioi tiheysarvoja etelässä ja yliarvioi niitä pohjoisessa, jäännösneliövirheiden ollessa noin 40 kg/m^3 molemmissa osajoukoissa. Havaitut tiheydet eteläisillä linjoilla vaihtelivat $113\text{--}438 \text{ kg/m}^3$ välillä ja $112\text{--}360 \text{ kg/m}^3$ välillä pohjoisilla linjoilla.

4.8.2 Vaikutus vesi-arvoon

Maastossa havaittujen lumen vesi-arvojen erot eri tiheysfunktiolla korjattuihin radiometrilaskentoihin on esitetty taulukossa 12. Pohjoisessa osajoukossa, joka oli homogeenisempi, jäännösneliövirheet laskivat huomattavasti. Etelässä tulokset heikkenivät hieman.

Pohjoisessa osajoukossa parannettu tiheysfunktio pienensi radiometrihavainnoista lasketun lumen vesi-arvon jäännösneliövirhettä arvosta 29,3 mm arvoon 23,8 mm. Lähempään tarkasteluun otetuista yhdestätoista linjasta kymmenellä linjakohtaiset jäännösneliövirheet laskivat, muutoksen vaihdellessa 1–15 mm välillä.

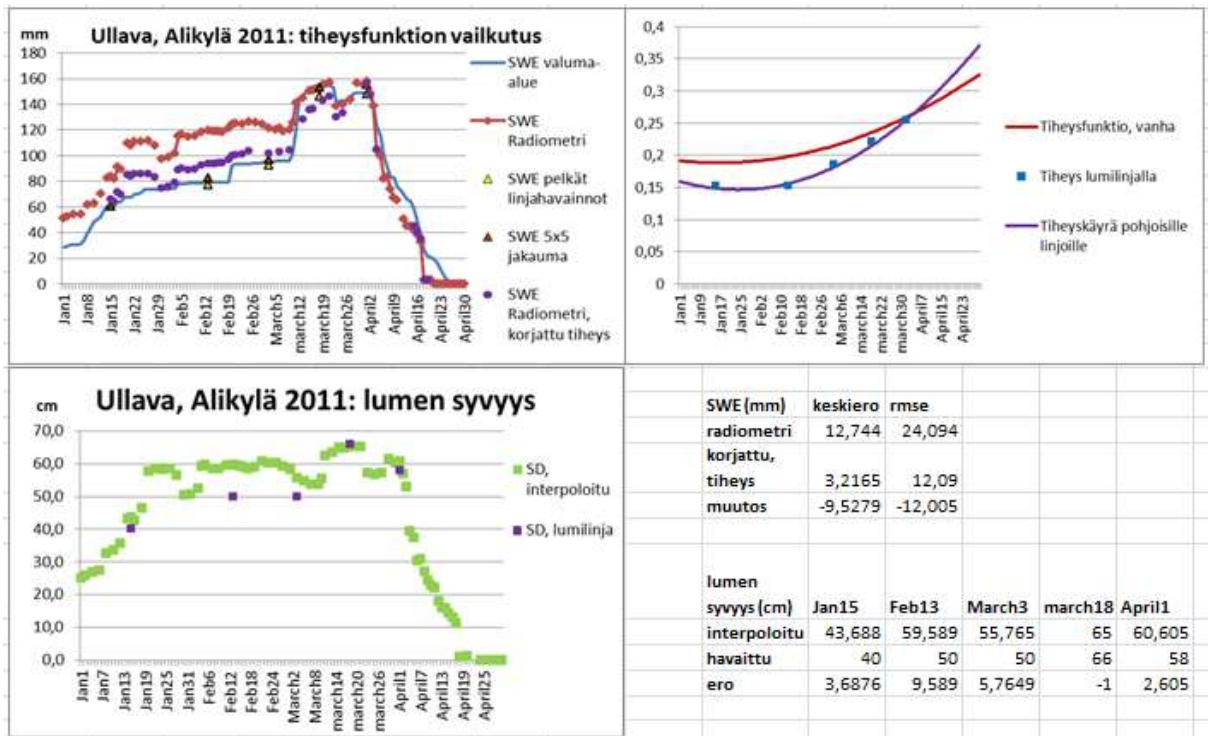
Kuvassa 29 lumilinjalta 1490501 Ullava, Alikylä uusi tiheysfunktio kuvaa linjalta mitattua tiheyden kehitystä erittäin hyvin. Verrattaessa uudella tiheysfunktiolla korjattua lumen vesiarvo käyrää (violetti katkoviiva) lumilinjamallilla maastohavainnoista interpoloituun käyrään (sininen viiva) huomataan että arviot vesiarvosta ovat jo hyvin lähellä toisiaan ja että jäljelle jäävä ero muodostuu pääasiassa alkutalvesta tehdystä yliarvioinnista lumen syvyydessä.

Taulukko 11: Tiheysfunktioiden erot maastohavaintoihin nähden

		Erojen Keski-arvo	Keski-hajonta	RMSE	Maksimi ero, havainto > estimoitu	Maksimi ero, havainto < estimoitu	
Etelään lat 63,5	Vanha tiheysfunktio vs. havaitut	-21,3	34,6	40,6	26,2	-122,8	kg/m ³
	Tiheysfunktio, eteläinen vs. havaitut	-2,0	25,4	25,2	58,9	-66,1	kg/m ³
Pohjoiseen lat 63,5	Vanha tiheysfunktio vs. havaitut	19,1	34,2	39,2	76,2	-69,1	kg/m ³
	Tiheysfunktio, pohjoinen vs. havaitut	-1,9	22,8	22,9	44,4	-50,0	kg/m ³

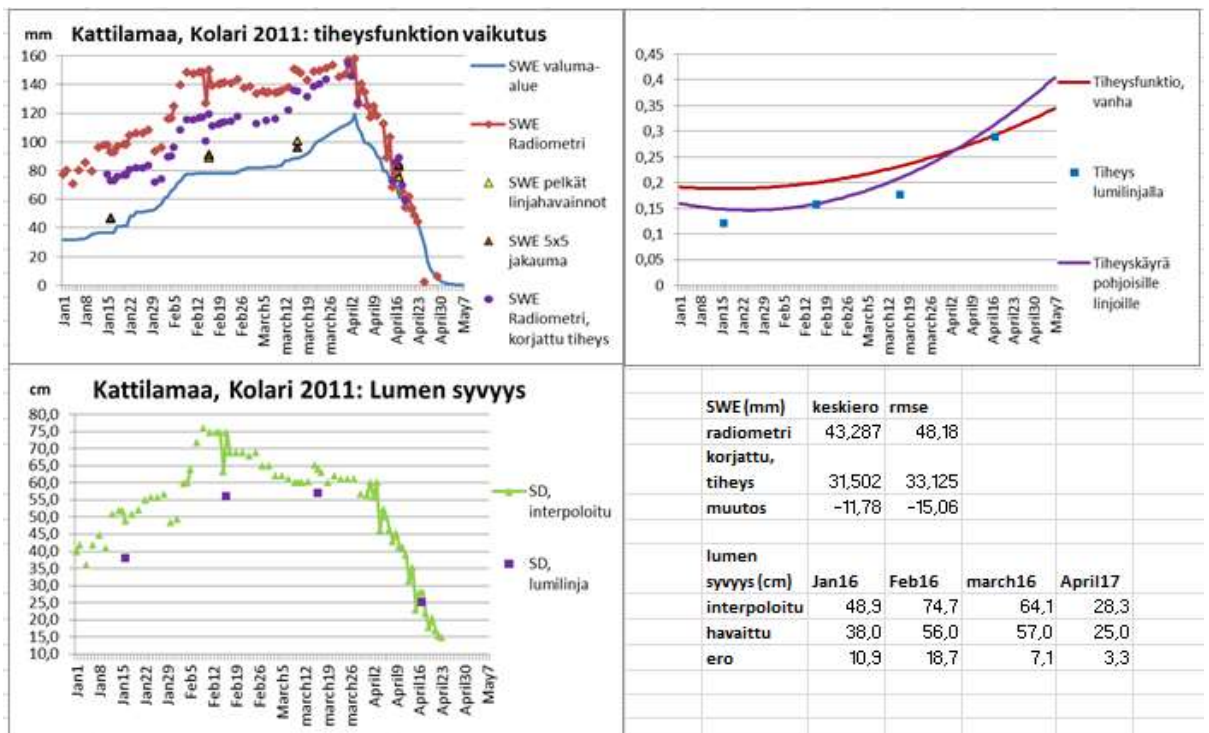
Taulukko 12: Tiheysfunktioiden vaikutus vesiarvoon

	Vanha tiheysfunktio, koko Suomen alueelle				Uusi funktio linjoille lat 63,5 etelään		Uusi funktio linjoille lat 63,5 pohjoiseen	
	Kaikki linjat	Etelään lat 63,5	Pohjoiseen lat 63,5	Kaikki valitut	Kaikki linjat etelään lat 63,5	Valitut linjat	Kaikki linjat pohjoiseen lat 63,5	Valitut linjat
Erojen Keskiarvo lumilinjoilla (mm)	6,2	4,9	7,7	5,0	10,7	4,8	-4,8	-0,4
RMSE (mm)	26,9	24,8	29,3	31,9	26,7	33,7	23,8	22,7



Kuva 29: Talven 2011 kuvaajat lumilinjalle 1490501 Ullava, Alikylä

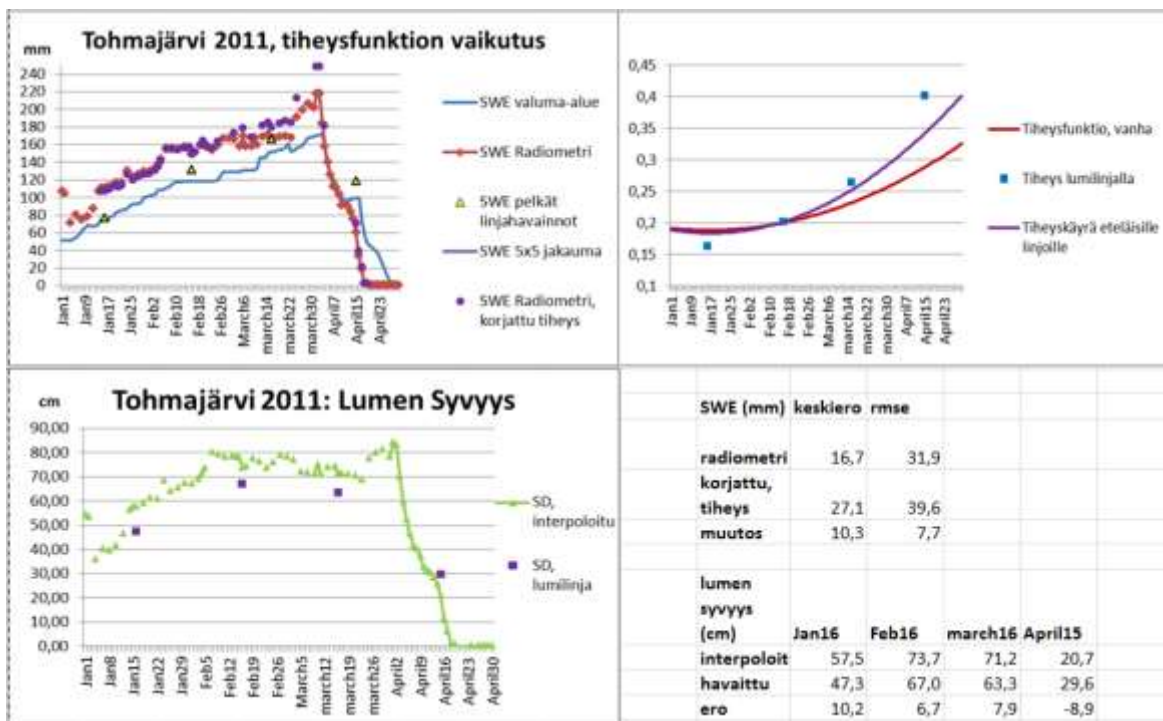
Linjalla 1673701 Kattilamaa, Kolari (kuva 30) uudella tiheysfunktioilla saavutettu korjaus yli 15 mm jäännösneliövirheessä oli testin parhaita. Tosin, pahasti yliarvioidun lumen syvyyden vuoksi korjattukin tulos jää vielä kuitenkin kauaksi maastohavainnoista.



Kuva 30: Talven 2011 kuvaajat lumilinjalle 1673701 Kattilamaa, Kolari

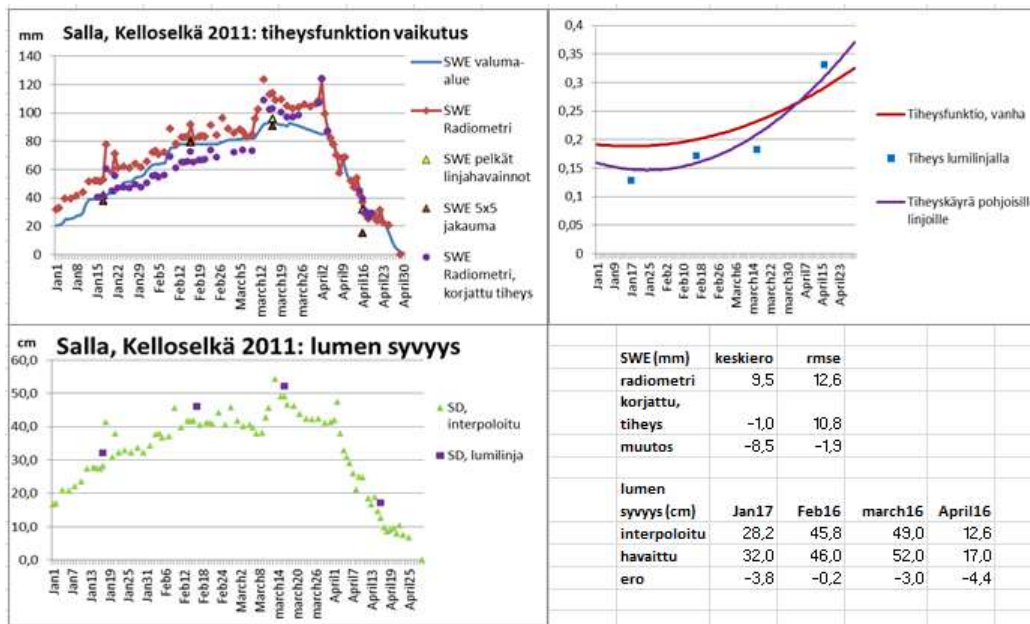
Eteläisellä osajoukolla jäännöseliövirhe hieman kasvaa arvosta 24,8 arvoon 26,7. Lähempään tarkasteluun valituilla linjoilla tämä ilmiö voimistuu entisestään ja pohjoisen osajoukon jäännöseliövirhe pienenee hieman lisää arvoon 22,7 ja eteläisillä linjoilla virhe kasvaa voimakkaasti arvoon 33,7. Eteläinen osajoukko oli lumen tiheysarvojen suhteen huomattavasti heterogeenisempää kuin pohjoinen osajoukko. Virheen käyttäytyminen eteläisillä linjoilla on silti hieman yllättävää, kun ottaa huomioon että sovitettu tiheysfunktio kuitenkin huomattavasti pienensi eroja lumilinjoilla havaittuihin tiheyksiin nähden.

Mahdollinen selitys löytyy tarkastelemalla kuvaa 31, jossa on esitetty interpoloidun lumen syvyyden, estimoidun tiheyden ja näistä lasketun lumen vesiarvon erot Tohmajärven lumilinjalla havaittuihin arvoihin. Kyseisellä linjalla interpoloitu lumen syvyys on suurempi kuin linjalla havaittu, mutta tiheys on estimoitu alakanttiin. Koska tiheys ja lumen syvyys ovat vesiarvossa saman kertolaskun tekijöinä, ne eri suuntiin vaikuttaessaan kumoavat osittain toistensa vaikutuksen. Kun linjalle, uutta tiheysfunktioita käyttäen lasketaan vesiarvo, tiheyden kompensoiva vaikutus häviää ja ero lumilinjalla havaittuihin vesiarvoihin kasvaa.



kuva 31: Talven 2011 kuvaajat lumilinjalle 1020101 Tohmajärvi

Kuvassa 32 näkyy miksi kiinteät, joko vakio tiheysarvoon tai kalenteriin sidotut tiheyskäyrät eivät kykene kovin hyvin mallintamaan lumen vesiarvon ajallisia vaihteluita. Maaliskuun alussa ennen kevään kolmatta mittauspäivää lumilinjalla on satanut runsaasti lunta. Myöhään kertymävaiheella, kun lumi on jo kohtuullisen tiheää, uuden satavan lumen pitäisi pienentää lumen keskimääräistä tiheyttä. Kiinteät tiheysfunktiot eivät kykene ottamaan tätä huomioon. Tämän seurauksena lumen vesiarvoa kuvaavaan käyrään muodostuu ylimääräinen piikki tai tasohyppäys aina runsaan lumisateen jälkeen.



Kuva 32: Talven kuvaajat lumilinjalta 1654801 Salla, Kellosoelkä

4.9 Johtopäätökset ja pohdintaa

Tehtyjen vertailujen perusteella erot radiometrituotteen ja lumilinjahavaintojen välillä vaihtelevat voimakkaasti niin ajallisesti kuin spatiaalisestikin. Aikasarjoissa on kuitenkin havaittavissa selkeä säännöllisyys. Erojen suuruus ja suunta korreloivat vahvasti sen kanssa, missä vaiheessa talvea ollaan menossa. Radiometrihavainnot näyttäisivät keskimäärin hieman yliarvioivan lumen määrää kerääntymiskaudella alku- ja keskitalvesta ja aliarvioivan sitä voimakkaasti kevätsulannan alettua.

Lisäksi tutkitusta aineistoista löytyi alueita, joissa ero tuotteiden välillä pysyy suurena ja samaan suuntaan harhaisena halki koko vertailujakson. Näissä kohteissa erot näyttäisivät ensisijaisesti liittyvän voimakkaasti korkeusvaihteluihin kohteiden ja niiden ympäristön välillä, sekä käytetyssä aineistossa olleisiin aukkoihin lumensyvyysasemien verkossa.

Tuotteiden välisiin eroihin vaikuttavat syyt ovat moninaiset ja vaikuttavat keskenään usein vastakkaisesti suuntiin. Yksittäisen virhelähteen vaikutuksen mittaaminen voi tästä johtuen olla haastavaa ja havaintoja onkin syytä käsitellä mahdollisimman laajana kokonaisuutena. Muutoin voi olla riskinä se, että yksittäisen virhelähteen eliminointi itse asiassa huonontaa lopullista tulosta.

Vaikutukseltaan suurimmat virhelähteet liittyvät tehtyjen analyysien perusteella radiometridatan assimiloinnissa käytettävän lumensyvyyskartan, käytetyn tiheyden ja niistä lasketavan vertausvesiarvon epätarkkuuksiin. Muita huomattavia eroa tuotteiden välillä aiheuttavia tekijöitä ovat radiometrihavainnon tulkintaan käytettävän inversioalgoritmin käytettävät oletukset ja vakioarvot, sekä tuotteiden erikokoiset havaintoalueet.

Lumilinja maastossa kattaa keskimäärin neljänneksen yhdestä radiometrituotteen pikselistä ja häviävän pienen osan satelliitti-instrumentin yhdestä hetkellisestä havainnosta. Havaintoalueiden suuri kokoero vaikeutti tuotteiden mielekästä vertailua. Vertailua varten lumilinjoilta havaitut lumen vesi-arvot laajennettiin radiometrituotteen pikselikokoon käyttäen kyseisten pikselien maankäyttökategorioita Corine maankäyttöluokituksessa.

Johtuen lumilinjaluokituksen tulkinnanvaraisesta tai puutteellisesta määrittelystä, muunnos Corine maankäyttöluokituksen ja lumilinjalla käytettävän maastotyyppien välillä ei ole yksiselitteinen. Tämä aiheuttaa oman epävarmuutensa tulosten tulkintaan, mutta vertailun perusteella havaintoympäristön koon suhteellinen vaikutus oli keskimäärin noin 9,3 %:a tai jäännösneliövirheellä mitattuna 7,5 mm. Yksittäisillä linjoilla, varsinkin kevään viimeisten havaintopäivien kohdalla, erot saattoivat kuitenkin olla huomattavasti suurempia.

Yllä esitetyn sekä vesistömallijärjestelmän tarpeiden perusteella radiometrituotteen tarkkuustavoitteeksi valittiin +/- 10 % suhteessa lumilinjahavaintoihin tai 10 mm jäännösneliövirheessä. Jos ero tuotteiden välillä on paljon tätä suurempi, voidaan olla melko varmoja, että syyt siihen löytyvät muualta kuin havaintoympäristöjen erilaisesta resoluutiosta.

Syvyyskartan interpolointiin käytettävät sääasemat sijaitsevat aukeilla paikoilla, joihin lumi kerääntyy eri tavalla kuin metsään. Tästä seuraa virhettä sekä estimoituun lumen määrään asemien ja lumilinjojen välillä, että sulamisen ajankohtaan. Lisäksi interpoloinnissa ei nykyisellään oteta huomioon korkeuden vaikutusta kerääntyvän lumen määrään.

Sääasemien huoltokatkot ja hetkelliset vikatilanteet voivat aiheuttaa voimakkaita muutoksia interpoloituun lumensyvyyyteen, mikä näkyy poikkeusarvoina assimiloitussa lumen vesiarvossa. Mitä harvempi on lumen syvyysasemien verkko, sitä suurempi on yksittäisen sääaseman puuttumisen aiheuttama virhe tulkittuun vesiarvoon. SYKEN algoritmiversiossa käytössä ollut sääasemien suodatus pahensi vaikutusta entisestään.

Lumen tiheys vaihtelee keskimäärin vasta sataneen lumen noin 100 kg/m^3 :stä vanhan, kasaan painuneen ja useamman osittaisen sulamis- ja jäätymissyklin läpikäyneen lumen noin 500 kg/m^3 :iin. Assimiloinnissa käytettävä taustakartta lumen vesiarvolle lasketaan kertomalla interpoloitu lumen syvyys vakiotiheydellä 240 kg/m^3 , joka perustuu pitkistä aikasarjasta laskettuun keskiarvoon. Tämä aiheuttaa virhettä, sillä lumen tiheys muuttuu voimakkaasti sekä maantieteellisesti, että ajan mukana. Lisäksi vakiotiheyttä käytetään arvioimaan radiometrihavaintojen hyvyttä sääasemien kohdalla. Eroa lumen todelliseen tiheyteen kompensoidaan säätämällä lumen oletettu raekokoa havaintopaikalla. Tämä kuitenkin lisää varianssia, jonka kasvaminen vähentää radiometrihavaintojen painoarvoa assimilointiprosessissa.

Lumen tiheydessä ajan myötä tapahtuva kehitys voidaan mallintaa ja vakiotiheydestä aiheutuvaa virhettä voidaan jonkin verran korjata jälkilaskentana. Tällä ei kuitenkaan saada otettua huomioon tiheyden maantieteellistä vaihtelua, vaihtelua vuosien välillä, eikä tiheydessä sääolojen seurauksena tapahtuvia nopeita muutoksia. Talven alkamisen ja loppumisen ajankohta vaihtelee maantieteellisesti ja eri vuosien välillä. Jälkilaskenta ei myöskään vaikuta datalähteiden painotukseen assimilointiprosessissa.

Tiheyden maantieteellisestä vaihtelusta Suomessa iso osa selittyy sillä, että talvi on eripituinen sekä alkaa ja loppuu eri aikaan maan etelä- ja pohjoisosissa. Lisäksi sääolot maan eri osissa vaihtelevat. Pohjoisessa talvi on yleensä pidempi ja yhtäjaksoinen, kun etelässä lumi voi välillä sulaa lähes kokonaan. Tämän seurauksena lumi on yleensä tiheämpää rannikoilla ja maan eteläosissa, kuin pohjoisessa ja itärajalla.

Tiheyden vaihtelun vaikutuksen selvittämiseksi, vuoden 2011 data jaettiin kahtia etelä-pohjoissuunnassa leveyspiirin 63,5 kohdalla. Molemmille osajoukoille laskettiin uusi tiheyden muutosta kuvaava käyrä, jota käytettiin tulosten korjaamiseen jälkilaskennalla.

Pohjoisella osajoukolla erojen jäännöseliövirhe laskee 29 mm:stä 24 mm:iin ja eteläisellä osajoukolla ero kasvoi 25 mm:stä 27 mm:iin. Tuloksen perusteella aineiston jakaminen pienempiin maantieteellisiin osiin ja paikallisten tiheyskorjausten käyttö voivat huomattavasti pienentää eroa radiometrituotteen ja lumilinjahavaintojen välillä.

Tulosten parantaminen vaatii tosin hienompaa aluejakoa kuin karkea puolittaminen ja ainakin rannikot on syytä erottaa omaksi alueeksi. Sään vaihteluiden aiheuttamien muutosten ja eri vuosien välisten erojen huomioimiseksi, tiheystietoa tarvitsisi voida päivittää aktiivisesti, sitä mukaa kun havaintoja lumilinjoilta ja mahdollisista muista kohteista saadaan.

Radiometrituotteen ja lumilinjahavaintojen välisten erojen kuukausittaiset jäännöseliövirheet vaihtelevat 18 ja 35 mm:n välillä, vuosittaisen jäännöseliövirheen pysyessä 28 mm tuntumassa. Erojen maksimi-arvot vaihtelevat vuodesta toiseen, mutta erot pääsääntöisesti kasvavat kevättä kohti mentäessä.

Nykyisessä muodossaan radiometrihavaintojen tarkkuus ei riitä operatiivisen seurannan tarpeisiin, mutta tämän työn ohessa on tullut esille useita keinoja, joilla havaintoja voidaan saada lähemmäksi maastossa havaittuja arvoja. Suurin osa kehitysideoista liittyy assimilaation parantamiseen, varsinkin lumen paikallisten syvyys- ja tiheystietojen parempaan hyödyntämiseen. Lisäksi yhteiskäyttöä varten nykyisiä lumilinjamittauksia tai niiden käsittelyä on hieman muutettava, jotta tulokset olisivat paremmin vertailtavissa. Näitä kehitysideoita ja jatkotutkimustarpeita on käsitelty tarkemmin luvussa 5.

Assimilaatioprosessin parantamisen lisäksi myös radiometrihavaintojen tulkintaan käytettävän inversioalgoritmin kehittäminen jatkuu. Ilmatieteen laitoksella on kokeilussa uusi versio käytetystä algoritmista, joka huomioi järvien vaikutuksen ja ottaa paremmin huomioon myös puuston vaikutuksen havaittuun signaaliin. Muita mahdollisia kehityskohteita ovat maaperän dielektrisyiden, ilman ja maan lämpötilan vaikutusten, sekä ilmakehässä tapahtuvan vaimenemisen tarkempi mallintaminen.

Lumen vesiarvon estimointi inversiolla havaitusta kirkkauslämpötilasta perustuu kirkkauteen vaikuttavien muuttujien kuten lumen raekoon ja tiheyden, sekä ilmakehän ja kasvillisuuden aiheuttamien vaimennuksien tuntemiseen. Tietoa näistä arvoista ei yleensä ole saatavilla juuri radiometrin mittaushetkelle tai kaikille havaituille paikoille. Arvojen estimointiin joudutaan usein käyttämään havaintosarjoista laskettuja keskiarvoja.

Arvot kuitenkin vaihtelevat voimakkaasti, niin ajan myötä, kuin maantieteellisestikin, ja keskiarvojen käytöllä ei yleensä saavuteta tyydyttävää tarkkuustasoa. Parempaan tuloksen saamiseksi radiometrihavainnot kannattaa yhdistää maastohavainnoista interpoloituihin estimaatteihin tarvittavista muuttujista, jolloin muuttujien ajallinen ja spatiaalinen vaihtelu saadaan paremmin otettua huomioon. Koska radiometrihavaintojen saavutettavissa oleva tulkintatarkkuus on pitkälti riippuvainen kalibrointiin käytettävän maastohavaintoverkon tiheydestä, ei maastohavaintojen korvaaminen satelliittituotteella nykyisellään ole järkevää.

5 Kehitys- ja jatkotutkimusideoita

Tässä luvussa käydään läpi työn aikana esille tulleita jatkotutkimustarpeita, sekä kehitysideoita radiometri- ja lumilinjahavainnoista tuotetun lumen vesi-arvotiedon erojen pienentämiseksi. Lisäksi tehdään pintapuolinen katsaus inversiomallin meneillään olevaan kehitykseen.

Pitkällä aikavälillä säteilymallinnuksen ja uusien satelliitti-instrumenttien kehitys voivat vähentää tarvetta radiometrihavaintojen korjaamiseen maastohavaintojen avulla. Lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä assimilointiprosessin kehittäminen näyttäisi olevan paras keino radiometrihavaintojen tehokkaaseen hyödyntämiseen ja laajempaan käyttöön. Radiometrimenetelmän käyttämistä vakioista (esimerkiksi lumen tiheys) tulisi mahdollisuuksien mukaan pyrkiä eroon ja korvata niitä maastohavaintoihin perustuvilla paikallisilla muuttujilla. Lisäksi nykyisten havaintoverkkojen yhteiskäyttöä ja keskinäistä vertailtavuutta SYKE:n, Ilmatieteen laitoksen ja muiden tahojen olisi hyvä parantaa.

Radiometrimenetelmän osalta suuri osa esille tulleista eroista lumen vesi-arvossa selittyy sääasemilta interpoloitavan lumen syvyyskartan ja siitä laskettavan vesi-arvon epätarkkuuksilla. Vesi-arvo lasketaan lumen syvyyden ja tiheyden tulona, ja molempia lähtötietoja on kehitettävä rinnan, assimilointitulosta halutaan parantaa.

5.1 Lumen syvyys

Koska lumensyvyys vaihtelee voimakkaasti maantieteellisesti, radiometrihavaintojen korjaamiseen sääasematiedoilla tarvitaan riittävän tiheä havaintoverkko. Järkevän interpolointituloksen aikaan saamiseksi on syytä käyttää kaikkia tarjolla olevia tietolähteitä. Samalla on kuitenkin pidettävä huolta toimitusvarmuudesta, sillä puuttuvat havainnot tai uusien havaintolähteiden lisääminen kesken tarkastelujakson voivat aiheuttaa piikkejä interpoloitujen syvyysarvojen aikasarjaan.

5.1.1 Sääasemalistan suodatuksen poistaminen

SYKE:ssä käytetty radiometrimenetelmän versio käytti syötteenä alun perin vesistömallia varten suodatettua sääasemadataa, josta oli poistettu kaikki asemat, joiden sadantoja ei ole voitu tarkastaa. Sadannan tarkistamisella ei kuitenkaan ole relevanssia lumen syvyyden mittaamisessa, joka tehdään eri instrumentilla kuin sadehavainto. Ongelma on tämän työn kirjoittamisen aikana korjattu, ja nykyään lumen syvyyden interpolointi suoritetaan käyttäen kaikkia Ilmatieteen laitoksen lumen syvyyshavaintoja.

5.1.2 Puuttuvan sääasematiedon korvaaminen edellispäivän lukemalla

Sääasemalta saatavaan havaintosarjaan saattaa syntyä tauko esimerkiksi teknisen vian tai huoltokatkon takia. Tämä saattaa aiheuttaa piikin interpoloidussa lumen syvyydessä ja siitä estimoidussa vesi-arvossa, virheen suuruuden riippuessa ympäröivän sääasemaverkon tiheydestä ja siitä, miten voimakkaasti maaston ominaisuudet asemien välillä muuttuvat. Näitä virheitä voi kompensoida käyttämällä puuttuvalle asemalle sen edellistä havaittua arvoa. Tämä vaatisi muutoksia algoritmin nykyiseen versioon, sillä asemalista olisi tarkistettava päivittäin mahdollisten puuttuvien asemien havaitsemiseksi. Haasteeksi muodostuvat myös pitkät tauot aseman toiminnassa. On esimerkiksi päätettävä, kuinka pitkä tauko aseman toiminnassa voidaan sallia, ennen kuin se on poistettava laskennasta. Entä mitä tehdä uusille asemille, jotka tulevat mukaan kesken havaintojakson?

5.1.3 Lumen syvyyssmittausten täydentäminen lumilinjahavainnoilla

Sääasemat sijaitsevat pääasiallisesti aukeilla paikoilla, joihin lumi kerääntyy eri tavalla kuin metsiin. Suomen pinta-alasta noin neljä viidesosaa on metsien peitossa [Metla 2014]. Tämä johtaa epätarkkuuksiin lumipeitteen alueellisen syvyyden interpoloinnissa. Lumilinjat sijaitsevat puolestaan pääosin metsissä, mutta sisältävät havaintoja myös aukeilta maastotyypeiltä. Sääasemahavainnoista interpoloituja syvyyksiä voisi korjata tarkastelemalla lumilinjahavaintojen sisäisiä syvyyseroja metsästä ja aukealta tehtyjen havaintojen välillä. Tämä on tehtävä siten että vähintään kertymis- ja sulamiskausille määritetään omat korjaustavat. Lisäksi tarvitaan kriteeri sille, kumpaa tapaa käytetään. Päivämäärä on huono kriteeri, koska talvien pituudet ja ajoittuminen kalenterivuoden sisällä vaihtelevat. Pälvien ilmaantumisen ja pälvisyyden määrittäminen esimerkiksi optisen kaukokartoituksen avulla voisi olla hyvä työkalu tähän tarkoitukseen.

Olisi lisäksi hyvä kehittää säännöt sille, miten lumilinjan yksittäisen havaintopisteen rinteeseen suunta ja jyrkkyys sekä kasvillisuuden tiheys voitaisiin ottaa huomioon lumilinjalaskennassa. Näiden tietojen keräämiselle on lumilinjan havaintolomakkeessa varattu kohta, mutta kerättyjä tietoja ei toistaiseksi ole hyödynnetty.

Toinen vaihtoehto interpolointimenetelmän parantamiseksi olisi käyttää lumilinjojen keskimääräisiä lumensyvyysarvoja lisähavaintoina. Ongelmaksi muodostuu se, että linjahavaintoja tehdään keskimäärin vain kerran kuukaudessa. Interpolointia varten lumen syvyydet tarvittaisiin mieluiten päivittäin. Lumilinjamallilla estimoidaan linjan vesi-arvon muutokset mittauspäivien välille käyttämällä sääasemien sadanta- ja lämpötilatietoja. Vastaavaa menetelmää voitaisiin käyttää myös lumen syvyyksien estimointiin, mutta tämä vaatii lisätutkimusta.

5.2 Lumen tiheys

Assimiloinnin ideana on, että sääasemahavainnoista interpoloitua lumen vesi-arvoa korjataan radiometrihavainnon mukaisesti, perustuen siihen, kuinka hyvin radiometri estimoii lumen vesi-arvon tunnetuissa pisteissä eli sääasemien kohdalla. Lumen tiheyden suora vaikutus radiometrin havaitsemaan kirkkausarvoon on melko vähäinen, mutta jos oletustiheys on väärin, verrataan radiometrihavaintoa väärään vesi-arvoon. Tämä ero kompensoidaan säätämällä laskennassa käytettävää raekokoa. Jos lumen todellinen tiheys sääasemien välillä vaihtelee voimakkaasti, kasvaa raekoon varianssi, mikä vähentää radiometrihavainnon painoa suhteessa sääasemahavaintoihin. Tällöin myös sääasemilta interpoloitu lumen vesi-arvon taustakartta on virheellinen, jolloin tiheyden vaikutus lopulliseen vesi-arvoon radiometrikartassa voi olla huomattava.

Lumen vesi-arvo, johon radiometrin havaitsema kirkkaushavainto sovitetaan, lasketaan sääasemalla havaitun lumen syvyyden ja vakiotiheyden tulona. Käytetty vakioarvo 240 kg/m^3 on klimatologisista aikasarjoista saatu globaali keskiarvo. Saatuja vesi-arvoja voidaan tarkentaa jälkilaskentana korjaamalla saatua tulosta ajan mukaan muuttuvalla tiheydellä. Jälkilaskenta parantaa tuloksia, mutta perimmäinen ongelma eli tiheyden maantieteellinen ja vuosittainen vaihtelu säilyy. Talvi alkaa ja päättyy eri vuosina eri aikaan ja maan eteläosassa voi maa olla vielä paljas, kun pohjoisessa on jo metri lunta (tilanne esimerkiksi joulukuussa 2013). Lisäksi jälkilaskenta ei vaikuta radiometri- ja säädatan väliseen painotukseen, joka perustuu edelleen vakioarvoon.

5.2.1 Käytetyn oletustiheyden päivittäminen lumilinjamittauksiin perustuen

Radiometrin kirkkaushavaintojen tarkkaa sovittamista ja korjaamista varten tarvittaisiin tiheyskenttä, joka muuttuu sekä maantieteellisesti että ajallisesti talven kehittymisen mukaan. Lumilinjoilta saadaan kattavasti tiheysarvoja ympäri Suomea useista eri maastotyypeistä. Näitä havaintoja voisi käyttää tiheyskentän laskemiseen. Havaintoja saadaan kuitenkin keskimäärin vain kerran kuussa, joten on tärkeä kehittää keino tiheyskentän päivittämiseen mittauspäivien välillä.

SYKEN vesistömallijärjestelmällä lasketaan lumelle päivittäiset tiheysarvot sekä yhden viikon ennuste kolmannen jakovaiheen valuma-alueille (katso kuva 13, luku 3.2), perustuen vastaaville alueille laskettuun lumen vesiarvoon. Nämä arvot olisivat radiometrilaskennan kannalta varmasti parempia kuin nykyisin käytössä oleva vakiotiheys. Valuma-alueiden koot kuitenkin vaihtelevat melko paljon, joten on tarpeen selvittää, onko tuotteen spatiaalinen tarkkuus riittävä laskennan tarpeisiin, vai onko tiheyden laskenta parempi toteuttaa suoraan radiometrituotteen resoluutioon.

5.2.2 Tiheyden muutoksen mallintaminen

Parasta olisi, jos vesistömallilla laskettuja lumen tiheyksiä voitaisiin käyttää suoraan tai hyvin pienin muutoksin, jolloin välttyttäisiin päällekkäisiltä laskennoilta. Jos kuitenkin katsotaan, että päivittäiset tiheysarvot tarvitaan radiometrituotteen resoluutiossa, voitaisiin ne johtaa lumilinjahavainnoista muutoskentän avulla. Tällöin jokaiselle pikselille interpoloidaan sääasemahavainnoista päivittäiset sadannat ja lämpötilat, joiden perusteella arvioidaan miten tiheys muuttuu lumilinjalla mitatusta lähtöarvosta. Jos linjahavaintoja ei ole tarjolla riittävän lähellä, voidaan lähtöarvona käyttää vastasataneen lumen tiheyttä.

Lumen tiheyden kehittymiseen vaikuttavat ensisijaisesti sadanta ja lämpötila. Kirjallisuudessa on annettu useita arvoja vastasaneen lumen tiheydelle, jotka yleensä vaihtelevat 50 kg/m^3 ja 200 kg/m^3 välillä. Tiheys riippuu satavan lumen kosteudesta sekä tuulen nopeudesta ja ilman lämpötilasta sadantahetkellä. Suomessa vastasataneen kuivan lumen tiheytenä on yleisesti käytetty arvoa 100 kg/m^3 . [Mustonen (toim.) 1986] Jokaiselle vesiarvokartan pikselille lasketaan muutosarvo, joka perustuu sääasemilta saataviin sadantatietoihin sekä radiometristä havaittuun tai sääasemilta interpoloituun lämpötilaan. Jos lämpötila pysyy pakkasen puolella, satanut lumivaippa painuu hitaasti kasaan ajan kuluessa, jolloin muutosarvo on pieni. Suuri muutosarvo saadaan, jos lämpötila on plussan puolella tai sataa vettä, jolloin lumi sekä osittain sulaa että tiivistyy nopeammin. Jos sataa lisää pakkaslunta, lumen tiheys lasketaan vanhan lumivaipan ja sataneen lumen tiheyksien painotettuna keskiarvona, missä painoina toimivat sataneen lumen määrä ja vanhan vaipan paksuus.

5.3 Lumilinjalaskenta

Suurin osa lumilinjalaskennasta olleista virheistä poistui syksyllä 2013 tehdyn laskentauudistuksen myötä, mutta radiometrituotteiden parempi hyödyntäminen asettaa kehitystarpeita myös maastohavaintojen keräämiseen ja käsittelyyn.

5.3.1 Maastotyyppien määrittelyt

Jotta lumilinjalla tehtyjä maastohavaintoja ja radiometrihavaintoja saadaan paremmin verrattua, on maastotyyppien määrittelyä tarkennettava. Varsinkin metsänaukot on määriteltävä siten, että ne kytetään tunnistamaan myös digitaalisesta aineistosta. Lisäksi on tehtävä päätös siitä, miten lumilinjilla esiintymättömiä maanpeiteluokkia, kuten kaupunkitaaja-

maa, metsässä kulkevia sähkölinjan aukkoja ja vesistöjen rantakosteikkoja tulisi käsitellä, sillä radiometrihavaintoon näitäkin maastotyyppisiä maastotyyppejä mahtuu runsaasti. On tutkittava, kannattaako nykyisiä lumilinjoja laajentaa siten, että mukaan saadaan havaintoja myös näistä maanpeitettyypeistä vai lasketaanko kyseisten maastotyyppien lumen vesiarvot korjauskertoimilla olemassa olevista maastotyypeistä. Vaihtoehtoisesti kyseisiin maastotyyppisiin kuuluvat pikselit voidaan suodattaa satelliittiaineistosta tai voidaan käyttää jotain sopivaa yhdistelmää edellä mainituista menetelmissä.

5.3.2 Laskennan yhdenmukaistaminen

Pienten valuma-alueiden lumilinjojen lumen vesiarvo lasketaan edelleen hieman eri tavalla kuin muiden linjojen. Näillä lyhyillä lumilinjoilla ei ole merkitty ylös syvyysmittausten ja tiheyspunnitusten maastotyyppisiä vaan lumen vesiarvo linjalle on laskettu kaikkien havaintojen keskiarvona. Havaintojen tasalaatuisuuden varmistamiseksi olisi myös pienten valuma-alueitten linjoilla syytä siirtyä käyttämään samaa, eri maastotyypeissä tehtyjen havaintojen määrällä painotettuun keskiarvoon perustuvaa laskentamenetelmää kuin muillakin linjoilla.

Lyhyiden lumilinjojen erilaista havaintotapaa on perusteltu pitkällä, katkeamattomalla aikasarjalla. Havaintoympäristön ylöskirjaaminen ei kuitenkaan estä vesiarvon laskemista entiseen tapaan, vaan lumen vesiarvo voidaan helposti laskea molemmilla tavoilla jos painottamatonta keskiarvo edelleen tarvitaan.

5.3.3 Maastotietojen parempi hyödyntäminen

Lumilinjojen nykyisessä havaintolomakkeessa on paikat metsänaukon koon sekä maaston jyrkkyyden ja rinteiden suunnan kirjaamiseksi. Näitä tietoja ei kuitenkaan nykyisellään hyödynnetä, eikä niiden keräämistä tästä syystä ole valvottu. Osa havaintosijoista on kirjannut tiedot ylös, osa taas ei. Tuulen suunta satamishetkellä suhteessa rinteiden suuntaan ja jyrkkyyteen kuitenkin vaikuttavat voimakkaasti kertyvän lumen määrään, joten nämäkin tiedot olisi hyvä saada osaksi niin yksittäisen lumilinjan kuin hilakartan lumen vesiarvojen laskentaa.

5.3.4 Lumilinjojen edustavuuden tarkistus

Tämän työn yhteydessä tuli esiin muutamia lumilinjoja, joiden kohdalla linjoilta laskettu valuma-aluekohtainen lumen vesiarvo, pelkkiin linjahavaintoihin perustuva keskiarvo, sekä arvo radiometrilaskennan 5×5-ympäristössä erosivat voimakkaasti toisistaan. Näiden linjojen osalta on syytä tarkistaa, vieläkö ne ovat edustavia lähiympäristönsä suhteen.

Lisäksi, nyt kun maastotyyppien välisistä korjauskertoimista on uuden laskentamenetelmän myötä luovuttu, on linjoja syytä muutenkin tarkistaa niin, että mukaan saadaan mahdollisimman paljon eri maastotyyppisiä. Tämä pätee erityisesti, jos kohdassa 5.4.1 esitettävä hilakartan pikseliarvon laskenta suoraan oikean maastotyyppin mukaisesti halutaan ottaa käyttöön.

5.4 Topologia ja maanpeite

Työn edetessä tuli esiin ideoita myös siitä, miten nykyistä hilakarttaa voisi ehkä parantaa. Lisäksi sääasemilta laskettavaa lumensyvyyskarttaa saattaisi olla mahdollista tarkentaa ottamalla huomioon korkeusvaihtelun aiheuttamat muutokset lumen kerääntymiseen.

5.4.1 Maanpeitteen huomiointi hilakartan laskennassa

Nykyinen hilakartta lasketaan lumilinjojen keskiarvoista topologiakorjausten ja tuulensuuntien yleisyysmatriisin avulla. Lumilinjoilla havaitaan myös maastotyyppikohtaiset vesiarvot, joita voisi suoraan käyttää hilakartan laskennassa, kunhan vain tiedetään kohdepikselin maastotyyppi tai maastotyyppien jakauma. Tässä työssä laskettiin muunnos, jolla lumilinjan pistemäinen maastohavainto saatiin laajennettua satelliittituotteen käyttämään pikselikokoon.

Johtuen kohdassa 5.3.1 mainituista määritystarpeista, muunnosta Corine-maankäyttöluokituksen ja lumilinjojen kuuden luokan välillä tarvitsee vielä hieman tarkentaa. Periaatteessa hilapisteiden vesiarvon laskeminen suoraan oikean tyyppisistä maastohavainnoista pitäisi olla kohtuullisen helposti toteutettavissa.

5.4.2 Hilakartassa käytettävä tuulensuuntakertoimien päivitys

Hilakartan laskentaa kuvaavan artikkelin mukaan [Reuna 1994] hilakartan rinnekorjauskertoimet lasketaan perustuen hilapisteiden välisiin korkeuseroihin, joita painotetaan eri suunnista puhaltavien tuulten yleisyydellä. Kertoimet perustuvat tilastollisiin keskiarvoihin välillä lokakuu–huhtikuu, mutta hilakartan laskenta aloitetaan usein jo syyskuussa ja sitä jatketaan usein vähintään toukokuun puolelle. Käytettävät kertoimet kannattaisi päivittää vastaamaan hilakartan käyttöjaksoa, ja samalla olisi ehkä mahdollista laskea omat kertoimet joka kuukaudelle ja eri puolille maata nykyisten koko maan kattavien vuosikeskiarvojen sijaan.

Korhosen (1942) alkuperäisessä tutkimuksessa oli laskettu kuukausikeskiarvot yleisimmälle tuulensunnalle 22:lle ympäri Suomea sijaitsevalle paikkakunnalle. Näitä ei kuitenkaan ole hyödynnetty suoraan, ilmeisesti laskennan keventämiseksi. Kyseinen tutkimus on kuitenkin jo yli 70 vuotta vanha, joten lienee muutenkin suositeltavaa tarkistaa, pitävätkö käytettävät kertoimet yhä paikkaansa. Päivitetyin tuulten yleisyysmatriisin laskeminen esimerkiksi Ilmatieteen laitoksen tilastoista ja hilakartan herkkyyden testaaminen uusille arvoille voisi olla sopiva aihekokonaisuus esimerkiksi johonkin kandityöhön.

5.4.3 Rinnekorjauskertoimien suuruuden tarkistus

Hilakartan pikselin lumen vesiarvoa korjataan rinnekorjauskertoimella, jonka suuruus perustuu pikselin suhteelliseen korkeuteen ympäröiviin pikseleihin nähden. Suurimmat erot hilakartan ja radiometrituotteen välillä löytyvät paikoista, jotka ovat voimakkaasti ympäröivää maastoa korkeammalla. Tarvittaisiin maastonäytteitä hilakartan kertoimien tarkistamiseksi ja tarvittaessa korjaamiseksi. Tämä voitaneen hoitaa normaalien lumilinjahavaintojen ottamisen lomassa, tai sitä varten voidaan järjestää erillisiä maastomittauksia.

Jos maastonäytteet tukevat nykyisiä kertoimia, on radiometrilaskennassa käytettävää lumen syvyyden taustakarttaa korjattava kuten alla esitetään. Nykyisessä radiometrilaskennassa vuoristoiset alueet on suodatettu pois laskennasta, mutta jos näyttää siltä, että myös pienemmät korkeusvaihtelut aiheuttavat havaintoon virhettä, on myös itse inversioalgoritmia ehkä muutettava.

5.4.4 Topologiavaikutusten huomiointi radiometrikartan assimiloinnissa

Pois lukien tunturien puuttomat laet, korkeammalla oleva maastonkohdat keräävät yleisesti enemmän lunta. Assimilointiprosessin taustalla olevan lumen syvyyskartan interpolointia

voisi olla mahdollista tarkentaa ottamalla korkeusvaihtelut mukaan laskentaan. Korjauksen voisi toteuttaa esimerkiksi soveltamalla hilakarttalaskennassa käytettäviä rinnekorjausker-toimia tai mahdollisesti käyttämällä Kriging-interpoloinnin 3D-versiota.

5.5 Inversioalgoritmin kehittäminen

Mikroaltohavaintojen käyttökelpoisuutta voidaan lisätä assimilaatiota tehostamalla vain tiettyyn rajaan asti, joka riippuu siitä, kuinka hyvin havaitun kirkkauslämpötilan muutokset suhteessa lumihangen ominaisuuksiin saadaan mallinnettua.

5.5.1 Hangen kerroksellisen rakenteen huomiointi

HUT emissiomallista on kehitetty sovellus, jolla periaatteessa pystyy laskemaan emission rajattoman monesta kerroksesta koostuvasta kohteesta [Lemmetyinen ym. 2010]. Sovelluksen käytettävyyttä rajoittaa kerrosten määrän ja ominaisuuksien selvittämisen vaikeus, mutta sovellus on jo osoittautunut lupaavaksi kohteissa, joiden rakenne joko tunnetaan tai voidaan muuhun tietoon perustuen mallintaa kohtuullisella tarkkuudella. Kontu ym. [2014] ovat tutkimuksessaan osoittaneet, että monikerroksisen säteilymallin käytöllä voidaan parantaa lumen vesiarvon estimaattien tarkkuutta ainakin jäätyneiden järvien ja kosteikko-maiden osalta.

5.5.2 Matalampien taajuuksien käyttö

Mikroaltojen käyttökelpoisuutta lumen vesiarvon estimoimiseen rajoittaa havaintoihin käytettävien korkeampien taajuuksien saturoituminen, jos hanki on riittävän paksua. Ratkaisuksi on tarjottu kahden matalamman taajuuden kuten 10.7 GHz ja 18.7 GHz käyttöä, perinteisten 18.7 GHz ja 36,5 GHz välisten erotushavaintojen sijaan [Derksen 2008]. Matalamat taajuudet ovat lisäksi vähemmän herkkiä vaihteluille ilmakehän paikallisen koostumuksen vaihteluille sekä kasvillisuuden aiheuttamille muutoksille signaaliin voimakkuudessa. Tällöin ongelmiksi kuitenkin muodostustuvat pidemmästä aallonpituudesta joh-tuva heikompi spatiaalinen erotuskyky (katso luku 2.4.1) sekä se, että havaittavissa olevan hangen minimipaksuus nousee noin 5 cm:stä noin 30 cm:iin. Pitäisi tutkia, voitaisiinko eri kanavapareilla tehtyjä havaintoja yhdistää siten, että havaittavissa olevan hangen paksuus- aluetta voitaisiin kasvattaa ilman että spatiaalinen erotuskyky merkittävästi heikkenisi.

5.5.3 Maaperän ja lumihangen lämpötilojen huomiointi

Kohteen säteily tietyllä aallonpituudella, riippuu sen rakenteellisesti ja sähköisistä ominai-suuksista sekä kohteen fysikaalisesta lämpötilasta. Jäätyneen maan dielektrisyys ja siten emissiivisyys on lähes riippumaton havaittavasta taajuudesta, mutta molemmat pienenevät voimakkaasti lämpötilan laskiessa [Hallikainen ym. 1985]. Maaperän lämpötilan ja spati-aalisen vaihtelun määrittäminen on kuitenkin haastavaa ja usein ilman, lumihangen ja maaperän lämpötilalle käytetään yhtä ja samaa vakioarvoa.

HUT inversiomallissa on mahdollista käyttää syötteenä tietoa ilman lämpötilasta, joka olisi mahdollista interpoloida suoraan säähavaintoasemilta. Lumen lämpötilan puolestaan voi-daan olettaa olevan hyvin lähellä ilman lämpötilaa. Maaperä reagoi ilman lämpötilan muu-toksiin verrattain hitaasti, mutta tutkimisen arvoista olisi testata, voisiko arvioita maaperän emissiivisyydestä parantaa käyttämällä tietoa ilman lämpötilan pidemmän aikavälin kes-kiarvosta, esimerkiksi lähimmän viikon keskilämpötilasta.

6 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin mahdollisuuksia lumen vesiarvohavaintojen tuottamiseen, Suomen ympäristökeskuksen operatiivisen seurannan tarpeisiin, kaukokartoituksen keinoin. Lumen vesiarvo kertoo kuinka paljon vettä muodostuisi, jos lumikerros sulaisi välittömästi ja kokonaan nykyisellä paikallaan. Tietoa siitä tarvitaan muun muassa tulvien ennustamiseen, vesistöjen pintojen säännöstelyyn, maa- ja metsätalouden suunnitteluun sekä ympäristö- ja ilmastotutkimuksen tarpeisiin.

Lumen vesiarvoa mitataan maastohavainnoilla tai sitä voidaan estimoida sääasemahavain-toja interpoloimalla. Sääasema- ja havaintoverkot ovat kuitenkin verrattain harvoja ja maastohavain-toja puolestaan tehdään melko harvoin, joten estimoiduissa arvoissa esiintyy epävarmuuksia. Vesistöjen mallintamisen ja tulvien ennustamisen tarpeisiin havain-toja lumen vesiarvosta ja sen maksimista ennen kevätsulannan alkamista tarvittaisiin nykyistä useammin ja entistä laajemmalla alueelta. Kuitenkin jo nykyistäkin havaintoverkkoa varten on ajoittain ollut vaikea löytää riittävästi havaintosijoita.

Satelliittiin sijoitetulla mikroaaltoradiometrillä on mahdollista saada havain-toja lumen ve-siarvosta kaikissa sää- ja valaistusoloissa myös pilvisellä säällä ja yöllä. Satelliitti-instrumenteilla on globaali kattavuus ja tiheä toistoväli ja havain-toja saadaan päivittäin koko Suomen alueelta. Radiometrien haittapuolena ovat verrattain karkea spatiaalinen ero-tuskyky sekä havainnon oikeaan tulkintaan tarvittavan fysikaalisen mallinnuksen raskaus ja siihen liittyvän laskentaprosessin mahdolliset epätasaisuudet.

Maankamaran säteilemä energia vaimenee eri tavalla läpäistessään lumihangen taajuudesta ja hangen ominaisuuksista riippuen. Lumen vesiarvon määrittäminen mikroalloilla perus-tuu tämän taajuuseron mittaamiseen. Taajuuseron tulkitsemiseksi tarvitaan tarkkaa tietoa lumivaipan, ilmakehän sekä paikallisen maaston ominaisuuksista. Näitä tietoja on kuiten-kaan harvoin tarjoilla koko prosessoitavalle alueella ja laskennassa joudutaan usein tyyty-mään keskiarvoihin ja estimaatteihin. Tämän seurauksena satelliittihavainnot yksinään voivat olla melko epätarkkoja.

Puuttuvien lumen ominaisuustietojen ongelma voidaan osittain kiertää laskemalla lumen vesiarvolle tausta-arvokenttä perustuen sääasemilla tehtyihin havaintoihin hangen syvyy-destä ja sovittamalla radiometrihavainnot näihin lähtöarvoihin. Vertaamalla kuinka hyvin radiometrihavainnot vastaavat estimoitua lumen vesiarvoa sääasemien kohdalla, määrite-tään radiometri- ja sääasemahavaintojen välinen paino tietolähteiden yhteensovituksessa. Tätä menetelmää kutsutaan data-assimilaatioksi.

Kun radiometrihavainnoista tuotettua estimaattia lumen vesiarvosta verrattiin lumilinjoilta havaittuun keskimääräiseen lumen vesiarvoon, huomattiin että ero näiden välillä vaihteli voimakkaasti sekä maantieteellisesti että ajankohdan mukaan. Radiometrituote näyttää yleisesti hieman yliarvioivan lumen vesiarvoa alku- ja keskitalvesta ja vahvasti aliarvioi-van sitä kevään ja sulamisen edistyessä. Lisäksi löydettiin alueita, joilla ero havaintotapo-jen välillä pysyi suurena ja samaan suuntaan harhaisena halki koko kolme talvea käsittävän tarkastelujakson.

Ajallinen vaihtelu havaintomenetelmien välisessä erossa näyttäisi ensisijaisesti liittyvän sääasemilta interpoloitavan lumensyvyyden virheisiin sekä laskennassa käytettävään lumen tiheyden vakioarvoon. Lumi keräytyy eri tavalla metsässä sijaitseville lumilinjoille ja sää-

asemille jotka yleensä sijaitsevat aukeilla paikoilla. Aukeille kerääntyy enemmän lunta, mutta se myös sulaa sieltä nopeammin kuin metsistä puiden varjosta. Tämän seurauksena radiometri laskennassa käytettävä lumen syvyys yliarvioidaan alkutalvesta ja aliarvioidaan sulamisen alettua.

Laskennassa käytetty lumen tiheys perustuu pitkistä havaintoajaksarjasta laskettuun keskiarvoon. Tiheys kuitenkin vaihtelee ajallisesti siten, että vastasatanut lumi on huomattavasti keskiarvoa kevyempää ja vanha, ehkä jo osittain sulanut hanki jopa kaksi kertaa tiheämpää. Lisäksi lumen tiheys vaihtelee maantieteellisesti satamishetkellä vallinneiden sääolojen ja satamispaikan maaston ominaisuuksien mukaan. Talvi ja satava lumi myös saapuvat eri puolille Suomea eri aikaan ja talven pituus vaihtelee maan eri osien välillä sekä vuodesta toiseen.

Niissä kohteissa, joissa erot pysyvät suurina koko tarkastellulla ajanjaksolla, syyt näyttävät liittyvän ensisijaisesti aukkoihin käytetyssä sääasemaverkossa sekä korkeuserojen aiheuttamaan vaihteluun keräytyneen lumen määrässä, jota interpoloinnilla ei kyetty ottamaan huomioon. Lisäksi jonkun verran eroa aiheutuu radiometrituotteen ja lumilinjojen erikoisista havaintoympäristöistä, jotka vaikeuttavat tuotteiden välistä vertailua.

Tehtyjen analyysien perusteella tässä työssä käytettyjen kaukokartoitusaineistojen tarkkuus ei ole riittävä operatiivisen seurannan tarpeisiin, eikä maastohavaintojen korvaaminen satelliittihavainnoilla ole siten mahdollista. Kuitenkin on huomattava, että aineiston tuottamiseen käytetty menetelmä on osin jo vanhentunut. Menetelmän seuraava versio (jo koekäytössä) on monelta osin tätä kehittyneempi ja sen on arvioitu tuottavan vesiarvoestimaatteja selvästi paremmalla tarkkuudella. Valitettavasti uudella menetelmällä tuotettuja vesiarvokarttoja ei vielä ollut saatavilla tämän tutkimuksen aikana, joten se tehtiin vanhalla menetelmällä tuotetulla aineistolla.

Jopa nykyisen radiometrituotteen virheitä ja epävarmuuksia on kuitenkin mahdollista huomattavasti pienentää yhdistämällä laskentaan maastohavaintoverkosta saatavaa tietoa lumen paikallisista ominaisuuksista ja niiden muuttumisesta ajan kuluessa. Nykyisessä laskennassa käytettävää sääasemaverkkoa tiheämmän havaintoaineiston käyttö, lumen syvyshavaintojen täydentäminen lumilinjoilta saatavilta havainnoilla ja korkeuserojen huomioiminen, vähentäisivät laskennassa käytettävän taustakartan virheitä huomattavasti. Tämän lisäksi tarvitaan keino lumen tiheyden vaihtelun huomioimiseen.

Talven vaihtelevasta alkamisajasta ja pituudesta aiheutuvat muutokset maan eri osissa olisi mahdollista ottaa huomioon jakamalla Suomi pienempiin maantieteellisiin alueisiin ja laskemalla kullekin alueelle omat lumen tiheyden kehitystä kuvaavat käyrät. Jotta myös säästä aiheutuvat nopeat muutokset sekä eri vuosien välisistä eroista aiheutuvat muutokset saataisiin huomioitua, on radiometrilaskennan tueksi kehittävä keino tiheyden alueelliseen päivittämiseen sitä mukaa kun tietoa lumen tiheydestä saadaan lumilinjoilta ja mahdollisista muista näytteenottoaikoista.

Tietolähteiden yhteiskäyttöä ajatellen myös nykyisiä lumilinjamittauksia ja niiden käsittelyä on kehitettävä. Erityyppisten lumilinjojen laskentatavat on yhdenmukaistettava, jotta ne ovat vertauskelpoisia keskenään ja radiometrituotteen kanssa. Osa linjoista saattaa myös tarvita päivittämistä, jotta kaikki radiometrin laajemmassa havaintoympäristössä esiintyvät maastotyypit tulee havaittua.

Lisäksi lumilinjoilla käytettävän maastotyyppien luokkajako ei ole täysin yksiselitteinen ja jättää paljon havaitsijan tulkinnan varaan. Parempaa vertailtavuutta varten käytettävät maanpeiteluokat on määritettävä niin tarkasti, että samat luokat voidaan automaattisesti tunnistaa myös digitaalisesta aineistosta.

Myös itse radiometrisignaalin tulkintaan käytettävää inversioalgoritmia on mahdollista kehittää, niin että se ottaa paremmin huomioon havaintoympäristön kirkkausarvoon aiheuttamat muutokset. Tällaisia tekijöitä ovat muun muassa havaintoalueelle jäävät vesistöt, metsän läpäisevyyden nykyistä tarkempi mallinnus sekä lämpötilan ja maanpinnankorkeusvaihtelujen vaikutus havaittuun signaaliin.

Jos mallinnuksen ja tietolähteiden yhdistämisen liittyvät haasteet saadaan voitettua, mikroaaltoradiometrit tarjoavat valtavan määrän uutta tietoa nykyisten havaintomenetelmien tueksi. Radiometriaineistoa on jo tähän mennessä hyödynnetty vertailuarvona ratkaistaessa lumilinjahavaintojen ja vesistömallin välisiä ristiriitatilanteita ja ne ovat arvokasta tietoa sellaisilla alueilla joista ei muuta tietoa ole saatavilla, esimerkiksi sen takia, että lähin lumilinja on kaukana. Satelliittihavainnoilla ei karkean spatiaalisen tarkkuuden vuoksi ehkä koskaan saada korvattua maastohavaintoja, mutta tiheä havaintoväli ja suuri maantieteellinen kattavuus tarjoavat uutta tietoa havaintopisteiden väliin jääviin aukkoihin sekä havaintoja niistä lumen vesiarvosta tapahtuvista kriittisistä muutoksista, jotka valitettavan usein tapahtuvat juuri havaintopäivien välissä.

Lähteet

Derksen Chris (2008)	The contribution of AMSR-E 18.7 and 10.7 GHz measurements to improved boreal forest snow water equivalent retrievals, Remote Sensing of Environment, issue 112, 2008, sivut 2701–2710
Gray Donald Maurice, Male David Harold (editors) (1981)	Handbook of snow, Pergamon Press, Canada ISBN: 0-08-025374-1 (pbk)
Hallikainen Martti, Ulaby Fawwaz, Dobson Myron, El-Rayes Mohamed, Wu Lin-Kun (1985)	Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations, IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing Vol. 23. No 1. January 1985
Hollinger James, Pierce James, Poe Gene (1990)	SSM/I Instrument evaluation, IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing Vol. 28. No 5. September 1990
Kontu Anna, Lemmetyinen Juha, Pulliainen Jouni, Seppänen Jaakko, Hallikainen Martti T. (2014)	Observing and Modeling of Microwave Brightness Temperature of Snow-Covered Frozen Lakes and Wetlands, IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing Vol. 52. No 6. June 2014
Korhonen (1942)	Die Verteilung der Niederschläge, besonders der Schneefälle, auf die Verschiedenen Windrichtungen in Finnland. Annales Academiæ Scientiarum Fennicæ. Ser.A.1, Mathematica – Physica 13, Helsinki ISSN: 0365-673X Vaihtoehtoinen julkaisunimike: Suomalaisen tiedeakatemia toimituksia, sarja A1 ISSN: 0365-2300
Kruopis Nerijus, Pranks Jaan, Arslan Ali Nadir, Alasalmi Hanna, Koskinen Jarkko, Hallikainen Martti (1999)	Passive Microwave Measurements of Snow-Covered Forest Area in EMAC'95, IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing Vol. 37. No 5. September 1999
Kuittinen Risto ja Sucksdorff Yrjö (1987)	Inventory of River Basin Characteristics in Finnish Conditions Using Satellite Imagery, Aqua Fennica vol 17, issue 2, 1987, sivut 97-114
Kuusisto Esko (1984)	Snow accumulation and snowmelt in Finland, Publications of the Water Research Institute, Vol 55, Helsinki, Finland: National Board of Waters

Kärnä Juha-Petri (editor), Kolhinen Vesa, Metsämäki Sari, Vehviläinen Bertel, Kuitunen Timo, Lemmetyinen Juha, Pulliainen Jouni, Rautiainen Kimmo, Smolander Tuomo, Antropov Oleg, Berglund Robin, Kiviniemi Jukka, Rauste Yrjö (2012)	Improving flood forecasting using multi-source remote sensing data – Report of the Floodfore project, Finnish environment 12/2012, SYKE ISBN 978-952-11-4001-3 (PDF), saatavana sähköisenä www.environment.fi/syke/publications Haettu: 20.11.2013
Lemmetyinen Juha, Pulliainen Jouni, Rees Andrew, Kontu Anna, Qiu Yubao, Derksen Chris (2010)	Multible-Layer Adaptation of HUT Snow Emission Model: Comparison With Experimental Data IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing Vol. 48. No 7. July 2010
Lemmetyinen Juha, Kontu Anna, Kärnä Juha-Petri, Vehviläinen Juho, Takala Matias, Pulliainen Jouni (2011)	Correcting for the influence of frozen lakes in microwave radiometer observations through application of a microwave emission model, Remote Sensing of Environment issue 115, 2011, sivut 3695–3706 doi:10.1016/j.rse.2011.09.008
Lillesand Thomas M. ja Kiefer Ralph W. (2000)	Remote Sensing and Image Interpretation, 4 th edition Wiley & Sons, USA ISBN: 0-471-25515-7
Metsämäki Sari, Mattila Olli-Pekka, Pulliainen Jouni, Niemi Kirsikka, Luojus Kari, Böttcher Kristin (2012)	An optical reflectance model-based method for fractional snow cover mapping applicaple to continental scale, Remote Sensing of Environment issue 123, 2012, sivut 508–521 doi:10.1016/j.rse.2012.04.010
Mustonen Seppo (Toim.)	Sovellettu Hydrologia, Vesiyhdistys r.y. 951-95555-1-X (sid.)
Parkinson Claire / NASA (2002)	Aqua_brochure, NASA publication, Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland 20771 March 2002 NP-2002-1-422-GSFC, saatavana sähköisenä: http://www.nasa.gov/pdf/151986main_Aqua_brochure.pdf
Pulliainen Jouni, Grandell Jochen, Hallikainen Martti T. (1999)	HUT Snow Emission Model and its Applicability to Snow Water Equivalent Retrival, IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing Vol. 37. No 3. May 1999
Pulliainen Jouni (2006)	Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations, Remote Sensing of Environment issue 101, 2006, sivut 257–269, doi:10.1016/j.rse.2006.01.002

Rees Andrew, Derksen Cris, English Michael, Walker Anne, Duguay Claude (2006)	Uncertainty in snow mass retrievals from satellite passive microwave data in lake-rich high-latitude environments, Hydrological Processes Vol 20, issue 4 DOI: 10.1002/hyp6076 Luettavissa sähköisenä: Wiley Online Library http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.6076/pdf Haettu: 21.11.2013
Rees Gareth W. (2006)	Remote Sensing of Snow and Ice, Taylor & Francis, GB ISBN: 0-415-29831-8 (nid.)
Reuna Marja (1994)	An operational grid method for estimation of areal water equivalent of snow, Geophysica Vol 33 issues 1-2 1994 sivut:107–121
Takala Matias, Luojus Kari, Pulliainen Jouni, Derksen Chris, Lemmetyinen Juha, Kärnä Juha-Petri, Koskinen Jarkko, Bojkov Bojan (2011)	Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements, Remote Sensing of Environment issue 115, 2011, sivut 3517–3529 doi:10.1016/j.rse.2011.08.014

Sähköiset lähteet

Ilmatieteen laitos (2014a)	Vuositilastot Ilmatieteen laitoksen verkkosivut: www.ilmatieteenlaitos.fi suora linkki: http://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot viitattu 27.1.2014 sivu päivitetty 2.1.2014
Ilmatieteen laitos (2014b)	Säähavainnot Ilmatieteen laitoksen verkkosivut: www.ilmatieteenlaitos.fi suora linkki: http://ilmatieteenlaitos.fi/saahavainnot , haettu 25.3.2014, sivu päivitetty 13.3.2013
METLA (2014)	Euroopan metsäisin maa Metsäntutkimuslaitoksen verkkosivut: www.metla.fi suora linkki: http://www.metla.fi/suomen-metsat/ viitattu 4.4.2014 sivu päivitetty 4.6.2013
SYKE (2013a)	Hilakartta SYKE HYD-valikko, haettu 28.8.2013

SYKE (2013b)	Watershed Simulation and Forecasting System –esite, Erweko Oy, Helsinki Esite ladattavissa pdf -muodossa: http://www.syke.fi/en-US/Publications/Brochures/ haettu 23.4.2014 dokumentti päivitetty 9.4.2014
SYKE (2013c)	Maankäyttö- ja maanpeiteaineistojen tuottaminen CORINE Land Cover 2012 –hankkeessa SYKEN verkkosivut, www.syke.fi suora linkki: http://www.syke.fi/hankkeet/corine2012/ viitattu 1.4.2014 sivu päivitetty 7.5.2013
SYKE (2013d)	SYKE, HYD -valikko haettu 4.11.2013
SYKE (2014a)	Vesistömallijärjestelmä SYKEN verkkosivut, www.syke.fi suora linkki: http://www.syke.fi/fi-FI/Palvelut/Ymparistotietojarjestelmat/Vesistomallijarjestelma/Vesistomallijarjestelma viitattu 23.4.2014 päivitetty 20.9.2013
SYKE (2014b)	Corine land cover 2006 pdf -tiedosto ladattavissa: http://geoportal.ymparisto.fi/meta/julkinen/dokumentit/CorineLandCover2006.pdf viitattu 1.4.2014 dokumentti päivitetty 10.3.2014
Ympäristöhallinto (2014)	Ympäristöhallinnon tietojärjestelmä HERTTA Hakupolku: Hydrologiset havainnot -> Tietojen haku -> Havaintopaikka / -laji -> Nimi/tunnus -> 1657801->paikat listana -> tietoa ->lisätiedot-> linjakartta haettu 30.1.2014

Julkaisemattomat lähteet

Kärnä Juha-Petri (2011)	SWE- ja SD-karttojen validointitulokset, tekninen raportti, kopio saatavissa: J-P Kärnä, SYKEN tietokeskus
Pulliainen (2013)	Haastattelu 1.11.2013 Jouni Pulliainen, tutkimusprofessori ja arktisen tutkimusyksikön päällikkö (Ilmatieteen laitos)
Sjöblom Heidi (2013)	Henkilökohtainen tiedonanto 6.6.2013, Sjöblom Heidi, hydrologi (SYKE)

SYKE 7131, Hydrologian yksikkö	Lumipeitteen linjamittauksia, SYKEN havaintovihko 7131, saatavilla: SYKEN hydrologisen seurannan yksikkö
tuntematon 1	Lumimittaus ja mittaustuloksen laskenta suomessa, SYKEN dokumentti sisäiseen käyttöön, kopio saatavissa pyydettyäessä: Heidi Sjöblom, SYKEN hydrologisen seurannan yksikkö
tuntematon 2	Päivittäisten lumen vesiarvojen simulointimalli, joka on Suomessa rutiinikäytössä, SYKEN dokumentti sisäiseen käyttöön, kopio saatavissa pyydettyäessä: Heidi Sjöblom, SYKEN hydrologisen seurannan yksikkö
Vehviläinen Bertel (2014a)	Henkilökohtainen tiedonanto 11.3.2014, Bertel Vehviläinen, johtava hydrologi (SYKE)
Vehviläinen Bertel (2014b)	Sähköposti 13.5.2014 Bertel Vehviläinen, johtava hydrologi (SYKE)

Liite 1: Puuttuvien maastotyyppien vaikutus korjausker- toimiin

Kaikki mahdolliset kombinaatiot, millä tavalla maastotyyppiä voi puuttua ja niiden aiheuttamat virheet korjauskertoimiin. Maastotyyppissä aukea, tarkistus tiheyspunnituksen ole-massaolosta toteutui, joten sen korjauskertoimet ovat oikein. Joillekin maastotyypeille on määritelty vain kaksi korvaavaa maastotyyppiä, tällöin sarakkeeseen pitäisi olla on merkit-ty ???

Laskettava korjauskerroin

	metsänaukko		mänty- valtainen		kuusi- valtainen		lehtipuu- valtainen		suo	
	korjaus- kerroin	pitäisi olla	korja- us- ker- roin	pitäisi olla	korja- us- ker- roin	pitäisi olla	korja- us- ker- roin	pitäisi olla	korja- us- ker- roin	pitäisi olla
Maastotyyppit, joista ei puni- tuksia										
aukea+ aukko	1,1 x suo	1,2 x mänty	0,9 x suo	1,1 x kuusi		0,9 x mänty		1 x suo	1,1 x lehti	1 x lehti
aukea + mänty	1,1 x suo	1,3 x kuusi	0,9 x suo	1,1 x kuusi	0,8 x suo	???		1 x suo	1,1 x lehti	1 x lehti
aukea + kuusi	1,1 x suo	1,2 x mänty	0,9 x suo	???		0,9 x mänty		1 x suo	1,1 x lehti	1 x lehti
aukea + lehti	1,1 x suo	1,2 x mänty	0,9 x suo	1,1 x kuusi		0,9 x mänty		1 x suo	1,1x mänty	???
aukea + suo	1,21 x lehti	1,2 x mänty	0,99 x lehti	1,1 x kuusi		0,9 x mänty	1,1 x mänty	???	1,1 x lehti	1 x lehti
aukko + mänty		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
aukko + kuusi		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,9 x mänty		1 x aukea		1 x aukea
aukko + lehti		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,9 x mänty		1 x aukea		1 x aukea
aukko + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,9 x mänty		1 x aukea		1 x aukea
mänty + kuusi		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
mänty + lehti		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
mänty + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
kuusi + lehti		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,9 x mänty		1 x aukea		1 x aukea

kuusi + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,9 x mänty		1 x aukea		1 x aukea
lehti + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,9 x mänty		1 x aukea		1 x aukea
aukea + aukko + mänty	1,1 x suo	1,3 x kuusi	0,9 x suo	1,1 x kuusi	0,8 x suo	???		1 x suo	1,1 x lehti	1 x lehti
aukea + aukko + kuusi	1,1 x suo	1,2 x mänty	0,9 x suo	???		0,9 x mänty		1 x suo	1,1 x lehti	1 x lehti
aukea + aukko + lehti	1,1 x suo	1,2 x mänty	0,9 x suo	1,1 x kuusi		0,9 x mänty		1 x suo	1,1x mänty	???
aukea + aukko + suo	1,21 x lehti	1,2 x mänty	0,99 x lehti	1,1 x kuusi		0,9 x mänty	1,1 x mänty	???	1,1 x lehti	1 x lehti
aukea + mänty + kuusi	1,1 x suo	1,2 x lehti	0,9 x suo	???	0,8 x suo	???		1 x suo	1,1 x lehti	1 x lehti
aukea + mänty + lehti	1,1 x suo	1,3 x kuusi	0,9 x suo	1,1 x kuusi	0,8 x suo	???		1 x suo	1,2 x kuusi	???
aukea + mänty + suo	1,21 x lehti	1,3 x kuusi	0,99 x lehti	1,1 x kuusi	0,88 x lehti	???	1,2 x kuusi	???	1,1 x lehti	1 x lehti
aukea + kuusi + lehti	1,1 x suo	1,2 x mänty	0,9 x suo	???		0,9 x mänty		1 x suo	1,1x mänty	???
aukea + kuusi + suo	1,21 x lehti	1,2 x mänty	0,99 x lehti	???		0,9 x mänty	1,1 x mänty	???	1,1 x lehti	1 x lehti
aukea + lehti + suo	1,21 x män- ty	1,2 x mänty	1,08 x kuusi	1,1 x kuusi		0,9 x mänty	1,1 x mänty	???	1,1x mänty	???
aukko + mänty + kuusi		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
aukko + mänty + lehti		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
aukko + mänty + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
aukko + kuusi + lehti		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,9 x mänty		1 x aukea		1 x aukea
aukko + kuusi + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,9 x mänty		1 x aukea		1 x aukea
aukko + lehti + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,9 x mänty		1 x aukea		1 x aukea
mänty + kuusi + lehti		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
mänty + kuusi + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
mänty + lehti + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
kuusi + lehti + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,9 x mänty		1 x aukea		1 x aukea

aukea + aukko + mänty + kuusi	1,1 x suo	1,2 x lehti	0,9 x suo	???	0,8 x suo	???		1 x suo	1,1 x lehti	1 x lehti
aukea + aukko + mänty +lehti	1,1 x suo	1,3 x kuusi	0,9 x suo	1,1 x kuusi	0,8 x suo	???		1 x suo	1,2 x kuusi	???
aukea + aukko + mänty + suo	1,21 x lehti	1,3 x kuusi	0,99 x lehti	1,1 x kuusi	0,88 x lehti	???	1,2 x kuusi	???	1,1 x lehti	1 x lehti
aukea + aukko + kuusi + lehti	1,1 x suo	1,2 x mänty	0,9 x suo	???		0,9 x mänty		1 x suo	1,1x mänty	???
aukea + aukko + kuusi + suo	1,21 x lehti	1,2 x mänty	0,99 x lehti	???		0,9 x mänty	1,1 x mänty	???	1,1 x lehti	1 x lehti
aukea + aukko + lehti +suo	1,21 x män- ty	1,2 x mänty	1,08 x kuusi	1,1 x kuusi		0,9 x mänty	1,1 x mänty	???	1,1x mänty	???
aukea + mänty + kuusi + lehti	1,1 x suo	1,3 x kuusi	0,9 x suo	???	0,8 x suo	???		1 x suo	0,9 x aukko	???
aukea + mänty + kuusi + suo	1,21 x lehti	1,2 x lehti	0,99 x lehti	???	0,88 x lehti	???	0,9 x aukko	???	1,1 x lehti	1 x lehti
aukea + mänty + lehti + suo	1,32 x kuusi	1,3 x kuusi	1,08 x kuusi	1,1 x kuusi	0,72 x aukko	???	1,2 x kuusi	???	1,2 x kuusi	???
aukea + kuusi + lehti + suo	1,21 x män- ty	1,2 x mänty	0,81 x aukko	???		0,9 x mänty	1,1x mänty	???	1,1x mänty	???
aukko + mänty + kuusi + lehti		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
aukko + mänty + kuusi + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
aukko + mänty + lehti + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
aukko + kuusi + lehti + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,9 x mänty		1 x aukea		1 x aukea
mänty + kuusi + lehti + suo		1,1 x aukea		0,9 x aukea		0,8 x aukea		1 x aukea		1 x aukea
aukea + aukko + mänty + kuusi + lehti	1,1 x suo	1,1 x suo	0,9 x suo	???	0,8 x suo	???		1 x suo		N/A
aukea + aukko + mänty + kuusi + suo	1,21 x lehti	1,2 x lehti	0,99 x lehti	???	0,88 x lehti	???		N/A		1 x lehti
aukea + aukko + mänty + lehti + suo		1,3 x kuusi		1,1 x kuusi		N/A	1,2 x kuusi	???	1,2 x kuusi	???
aukea + aukko + kuusi + lehti + suo	1,21 x män- ty	1,2 x mänty		N/A		0,9 x mänty	1,1 x mänty	???	1,1x mänty	???
aukea + mänty + kuusi + lehti + suo		N/A	0,81 x aukko	???	0,72 x aukko	???	0,9 x aukko	???	0,9 x aukko	???

aukko + mänty + kuusi + lehti + suo	1,1 x aukea	0,9 x aukea	0,8 x aukea	1 x aukea	1 x aukea
---	----------------	----------------	----------------	--------------	--------------

Liite 2: Muunnossäännöt Corine land cover

→Lumilinjoilla käytettävät 6 maastotyyppiä

		Vesiluokat jätetään pois -- > NO DATA			
		Turvemaat ja rantakosteikot suo luokkaan			
		Harvapuiset alueet, käsitellään kuten muutkin metsät			
Tun- nus taso4	Tun- nus taso 3	luokka	Säännöt, säännöt pseudokoodia eivätkä seuraa suoraan mitään ohjelmointikieltä	Kohde- luokka Lumilin- joilla	Luok- ka tun- nus
1110	111	Tiiviisti rakennetut asuin- alueet		Aukea	1
1120	112	Väljästi rakennetut asuin- alueet		Aukea	1
1210	121	Teollisuuden ja palvelui- den alueet		Aukea	1
1220	122	Liikennealueet		Aukea	1
1230	123	Satama-alueet		Aukea	1
1240	124	Lentokenttäalueet		Aukea	1
1310	131	Maa-aineisten ottoalueet		Aukea	1
1320	132	Kaatopaikat		Aukea	1
1330	133	Rakennustyöalueet		Aukea	1
1410	141	Taajamien viheralueet ja puistot		Aukea	1
1421	142	Kesämökit		Aukea	1
1422	142	Urheilu- ja vapaa-ajan toiminta -alueet		Aukea	1
2110	211	Pellot		Aukea	1
2220	222	Hedelmäpuu- ja marjapen- sasviljelmät		Aukea	1
2310	231	Laidunmaat		Aukea	1
2430	243	Pienipiirteinen maatalous- mosaiikki		Aukea	1
3111	311	Lehtimetsät kivennäis- maalla		Lehtipuu- valtainen Metsä	5
3112	311	Lehtimetsät turvemaalla		Suo	6
3121	312	Havumetsät kivennäis- maalla	If runkotila- vuus(mänty) > Run- kotilavuus (kuusi)	Mäntyval- tainen metsä	3

			Else	Kuusivaltainen metsä	4
3122	312	Havumetsät turvemaalla		Suo	6
3123	312	Havumetsät kalliomaalla	If runkotilavuus(mänty) > Runkotilavuus (kuusi)	Mäntyvaltainen metsä	3
			Else	Kuusivaltainen metsä	4
3131	313	Sekametsät kivennäismaalla	If Runkotilavuus(lehtipuut)>50%	Lehtipuuvaltainen metsä	5
			else If runkotilavuus(mänty) > Runkotilavuus (kuusi)	Mäntyvaltainen metsä	3
			Else	Kuusivaltainen metsä	4
3132	313	Sekametsät turvemaalla		Suo	6
3133	313	Sekametsät kalliomaalla	If Runkotilavuus(lehtipuut)>50%	Lehtipuuvaltainen metsä	5
			else If runkotilavuus(mänty) > Runkotilavuus (kuusi)	Mäntyvaltainen metsä	3
			Else	Kuusivaltainen metsä	4
3210	321	Luonnonniityt		Aukea	1
3220	322	Varvikot ja nummet		Aukea	1
3241	324	Harvapuustoiset alueet , cc <10%		Aukea	1
3242	324	Harvapuustoiset alueet, cc 10-30%, kivennäismaalla	If Runkotilavuus(lehtipuut)>50%	Lehtipuuvaltainen metsä	5
			else If runkotilavuus(mänty) > Runkotilavuus (kuusi)	Mäntyvaltainen metsä	3
			Else	Kuusivaltainen metsä	4
3243	324	Harvapuustoiset alueet, cc 10-30%, turvemaalla		Suo	6
3244	324	Harvapuustoiset alueet, cc 10-30%, kalliomaalla	If Runkotilavuus(lehtipuut)>50%	Lehtipuuvaltainen metsä	5
			else If runkotilavuus(mänty) > Runkotilavuus (kuusi)	Mäntyvaltainen metsä	3
			Else	Kuusivaltainen metsä	4

3245	324	Harvapuustoiset alueet havumetsärajan yläpuolella	If Runkotilavuus(lehtipuut)>50%	Lehtipuuvaltainen metsä	5
			else If runkotilavuus(mänty) > Runkotilavuus (kuusi)	Mäntyvaltainen metsä	3
			Else	Kuusivaltainen metsä	4
3246	324	Harvapuustoiset alueet, sähkölinjan alla		Metsänaukko	2
3310	331	Rantahietikot ja dyynialueet		Aukea	1
3320	332	Kalliomaat		Aukea	1
3330	333	Niukkakasvustoiset kangasmaat		Aukea	1
4111	411	Sisämaan kosteikot maalla		Suo	6
4112	411	Sisämaan kosteikot vedessä		Suo	6
4121	412	Avosuot		Suo	6
4122	412	Turvetuotantoalueet		Suo	6
4211	421	Merenrantakosteikot maalla		Suo	6
4212	421	Merenrantakosteikot vedessä		Suo	6
5110	511	Joet		NO DATA	No Data
5120	512	Järvet		NO DATA	No Data
5230	523	Meri		NO DATA	No Data

Liite 3: Jakaumien vaikutus tuotteiden väliseen eroon

Tuotteiden välisen eron jäännöseliövirheet valituilla linjoilla, eri laskentaympäristöissä, arvot on laskettu lumilinjojen mittauspäiville.

Erot laskettu vain kahdelta mittauspäivältä, puuttuvien radiometrihavaintojen takia, edustavuus kyseenalainen								
Ero radiometrin ja lumilinjan välillä pienentynyt huomattavasti								
Ero radiometrin ja lumilinjan välillä kasvanut huomattavasti								
2011								
Nimi	Tunnus	radiometri vs valuma-alue	radiometri vs pelkät linjahavainnot	radiometri vs 5x5-ympäristö	muutos valuma-alue vs pelkät linjahavainnot	muutos valuma-alue vs 5x5	muutos (%) valuma-alue vs pelkät linjahavainnot	muutos (%) valuma-alue vs 5x5-ympäristö
Tohmajärvi, Kemie	1020101	31,4	34,7	43,5	3,3	12,1	10,39 %	38,43 %
Savi-taipale	1041401	14,6	13,1	15,9	-1,5	1,3	-10,59 %	8,98 %
Siilin-järvi, kk	1046501	33,1	27,0	30,7	-6,1	-2,5	-18,52 %	-7,41 %
Rautalampi	1147101	46,0	39,8	42,8	-6,2	-3,2	-13,41 %	-7,05 %
Orimattila, Pakaa	1160001	20,8	19,4	21,9	-1,3	1,1	-6,44 %	5,32 %
Tuusula, Ruskela	1210801	7,4	7,5	14,2	0,1	6,9	1,47 %	92,79 %
Vaala, Niska	1592101	28,2	25,0	28,0	-3,2	-0,2	-11,34 %	-0,66 %
Kuhmo, Varajoki	1599501	31,6	30,1	30,1	-1,5	-1,5	-4,74 %	-4,69 %
Puolanka	1600501	25,1	22,7	24,2	-2,5	-0,9	-9,78 %	-3,70 %
Salla, Kelloselkä	1654801	13,5	12,5	18,4	-1,0	4,9	-7,71 %	36,25 %
Rovaniemi, Olkkajärvi	1657101	21,2	22,6	18,2	1,4	-3,0	6,45 %	-14,17 %
Raudanjoki	1657801	27,3	25,1	22,2	-2,2	-5,1	-8,13 %	-18,68 %
Kattilamaa, Kolari	1673701	55,8	45,7	45,9	-10,2	-9,9	-18,23 %	-17,72 %
Inari, Repojoki	1714301	30,8	30,1	30,5	-0,8	-0,3	-2,57 %	-0,98 %
Yläne	1340402	22,2	18,8	20,1	-3,4	-2,1	-15,25 %	-9,33 %
Keuruu	1356602	19,2	17,5	19,0	-1,8	-0,2	-9,14 %	-1,02 %
Oijärvi	1630201	53,8	55,5	56,4	1,8	2,6	3,29 %	4,93 %
Ullava, Alikylä	1490501	27,2	28,7	25,2	1,5	-2,0	5,40 %	-7,51 %

Inari, Kaasmukka	17198 01	32,1	27,9	26,7	-4,2	-5,5	-13,09 %	-16,98 %
Karvia	13604 01	26,6	26,2	22,0	-0,4	-4,5	-1,60 %	-17,10 %
keskiarvot		28,4	26,5	27,8				

2012								
Nimi	Tunnus	radiometri vs valuma-alue	radiometri vs pelkät linjahavainnot	radiometri vs 5x5-ympäristö	absoluuttinen muutos valuma-alue vs linjahavainnot	absoluuttinen muutos valuma-alue vs 5x5	muutos (%) valuma-alue vs pelkät linjahavainnot	muutos (%) valuma-alue vs 5x5-ympäristö
Tohmajärvi, Kemie	1020101	32,6	23,5	9,6	-9,1	-23,0	-27,95 %	-70,53 %
Savi-taipale	1041401	12,2	13,1	15,6	1,0	3,4	7,88 %	27,96 %
Siilinjärvi, kk	1046501	20,8	17,4	19,9	-3,5	-0,9	-16,57 %	-4,44 %
Rautalampi	1147101	42,9	35,3	40,1	-7,6	-2,9	-17,75 %	-6,64 %
Orimattila, Pakaa	1160001	14,9	15,0	18,0	0,0	3,1	0,24 %	20,84 %
Tuusula, Ruskela	1210801	32,0	31,4	31,0	-0,6	-1,0	-1,97 %	-3,14 %
Vaala, Niska	1592101	12,8	29,6	28,7	16,7	15,8	130,09 %	123,36 %
Kuhmo, Varajoki	1599501	26,0	23,6	25,5	-2,4	-0,5	-9,27 %	-2,11 %
Puolanka	1600501	16,6	14,4	15,8	-2,2	-0,8	-13,51 %	-4,91 %
Salla, Kelloselkä	1654801	11,5	15,4	15,8	3,8	4,3	33,11 %	37,33 %
Rovaniemi, Olkkajärvi	1657101	16,3	17,3	8,9	1,0	-7,4	5,83 %	-45,66 %
Raudanjoki	1657801	15,3	12,5	13,6	-2,8	-1,7	-18,19 %	-10,91 %
Kattilamaa, Kolari	1673701	64,9	56,2	55,7	-8,7	-9,2	-13,39 %	-14,19 %
Inari, Repojoki	1714301	26,9	10,2	15,1	-16,7	-11,9	-62,14 %	-44,13 %
Yläne	1340402	11,8	11,0	11,0	-0,8	-0,8	-7,09 %	-6,97 %
Keuruu	1356602	17,0	14,1	17,1	-2,9	0,2	-17,05 %	0,95 %
Oijärvi	1630201	77,2	76,1	82,1	-1,1	4,9	-1,43 %	6,32 %
Ullava, Alikylä	1490501	16,5	17,3	19,4	0,8	2,9	5,06 %	17,67 %
Inari, Kaasmukka	1719801	15,1	17,8	20,0	2,7	4,9	18,04 %	32,60 %
Karvia	1360401	18,2	18,5	15,5	0,2	-2,8	1,35 %	-15,08 %
keskiarvot		25,1	23,5	23,9				

2013								
Nimi	Tunnus	radiometri vs valuma-alue	radiometri vs pelkät linjahavainnot	radiometri vs 5x5-ympäristö	absoluuttinen muutos valuma-alue vs linjahavainnot	absoluuttinen muutos valuma-alue vs 5x5	muutos (%) valuma-alue vs pelkät linjahavainnot	muutos (%) valuma-alue vs 5x5-ympäristö
Tohmajärvi, Kemie	1020101	16,9	15,0	17,4	-1,8	0,5	-10,91 %	2,92 %
Savi-taipale	1041401	14,9	15,7	22,0	0,8	7,1	5,30 %	47,40 %
Siilinjärvi, kk	1046501	28,3	30,1	26,1	1,8	-2,2	6,36 %	-7,74 %
Rautalampi	1147101	48,1	42,6	47,5	-5,5	-0,6	-11,45 %	-1,24 %
Orimattila, Pakaa	1160001	22,4	22,3	23,1	0,0	0,8	-0,21 %	3,46 %
Tuusula, Ruskela	1210801	28,2	25,0	28,0	-3,2	-0,2	-11,34 %	-0,66 %
Vaala, Niska	1592101	29,6	19,0	15,6	-10,6	-14,0	-35,76 %	-47,31 %
Kuhmo, Varajoki	1599501	22,5	21,9	20,8	-0,7	-1,7	-3,00 %	-7,65 %
Puolanka	1600501	26,7	22,1	26,5	-4,6	-0,1	-17,13 %	-0,55 %
Salla, Kelloselkä	1654801	17,4	18,9	11,7	1,5	-5,7	8,83 %	-32,79 %
Rovaniemi, Olkkajärvi	1657101	13,5	14,2	14,7	0,7	1,2	5,24 %	8,99 %
Raudanjoki	1657801	31,9	30,8	27,4	-1,1	-4,5	-3,43 %	-13,97 %
Kattilamaa, Kolari	1673701	34,6	14,2	16,1	-20,4	-18,5	-58,91 %	-53,56 %
Inari, Repojoki	1714301	22,7	23,8	18,9	1,1	-3,7	5,04 %	-16,51 %
Yläne	1340402	32,6	31,5	31,7	-1,1	-0,9	-3,43 %	-2,90 %
Keuruu	1356602	20,9	17,6	20,4	-3,3	-0,4	-15,66 %	-2,00 %
Oijärvi	1630201	40,5	39,2	39,1	-1,3	-1,4	-3,18 %	-3,40 %
Ullava, Alikylä	1490501	20,0	20,3	20,5	0,4	0,5	1,98 %	2,52 %
Inari, Kaasmukka	1719801	30,1	13,1	12,9	-17,0	-17,2	-56,39 %	-57,13 %
Karvia	1360401	7,9	7,5	8,8	-0,3	1,0	-4,04 %	12,27 %
keskiarvot		25,5	22,3	22,5				

Liite 4: lumensyvyys interpoloinnista puuttuvilla sää- asemilla 2–5.2.2012

		* koordinaatit osuvat radiometrituotteen vesimaskattuun pikseliin, interpoloidut SD -arvot otettu lähimmästä maapikselistä													
aseman nimi	lp nn	Lat	Long	Lumen syvyys sääasemalla				Lumen syvyys interpoloitu				Erot			
				2.2	3.2	4.2	5.2	2.2.	3.2.	4.2.	5.2.	2.2.	3.2.	4.2.	5.2.
Utsjoki Nuorgam Rajavartio- asema	9604	70,082	27,896	33	33	33	33	39,0	39,0	38,9	36,5	6,0	6,0	5,9	3,5
Inari Kirakkajärvi	9708	69,582	28,897	36	36	37	37	35,5	36,1	36,0	34,3	-0,5	0,1	-1,0	-2,7
Inari Kaamanen	9616	69,141	27,266	34	34	34	34	35,6	35,8	35,8	35,0	1,6	1,8	1,8	1,0
Inari Angeli Lintupuoliselkä	9405	68,903	25,736	37	37	37	37	58,3	58,2	58,2	58,2	21,3	21,2	21,2	21,2
Enontekiö Näkkälä	9201	68,603	23,576	41	42	41	42	52,6	52,4	52,3	52,1	11,6	10,4	11,3	10,1
Inari Saariselkä	8606	68,415	27,413	44	44	44	44	38,7	38,5	38,5	38,4	-5,3	-5,5	-5,5	-5,6
Kittilä Pokka	8404	68,170	25,782	61	60	59	59	49,7	49,7	49,7	49,3	-11,3	-10,3	-9,3	-9,7
Sodankylä Vuotso	8602	68,085	27,186	52	51	51	51	44,4	44,5	44,3	43,8	-7,6	-6,5	-6,7	-7,2
Kittilä Kenttäröva	8312	67,992	24,239	67	67	66	66	48,8	48,8	48,9	48,7	-18,2	-18,2	-17,1	-17,3
Sodankylä Lokka	8601	67,822	27,746	45	45	44	45	47,5	48,3	47,5	46,5	2,5	3,3	3,5	1,5
Sodankylä, Lapin Ilmatiet. tutk. kes	7501	67,367	26,629	55	56	55	55	50,9	52,7	51,7	50,2	-4,1	-3,3	-3,3	-4,8
Salla Naruska	7804	67,163	29,178	54	54	53	53	45,3	41,8	41,2	40,9	-8,7	-12,2	-11,8	-12,1
Rovaniemen MLK Apukka	7502	66,580	26,011	47	47	47	47	58,0	57,9	56,3	57,8	11,0	10,9	9,3	10,8
Rovaniemi lentoasema / Rovaniemen mlk	7401	66,559	25,831	61	63	63	63	58,9	58,7	56,5	58,7	-2,1	-4,3	-6,5	-4,3
Ylitornio Meltosjärvi	7301	66,529	24,649	50	51	50	51	61,5	61,4	57,2	61,5	11,5	10,4	7,2	10,5
Kuusamo Kiutaköngäs	6802	66,367	29,313	49	48	48	50	49,7	48,2	48,2	48,3	0,7	0,2	0,2	-1,7
Ranua Lentokenttä	6514	65,977	26,368	60	60	60	60	56,2	56,1	53,1	56,3	-3,8	-3,9	-6,9	-3,7

Tornio Torppi	63 12	65,847	24,174	45	45	45	45	58,5	58,2	45,2	58,3	13,5	13,2	0,2	13,3
Hailuoto Ojakylä	53 01	65,020	24,728	31	30	31	32	43,0	42,8	37,3	43,4	12,0	12,8	6,3	11,4
Vaala Pelso	55 02	64,502	26,424	28	28	28	29	40,4	40,5	39,7	40,5	12,4	12,5	11,7	11,5
Vieremä Kaarakkala	46 02	63,841	27,221	53		53	53	52,8	47,0	46,9	46,9	-0,2		-6,1	-6,1
Alajärvi Möksy	33 14	63,089	24,261	36	36	36	36	28,6	28,5	28,3	28,3	-7,4	-7,5	-7,7	-7,7
Kuopio Yliopisto	36 17	62,893	27,633	34	34	33	34	36,7	36,8	37,4	37,9	2,7	2,8	4,4	3,9
Ilomantsi Mekrijärvi	39 19	62,770	30,975	41	41	41	42	59,1	58,9	59,7	59,5	18,1	17,9	18,7	17,5
Joensuu Linnunlah- ti	38 25	62,602	29,724	34	35	34	33	42,6	41,9	41,4	41,6	8,6	6,9	7,4	8,6
Multia Karhila	33 17	62,511	24,808	43	44	44	45	35,5	35,5	35,5	35,6	-7,5	-8,5	-8,5	-9,4
Karvia Alkkia	21 03	62,183	22,800	24	24	24	24	26,7	26,3	27,2	27,1	2,7	2,3	3,2	3,1
Leivonmä- ki Sa- venaho	25 01	61,880	26,096	33	34	34	33	40,1	40,1	40,6	40,3	7,1	6,1	6,6	7,3
Punkaharju Laukansaa- ri	28 01	61,802	29,315	38	38	38	37	44,6	44,3	43,9	44,0	6,6	6,3	5,9	7,0
Anjalan- koski An- jala	15 04	60,697	26,810	37	38	37	37	32,8	33,6	34,2	33,8	-4,2	-4,4	-2,8	-3,2
Lohja Porla	30 7	60,244	24,049	27	27	27	28	31,9	32,1	34,5	34,3	4,9	5,1	7,5	6,3
							keskiar- vo					2,4	2,2	1,3	1,7
							keskihajonta					9,0	9,2	8,7	9,1
							RMSE					9,3	9,4	8,8	9,3