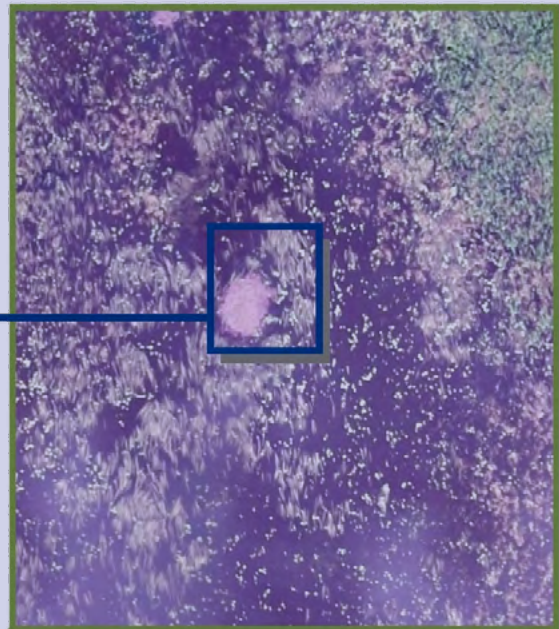




Eri mittakaavaiset kaukokartoitusmenetelmät järvien rantavyöhykkeen kasvillisuuden tilan arvioinnissa ja seurannassa

JUHO-VILLE MARTTILA | JUKKA AROVIITA | MINNA KUOPPALA | ANTTI KANNINEN



Eri mittakaavaiset
kaukokartoitusmenetelmät järvien
rantavyöhykkeen kasvillisuuden tilan
arvioinnissa ja seurannassa

RAPORTTEJA 48 | 2020

**ERI MITTAKAAVAISET KAUKOKARTOITUSMENETELMÄT JÄRVIEN RANTAVYÖHYKKEEN
KASVILLISUUDEN SEURANNASSA JA TILANARVIOINNISSA**

Pohjois-Savon elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus

Taitto: KEHA-keskus

Kansikuva: Pieni Vehkalahti Kaavilta eri kaukokartoitusaineistoissa. Vasemmalla ylhäällä: droonikuva 15 metrin korkeudesta ©Juho-Ville Marttila, Pohjois-Savon ELY-keskus 2019. Oikealla ylhäällä: 150 metrin korkeudessa droonilla kuvatuista kuvista tuotettu ortomosaiikki ©Juho-Ville Marttila, Pohjois-Savon ELY-keskus 2019. Vasemmalla alhaalla: lentokoneella kuvattu väri-infraortokuva ©Maanmittauslaitos 2018. Oikealla alhaalla: Sentinel-2-satelliitilla kuvattu tosivärikuva ©Euroopan avaruusjärjestö 2018. Kansikuvan taitto: Juho-Ville Marttila.

Diagrammit: Pohjois-Savon ELY-keskus ja SYKE 2019-2020

Kartat: Juho-Ville Marttila

ISBN 978-952-314-901-4 (PDF)

ISSN 2242-2854 (verkkajulkaisu)

URN:ISBN:978-952-314-901-4

www.doria.fi/ely-keskus

Sisältö

Esipuhe	3
Johdanto	4
Lähteet.....	5
OSA I: Ilmakuvatulkintaan pohjautuvan kasvittumisaste-tilamuuttujan jatkokehitys	6
1. Johdanto.....	6
2. Aineisto.....	7
3. Vertailuolosuhteiden mallintaminen kasvittumisasteelle	9
4. Tilanarviointi ja luokkarajojen määrittely	10
5. Kasvittumisasteen vaihtelu.....	11
6. Vertailuolosten mallinnus.....	12
7. Kasvittumisasteeseen perustuva tilan arviointi	16
8. Kasvittumisasteen ja vesienhoidon tilamuuttujien välinen suhde.....	20
9. Johtopäätökset	22
10. Lähteet	24
OSA II: Vesikasvitulkinta satelliittikuvista kynnystämistekniikalla	25
1. Johdanto.....	25
2. Aineisto ja menetelmät	26
2.1. Kynnysarvojen määrittäminen parhaalla mahdollisella referenssiaineistolla31	
2.2. Kynnysarvojen määrittäminen kahden alueen järvien välillä	34
3. Valtakunnallisen NDVI-mosaikin kynnystäminen.....	41
4. Johtopäätökset	44
5. Lähteet	46
OSA 3: Vesikasvillisuuden kartoitus satelliittikuvista EcoSat-menetelmällä.....	47
1. Johdanto.....	47
2. Aineisto.....	48
2.1. Testikohde ja satelliittikuva-aineisto.....	48
2.2. Maastotiedon kerääminen	50
2.3. EcoSat-tulkintamenetelmän evaluointi	53
2.4. EcoSat-tulkintamenetelmän validointi	53
2.5. Tulkintamenetelmä	54
2.6. BioBase	54
3. Tulokset	56
3.1. Luokitusten tarkkuus.....	56
3.2. Tutkimusaluekohtaiset tarkastelut	60
3.3. Vertailu aiempiin kartoituksiin.....	65
4. Johtopäätökset ja jatkokehityskohteet	67
4.1. Maastotiedon keruu ja muu menetelmän käyttäjältä vaadittu toiminta	67
4.2. Kustannukset.....	67
4.3. Menetelmän hyödynnettävyys.....	68
5. Lähteet	69

OSA IV: Vesikasvitulkinta Picterra-menetelmällä	70
Yhteenveto	72
Liitteet	73
Liite a Tulkinta-avain vesikasvillisuuden tunnistamiseen kansallisen ilmakuvausohjelman väri-infrakuvista.....	74
Liite b Karttasarja satelliitti- ja ilmakuvista tehdyistä vesikasvillisuustulkinnoista osassa II tutkituilla järvillä.	111
Liite c Virhematriisi WorldView-3 -kuvasta luokittain	136
Liite d Virhematriisi Sentinel-2 -kuvasta luokittain (MMU 100 m²).....	136
Liite e Virhematriisi Sentinel-2 -kuvasta luokittain (MMU 500 m²).....	137

Esipuhe

Hankkeessa ”Kansallisen kuvausohjelman ilmakuvat vesikasvillisuuden runsastumisen ja tilan arvioinnissa (ILMAVERSO)” luotiin ilmakuvien käyttöön perustuva tulkintamenetelmä ja tarvittavat GIS-työkalut järvien ranta- ja vesikasvillisuuden runsauden analysoitiin. Lisäksi hankkeessa kehitettiin tulkintamenetelmään pohjautuvaa vesikasvillisuuden tilan arviointimenetelmää.

Hankkeen toteutuksen aikana havaittiin jatkokehittämistarpeita, jotta kaukokartoitukseen perustuvat menetelmät olisivat laajemmin sovellettavissa Suomen järvien vesikasvillisuuden tilan ja siinä tapahtuvien muutosten arvioinnissa. Jatkokehitystä varten ympäristöministeriöltä saatiin rahoitus hankkeelle ”Eri mittakaavaisten kaukokartoitusmenetelmien yhdistäminen järvien rantavyöhykkeen kasvillisuuden tilan arvioinnissa ja seurannassa (ILMAVERSO II)”.

Jatkohankkeen tavoitteet jakautuivat neljään osaan. Ensimmäisessä osassa kasvatettiin ilmakuvatulkinnalla tutkittavien järvien määrää, jotta tila-arvioinnissa käytettävän kasvittumisastemuuttujan vertailuolojen mallinnusta voitiin täsmentää. Koska kansallisessa kuvausohjelmassa tuotettavien ilmakuvien kuvausajankohdissa on vaihtelua ja kuvissa saattaa olla paikallisia, vesikasvillisuuden tulkinnan estäviä häiriöitä, hankkeen toisessa ja kolmannessa osassa tutkittiin vaihtoehtoisten kaukokartoitusmenetelmien hyödyntämistä. Toisessa osassa testattiin alkuperäistä tulkintamenetelmää mukailevaa ratkaisua, jossa kansallisen satelliittidatakeskuksen kautta avoimesti ja ilmaiseksi ladattuja Sentinel-2 -kuvia luokiteltiin kasvillisuusindekin kynnystämiseen perustuvalla yksinkertaisella me-

netelmällä. Kolmannessa osassa vesikasviliukitelu tuotettiin valmiin kaupallisen EcoSat-kaukokartoitus tuotteen avulla. Tapausesimerkkinä oli Säkylän Pyhäjärvi. Neljännessä osassa testattiin kaupallista Picterra-kaukokartoituskuvatulkintaso-velusta.

Juho-Ville Marttila ja Antti Kanninen Pohjois-Savon ELY-keskuksesta suunnittelivat hankkeen ja vastasivat pääosasta raportointia. Marttila teki ilmakuva- ja satelliittikuvatulkinnat ensimmäisessä ja toisessa osassa sekä tilastollisen tarkastelun toisessa ja kolmannessa osassa. Kanninen toimi hankkeen projektipäällikkönä. Jukka Aroviita Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) Vesikeskuksesta vastasi ensimmäisen osan tilastollisen mallintamisen suunnittelusta ja toteutuksesta ja pääosasta ko. osan raportointia. Minna Kuoppala SYKEN Vesikeskuksesta osallistui ensimmäisessä osassa kasvittumisasteen ja vesienhoidon tilamuuttujaineistojen käsittelyyn. Sampsa Koponen, Markus Törmä ja Pekka Härmä SYKEN Tietokeskuksesta toimittivat aineistoa toista osaa varten ja antoivat neuvoa satelliittiaineistojen käsittelyssä. Anne-Mari Ventelä ja Elisa Mikkilä toimittivat paikkatietoaineistoja ja muita tutkimusmateriaaleja kolmatta osiota varten. Ray Valley Navicolta ja Christian Bödingen EOMAP-yrityksestä vastasivat Pyhäjärven EcoSat-tulkinnan toimittamisesta ja toteutuksesta, maastoaineiston keräsivät Marttila ja Kanninen. Frank de Morsier Picterralta oli kumppanina neljännen osan Picterra-tulkintojen toteuttamisessa.

Tekijät kiittävät kaikkia yhteistyökumppaneista panoksesta hankkeeseen ja ympäristöministeriötä hankkeen rahoittamisesta!

Kuopiossa,

Juho-Ville Marttila ja Antti Kanninen

Johdanto

Suurvesikasvillisuus on tärkeä osa järvien ekosysteemiä, sillä se tarjoaa elinympäristön useiden kalalajien lisääntymiselle ja kalanpoikasten kasvulle sekä vesilinnuille ruokailu-, pesintä- ja levähdyspaikkoina. Suurvesikasvillisuuden koostumusta käytetään ilmentämään järvien tilaa osana vesistöjen ekologisen tilan arviointia (esim. Aroviita ym. 2019).

Pohjois-Savon ELY-keskuksen hankkeessa ”Kansallisen kuvausohjelman ilmakuvat vesikasvillisuuden tilan ja runsastumisen arvioinnissa (ILMAVERSO-OHKE)” (Marttila ym. 2018) kehitettiin kustannustehokas tulkintamenetelmä, jolla määritetään järvien ranta- ja vesikasvillisuuden pinta-ala. Menetelmän lähtöaineistona ovat kansallisessa ilmakuvausohjelmassa tuotetut avoimet ilmakuvaineistot. Menetelmän soveltamiseksi hankkeessa luotiin tarvittavat ArcGIS-työkalut.

Tulkintamenetelmän lopputuotteet ovat vesikasvikartta ja kasvittumisasteeksi kutsuttava tunnusluku. Kasvittumisaste määritetään vertaamalla ilmakuvasta näkyvää vesikasvillisuuden kokonaispinta-alaa järven syvyysvyöhykkeiden perusteella määritettyyn vesikasvillisuuden mahdolliseen kasvualueeseen. Kasvittumisasteen perusteella ILMAVERSO-hankkeessa kehitettiin alustavasti mallinnusmenetelmää, jolla muuttujaa voidaan käyttää kasvillisuuden tilan mittarina.

Tilantarvioinnin pohjana oleva vertailuolujen mallinnus toimi hankkeessa kerätyn aineiston perusteella erittäin lupaavasti (Marttila ym. 2018). Ilmakuvista tulkittua tilamuuttujaa eli kasvittumisastetta pystyttiin vertailuoloissa mallintamaan ihmistoinnasta riippumattomien muuttujien (valuma-alueen kivennäismaat, järviältäan keskisyvyys) perusteella. Tällöin rehevissä, lähinnä maatalouden kuormittamissa järvissä tapahtuneet kasvillisuusmuutokset pystyttiin tunnistamaan ilmakuvien avulla. Hankkeessa pystyttiin tulkitsemaan 23 vertailuolota edustavaa järveä. Vertailuaineisto jäi kuitenkin liian suppeaksi, jotta koko valtakunnan laajuisesti toimivan mallin ja tilantarviointimenetelmän luominen olisi ollut mahdollista.

Vaikka kansallisessa ilmakuvausohjelmassa tuotetaan ilmakuvia maantieteellisesti kattavasti ja toistuvasti, liittyy aineiston hyödyntämiseen merkittäviä rajoitteita. Kuvauksista suuri osa tehdään

huhti–kesäkuun aikana, jolloin ajankohta ei ole sopiva vesikasvillisuuden runsauden määrittämiseksi. Toisaalta kasvillisuustulkinnan näkökulmasta oikeaan aikaankin kuvatussa aineistossa voi olla radiometrisiä häiriöitä, jotka estävät tulkinnan. Jotta tilantarviointimenetelmän käyttökelpoisuutta saataisiin laajennettua, tulee selvittää vaihtoehtoisten kaukokartoitusaineistojen, kuten tarkan resoluution satelliittikuvien, hyödyntäminen

Hankkeen tavoitteet jakautuivat neljään eri osaan. Ensimmäisessä osassa ilmakuvista tulkittavien vertailujärvien ja kuormitettujen järvien aineistoa kasvatettiin edeltävässä hankkeessa luodulla menetelmällä. Laajennetulla aineistolla tarkennettiin tilamuuttujan vertailuolujen mallinnusta ja luotiin ennustavaan mallinnukseen pohjautuva menetelmä vertailuolujen ja luokkarajojen asettamiseen. Luokittelun validoimiseksi tilamuuttujaa vertailtiin myös laajennettuun vesikasvillisuuden maastoaineistoon.

Toisessa osassa vesikasvitulkinta tehtiin Sentinel-2 -kaksoissatelliittien monikanavaisille kuville edeltävässä hankkeessa luodun menetelmän tavoin kynnystämistekniikalla. Kuva-aineistot ovat avoimesti ladattavissa kansallisen satelliittikuva-keskuksen latauspalvelusta. Sentinel-2 -kuvat mahdollistavat maantieteellisesti ja ajallisesti kattavamman aineistolähteen ilmakuviin verrattuna, mutta karkeampi maastoresoluutio (spektrikanavasta riippuen 10–60 metriä) heikentää lähtökohteisesti rantavyöhykkeen tulkintaa. Tavoitteena oli selvittää, että voitaisiinko Sentinel-2 -aineistosta tuottaa luotettavasti ilmakuvamenetelmään verrannollisia vesikasvillisuuden pinta-alatietoja.

Kolmannessa osassa arvioidaan kaupallisen EcoSat-kaukokartoitustuotteen käyttökelpoisuutta suomalaisen järviympäristön kasvillisuuden tulkinnassa. Testauksen tapausesimerkkinä käytettiin Säkylän Pyhäjärveä, jossa on tehty useita aikaisempia kasvillisuustutkimuksia. EcoSat-tuotteen aineistolähteenä käytettiin kaupallista tarkan resoluution WorldView-2 -satelliittikuvaa ja avointa Sentinel-2 -kuvaa. Kyseessä oli ensimmäinen sovelluskerta Suomessa kyseiselle tuotteelle.

Neljännessä osassa arvioidaan vielä pienimuotoisesti hankkeen loppupuolella esille nousutta vaihtoehtoista tapaa ilmakuvista tehtävälle il-

makuvatulkinnaalle. Kyseinen tapa on kaupallinen Picterra-kaukokartoitusuote, jota käytetään internetiselaimella. Tuote mahdollistaa kohteiden tunnistamisen kaukokartoitusaineistoista suhteellisen nopeasti ja helposti luotavien koneoppimismallien avulla, joita voidaan soveltaa eri alueiden välillä.

Lähteet

Aroviita J., S. Mitikka, S. Vienonen (toim.) (2019).

Pintavesien tilan luokittelu ja arviointiperusteet vesienhoidon kolmannella kaudella. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 37/2019. 177 s.

<http://hdl.handle.net/10138/306745>

Marttila, J.-V., J. Aroviita, M. Törmä, S. Koponen, I. Autio, V.-M. Vallinkoski, M. Kuoppala, M. Rasilainen, A. Kanninen (2018). Kansallisen kuvausohjelman ilmakuvat vesikasvillisuuden runsastumisen ja tilan arvioinnissa. Raportteja 65/2018. 68 s.

OSA I: Ilmakuvatulkintaan pohjautuvan kasvittumisaste-tilamuuttujan jatkokehitys

1. Johdanto

Kansallisen kuvausohjelman ilmakuvat vesikasvillisuuden runsastumisen ja tilan arvioinnissa -hankkeessa (ILMAVERSO OHKE, myöhemmin ILMAVERSO I) kehitettiin ranta- ja vesikasvillisuuden kartoittamiseen tulkintasovellus (Marttila ym. 2018). Se perustui kansallisessa ilmakuvausohjelmassa tuotettaviin ortokorjattuihin vääräväri-ilmakuviin (ts. väri-infra), joiden maastoresoluutio on 0,5 metriä. Tulkintasovelluksessa käyttäjän apuna on joukko ArcGIS-ohjelmistolle kehitettyjä työkaluja graafisilla käyttöliittymillä.

Tulkintasovelluksen vaiheet ovat tiivistetysti:

1. Ilmakuvien lataaminen, yhdistäminen ja järvi-alueen rajaaminen vektoritason polygonimuotoisella kuviolla.
2. Kasvillisuustulkinta. Normalisoidun kasvillisuusindeksin (NDVI) laskenta ja luokittelu kolmeen luokkaan (rantakasvillisuus, vesikasvillisuus, vesi) visuaalisesti määritetyillä kynnsarvoilla (tarvittaessa eri kynnsarvot eri puolille järveä).
3. Varjomaskin muodostaminen. Punaisuusindeksin laskenta ja luokittelu kahteen luokkaan (varjoiset alueet, valoisat alueet). Punaisuusindeksin ollessa epäsopeva luokittelu voidaan tehdä myös harmaasävyrasterista tai pääkomponenttianalyysin avulla.
4. Kasvillisuusluokituksen laadunvarmistus. Maastototuusarvon kirjaaminen 150 satunnaisesti valitulle pisteelle (50 per pistettä luokka) ilmakuvista tehtävän visuaalisen tarkastelun perusteella. Luokittelun onnistumista kuvaavan kokonaistarkkuuden laskeminen.
5. Kasvittumisasteen laskenta ja arkistointi. Kasvittumisasteen laskenta perustuu ilmakuvasta tulkitun kasvillisuuspinna-alueen vertaamiseen järven teoreettista litoraaliauetta kuvaavien syvyysvyöhykkeiden pinta-alaan.
6. Elomuotovyöhykkeiden, varjomaskien, NDVI:n ja ilmakuvien vieminen karttapalveluun.
7. Käytettyjen kynnsarvojen arkistointi.

Vääräväri-ilmakuvien visuaalisen arvioimisen tueksi tässä raportissa julkaistaan tulkinta-avain liitteessä a. Siinä on esitetty rinnakkain ilmakuvat sekä 10 metrin korkeudesta droonilla otetut pysty- ja viisokuvat kolmen Koillis-Savossa sijaitsevan järven eri kasvillisuustyypeistä.

ILMAVERSO I -hankkeessa kerätyn aineiston perusteella mallinnettiin vertailuolosuhteita kasvittumisaste-tilamuuttujalle ja saatiin lupaavia alustavia tuloksia (Marttila ym. 2018). Vertailuolosuhteilla tarkoitetaan tässä luontaista tilaa, johon hajakuormitus ei ole vaikuttanut ja joka kuvastaa parasta ekologista tilaa eli tilaluokkaa erinomainen. Työssä havaittiin, että humusjärvien luontaista kasvittumisastetta selittivät eniten keskisyvyys ja soiden osuus valuma-alueella. Kerätty aineisto ei kuitenkaan ollut riittävän kattava, jotta olisi saatu luotua laajemmin sovellettavissa olevat vertailuolosuhteet, minkä vuoksi aineistoa laajennettiin ja mallinnusta jatkettiin ILMAVERSO II -hankkeessa. Työn ensisijaisena tavoitteena oli mahdollisimman kattavan järvien vesikasvillisuuden ilmakuvatulkintaan perustuvan tilanarviointimenetelmän luominen.

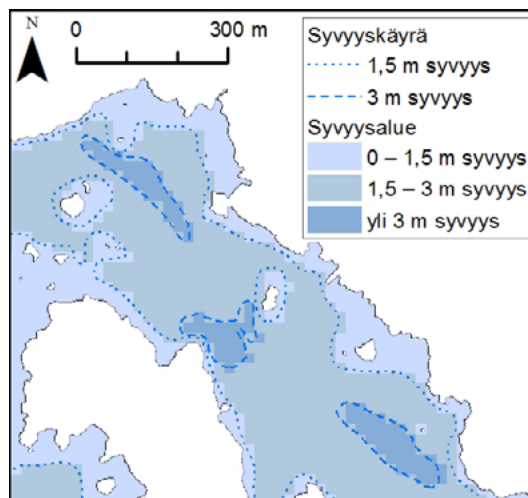
2. Aineisto

ILMAVERSO I -hankkeessa ilmakuvatulkinta tuotettiin 22 vertailujärvelle ja 14 hajakuormitteiselle järvelle. Valitut järvet täyttivät seuraavat ehdot:

- Ne kuuluivat SYKEN (Riihimäki & Tattari) ryhmittelyä varten kokoamaan noin 2500 järven aineistoon. Ko. aineiston järvistä oli valmiina koottuna tarvittavat taustatiedot ja ympäristömuuttujat.
- Järviltä oli käytössä tarkka syvyystieto (SYKEN sisävesien luotauksiin perustuvat syvyysalueet). Syvyystietoa tarvitaan kasvittumisasteen laskennassa.
- Järvet kuuluivat tyypiltään pieniin humusjärviin (Ph), runsashumuksisiin järviin (Rh), mataliin humusjärviin (Mh) tai mataliin runsashumuksisiin järviin (MRh). Lähtökohtaisesti kasvittumisaste toimii parhaiten humusjärvisissä, joissa vedenalaisen kasvillisuuden runsaus on luontaisesti vähäisempää kuin kirkasvetisissä järvissä.
- Järvet sijaitsivat Etelä-Suomessa. Järvien vesikasvillisuuden tilan luokittelussa Pohjois- ja Etelä-Suomen järville käytetään eri kriteereitä. Etelä-Suomeen luetaan Oulujoen vesistöalueen eteläpuolella olevat järvet ja Oulujoen vesistöalueen alle 120 metriä merenpinnan yläpuolella olevat järvet (OH 3 / 2019).

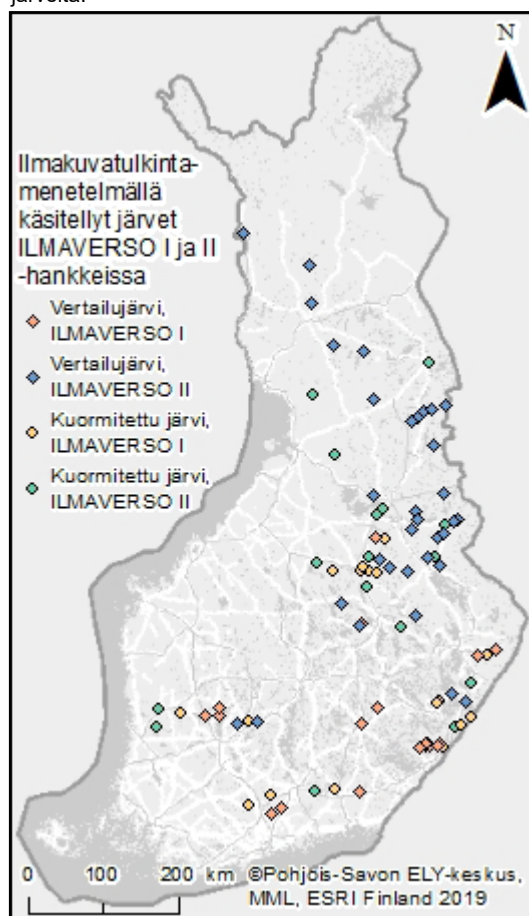
ILMAVERSO II -hankkeessa tehtiin lisää vesikasvillisuuden linjaseurantoja maastossa sekä ilmakuvatulkintoja. Aineistoa laajennettiin Pohjois-Suomen järville ja tyypiltään keskikokoisille humusjärville (Kh). Lisäksi otettiin mukaan järviä, joille SYKEN VESISEN-hankkeessa oli tehty Maanmittauslaitoksen (MML) Maastotietokannan syvyyskäyristä rasterointi 20 metrin maastoresoluutiolla. Rasteroinnin laatu tarkastettiin visuaalisesti suhteessa syvyyskäyriin. Mikäli laatu oli hyvä, rasterista muokattiin syvyysalueet 0–1,5 metriä ja 1,5–3 metriä (kuva 1).

Hankkeessa tehdyillä lisätulkinnoilla vertailujärvien lukumäärä kasvoi 52 kappaleeseen ja hajakuormitetujen järvien 32 kappaleeseen. ILMAVERSO I -hankkeessa analysoidusta neljästä referenssijärvestä kävi ilmi, etteivät ne täytä ehtoa vähintään hyvästä ekologisesta tilasta ja nämä järvet sisällytettiin kuormitettujen järvien joukkoon. Järvien sijainti on esitetty kuvassa 2. Vertailujärvien joukkoa saatiin kasvatettua erityisesti Pohjois-Savon, Kainuun, Koillismaan ja eteläisen Lapin alueelta.



© Pohjois-Savon ELY-keskus, SYKE, MML 2019

Kuva 1. Syvyyskäyriä Maanmittauslaitoksen Maastotietokannasta ja syvyysalueet, jotka on tuotettu SYKEN VESISEN-hankkeen syvyysrasterista. Kartta on Venesjärveltä.



Kuva 2. ILMAVERSO I ja II -hankkeissa tuotettu aineisto vertailujärviksi valituilta ja hajakuormitetuilta järviltä.

Vertailujärvet olivat jokaisessa tarkastellussa järviyypissä keskimäärin jonkin verran pienempiä ja syvempiä kuin hajakuormitettujen järvien (taulukko 1). Vertailujärvien valuma-alueella oli enintään 6 % peltoviljelyä ja niiden keskimääräinen fosforipitoisuus oli 19 µg/l. Kuormitettujen järvien valuma-alueella peltoa oli yleensä yli 10 % ja niiden keskimääräinen fosforipitoisuus oli 39 µg/l. Kuormitettujen järvien olivat myös yleensä tummempia kuin vertailujärvet.

Turvemaiden osuus valuma-alueesta oli samaa suuruusluokkaa vertailujärvillä ja kuormitetuilla järvillä kaikissa järviyypeissä (taulukko 1). Vertailutilassaan kuormitettujen järvien valuma-alueet lievenivät kuitenkin olleet turvemaavaltaisempia, sillä peltoja on raivattu turvemaille. Pienten humusjärvien tyyppissä (Ph) kuormitettujen järvien valuma-alueiden turvemaavaltaisuus oli erityisen vähäinen ja peltojen osuus suurin.

Hankkeiden aikana tilanarviointimenetelmän kehittämistä varten tarkasteltiin suuri määrä järviä, joiden vesikasvillisuustulkintaa (luokittelua) ei ilmakuvan puutteellisen laadun takia pystytty lopulta tekemään. Onnistuneiden luokittelujen osuus kaikista yrityksistä oli 49 prosenttia (taulukko 2). Näiden tulosten perusteella kansallisessa kuvausohjelmassa tuotettu ilmakehän aineisto ei ole kaikilta osin riittävän laadukas ja kattava vesikasvillisuustulkintojen tekemiseen ja siten systemaattiseen seurantaan. Tuotetun ilmakehän aineiston laadussa vesikasvillisuustulkinnan näkökulmasta näyttää lisäksi olevan merkittäviä kuvaajakohtaisia eroja, sillä onnistuneet tulkintaosuudet vaihtelivat n. 20 ja 80 % välillä (taulukko 2).

Taulukko 1. Tutkimukseen valittujen vertailujärvien (Vert) ja hajakuormitettujen järvien (Kuorm) tunnuslukuja (keskiarvo ja vaihteluväli) järviyypeittäin.

Tyyppi	Status	Lkm	Pinta-ala (ha)	Keskisyvyys (m)	Turvemaat (%)	Pellot (%)	Kokonaisfosfori (µg/l)	Väriarvo (µg Pt/l)
MRh	Vert	12	124 (53–222)	2,0 (0,8–3,4)	35 (16–53)	2 (0–6)	25 (14–38)	154 (95–230)
	Kuorm	8	481 (18–2105)	1,3 (0,5–2,6)	34 (10–63)	8 (1–22)	55 (21–87)	170 (113–230)
Mh	Vert	14	173 (51–507)	2,3 (1,0–3,0)	26 (9–43)	2 (0–5)	19 (7–32)	90 (48–150)
	Kuorm	9	299 (66–672)	2,0 (0,9–3,2)	22 (8–36)	10 (3–25)	33 (13–53)	69 (45–107)
Ph	Vert	15	205 (42–397)	5,3 (3,3–7,8)	23 (7–39)	2 (0–5)	12 (6–21)	66 (37–95)
	Kuorm	9	234 (51–560)	3,7 (2,7–5,3)	15 (11–31)	15 (4–28)	31 (11–58)	72 (35–133)
Kh	Vert	2	1740 (572–2908)	4,7 (4,3–5,0)	41 (36–46)	2 (1–3)	18 (12–24)	75 (64–85)
Rh	Vert	9	170 (38–393)	4,4 (2,7–6,3)	33 (19–48)	2 (0–5)	22 (12–36)	138 (100–170)
	Kuorm	6	504 (151–907)	3,5 (2,9–4,3)	35 (21–51)	9 (0–23)	36 (19–47)	159 (134–206)

Taulukko 2. Tulkintamenetelmällä luokittelun onnistuminen tilan arviointia varten valituilla järvillä ILMAVERSO I ja II -hankkeissa. Tapaukset, jossa järvi on luokiteltu kahden eri kuvaajan tuottamista ilmakehävälillä, on jätetty taulukosta pois. Yhdellä järvellä saattaa olla ilmakehävälillä useammalta vuodelta, joilta luokittelu epäonnistui.

Kuvaaja	Tilaaja	Onnistuneet luokittelut	Epäonnistuneet luokittelut
Blom Kartta	Suomen metsäkeskus (2015–2016)	39	11
Maanmittauslaitos	Maanmittauslaitos (2014–2018)	20	31
SKM Gisair	Maaseutuvirasto (2014–2017), Suomen metsäkeskus (2017–2018)	18	17
TerraTec	Maaseutuvirasto (2012–2013), Suomen metsäkeskus (2017–2018)	6	28

3. Vertailuolosuhteiden mallintaminen kasvittumisasteelle

Työssä mallinnettiin vesikasvillisuuden kasvittumisasteen vertailuolosuhteita (eli luontaista tasoa ilman merkittävää ihmistoiminnan vaikutusta) järvien tyypittely-, morfometria- ja valuma-alue tiedon perusteella. Jo ILMAVERSO I-hankkeessa todettiin, että järvien tyypittely ei ole yksinään riittävä keino luontaisen vaihtelun huomioimiseksi (Marttila ym. 2018). Tilastomallinnuksen menetelmänä kokeiltiin jo ILMAVERSO I-hankkeessa sovellettua Random Forest -mallinnusta (Breiman 2001) ja perinteistä lineaarista regressiomallinnusta. Random Forest on moderni tilastomenetelmä, jonka avulla voidaan havaita useiden selittävien muuttujien väliset selityssuhteet samanaikaisesti (Cutler ym. 2007).

Mallit kalibroitiin 52 vertailujärven aineiston avulla. Molemmille syvyysvyöhykkeille (0–1,5 m ja 0–3 m) rakennettiin omat mallit. Selittäviksi muuttujiksi malleihin tarjottiin taustatietoja järvien luontaisista ominaisuuksista, kuten sijainnista (koordinaatit, korkeus merenpinnasta), morfometriasta (keskisyvyys, pinta-ala, rantaviivan pituus) ja valuma-alueesta (turvemaiden osuus, kivennäismaiden osuus, vesistöjen osuus, soiden osuus). Turvemaiden osuuteen sisällytettiin pellot, joiden oletettiin pääasiassa olevan turvemaista raivattuja. Jatkossa tulisi tarkemmin määrittellä, mikä osuus valuma-alueiden pelloista on turvemaita, mikä osuus kivennäismaita.

Malleihin tarjottiin ensin selittäviksi muuttujiksi kaikkia muuttujia, minkä jälkeen iteratiivisesti poistettiin vähiten kasvittumisastetta selittäviä muuttujia ja keskenään korreloituneita muuttujia. Pyrkimyksenä oli kehittää molemmille syvyysvyöhykkeille ylisovittamaton ja mielekäs malli, jonka avulla voitaisiin arvioida kasvittumisasteen luontainen taso luontaisesti erilaisissa kuormittuneissa järvissä. Tämän takia mallinnuksessa ei käytetty vedenlaatumuuttujia, joiden käyttö vaatisi niille järvi kohtaisen luontaisen tason määrittelyn. Random Forest -mallinnuksessa muuttujien valinnassa käytettiin apuna R-ohjelman VSURF-pakettia (Genuer ym. 2015). Lopullisiksi valittujen mallien avulla ennustettiin kuormitetuille järville niiden vertailutilassa odotettu kasvittumisasteen taso eli kasvittumisasteen vertailuarvot.

4. Tilanarviointi ja luokkarajojen määrittely

Vertailuarvojen avulla laskettiin kasvittumisasteen ekologinen laatusuhde (ELS). ELS on vesienhoidon tilan arvioinnissa käytetty biologisen tilan muuttuneisuuden mitta: lähellä arvoa 1 olevat arvot indikoivat tilaluokkaa erinomainen, joka kuvaa vain vähän ihmistoiminnan muuttamaa tilaa (Aroviita ym. 2019), ja lähellä nollaa olevat arvot kuvastavat heikointa mahdollista tilaa.

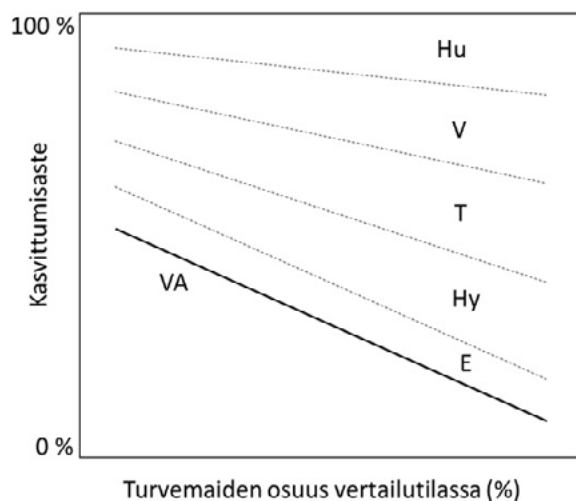
Kasvittumisasteen ELS-arvot laskettiin samaan tapaan kuin kasviplanktonin haitalliset sinilevät -muuttujalla, joka myös on myös prosenttiasteikollinen muuttuja ja jonka huonoin arvo on 100 %. Kasvittumisasteen alkuperäinen ELS lasketaan kaavalla:

$$\text{ELS} = (100 \% - \text{havaittu kasvittumisaste}) / (100 \% - \text{kasvittumisasteen vertailuarvo}),$$

jolloin ELS saa arvon 1 jos havaittu kasvittumisaste vastaa vertailuarvoa ja ELS pienenee kasvittumisasteen lisääntyessä saavuttaen arvon 0 jos kasvittumisaste on 100 %.

Koska vertailuarvot mallinnettiin järviokohtaisesti, myös luokkarajat kasvittumisasteelle asetettiin järviokohtaisesti. Vastaavaa menettelyä on käytetty järvisyvänteiden pohjaeläimistön tilaluokittelussa, jossa vertailuarvot myös mallinnetaan järviokohtaisesti (Aroviita ym. 2019). Kasvittumisasteen katsottiin kuvastavan vain kasvittumisen lisääntymistä ihmistoiminnan vaikutuksen lisääntyessä (ravinne- ja muu kuormitus), joten luokkarajat määriteltiin vain vertailuarvoa suuremmille kasvittumisasteille. Mitä pienempi ELS-arvo on, sitä kasvittuneempi ja umpeenkasvaneempi järvi on suhteessa mallinnuksen perusteella arvioituun luontaiseen kuormittamattomaan tilaan. Vertailuarvoja pienempien kasvittumisasteiden merkitys vaatisi lisätutkimusta.

Tilaluokkien rajat asetettiin poikkeamana vertailuarvosta. Vertailuarvo kuvaa keskimääräistä erinomaista eli luontaista tilaa. Erinomaisen tilan luokan raja määriteltiin vertailuarvomallin keskimääräisen ylempään 95. prosentin luottamusvälin avulla niin, että luokkien erinomainen ja hyvä raja-arvo (E/Hy) asetettiin kaikille järville yhtä monta kasvittumisasteen prosenttiyksikköä suuremmaksi kuin k.o. ylempi luottamusväli keskimäärin oli vertailuarvoa suurempi (ks. taulukko 3). Menettelyn avulla luokan



Kuva 3. Kasvittumisasteen luokkarajojen määrittely poikkeamana mallinnetuista vertailuarvoista (VA). Vertailuarvot mallinnettiin (paksu viiva) järviokohtaisesti turvemaiden osuuden perusteella. Katkoviivat kuvaavat luokkarajoja, jotka asetettiin poikkeamana luokkien erinomainen ja hyvä raja-arvosta (ks. tarkemmin teksti).

erinomainen leveyden määräytymisessä voidaan ottaa huomioon vertailuarvomallin epävarmuus: tarkemmassa mallissa hajontaa on vähemmän ja vertailuarvot voidaan määrittellä tarkemmin, jolloin erinomaisen tilan luokan leveys (luottamusvälit) voi olla kapeampi kuin tilanteessa missä vertailuvaihtelu pystytään selittämään heikommin.

Muiden tilaluokkien rajat asetettiin, kullekin järvelle erikseen, jakamalla kasvittumisasteen E/Hy-ajan ja arvon 100 % (luokan huono alaraja) väli neljään tasaväliseen osaan (luokat hyvä, tyydyttävä, välittävä ja huono) (kuva 3, taulukko 3). Lopuksi vertailuarvon ja luokkarajojen avulla laskettiin havaitun kasvittumisasteen skaalattu ELS luokitteluoppaan Liitteen 2 (Aroviita ym. 2019) kaavojen mukaisesti. Skaalatun ELS:in asteikolla luokkarajat ovat ELS = 0,8 (erinomainen/hyvä), 0,6 (hyvä/tyydyttävä), 0,4 (tyydyttävä/välittävä) ja 0,2 (välittävä/huono).

Taulukko 3. Kasvittumisasteen luokkarajojen määrittely (ks. tarkemmin teksti).

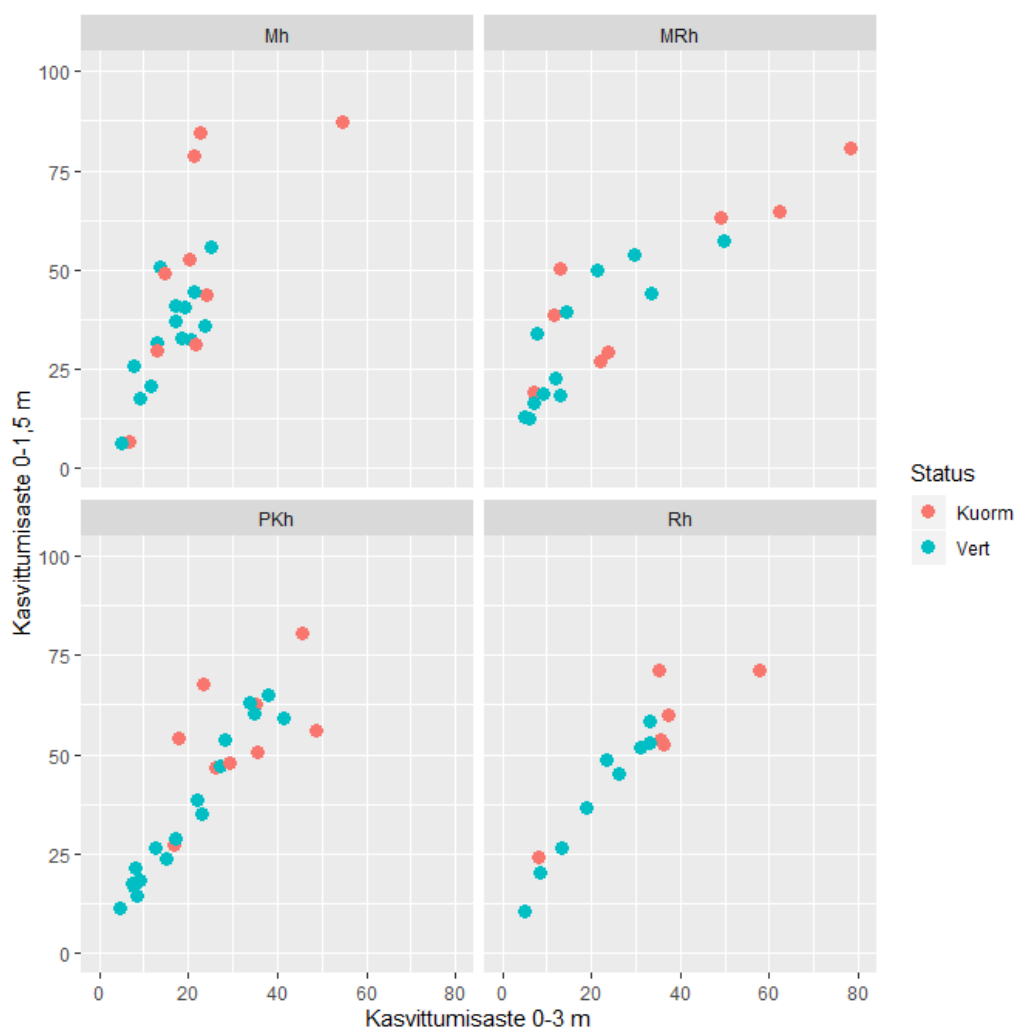
Kriteeri	Kasvittumisasteen arvo =
Vertailuarvo (VA)	Mallinnettu VA
Erinomainen/Hyvä (EHy)	EHy (ks. taulukko 4)
Hyvä/Tyydyttävä (HyT)	EHy + (100 % - EHy)/4
Tyydyttävä/Välittävä (TVä)	EHy + (100 % - EHy)/2
Välittävä/Huono (VHu)	100 % - (100 % - EHy)/4
Huono alaraja (HuAlar)	100 %

5. Kasvittumisasteen vaihtelu

Kasvittumisaste vaihteli 52 luontaisesti humuksisen (järvityypit Mh, MRh, Ph, Kh ja Rh) vertailujärven aineistossa verrattain paljon (Kuva 4). Keskisuuria humusjärviä oli aineistossa vain kaksi kappaletta, joten pieniä ja keskisuuria järveä käsiteltiin yhtenä järvityypinä (pienet ja keskisuuret humusjärvet, PKh). Matalammalla 0–1,5 m vyöhykkeellä kasvittumisaste oli keskimäärin 36 % (vaihteluväli 6–81 %). Syvyysvyöhykkeiden kasvittumisasteet korreloivat keskenään suhteellisen säännönmukaisesti (kuva 4). Laajemmassa 0–3 m vyöhykkeellä kasvittumisasteen taso oli pienempi, keskimäärin

20 % (vaihteluväli 5–78 %, mutta vain yhdessä järvessä yli 50 % (Suojärvi)).

Kuormitetuissa järvissä kasvittumisasteet olivat keskimäärin suurempia, vaikkakin useiden kuormitettujen järvien kasvittumisaste oli osittain vertailujärvien vaihtelun sisällä. Kasvittumisasteet olivat keskimäärin hieman alhaisempia ja niiden vaihtelu vähäisempää matalissa humusjärvissä (Mh ja MRh) kuin pienissä humusjärvissä ja runsashumuksissa järvissä (Ph ja Rh) (kuva 4). Selkeää eroa järvityyppien välillä ei esiintynyt, eikä näin ollen järvityypittely ole yksinään riittävä keino vertailuarvojen määrittämiseen.



Kuva 4. Kahden syvyysvyöhykkeen kasvittumisasteen välinen suhde neljässä eri järvityypissä. Järvien jako luonnontilaisiin vertailujärviin (Vert) ja kuormitettuihin järviin (Kuorm) on merkitty eri värisillä symboleilla. Kasvittumisaste on laskettu vertailemalla syvyysvyöhykkeessä olevan kasvillisuuden pinta-alaa syvyysvyöhykkeen pinta-alaan.

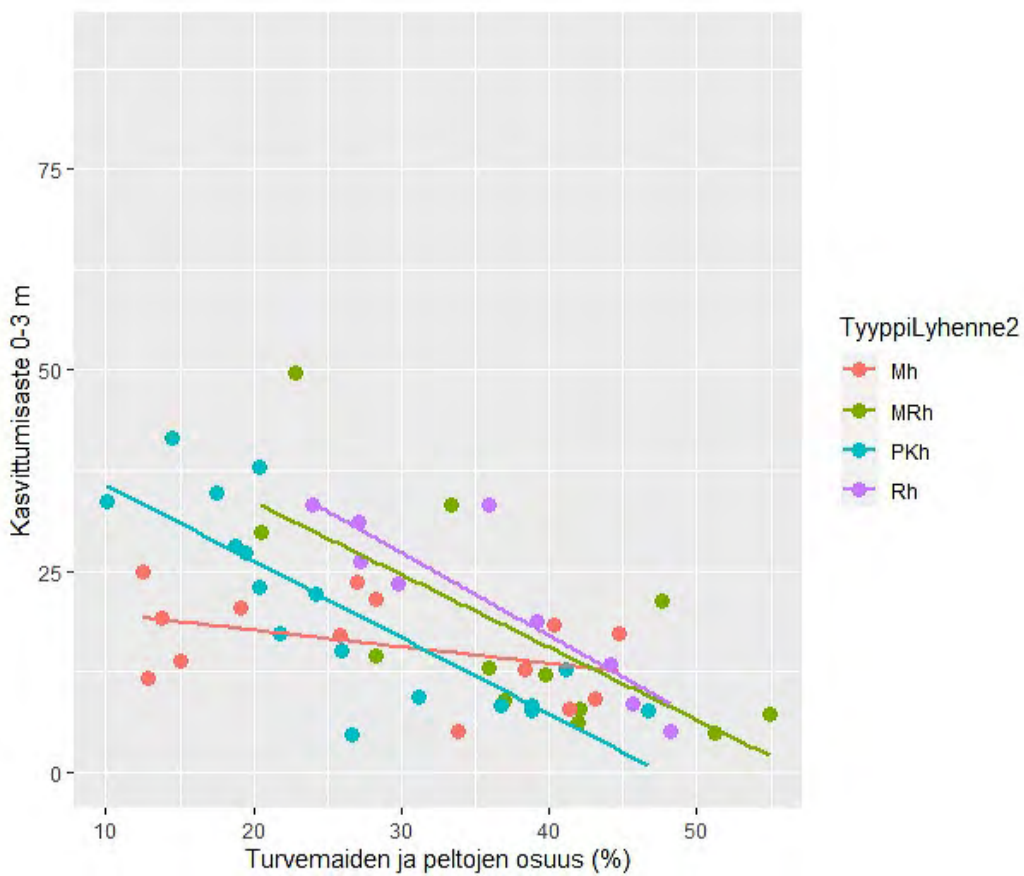
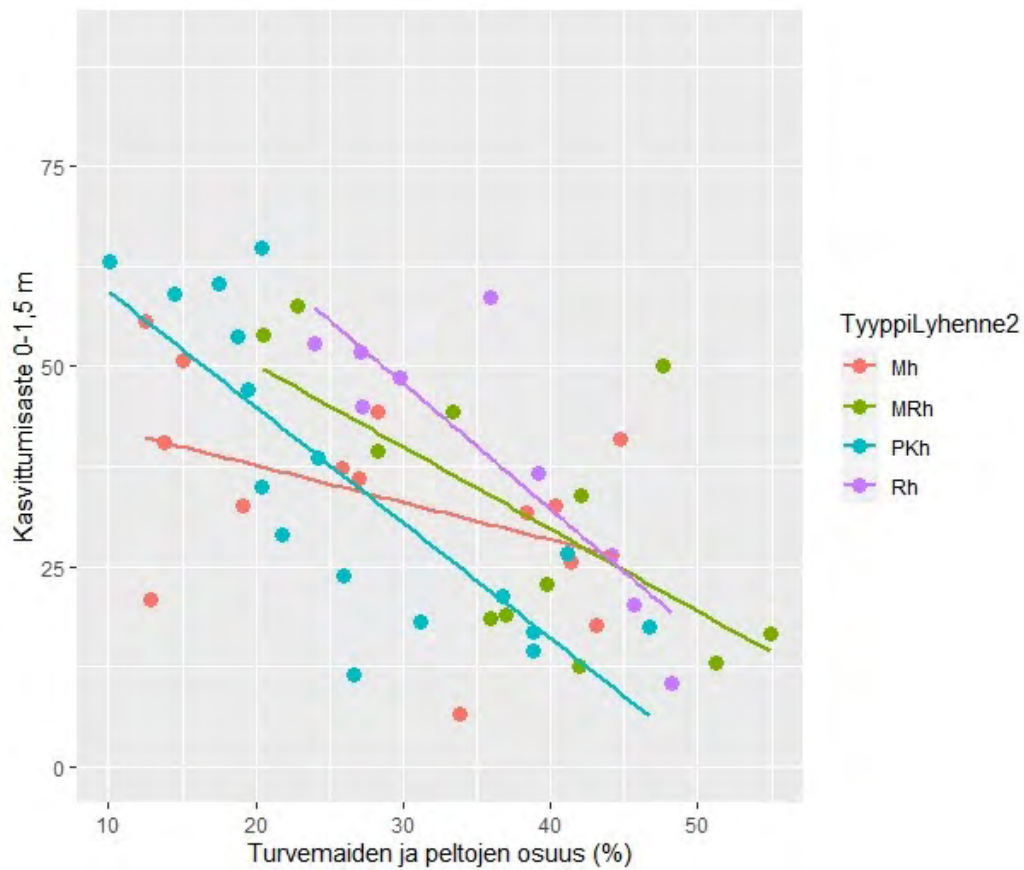
6. Vertailuolujen mallinnus

Kasvittumisasteen luontaista vaihtelua selitti vertailujärvijoukossa parhaiten turvemaiden osuus järven valuma-alueesta (kuva 5). Kasvittumisasteen ja turvemaiden osuuden suhde oli negatiivinen eli mitä enemmän järven valuma-alueella oli turvemaita, sitä alhaisempi järven luontainen kasvittumisaste oli. Vastaavasti kasvittumisasteen suhde kivennäismaiden osuuteen oli positiivinen, koska turvemaiden osuuden pienentyessä kivennäismaiden osuus kasvaa. Turvemaiden osuus selitti kasvittumisastetta yleensä hieman enemmän kuin kivennäismaiden osuus, joten turvemaiden osuutta käytettiin jatkossa mallinnuksessa.

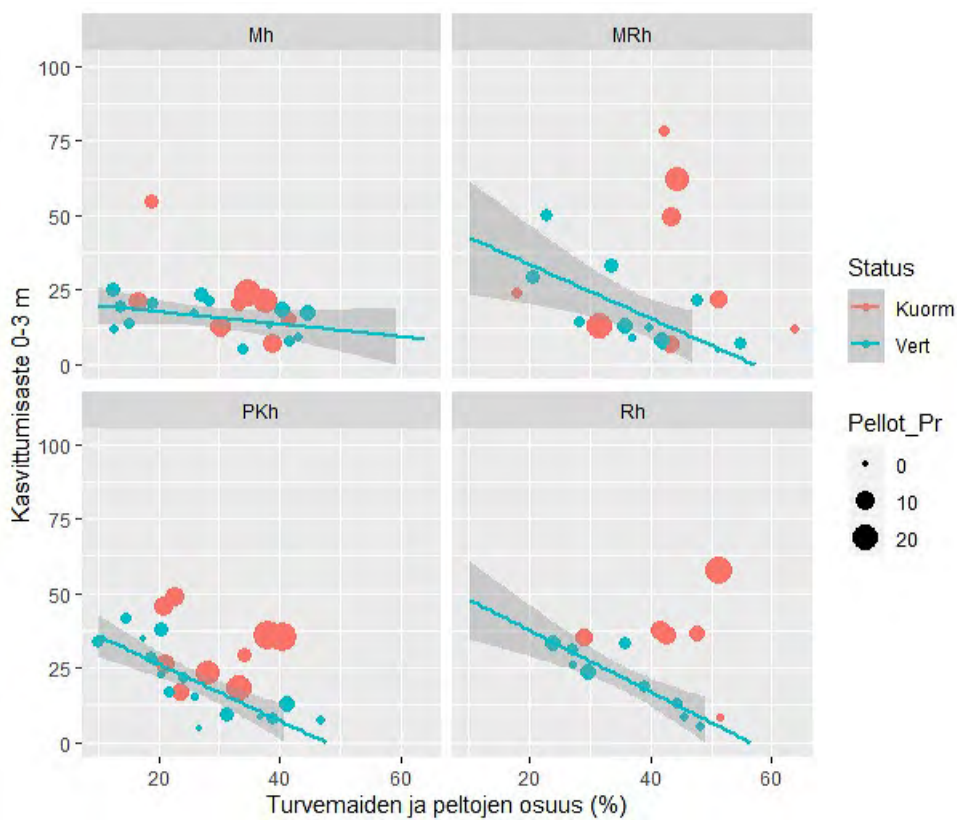
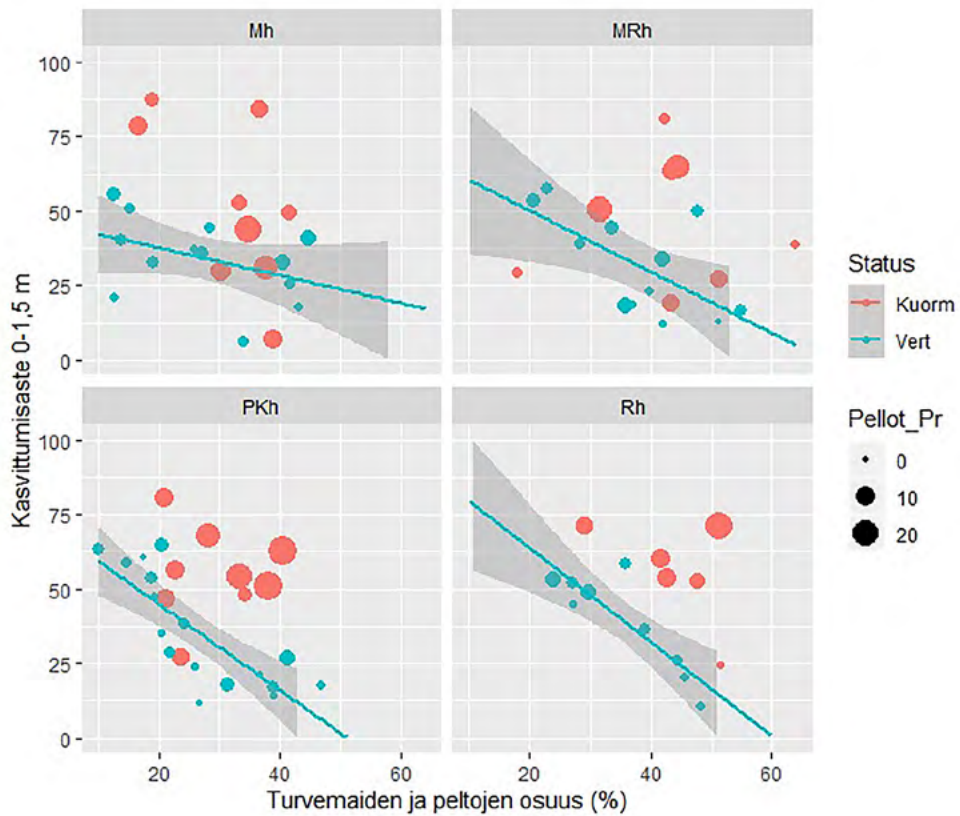
Kasvittumisasteen vaihtelun suhde valuma-alueen turvemaiden osuuteen oli voimakkain runsashumuksissa ja pienissä humusjärvissä ja heikompi matalissa runsashumuksissa järvissä ja heikoin matalissa humusjärvissä. Karkeasti arvioiden esimerkiksi Rh-tyyppin järvien vertailutilassa odotettu kasvittumisaste 0–1,5 m syvyysvyöhykkeessä oli yli 50 %, jos järven turvemaiden osuus oli alle 20 %, mutta alle 20 %, jos järven turvemaiden osuus ylitti 40 %.

Järven luontainen humuksisuus (humustyyppi) aiheutti tasoeron kasvittumisasteeseen niin, että samalla turvemaiden osuudella luontaisesti tummemmissa järvissä (Rh, MRh) kasvittumisaste oli korkeampi kuin vähemmän tummissa (PKh, Mh) (kuva 5). Tasoeron huomioimiseksi vertailuarvomallit rakennettiin järvityyppikohtaisesti.

Matalissa humusjärvissä (Mh) kasvittumisasteen luontainen vaihtelu oli pienempää kuin muissa tyypeissä, eikä kasvittumisasteen suhde turvemaiden osuuteen ollut merkitsevä kummassakaan syvyysvyöhykkeessä. Mh-tyyppin regressiomallin kulmakerron oli myös suurempi (loivempi regressiosuora) kuin muissa tyypeissä, vaikkakaan malli ei ollut merkitsevä (kuva 5).



Kuva 5. Vertailujärvien havaitun kasvittumisasteen ja järvien valuma-alueen turvemaiden (ml. pellot) osuuden välinen suhde kahdessa syvyyssvyöhykkeessä. Järvityypit on merkitty eri väreillä. Kullekin järvityypille sovitettu lineaarisen regression tiedot ovat taulukossa 4. Matalien humusjärvien (Mh) mallit eivät ole tilastollisesti merkitseviä.



Kuva 6. Tutkimusjärvien havaitun kasvittumisasteen ja valuma-alueen turvemaiden ja peltojen osuuden välinen suhde kahdessa syvyyssyöhykkeessä. Järvien jako luonnontilaisiin vertailujärviin (Vert) ja kuormitettuihin järviin (Kuorm) on merkitty eri väreillä. Vertailujärville sovitettujen lineaaristen regressiomallien (sininen viiva) tiedot ovat taulukossa 4. Tummanharmaa alue kuvaa regressioiden 95. %:n luottamusvälejä, jonka keskimääräistä arvoa käytettiin tilaluokittelun asettamiseen. Symbolien koko kuvaa pelkkää valuma-alueen peltojen osuutta. Matalien humusjärvien (Mh) mallit eivät ole tilastollisesti merkitseviä.

Useat selittävät muuttujat olivat keskenään korreloituneita eli niiden poisto selittävien muuttujien joukosta ei välttämättä vähentänyt mallien selitysvoimaa. Kun turvemaiden osuus sisällytettiin malliin, muiden muuttujien lisääminen malleihin ei myöskään lisännyt selitysvoimaa ilman, että olisi päädytty ylisovitetuihin malleihin. Lopullisiin malleihin päädyttiin sisällyttämään vain turvemaiden osuus (taulukko 4). Lopullisessa mallinnuksessa käytettiin lineaarista regressiota, joka selitti vertailujärvien vaihtelua hieman paremmin ja mielekkäämmin kuin Random Forest -malli.

Aineistossa oli maantieteellinen vaihtelu niin, että Pohjois-Suomen järvissä luontainen kasvittumisaste oli keskimäärin pienempi. Vaihtelu selittyy osin turvemaiden osuuden vaihteluun eli Pohjois-Suomessa on enemmän soita. Turvemaiden osuus ei kuitenkaan selity aineistossa vain sijainnilla, vaan myös aineiston Etelä-Suomen järvissä on turvemaavaltaisia valuma-alueita.

Taulukko 4. Kasvittumisasteen vertailuarvojen ennustamisen regressiomallit. X = järven valuma-alueen turvemaiden osuus (%) vertailuoloissa. Turvemaiden osuus arvioitiin sisällyttämällä siihen maatalouskäyttöön raivatut pellot. Vaihteluväli kertoo turvemaiden (ml, pellot) osuuden vaihtelun vertailujärvillä, jolle mallit ovat sovellettavissa. Taulukossa on esitetty myös tilaluokkien erinomainen (E) ja hyvä (Hy) luokkaraja, joka määriteltiin vertailuarvomallin keskimääräisen 95. %:n ylemmän luottamusvälin perusteella. *) humusjärvien (Mh) mallit eivät ole tilastollisesti merkitseviä.

Syvyyshyöhyke	Järvityyppi	Vertailuarvon yhtälö (%)	F	p	R ²	Vaihteluväli (X, %)	E/Hy-luokkaraja (%)
0– 1,5 m	Mh*	VA = 46,9 – 0,46X	2,7	0,127	0,18	12–45	VA + 7
	MRh	VA = 70,7 – 1,03X	7,4	0,021	0,43	20–55	VA + 8
	PKh	VA = 73,9 – 1,44X	26,8	<0,001	0,64	10–47	VA + 6
	Rh	VA = 95,1 – 1,57X	20,1	0,003	0,74	24–48	VA + 7
0– 3,0 m	Mh*	VA = 21,8 – 0,21X	2,5	0,139	0,17	12–45	VA + 4
	MRh	VA = 51,7 – 0,90X	9,7	0,011	0,49	20–55	VA + 7
	PKh	VA = 45,3 – 0,95X	32,0	<0,001	0,68	10–47	VA + 4
	Rh	VA = 58,2 – 1,03X	25,1	0,002	0,78	24–48	VA + 5

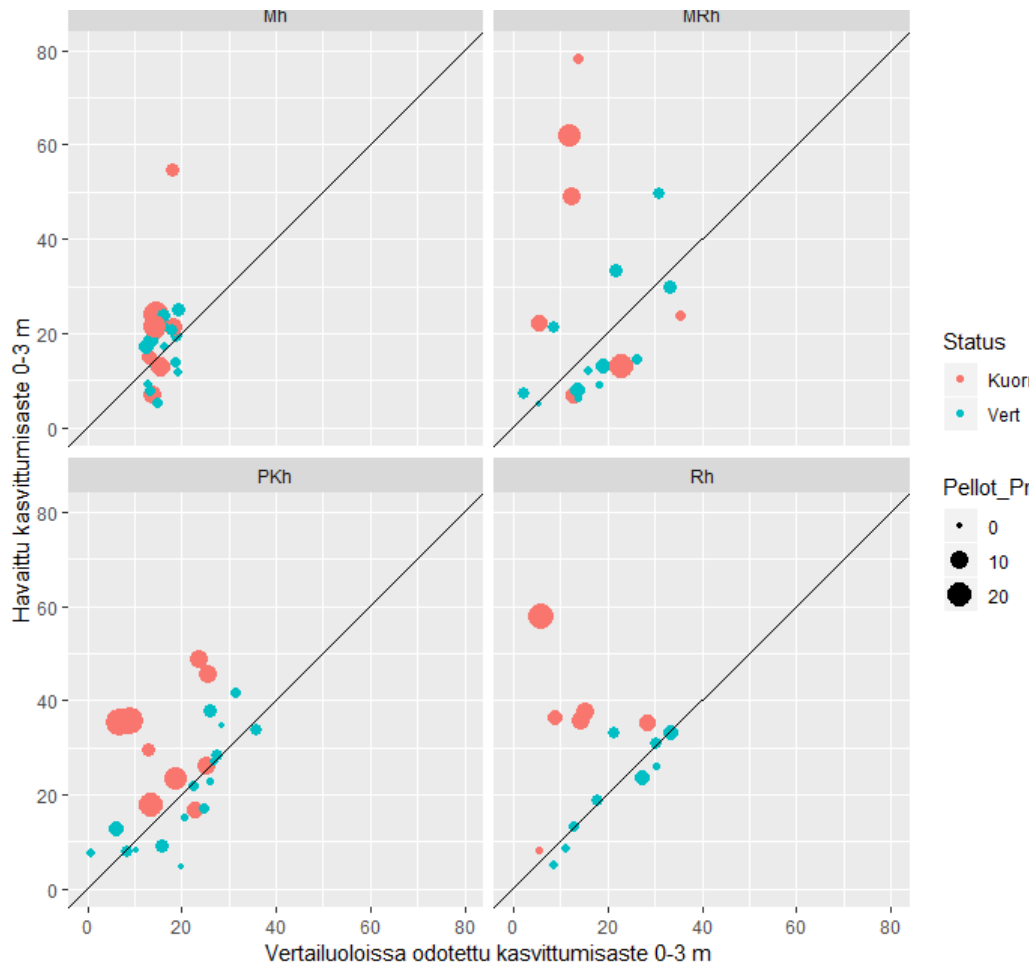
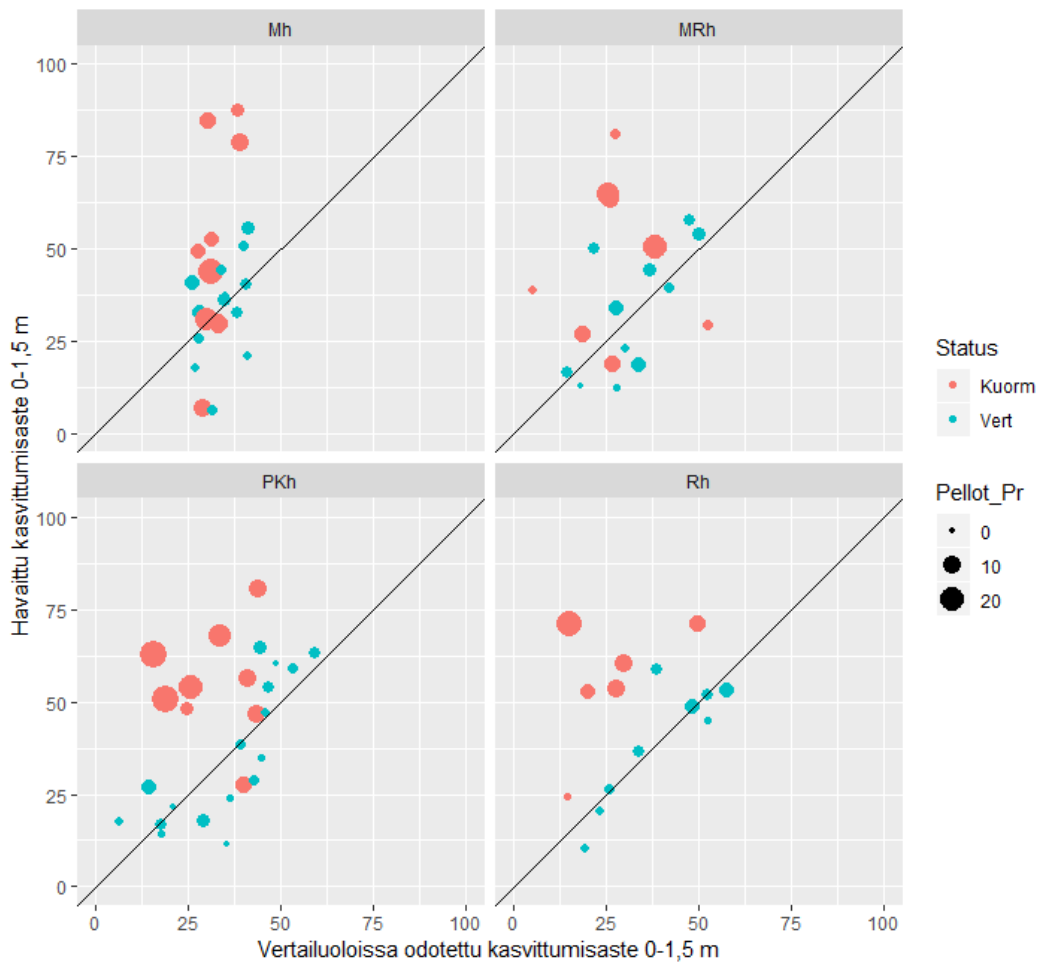
7. Kasvittumisasteeseen perustuva tilan arviointi

Kuormitetuille järville ennustettiin niiden vertailu-oloissa odotettu kasvittumisaste järvityyppikohtaisten mallien avulla. (kuva 7). Kunkin järven vertailuolujen turvemaiden osuutena käytettiin nykyisten turvemaiden ja peltojen yhteenlaskettua osuutta. Menettely sisältää oletuksen, että valtaosa pelloista on raivattuja turvemaita. Jatkossa tulisi tarkemmin määrittellä, mikä osuus valuma-alueiden pelloista on turvemaita, mikä osuus kivennäismaita. Kuormitettujen järvien vertailuolujen turvemaiden osuus oli vertailujärvien vaihtelun sisällä tai hyvin lähellä sitä, joten malleilla voitiin ennustaa odotettu kasvittumisaste kaikille kuormitetuille järville.

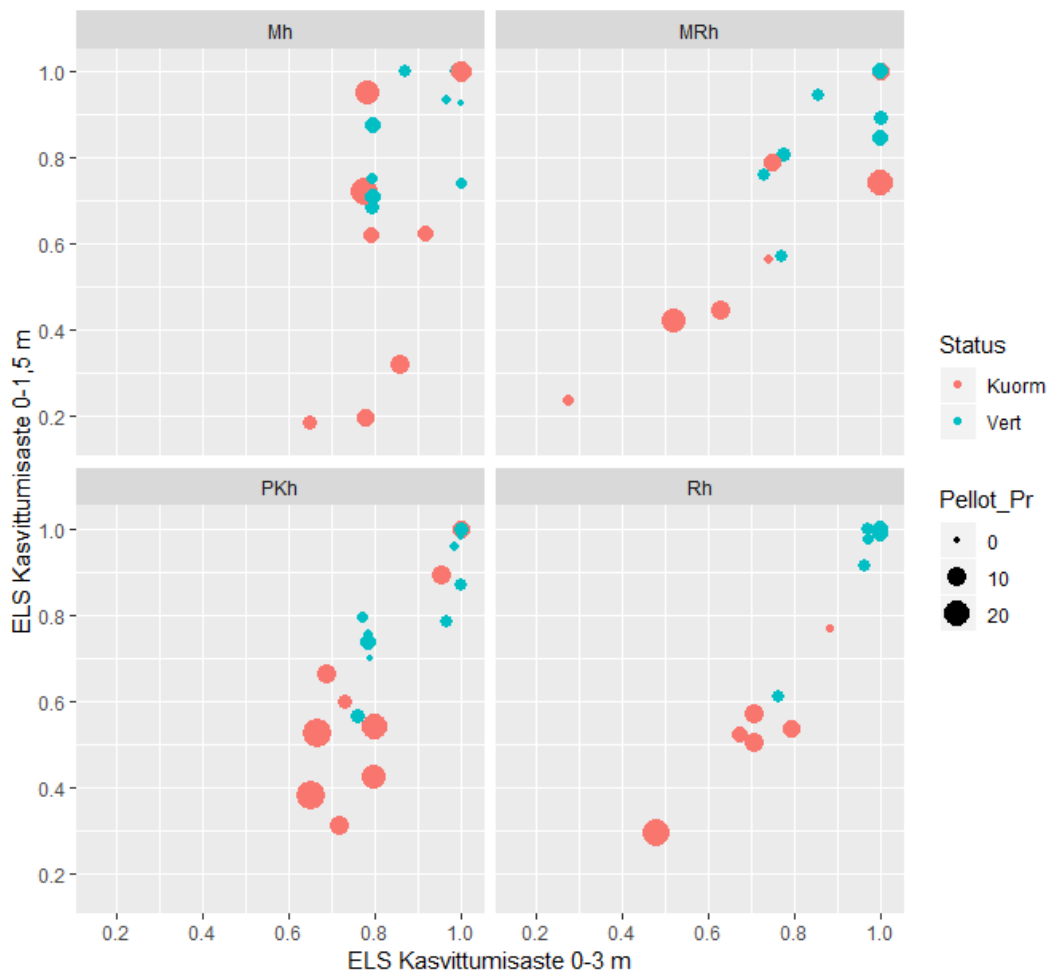
Kuormitettujen, peltovaltaisten valuma-alueiden järvien kasvittumisaste oli yleensä suurempi kuin mitä niillä mallien perusteella luontaisesti olisi ilman kuormitusta (kuva 7). Kuormitetut järvet erottuivat vertailutilasta selkeimmin tyypeissä Rh ja Ph. Matalissa järvissä (Mh, MRh) vain osa kuormittuneista järvistä erosi vertailutilasta. Heikompaa erottumista selittänee se, että matalien järvien mallien luotettavuus oli selkeästi heikompi. Kuvan 7 perusteella nähdään hyvin mallien toimivuuden ero tyyppien välillä: tyyppissä Rh vertailujärvet sijoittuvat jokseenkin lävistäjän suuntaisesti, kun taas esim. tyyppissä Mh havaitun kasvittumisasteen vaihtelua ei voitu ennustaa hyvin.

Odotetun kasvittumisasteen ja luokkarajojen perusteella laskettiin kasvittumisasteen skaalattu ELS. Syvyysvyöhykkeiden ELS-arvot korreloivat voimakkaasti keskenään (koko aineisto: $r = 0,83$) ja tyypeittäin etenkin runsashumuksisissa tyypeissä (kuva 8). 68 % järvistä luokitui molempien vyöhykkeiden perusteella samaan tilaluokkaan ja 27 % heikompaan tilaan 0–1,5 m vyöhykkeen perusteella kuin 0–3 m vyöhykkeen. Syvyysvyöhykkeiden luokittelutulokset erosivat toisistaan eniten tyypeissä Mh ja PKh.

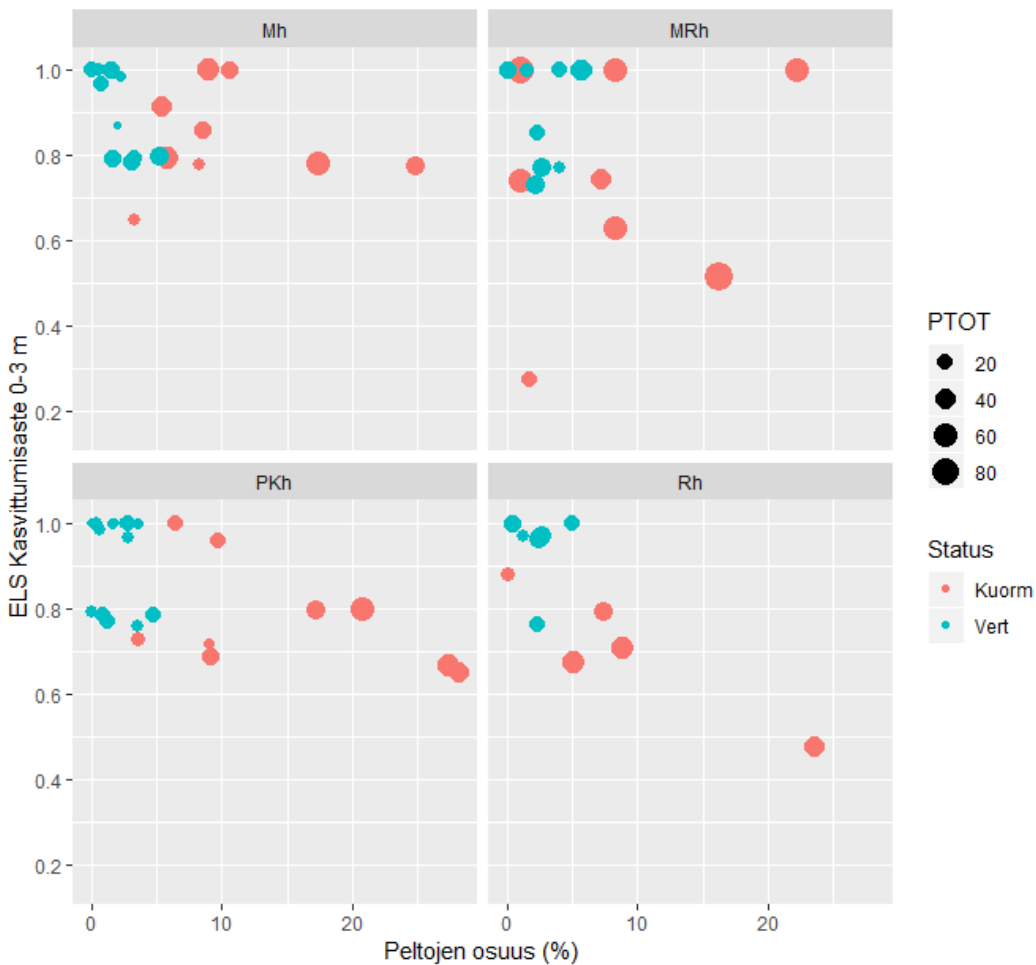
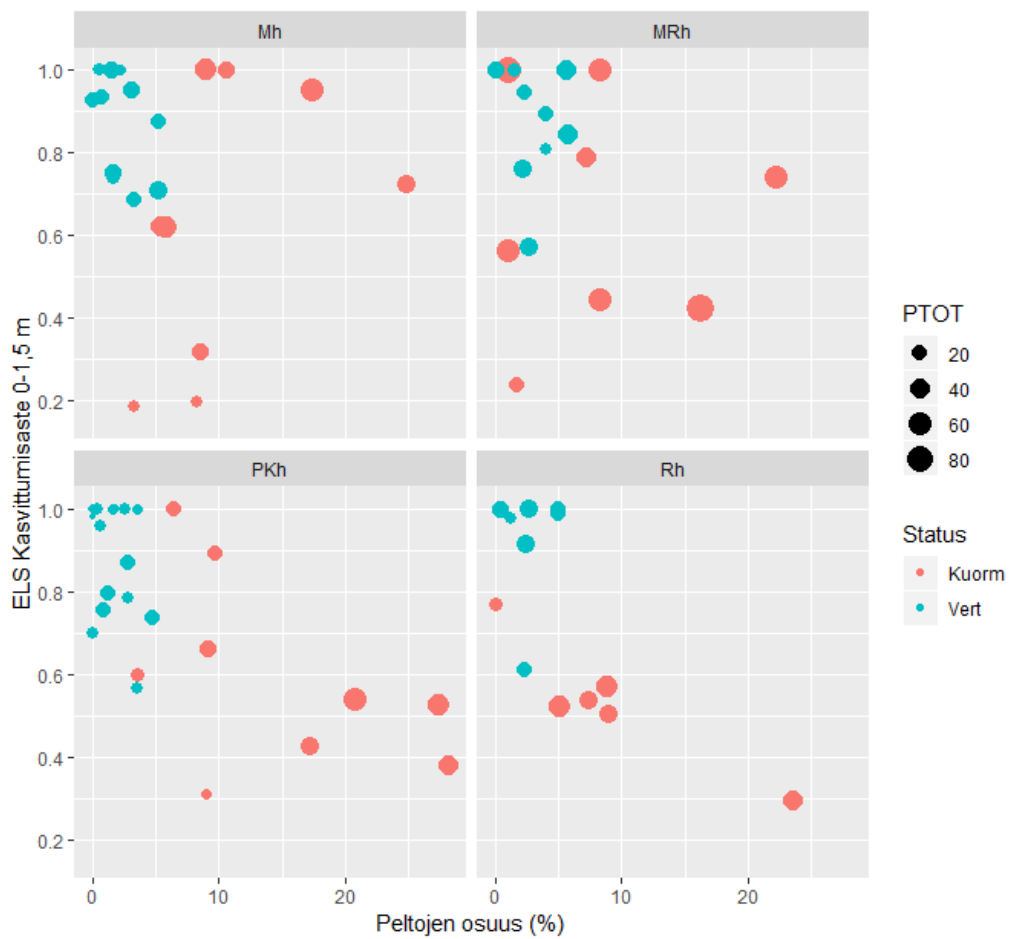
Kasvittumisasteeseen perustuvat tila-arviot olivat selkeästi yhteydessä valuma-alueen kuormituspaineeseen ja kuormituksen vaikutuksia kuvastaviin vedenlaatumuuttujiin. Kasvittumisasteen ELS pieneni kun peltoisuus kasvoi (0–1,5 m vyöhyke: $r = -0,48$; 0–3 m vyöhyke: $-0,43$) ja veden laatu heikkeni (kuva 9). Suhteet vedenlaatuun (kokonaisfosfori, sameus) olivat hyvin samanlaisia. Korrelaatiot olivat voimakkaimmat tyypeissä PKh ja Rh ($r < -0,61$). Matalissa järvityypeissä oli enemmän vaihtelua (kuva 9) eivätkä korrelaatiot olleet merkitseviä.



Kuva 7. Havaittu ja mallinnetun (eli vertailutilassa odotetun) kasvittumisasteen välinen suhde kahdessa syvyyssvyöhykkeessä. Järvien jako luonnontilaisiin vertailujärviin (Vert) ja kuormitettuihin järviin (Kuorm) on merkitty eri väreillä. Symbolien koko kuvaa järven valuma-alueen peltöjen osuutta. Matalien humusjärvien (Mh) vertailuarvomallit eivät ole merkittäviä eivätkä tulokset ole luotettavia.



Kuva 8. Kahden syvyyvyöhykkeen kasvittumisasteen skaalatun ekologisen laatusuhteen (ELS) välinen suhde neljässä eri järviyypissä. Järvien jako luonnontilaisiin vertailujärviin (Vert) ja kuormitettuihin järviin (Kuorm) on merkitty eri värisillä symboleilla joiden koko kuvaa järven valuma-alueen pellojen osuutta (Pellot_Pr). Matalien humusjärvien (Mh) vertailuarvomallit eivät ole merkitseviä eivätkä tila-arviot ole luotettavia.

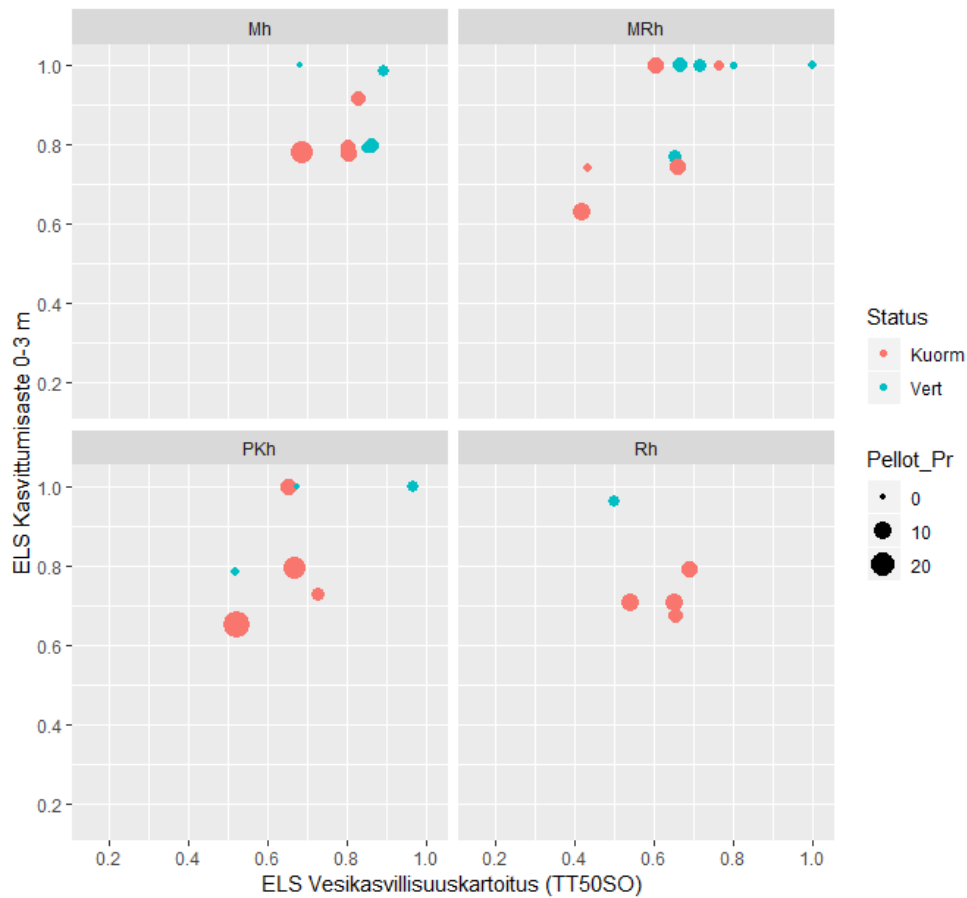
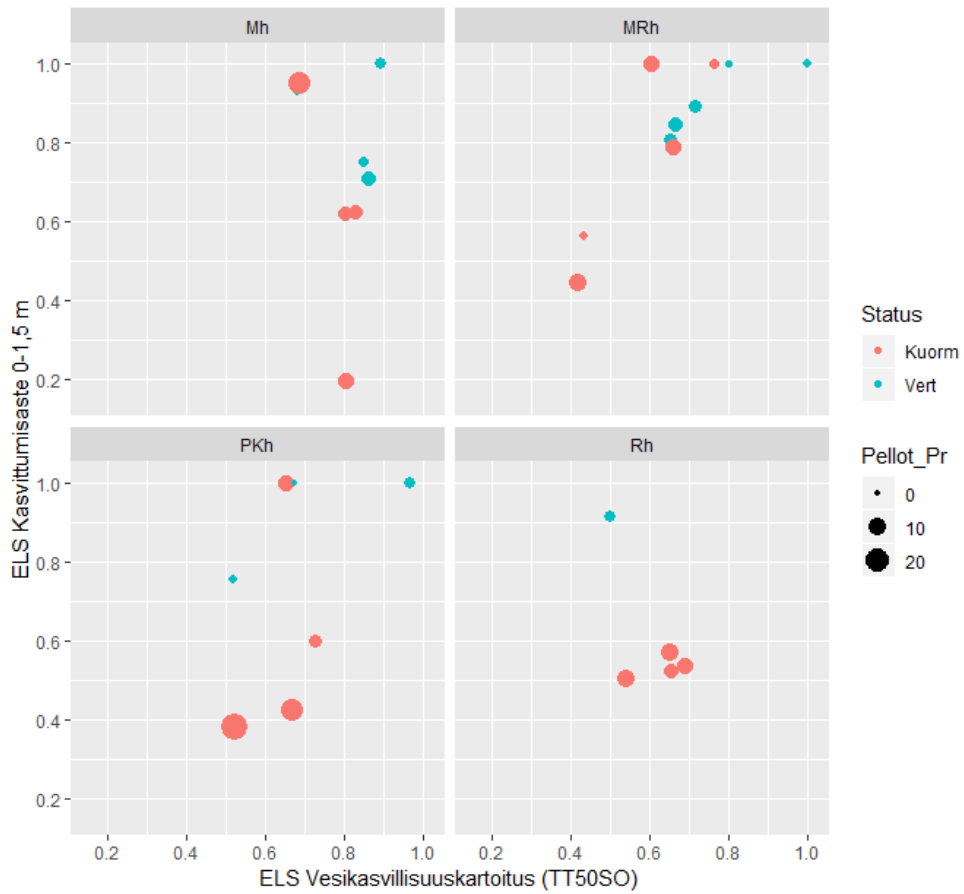


Kuva 9. Kahden syvyysvyöhykkeen kasvittumisasteen skaalatun ekologisen laatusuhteen (ELS) ja valuma-alueen peltoisuuden välinen suhde neljässä eri järviyötyypissä. Erinomaista tilaa indikoivat > 1 ELS-arvot on muutettu arvoksi 1. Symbolien koko kuvaa fosforipitoisuutta (PTOT).

8. Kasvittumisasteen ja vesienhoidon tilamuuttujien välinen suhde

Tarkasteluun valikoitui 30 järveä, joista oli onnistunut ilmakuvatulkinta kasvittumisasteesta sekä maastossa tehty vesikasvillisuuden lajiston kartointus. Lajiston perusteella lasketut tila-arviot perustuvat vesienhoidon tila-arvioinnissa käytettyihin muuttujiin ja niille luotuihin vertailuoloihin. Lajistoindeksien laskennat toteutettiin EKOLAS-projektissa Sykessä (<https://www.syke.fi/hankkeet/ekolas>).

Kasvittumisasteeseen perustuva tilan arviointi ei ollut voimakkaasti yhteydessä maastossa tehtyyn lajistokartoitukseen perustuvaan vesikasvillisuuden tilan arviointiin. Lajistoon perustuvan ELS:n korrelaatiokerroin oli 0,28 ($p=0,14$) matalamman 0–1,5 m vyöhykkeen ja 0,39 ($p=0,03$) laajemman 0–3 m vyöhykkeen kasvittumisasteen ELSin kanssa. Kasvittumisasteen ELS korreloi voimakkaimmin ja merkittävästi lajistomuuttujista vain tyyppilajien suhteelliseen osuuteen (koko aineisto: $r=0,39$ 0–1,5 m ja $r=0,45$ 0–3 m), heikommin RI-indeksiin eikä ollenkaan PMA-indeksiin. Molemmat menetelmät indikoivat heikentyntä tilaa kaikkien kuormittuneimmissa järvissä. Useissa kuormittuneissa järvissä vesikasvillisuudessa oli 0–1,5 m vyöhykkeen kasvittumisasteen ELSin perusteella enemmän muutoksia, kun taas vesienhoidon tilaluokitteluindeksi (tyyppilajien suhteellinen osuus) indikoi vähäisempää muutosta (Kuva 10). Puolestaan 0–3 m vyöhykkeen kasvittumisasteen ELS indikoi vähäisempään muutosta kuin vesienhoidossa käytettävä tyyppilajien suhteellinen osuus.



Kuva 10. Ilmakuvatulkintaan perustuvan kasvittumisasteen ja maastossa tehdyn vesikasvillisuuden lajistokartoituksen (tyyppiominaisten lajien osuus) skaalattujen ELS-arvojen suhde 30 tutkimusjärvellä kahdessa syvyyssvyöhykkeessä ja neljässä eri järvityypissä. Symbolien koko kuvaa peltojen määrää valuma-alueella.

9. Johtopäätökset

Vesikasvien runsastuminen ja lajiston muuttuminen on yksi näkyvimmistä järvien rehevöitymisen seurauksista. Näkyviä muutoksia ovat esimerkiksi ruovikoiden laajentuminen ja tiheneminen sekä kelluslehtisten lajien kasvustojen peittävyys kasvu pehmeillä pohjilla. Toisaalta pinnan alla elävät uposkasvit ja pohjassa ruusukkeina kasvavat pohjalehtiset kärsivät mm. leväsamennuksen lisääntymisestä ja voivat pitkälle etenevän rehevöitymisen myötä taantua. Rehevöityminen vaivaa etenkin matalia maatalousalueiden järviä, joiden ravinnepitoisuudet ovat paljon suurempia kuin luonnontilassa.

Järvien tilan luokittelussa olisi perusteltua käyttää apuna veden pinnalla tai sen yläpuolella kasvavan vesikasvillisuuden runsastumista, joka on myös kansalaisille yksi silmiinpistävimmistä järvien tilan muutoksista. Laaja-alaiseen tilaluokitteluun vesikasvien runsastumisen perusteella liittyy kuitenkin ainakin kahdenlaisia haasteita:

1. Suomessa on tuhansia järviä, eikä kaikkien tilaa voida arvioida maastokäynnein.
2. Vesikasvillisuuden määrä ja lajisto vaihtelevat eri järvien välillä luontaisista tekijöistä johtuen, eikä kaikkien tilaa voida arvioida samoin kriteerein.

Tässä hankkeessa kehitettiin järvien tilan arviointia perustuen ilmakuvien avulla tulkittuun vesikasvillisuuden määrään. Ilmakuvat saatiin kansallisesta ilmakuvausohjelmasta. Ilmakuvia tulkitsemalla ja yhdistämällä kasvillisuuskartat järvien syvyysohjelmiin muodostettiin tutkimusaineisto, jonka avulla kehitettiin tilastollisia malleja tilan arviointia varten. Mallien avulla arvioitiin vesikasvillisuuden runsauden eli kasvittumisasteen luontaista tasoa kuormituneissa järvissä. Mallit perustuivat kaikkiaan 52 mahdollisimman vähän kuormitetun vertailujärven aineistoon.

Kasvittumisaste kuvaa erityisesti pinnalle asti ulottuvan (kelluslehtiset kasvustot, osa uposkasvilajien kasvustoista) tai pinnan yläpuolella kasvavan ilmaversoislajiston runsautta syvyyden puolesta mahdollisella kasvialueellaan. Kasvittumisasteen luontaista vaihtelua selitti voimakkaimmin järvien luontainen humuksisuus ja valuma-alueen turvemaiden osuus: veden humuspitoisuuden kasvaessa kasvittumisaste pieneni. Tulos on täysin

odotuksen mukainen, sillä veden väri tunnetusti rajoittaa kasvillisuuden esiintymisvyöhykettä, joten turvemaavaltaisissa ja humuksisissa vesissä kasvillisuus on rajoittunut suppeammalle esiintymisalueelle syvyyden suhteen kuin kirkasvetisemmissä järvissä. Jo ensimmäisissä kasvittumisaste-muuttujaa käsitelleissä tutkimuksissa dokumentoitiin veden värin ja kelluslehtisen kasvillisuuden syvimmän kasvussyvyyden välinen yhteys (Vallinkoski ym. 2004). Tuolloin käytettiin järven havaittua värilukua ennustamaan ilmakuvilta tulkitun kasvillisuuden maksimiesiintymissyvyys, jota puolestaan käytettiin määriteltäessä vesikasvillisuuden mahdollista esiintymisaluetta järvikohtaisesti rakennetuista syvyyksille. Nyt kehitetyllä mallilla on ko. menettelyyn verrattuna selvänä etuna se, että mallinnuksessa käytetyt selittävät muuttujat ovat täysin riippumattomia ihmistoiminnasta ja mahdollisen esiintymisalueen (syvyysohyykkeiden) määrittäminen teknisesti yksinkertaisella ja yleistettävällä olevalla tavalla.

Tilan arviointi onnistui luotettavimmin runsashumuksisissa järvissä (järvityyppi Rh) sekä pienissä ja keskikokoisissa humusjärvissä (PKh). Kasvittumisasteeseen perustuvat tila-arviot olivat näissä järvityypeissä selkeästi yhteydessä valuma-alueen kuormituspaineeseen ja vedenlaatuun.

Matalissa järvissä (keskisyyvyys < 3 m) vertailuarvomallien toimivuus oli heikompi. Näissä järvissä kasvittumisasteessa oli vähemmän vaihtelua vertailujärvissä, eikä sitä pystytty kovin hyvin selittämään turvemaiden osuudella tai muillakaan taustamuuttujilla. Aineiston perusteella myös matalissa järvissä kasvittumisaste oli kuitenkin usein kuormitetuissa järvissä korkeampi kuin vertailujärvissä, joten kasvittumisaste ja tässä kehitetyt alustavat mallit kertovat myös niiden tilasta.

Kasvittumisaste määriteltiin kahdelle eri syvyysohyykkeelle (0–1,5 m ja 0–3 m), mutta erot eri vyöhykkeiden välillä muuttujan käyttäytymisessä ja tila-arvioinnin luotattavuudessa olivat varsin pienet. Kuitenkin 0–3 metrin vyöhykkeen vertailuolujen mallinnus onnistui hieman paremmin ja yhteys lajistomuuttujiin oli voimakkaampi kuin 0–1,5 metrin syvyysohyykettä käytettäessä. Syvyydsvälillä 1,5 ja 3 metriä voi vielä ainakin vähemmän humuospitoisilla järvillä kasvaa jopa ilmaversoisia, mutta

ainakin kelluslehtisiä, joten laajemman syvyysvyöhykkeen käyttö sisältänee enemmän informaatiota kasvillisuudesta, mikä voi selittää hieman parempaa toimivuutta.

Ilmakuvatulkintojen onnistuminen aiheuttaa haasteen ja mahdollisen pullonkaulan menetelmän laajaan soveltamiseen. Pääasiassa ilmakuvissa olevista radiometrisistä häiriöistä johtuen vain puolet hankkeessa aloitetuista tulkinnoista onnistui. Onnistuneista tulkinnoistakin 74 prosentissa järvi oli tarpeen jakaa osiin, joille sovellettiin omia kynnysarvoja. Osissa kynnystäminen hidastaa tulkintaprosessia tunneilla yksittäisen järven osalta, joten kyseessä on merkittävä työpanosta kasvattava hidaste.

Toinen suuri haastava tekijä ilmakuvatulkinnolle on rantapuustosta vedenpintaan lankeavat varjot. Varjojen vaikutus on tapauskohtaista: toisilla järvilla varjojen alle jäävä kasvillisuus luokituu systemaattisesti vedeksi ja taas toisilla vesi luokituu systemaattisesti kasvillisuudeksi (Marttila ym. 2018). Niiden järvien joukosta, joille varjomaski pystyttiin tulkitsemaan onnistuneesti, varjomaskien pinta-ala oli ranta- ja vesikasvillisuuden pinta-alasta keskimäärin 18 prosenttia. Seitsemällä järvellä kyseinen suhdeluku ylitti 30 prosenttia ja suurin suhdeluku oli Naarajärvellä (järvitunnus 04.284.1.025) 63 prosenttia. Varjoista koituvaa virhettä ei pystytty mielekkäästi sisällyttämään mallinnukseen. Varjojen vaikutus on suurimmillaan kasvillisuusvyöhykkeen ollessa kapea.

Ilmakuvatulkintaan perustuvan menetelmän suurin potentiaali on mahdollistaa järvien kasvittuneisuuden arvioinnin ilman maastokäyntejä. Ilmakuvatulkinnan ja siihen perustuvan tilaluokittelumenetelmän avulla voitaisiin laaja-alaisesti kartoittaa järvien tilaa ja tuottaa hyödyllistä tietoa järvien alueelliseen kunnostussuunnitteluun ja priorisointiin. Tässä hankkeessa kehitetty menetel-

mäkokonaisuus (tulkintaprosessi ja siihen liittyvä tilanarvioinnin menetelmä) on lupaava ja osin jo käytännössäkin käyttövalmis työkalu. Avoimen kuva-aineiston laatu ja siihen liittyvät haasteet ovat merkittävät soveltamispotentiaalia heikentävä tekijä, joten vaihtoehtoisten kuvalähteiden käyttökelpoisuutta tulisi selvittää (kts. tämä raportin muut osat). Toisaalta kansallisen kuvausohjelman sykli on hiljattain tihentynyt, joten tulkintoihin käyttökelpoisen ilmakehu-aineiston määrä on edelleen kasvussa. Luotujen mallien avulla voidaan laskea odotetut kasvittumisasteet isommalle joukolle järviä ja lähteä kokoamaan lisää validointiaineistoa luodulle luokittelumenetelmälle käyttökelpoisen ilmakehu-aineiston jatkuvasti lisääntyessä.

10. Lähteet

- Aroviita J., S. Mitikka, S. Vienonen (toim.) (2019). Pintavesien tilan luokittelu ja arviointiperusteet vesienhoidon kolmannella kaudella. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 37/2019. 177 s.
<http://hdl.handle.net/10138/306745>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning* 45, 5–32.
- Cutler, D., T. Edwards, K. Beard, A. Cutler, K. Hess, J. Gibson, J. Lawler (2007). Random Forests for Classification in Ecology. *Ecology* 88. 2783–92.
- Genuer, R., J.-M. Poggi, C. Tuleau-Malot (2015). VSURF: An R Package for Variable Selection Using Random Forests. *The R Journal, R Foundation for Statistical Computing*, 7(2), 19–33.
- Marttila, J.-V., J. Aroviita, M. Törmä, S. Koponen, I. Autio, V.-M. Vallinkoski, M. Kuoppala, M. Rasilainen, A. Kanninen (2018). Kansallisen kuvausohjelman ilmakuvat vesikasvillisuuden runsastumisen ja tilan arvioinnissa. *Raportteja* 65/2018. 68 s.
- OH 3/2009. Vuori K.-M., S. Mitikka, H. Vuoristo (toim.). Pintavesien ekologisen tilan luokittelu. Osa I: Vertailuluokat ja luokan määrittäminen. Osa II: Ihmistoiminnan ympäristövaikutusten arviointi. *Ympäristöhallinnon ohjeita* 3/2009. 120 s. <http://hdl.handle.net/10138/41785>
- Vallinkoski V.-M., A. Kanninen, J. Leka, R. Ilvonen (2004). Vesikasvillisuus pienten järvien tilan ilmentäjänä. Ilmakuvatulkintaan ja maastoseurantoihin perustuvat ekologisen tilan mittarit. *Suomen ympäristö* 725: 1–90.

OSA II: Vesikasvitulkinta satelliittikuvista kynnystämistekniikalla

1. Johdanto

Järvien kasvillisuustulkinnan lähtöaineistoksi satelliittikuvat tarjoavat ilmakuvia sekä alueellisesti että ajallisesti kattavampaa, mutta maastoresoluutioltaan karkeampaa aineistoa. Tutkimuksen tässä osiossa oli tavoitteena selvittää avoimesti saatavilla olevien Sentinel-2-satelliittikuvien hyödyntämismahdollisuutta vesikasvillisuuden kartoittamisessa. Menetelmällisenä lähtökohtana oli soveltaa samaa yksinkertaista tulkintaperiaatetta kuin ilmakuville: kuvasta lasketaan indeksejä, jotka luokitellaan kynnysarvoilla kasvillisuutta ja vettä edustaviin luokkiin. Sentinel-2-satelliittikuvien maastoresoluutio (parhaimmillaan 10 m) ei mahdollista luotettavaa vesikasvillisuuden tulkintaa pelkästään visuaalisesti, kuten ilmakuviin pohjautuvassa menetelmässä. Tämän vuoksi ilmakuvista tehtyä tulkintaa käytettiin maastototuutena, jota vasten satelliittikuvasta tehtyä tulkintaa verrattiin. Jotta alueellisesti ja ajallisesti kattavien satelliittikuvien tulkinta onnistuisi laajemmin, pitäisi tietyltä alueelta tai ajalta olevaa maastototuutta (maastoresoluutioltaan tarkempaa aineistoa) voida yleistää satelliittikuvien tulkintaa varten järveltä ja alueelta toiselle. Tämän vuoksi tavoitteena oli erityisesti tutkia sitä, voidaanko eri järville käyttää vesikasvillisuustulkinnassa kynnysarvoa, joka perustuu toiselta järveltä tai alueelta peräisin olevaan maastototuusaineistoon. Lisäksi tavoitteena oli tutkia, onko satelliittikuvilta tulkittu kasvillisuuden kokonaispinta-ala verrannollinen ilmakuvilta tulkittuun, jolloin sitä voisi soveltaa myös kasvittumisasteen laskentaan.

2. Aineisto ja menetelmät

Sentinel-2 (lyhennettynä S2) on Euroopan unionin Copernicus-ohjelmaan kuuluva kuvaustehtävä, jota varten Euroopan avaruusjärjestö ESA on laukaisut Maan kiertoradalle kaksi satelliittia: Sentinel-2A ja Sentinel-2B (lyhennettynä S2-A ja S2-B). Näistä ensin mainittu laukaistiin kiertoradalleen 23.7.2015 ja jälkimmäinen 7.3.2017. Satelliitit ovat varustettu 13 spektrikanavaa kattavalla multispektrikameralla (ESA 2019a).

Sentinel-2-kuvaustehtävän kiertorata on auringosynkroninen eli satelliitti kulkee suhteellisen matalalla kiertoradalla (keskimäärin 786 km korkeudessa) sivuuttaen navat läheltä. Ratataso siirtyy päivittäin idemmäksi siten, että maahan suhteutettuna satelliitti kulkee samaa linjaa pitkin 10 vuorokauden välein. Kaksoissatelliitit kulkevat samaa kiertorataa, mutta eroten 180 astetta (sijainti on täsmälleen toisella puolella maapalloa), jolloin toistoväli samasta kiertoradan pisteestä kuvaamisessa puolittuu. Koska satelliittien kuvaamisessa kaistaleissa on enemmän päällekkäisyyttä napa-alueita läheystyessä, Suomi kuvataan kuvaustehtävässä uudelleen 2–3 vuorokauden välein (ESA 2015).

Vaikka runsas pilvisuus rajoittaa väli-ilmastoon kuuluvan Suomen kuvaamista satelliiteista, Sentinel-2-kuvausohjelmassa Suomea kuvataan sen verran tiheävälisesti, että pilvettömiä satelliittikuvia on laajasti saatavilla vesikasvillisuuden kannalta sopivalta ajanjaksolta heinäkuun alusta syyskuun alkupuoleen. Kuva 11 esittää pilvettömien Sentinel-2-kuvien saatavuuden heinäkuun ja elokuun ajaksolta vuosilta 2018 ja 2019, jolloin aineistoa saatiin kuvaustehtävän kummaltakin kaksoissatelliitilta. Vuoden 2018 saatavuus on erittäin hyvä, sillä jo heinäkuultakin pilvettömiä kuvia oli saatavilla koko maan laajuisesti. Myös elokuulta kuvia oli saatavilla joitain Pohjois-Lapin alueita lukuun ottamatta. Kesällä 2019 sää oli pilvisempi ja kuukauden jaksolla katveeseen jääviä alueita oli runsaammin. Kuitenkin sekä heinä- että elokuussa katveeseen jäi vain pieniä alueita Suomenselältä, Kainuusta ja Ylä-Lapista. On hyvä huomata, että yksittäinen kesä voi olla edellä mainittuja pilvisempi, jolloin katvealueita jää enemmän. Edellä todetun tarkastelun myötä voidaankin todeta, että Sentinel-2-kuvaustehtävä mahdollistaa vuosittaisen satelliittikuvasaatavuuden

lähes koko maasta vesikasvillisuustulkintaan sopivalta ajanjaksolta.

Tutkimuksen tavoitteena oli ensin tutkia parasta mahdollista tilannetta, jossa satelliittikuva ja maastototuuksena eli referenssidatana toimiva ilmakekuva on kuvattu lähes samanaikaisesti. Toiseksi tutkittiin myös tilannetta, jossa satelliitti- ja ilmakekuvan välillä on pidempi aika. Kun samanaikainen ja eriaikainen tarkastelu oli tehty eri alueilla, voitiin tarkastella referenssiaineistosta pääteltyjen kynnyksarvojen yleistettävyyttä eri järville.

Tutkimuksen esitarkastelussa olivat S2-A:n kuva 19.7.2019 ja S2-B:n 14.7.2019. Kun kuvia verrattiin muihin paikkatietoaineistoihin, satelliittikuvissa oli huomattavissa spatiaalisten koordinaattien osalta siirtymää eli geolokaatiovirhettä. ESA (2019b) raportoi, että Sentinel-kaksoissatelliiteilla geolokaatiovirhe on muuten samaa suuruusluokkaa (95,5 % varmuudella mitatun kohteen sijaintivirhe on alle 11 metriä), mutta pohjoisilla leveyspiireillä havaitaan lisäksi satelliitin lentoradan suuntaista noin 5 metrin siirtymää etelään päin. S2-B:n kuvissa leveyspiiriirippuvainen ilmiö on havaittu vahvemaksi kuin S2-A:n kuvissa. Tämä on linjassa tässä tutkimuksessa tehtyihin havaintoihin, joiden mukaan S2-A:n siirtymä oli silmämääräisesti arvioiden 7 metriä ja S2-B:n 12 metriä. Tutkimusta jatkettiin S2-A-kuvalla sijaintivirhettä korjaamatta, sillä jos jatkossa haluttaisiin tilata satelliittikuvatulkinta SYKE:n Tietokeskuksesta, kuvien uudelleenasetointiin ei prosessissa käytännössä ole mahdollisuutta (Sampsä Koponen, suullinen tiedonanto).

A) 1.-31.7.2018



B) 1.-31.8.2018



C) 1.-31.7.2019



D) 1.-31.8.2019

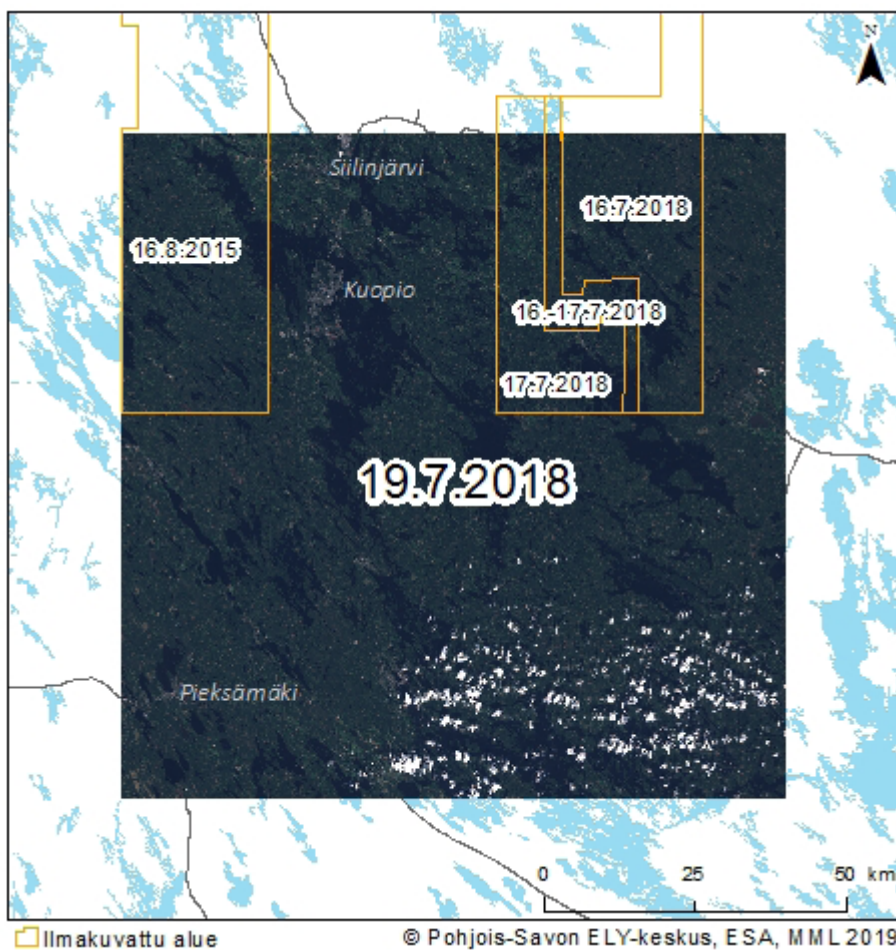


**Pilvettömän Sentinel-2-kuvan
saatavuus ajanjaksolta**

- saatavissa
- ei saatavissa

© Pohjois-Savon ELY-keskus,
SYKE, MML 2019

Kuva 11. Pilvettömien Sentinel-2-satelliittikuvien saatavuus Suomen alueella neljältä eri ajanjaksolta. Kartat perustuvat SYKEN julkaisemiin kuukausittaisiin NDVI-kasvillisuusindeksitulointoihin.



Kuva 12. Tutkimukseen valittu Sentinel-2A-kuva ja samalla alueella tehdyt ilmakuvaukset vuosina 2015 ja 2018.

Tutkimuksen ensimmäisen tavoitteen mukaisia järviä oli saatavilla Koillis-Savosta ja toisen tavoitteen mukaisia Länsi-Kuopiosta (kuva 12). Satelliittikuvatulkinta tehtiin varsinaisesti 11 järvellä, mutta Suuri Ruokoveden Lehostenlahden ja Hirvilahden alueita käsiteltiin erillisinä tutkimusalueina. Tämän

vuoksi raportissa jatkossa puhutaan 12 tutkimusjärvestä (taulukko 5). Pinta-aloiltaan suurilta Suurelta Ruokovedeltä ja Saarijärveltä tutkimukseen valittiin vain osia järven koko laajuudesta, sillä ilmakuvien radiometrinen häiriöiden takia järviä ei pystytty kokonaan tulkitsemaan.

Taulukko 5. Sentinel-2-satelliittikuvatutkimukseen valitut järvet.

Järvi	Alue	Aluekoodi	Järvitunnus	Järvityyppi	Tutkitun alueen pinta-ala, hehtaaria
Akonvesi	Koillis-Savo	1	04.611.1.001_004	Keskikokoiset humusjärvet	812
Keskimmäinen	Koillis-Savo	1	04.692.1.001	Runsaskalkkiset järvet	30
Pieni Vehkalahti	Koillis-Savo	1	04.612.1.014	Pienet humusjärvet	193
Saarijärvi	Koillis-Savo	1	04.741.1.009_001	Runsashumukset järvet	609
Tuusjärvi	Koillis-Savo	1	04.693.1.008	Pienet humusjärvet	203
Vihtajärvi	Koillis-Savo	1	04.741.1.026	Runsashumukset järvet	157
Hirvijärvi	Länsi-Kuopio	2	04.281.1.029	Pienet ja keskikokoiset vähähumuksiset järvet	147
Naarajärvi	Länsi-Kuopio	2	04.284.1.025	Matalat humusjärvet	285
Suuri- ja Pieni-Palonen	Länsi-Kuopio	2	04.284.1.021	Matalat humusjärvet	230
Suuri Ruokovesi eteläosa (Hirvilahden alue)	Länsi-Kuopio	2	04.281.1.001_002	Runsashumuksiset järvet	221
Suuri Ruokovesi länsiosa (Lehostenlahden alue)	Länsi-Kuopio	2	04.281.1.001_002	Runsashumuksiset järvet	242
Valkeinen	Länsi-Kuopio	2	04.282.1.001_a01	Runsaskalkkiset järvet	70

Ilmakuvatulkinta tehtiin järville ILMAVERSO I -hankkeessa kehitetyllä menetelmällä (Marttila ym. 2018). Ilmakuvat sisälsivät vesialueilla radiometrisiä häiriöitä kummallakin alueella, joten yli 100 hehtaarin kokoiset järvet kynnystettiin 3–5 osassa. Visuaaliseen tarkasteluun perustuvalla validoinnilla luokitteluiden kokonaistarkkuudet olivat järvillä yli 90 prosenttia. Koillis-Savon järvillä vesikasvikartoihin jäi selkävesille systemaattisesti parin neliömetrin kokoisia pikseliryppäitä, jotka luokittuivat vesikasvillisuudeksi, vaikka niiden kuului olla avovettä. Optimoitaessa kynnsarvoja satelliittikuvasta lasketuille kuvaindekseille tällaisella ilmakuvien virheellisellä luokittamisella on kuitenkin vain vähäinen merkitys.

Valitusta satelliittikuvasta tutkimuksessa käytettiin 1C-tasosta tuotetta. Kyseisen tason tuotteelle on tehty radiometriset ja geometriset korjaukset, mukaan lukien ortorektifointi ja spatiaalinen rekisteröiminen (ESA 2015). 1C-taso kuvaa heijastusarvoja ilmakehän yläosassa. 1C-tason tuotteet ovat avoimesti ladattavissa esimerkiksi kansallisen satelliittidatakeskuksen kautta internet-osoitteesta <https://finhub.nsd.c.fmi.fi/#/home>. Satelliittidatakeskuksesta on periaatteessa saatavilla ilmakehän vaikutuksista korjattuja 2A-tason tuotteita. SY-

KE:n Tietokeskuksen asiantuntijoiden näkemysten mukaisesti niiden käytöstä kuitenkin pidäytyttiin, koska tason tuottamiseen käytetyssä sen2cor-algoritmeissa oli ollut ongelmia (Sampsa Koponen, suullinen tiedonanto).

S2-A-satelliitilla 4.7.2019 otetusta satelliittikuvasta laskettiin neljä kuvaindeksiä, jotka olivat normalisoitu kasvillisuusindeksi (NDVI) sekä kolme Tasseled Cap -muunnosta (TC). NDVI laskettiin kanavien 4 ja 8 välillä seuraavalla muunnellulla kaavalla:

$$\frac{\text{kanava 8} - \text{kanava 4}}{\text{kanava 8} + \text{kanava 4}} * 100 + 100.$$

Kyseisellä kaavalla NDVI-arvot skaalataan tavanomaiselta lukuväliltään [-1...+1] välille [0...+200].

Tasseled Cap on lineaarinen kanavamuuunnos, jonka avulla satelliittikuvan alkuperäisistä kanavarvoista muodostetaan eri kanavien arvoista vakio-kertoimien avulla maaston fyysisiä ominaisuuksia vastaavia kuvia. Ensimmäisenä muunnoksen esittivät Kauth ja Thomas (1976). Tässä tutkimuksessa käytettiin kolmea muunnosta, jotka kuvaavat maaperän kirkkautta, vehreyttä ja kosteutta. Tasseled Cap-muunnoksissa käytetyt kertoimet ovat esitettyinä taulukossa 6

Taulukko 6. Sentinel-2A-satelliitin MSI-instrumentin spektraaliset kanavat ja Tasseled Cap -muunnosten kanavakohtaiset kertoimet Nedkovin (2017) mukaan.

Sentinel-2A MSI					Tasseled Cap -muunnos		
Kanavan numero	Kanavan nimi	Keskimmäinen aallonpituus, nanometriä	Kanavan leveys, nanometriä	Spatiaalinen resoluutio, metriä	Kirkkaus	Vihreys	Kosteus
1	Rannikon aerosoli	442,7	21	60	0,0356	-0,0635	0,0649
2	Sininen	492,4	66	10	0,0822	-0,1128	0,1363
3	Vihreä	559,8	36	10	0,1360	-0,1680	0,2802
4	Punainen	664,6	31	10	0,2611	-0,3480	0,3072
5	Punainen reuna 1	704,1	15	20	0,2964	-0,3303	0,5288
6	Punainen reuna 2	740,5	15	20	0,3338	0,0852	0,1379
7	Punainen reuna 3	782,8	20	20	0,3877	0,3302	-0,0001
8	Lähi-infrapuna	832,8	106	10	0,3895	0,3165	-0,0807
8a	Kapea lähi-infrapuna	864,7	21	20	0,4750	0,3625	-0,1389
9	Vesihöyry	945,1	20	60	0,0949	0,0467	-0,0302
10	Lyhytaaltainen infrapuna / Cirrus	1373,5	31	60	0,0009	-0,0009	0,0003
11	Lyhytaaltainen infrapuna 1	1613,7	91	20	0,3882	-0,4578	-0,4064
12	Lyhytaaltainen infrapuna 2	2202,4	175	20	0,1366	-0,4064	-0,5602

Viidentenä tutkittavana kuvaindeksinä toimi kuva, johon oli laskettu tutkimusalueen Sentinel-2-satelliittien 1C-tuotteista NDVI:n maksimiarvo heinä-syyskuun ajalta 2018. Selkeyden vuoksi tähän kuvaindeksiin viitataan jatkossa termillä NDVI-maksimi (pelkällä termillä NDVI viitataan 19.7.2018 kuvasta laskettuun kuvaindeksiin). NDVI-maksimin sijaintivirhe oli sama kuin muillakin kuvaindekseillä. NDVI-maksimi skaalattiin myös välille [0...200].

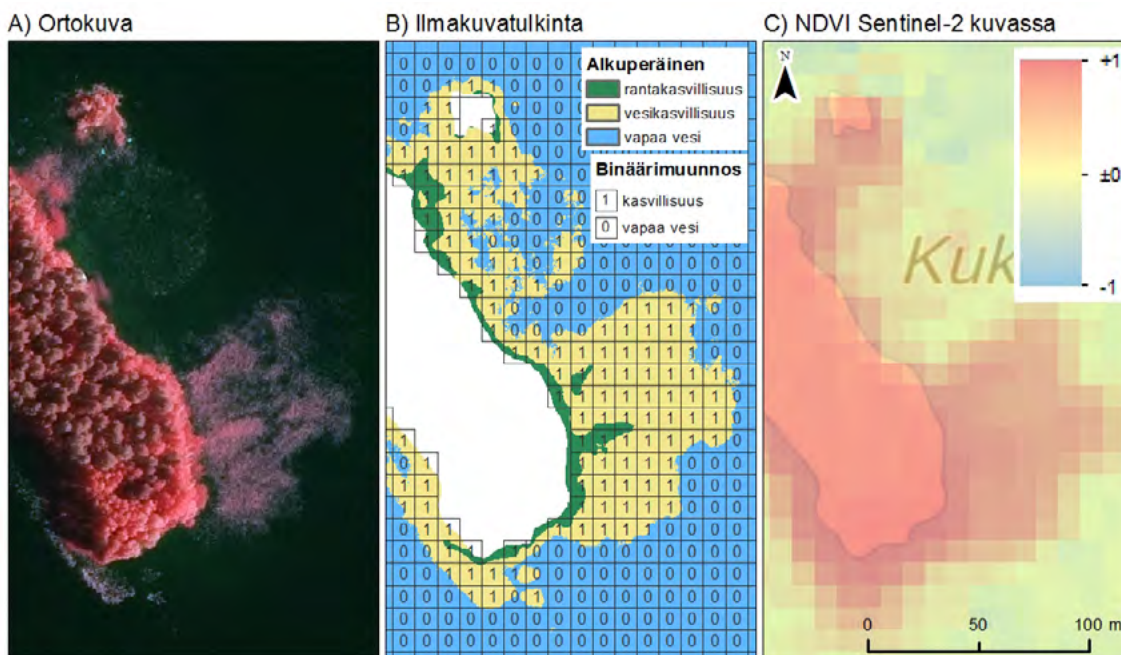
Kaikki viisi kuvaindeksiä olivat 10 metrin spatiaalisessa resoluutiossa. TC-kosteutta lukuun ottamatta vettä sisältävät ruudut saivat pieniä indeksin arvoja ja kasvillisuutta sisältävät ruudut taas suuria. Koska TC-kosteuden tilastollinen käsittelyminen oli helpompaa edellä mainitussa asetelmassa, indeksille tehtiin vastalukumuunnos.

ArcMap-ohjelmalla tehdyissä GIS-analyseissä tutkittaville järviolueille luotiin 10 x 10 metrin vektoriruudukko, joka kulki satelliittikuvan rasteriruutujen rajoja pitkin. Ruuduille laskettiin satelliittikuvista tutkittavan viiden kuvaindeksin arvot tilastollisen tarkastelun vastearvoiksi.

Ruuduille laskettiin myös Zonal Statistics as Table -työkalulla ilmakuvatulkinnassa luodun elomuotovyöhykkeen arvo. Kyseinen arvo muutettiin binäärimuotoiseksi siten, että jos vektoriruudulla sijaitsevista ilmakuvatulkinnan ruuduista yli puolet ovat vapaata vettä kuvaavia ruutuja, ruutu saa arvon nolla, muuten arvon yksi. Vektoriruudut, joiden pinta-alasta alle puolet sisälsivät ilmakuvatulkittuja

pikseleitä, rajattiin ulos aineistosta tässä vaiheessa (ks. kuva 13 B). Tässä tutkimuksessa referenssinä pidettävä järvien kasvillisuusvyöhykkeen pinta-ala on laskettu 10 metrin maastoresoluutioon muunneltusta tasosta.

Kuvaindekseistä muodostettiin kasvillisuutta kuvaavat kartat kynnystämiseen perustuvalla luokittelulla. Erona ilmakuvatulkintaan satelliittikuvaindeksit kynnystettiin vain yhdellä kynnyksarvolla, joka jakaa kuvan vesi- ja kasvillisuusluokkaan.



© Pohjois-Savon ELY-keskus, MML, ESA 2019

Kuva 13. Akonveden Kukkosaari ortokuvassa, ilmakuvatulkinnassa (alkuperäisessä kolme luokassa 0,5 m maastoresoluutiossa ja kahteen luokkaan 10 m maastoresoluutioon yleistettynä) sekä normalisoitu kasvillisuusindeksi Sentinel-2-kuvassa.

2.1. Kynnysarvojen määrittäminen parhaalla mahdollisella referenssiaineistolla

Optimaalisen kynnysarvon evaluointi tehtiin ensin kuudella Koillis-Savon järvellä. Aineistoa käsiteltiin siten, että tutkittavasta pinta-alasta 80 prosenttia käytettiin kynnysarvojen evaluointiin ja 20 prosenttia niiden validointiin (kuva 14)

Colditz ym. (2018) käyttivät tutkimuksessaan kahta eri kriteeriä optimaalisen kynnysarvon määrittelyyn kuvaindeksille. Pienimmän alueiden välisen eron kriteerissä muuttujalle haetaan sellainen kynnysarvo, jossa kynnystetyn kuvaindeksin (I) kasvillisuuspinta-ala olisi mahdollisimman samankokoinen kuin referenssiaineistossa (R):

$$\Delta A = |A_I - A_R|$$

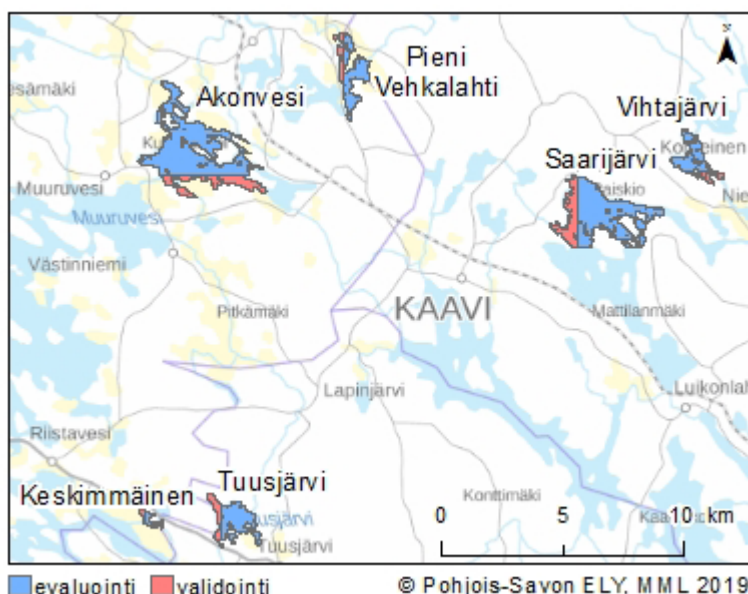
On huomattava, että edellä mainittu kriteeri ei ota huomioon sitä, että kuvaindeksin avulla luokitellut karttaruudut olisivat spatiaaliselta vastaavuudeltaan samoja kuin referenssikartassa. Tätä näkökulmaa varten voidaan käyttää toista kriteeriä, joka tähtää minimaaliseen omissio- (O) ja kommissiovirheeseen (C) – toisin sanoen yli- ja aliluokittuminen on mahdollisimman vähäistä.

Tämän kriteerin huomioiva kynnys voidaan valita yksinkertaisen symmetrisen hyperbolisen kustannusfunktion (H) avulla:

$$H = 1 - [(1 - O)(1 - C)]$$

Kullekin järvelle sovitettiin edellä mainituilla kriteereillä optimaaliset kynnysarvot. Tulokset olivat hyvin samankaltaiset siten, että pienimmän alueiden välisen eron kriteerillä optimoitu kynnysarvo oli aina vähän suurempi kuin hyperbolisella kustannusfunktiolla. Koska satelliittiaineistosta havaittiin aikaisemmin mainittu geolokaatiovirhe, spatiaalisesti täsmällisimmin määritetty optimointi ei ollut mielekäästä (ilmakuvista tulkittu referenssikartta ja satelliittikuva eivät koskaan asemoidu täysin päällekkäin). Niinpä optimointikriteeriksi valittiin pienimmän alueiden välisen eron menetelmä ja selvyyden vuoksi tulokset on esitetty ainoastaan tällä kriteerillä.

Kuvaindeksille sovittiin kullekin evaluointiosalle optimoitu kynnysarvo. Lisäksi evaluointiosat muodostivat alueen, jolla kuvaindeksille sovitettiin yhteiset kynnysarvot. Järvikohtaisesti optimoidut kynnysarvot tuottivat erittäin onnistuneita luokitteluja kokonaistarkkuuksien perusteella. Heikoin onnistuminen oli TC-vetisyysindeksin käyttö Vihtajärvellä, jonka luokittelun onnistuminen oli validointiosallaan 86,0 prosenttia. Keskimäinen erottuu järvenä, jolla optimaaliset kynnysarvot ovat selvästi korkeammalla kuin muilla. NDVI:n jakaumien ja kynnysarvojen vertailu on esimerkkinä esitettyä kuvassa 15.

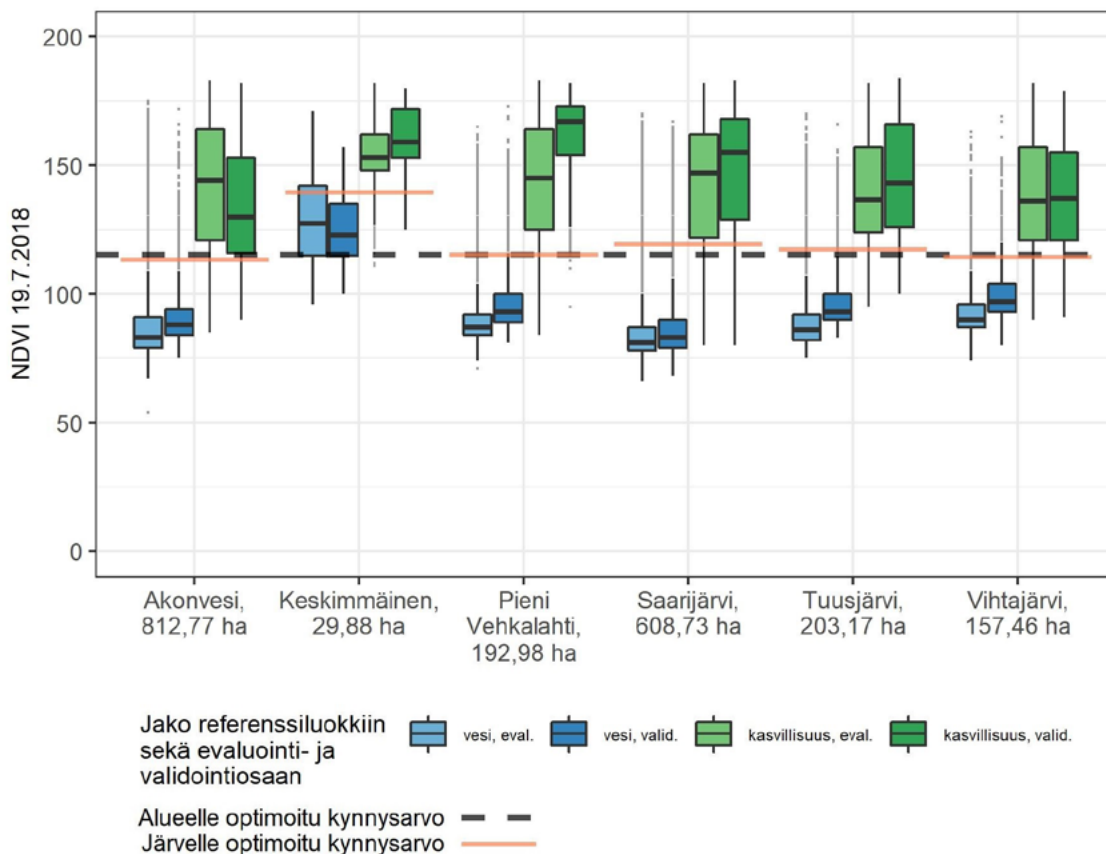


Kuva 14. Koillis-Savon tutkimusjärvien jako evaluointi- ja validointiosiin.

Kuuden järven evaluointiosille optimoidut kynnyksarvot osoittivat kaikkien viiden kuvaindeksin kohdalla samansuuntaisia tuloksia. Luokittelun kokonaistarkkuusprosentilla mitaten kaikilla kuvaindekseillä luokittelu johti erittäin hyviin tuloksiin (yli 90 %) sekä evaluointiosissa itsessään että validointiosissa. Kokonaistarkkuus on kuitenkin ongelmallinen tunnusluku, sillä luokkien välisessä koossa on suuri epäsuhta ("paljon vettä, vähän kasvillisuutta"). Koska tarkasteltavana on binäärimuotoinen muuttuja, onkin hyvä tarkastella myös luokittelun sensitiivisyyttä ja spesifisyyttä (Fielding & Bell 1997). Sensitiivisyys ilmaisee kasvillisuudeksi oikein luokitettujen ruutujen osuutta kaikista niistä ruuduista, joiden olisi pitänyt olla kasvillisuutta (todennäköisyys, jolla kasvillisuus luokituu kasvillisuudeksi). Spesifisyys vastaavasti ilmaisee vedeksi oikein luokitettujen ruutujen osuutta kaikista niistä ruuduista, joiden olisi pitänyt olla vettä (todennäköisyys, jolla vesi luokituu vedeksi). Kuten taulukosta 7 nähdään, erot sensitiivisyyksissä ja spesifisyyksissä ovat pieniä kuvaindeksien välillä. Vesi-luokan suuren koon takia spesifisyydet ovat odotetusti hyvin suuria.

Kasvillisuusluokassa on enemmän luokitteluvirheitä. Sensitiivisyydet ja spesifisyydet osoittavat, että NDVI:lle tehty luokittelu on spatiaalisesti tarkin.

Kartografiset tulokset ovat myös eri kuvaindeksien kohdalla samansuuntaiset. Tarkastelut osoittavat kelluslehtisten kasvustojen systemaattista aliluokittumista satelliittipohjaisten kuvaindeksien tulkinnassa. Tämä näkyy esimerkiksi kuvan 16 esittämällä Akonveden Ruokolahdella. Kuvassa näkyvä 20 metrin aliluokittuva kelluslehtisen kasvillisuuden vyöhyke olisi vieläkin leveämpi ilman satelliittikuvan sijaintivirhettä. Kelluslehtisten kasvustojen olisi hyvä olla mukana tulkinnassa kasvillisuusluokassa, koska ne indikoivat hyvin muutoksissa vesien tilassa (kasvustot tihentyvät ja osin myös laajenevat rehevöitymisen edetessä mm. pohjan liettymisen lisääntyessä). Toisaalta tarkastelu osoittaa sen, että pääasiana tulee olla sellaisen kynnyksarvon valinta, että kasvillisuus- ja vesiluokan raja kulkisi järveä keskimäärin ympäröivän kasvillisuusvyöhykkeen mukaisesti.

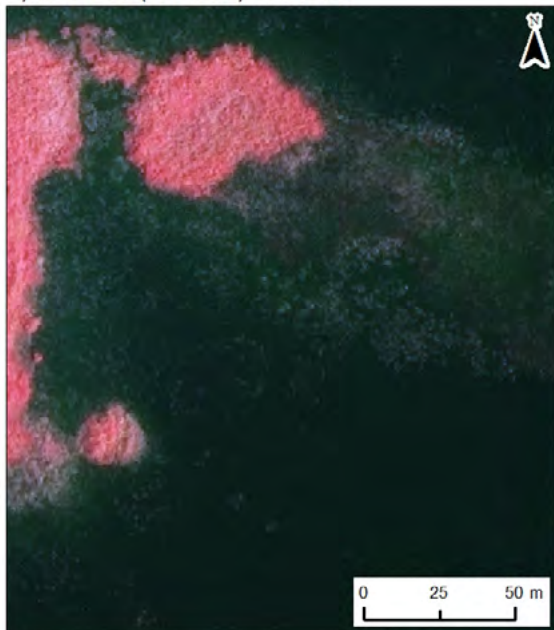


Kuva 15. Laatikko-jana-kuvaajilla esitetty NDVI:n jakauma alueen 1 järville. Aineisto on jaettu kuvioihin järvittäin, referenssiaineiston luokittain sekä evaluointi- ja validointiosiin. Harmaat pisteet janojen päissä ovat ulkopuolisia outlier-havaintoja yli puolitoista kertaa kvartaalivälin päässä ala- ja yläkvartaaleista.

Taulukko 7. Koillis-Savon järville optimoidut kynnyksarvot ja luokittumisen onnistumista kuvaavat tunnusluvut.

Kuvaindeksi	Kynnys	Luokittelun kokonaistarkkuus		Luokittelun sensitiivisyys	Luokittelun spesifisyys
		Evaluoitiossa	Validoitiossa	Validoitiossa	Validoitiossa
NDVI	115,5	96,0%	93,9%	85,9%	95,7%
NDVI-maksimi	153,5	94,8%	92,3%	78,5%	95,6%
TC-kirkkaus	1231,5	95,1%	92,6%	80,7%	95,3%
TC-vihreys	129,5	95,1%	92,8%	82,0%	95,3%
TC-vetisyys	235,5	94,7%	91,7%	80,1%	94,9%

A) Ortokuva (väri-infra) 17.7.2018



B) NDVI-tulkinta Sentinel-2-kuvasta 19.7.2018



© Pohjois-Savon ELY-keskus, MML 2019

Kuva 16. Ortokuva ja satelliittikuvasta määritellyn NDVI:n tulkinta Akonveden Ruokolahdella. Kuvapari osoittaa kelluslehtisen kasvuston aliluokittumista. Kohteesta dronilla otettuja viisto- ja pystykuvia on esitetty liitteessä a.

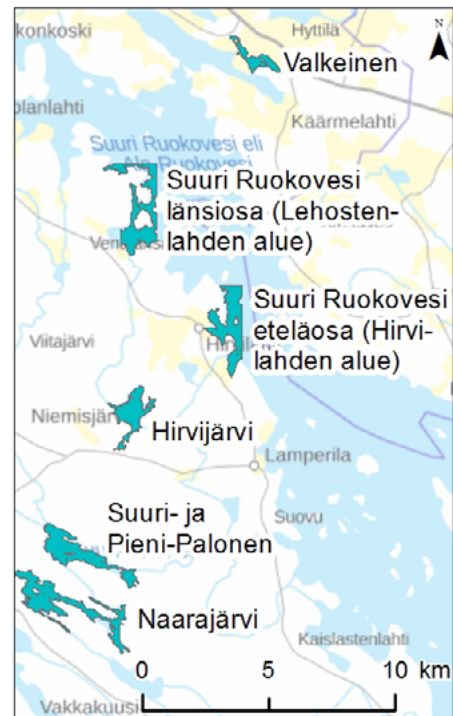
2.2. Kynnysarvojen määrittäminen kahden alueen järvien välillä

Toisella tutkittavalla alueella (Länsi-Kuopio) ei tehty järvien jakoa erillisiin evaluointi- ja kalibrointialueisiin, vaan kynnysarvojen optimointi tehtiin koko alueelle. Järvien sijainti on esitetty kuvassa 17.

Aluekohtaisesti optimoidut kynnysarvot ja luokittelun sensitiivisyydet on esitetty taulukossa 8. Graafisesti sensitiivisyys voidaan kuvan 18 avulla selittää myös siten, että se on kasvillisuusluokan jakauman osuus, joka on kynnysarvon yläpuolella. Sensitiivisyys on NDVI-luokittelussa muita hieman korkeampi. Vaikka valitun kriteerin puolesta luokittelussa ei edes pyritty spatiaalisesti mahdollisimman tarkkaan lopputulokseen, parempi sensitiivisyys on katsottava NDVI:n käytön puolesta eduksi. Tärkeä sensitiivisyyttä laskeva tekijä on sijaintivirhe, joka kuvaindeksien välillä on sama. Täten sijaintivirheestä johtuva sensitiivisyyden lasku on myös sama.

Kuvaindeksien saamat arvot skaalautuvat eri tavalla, joten alueellisten kynnysarvojen eroja ei voida arvioida suoraan luvuista. Kuvan 18 perusteella, jossa kynnysarvoja verrataan kuvaindeksien luokittaisiin jakaumiin, voidaan kuitenkin todeta, että TC-muunnoksille alueellisesti optimoidut kynnysarvot eroavat suhteellisen vähän.

NDVI-kuvaindeksin tulkinta Koillis-Savon järville alueellisesti optimoidulla kynnysarvolla johti Länsi-Kuopion järville 12 % pienempään kasvillisuusvyöhykkeen pinta-alaan kuin ilmakuvatulkinta. Asetelma toisin päin taas tuotti 9 % suuremman pinta-alan Koillis-Savon järville. Kunkin järven osalta vaikutukset pinta-alaan eri kynnysarvojen käytöstä ovat nähtävillä kuvassa 19 A. NDVI-maksimilla pinta-alaerot ovat vielä tätäkin suuremmat



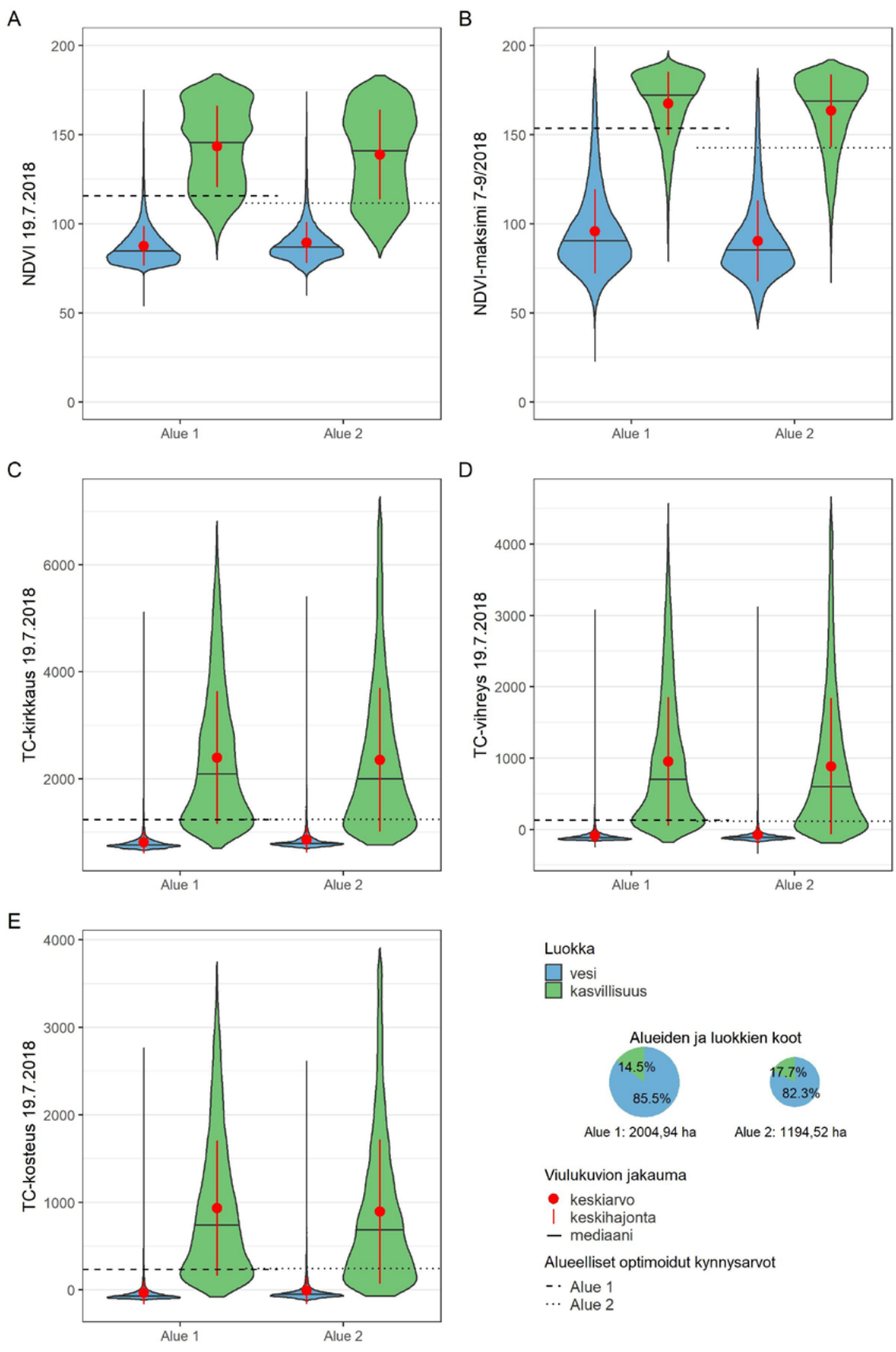
© Pohjois-Savon ELY-keskus, MML 2019

Kuva 17. Länsi-Kuopion tutkimusjärvet.

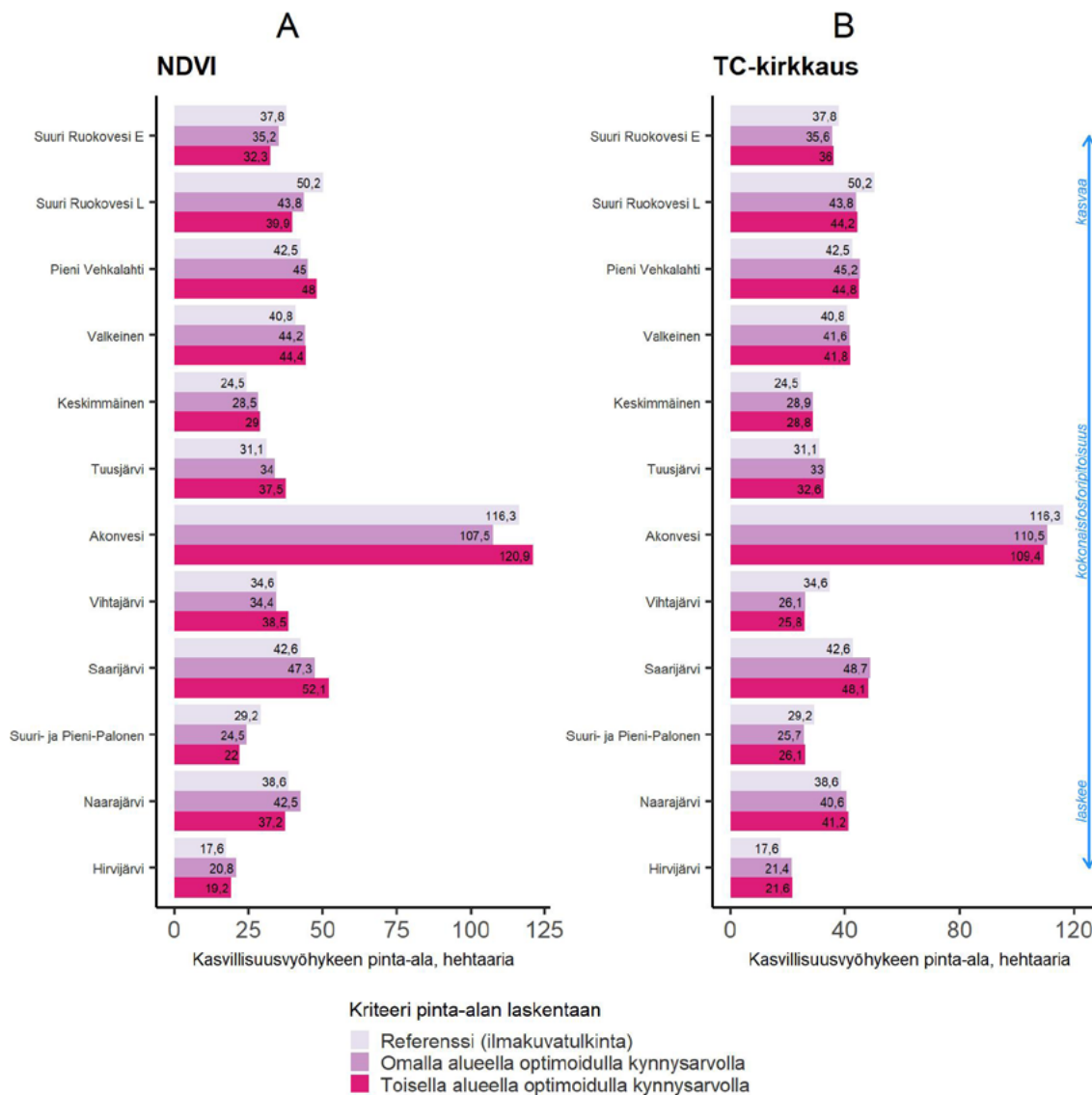
(johtaisi Koillis-Savossa 23 % suurempaan pinta-alaan ja Länsi-Kuopiossa 17 % pienempään pinta-alaan). Kirkkaus- ja vetisyysmuunnoksia käyttäessä niin omalla kuin toisellakin alueella optimoidun kynnysarvon käyttö johti kasvillisuusvyöhykkeen pinta-alassa alle prosentin eroon verratessa ilmakuvatulkinnalla saatuun pinta-alaan. Vihreysmuunnoksellakin erot olivat 2–4 %

Taulukko 8. Alueellisesti optimoidut kynnysarvot ja luokittelun sensitiivisyydet.

	Alue	Kynnysarvo	Luokittelun sensitiivisyys
NDVI	1 (Koillis-Savo)	115,5	85,6%
	2 (Länsi-Kuopio)	111,5	85,6%
NDVI-maksimi	1 (Koillis-Savo)	153,5	80,2%
	2 (Länsi-Kuopio)	142,5	80,2%
TC-kirkkaus	1 (Koillis-Savo)	1231,5	81,7%
	2 (Länsi-Kuopio)	1241,5	81,7%
TC-vihreys	1 (Koillis-Savo)	129,5	82,0%
	2 (Länsi-Kuopio)	114,5	82,0%
TC-vetisyys	1 (Koillis-Savo)	235,5	80,3%
	2 (Länsi-Kuopio)	242,5	80,3%



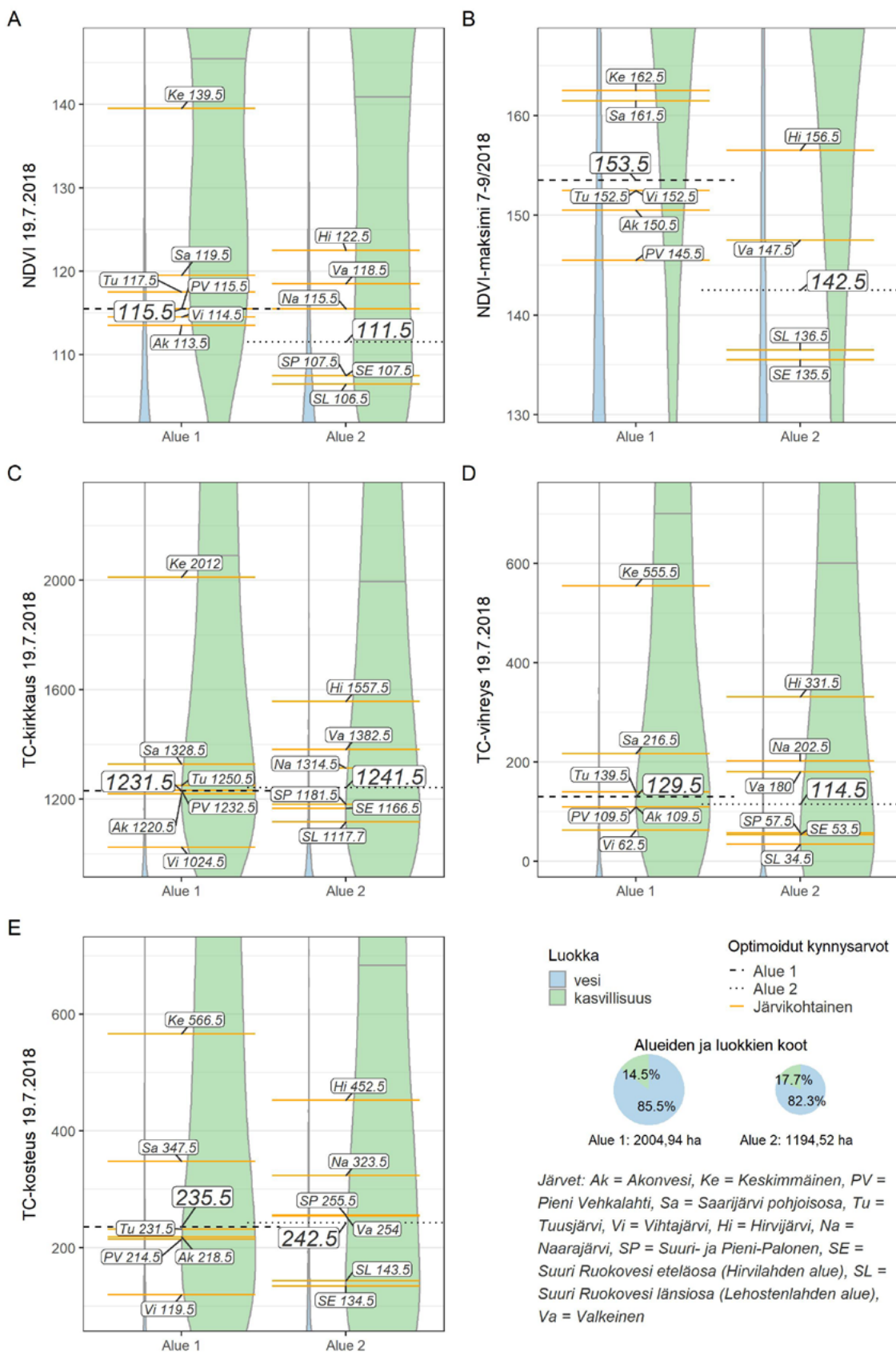
Kuva 18. Tutkimusalueiden vesi- ja kasvillisuusluokkien jakaumat eri kuvaindeksistä tulkittuna. Jakaumat ovat esitetty viulukuvioilla: mitä paksumpi viulukuvaaja on, sitä enemmän havaintoja on kyseisellä kuvaindeksiaron kohdalla. Viulukuvaajat ovat graafissa skaalattu maksimileveydeltään samanlaisiksi, jotta pienempien kasvillisuusluokkien jakaumat nähtäisiin selvemmin.



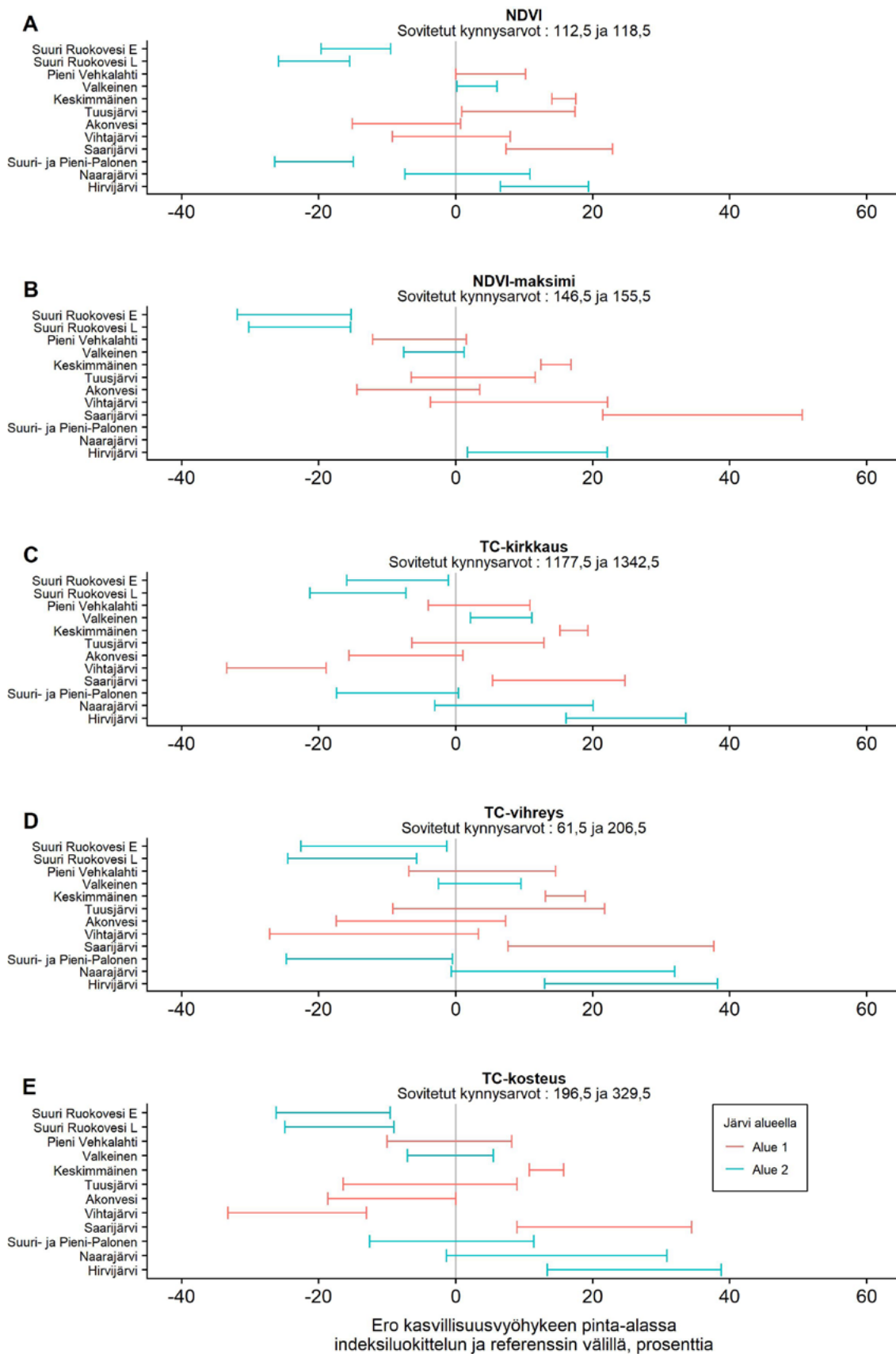
Kuva 19. Tutkimusjärvien kasvillisuusvyöhykkeiden pinta-ala referenssiaineistossa (ilmakuvatulkinta) ja satelliittikuvista tehdyistä tulkinnoissa, kun tulkinta perustuu A) NDVI-kuvaindeksin kynnystämiseen ja B) Tasseled Cap -kirkkausindeksin kynnystämiseen. Satelliittikuvatulkintaan perustuvat pinta-alat ovat esitetty sovittaen järvelle niin omalla tutkimusalueella optimoitua kuin toisella tutkimusalueella optimoitua kynnysarvoa. Järvet ovat järjestetty kokonaisfosforipitoisuuden perusteella.

Kuvaindekseille tehdyt tulkinnot on esitetty kartta-muodossa liitteessä b. Kohtuullisen koon pitämiseksi liitteessä on esitetty ainoastaan niitä tulkintoja, jotka saadaan kynnystämällä NDVI-kuvaindeksi ja TC-kirkkausmuunnos Koillis-Savon järville alueellisesti optimoiduilla kynnysarvoilla. Liitteen kartat vahvistavat huomioita sijaintivirheestä, kelluslehtisten kasvustojen systemaattisesta aliluokittumisesta ja edellä esitettyjä huomioita kasvillisuusvyöhykkeen pinta-alan eroista ilmakuvatulkintaan verrattuna. Toisaalta kartat osoittavat esimerkiksi Saarijärven kohdalla sitäkin, että kelluslehtisten kasvustojen tulee olla jo hyvin tiheitä, jotta 10 metrin maastoresoluutiossa ruutu tulisi luokitettuneeksi kasvillisuudeksi maastototuusarvoltaan.

Alueellisesti ja järviakohtaisesti optimoidut kynnysarvot on esitetty kuvassa 20. Vertailu osoittaa, että alueiden sisäinen kynnysarvojen vaihtelu on suurempaa kuin keskimääräisten kynnysarvojen ero alueiden välillä. Vaihtelun takia oli syytä tutkia muuhun joukkoon verrattuna pienempien ja suurempien kynnysarvojen vaikutuksia. Koska joukosta erottui poikkeavia arvoja (etenkin Keskimmäinen), ei ollut mielekästä soveltaa suoraan järviakohtaisia minimi- ja maksimikynnyksiä. Sen sijaan vertailussa käytettiin 12 järviakohtaisen kynnysarvon yli laskettuja ala- ja yläkvartileja, joiden mukaiset kasvillisuusvyöhykkeen pinta-alat laskettiin kaikille järville. Näitä verrattiin ilmakuvatulkinnassa laskettuun pinta-alaan (kuva 21).



Kuva 20. Alueellisesti ja järviokohtaisesti optimoidut kynnsarvot kullekin kuvaindeksille. Vesi- ja kasvillisuusluokkien jakaumat kuvaindeksien suhteen on esitetty taustalla viulukuvioilla.

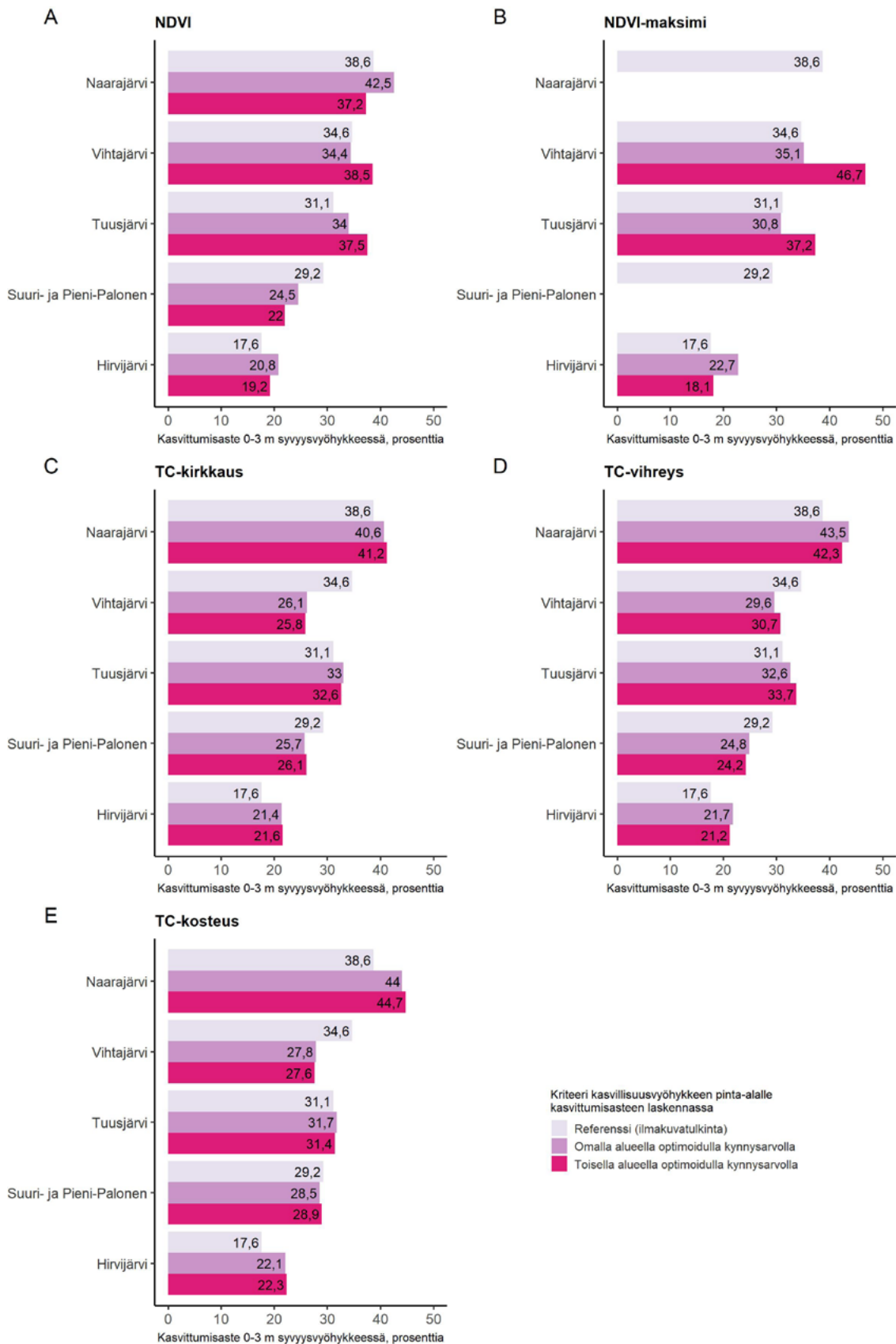


Kuva 21. Eri kuvaindekseistä tulkittujen kasvillisuusvyöhykkeiden pinta-alojen ero ilmakuvatulkinnasta saatavaan referenssiarvoon tutkimusjärvittäin. Kuvaindeksit ovat kynnystetty optimoitujen kynnyksarvojen ala- ja yläkvartiileilla.

Vertailu osoittaa, että kvartiileilla olevien kynnysarvojen käyttö kuvaindeksien luokittelussa johtaa yleisesti 10–20 prosentin eroihin referenssipinta-aloihin verrattuna. Osalla kuvaindekseistä 20–40 %:n erot ovat yleisiä. Tässä vertailussa NDVI:n käyttö näyttää suotuisimmalta, koska sillä suuria eroja pinta-aloihin tulee vähiten. Vihtajärveä lukuun ottamatta myös TC-kirkkaus vaikuttaa muita paremmalta.

Tutkittavista järvistä viideltä oli käytössä pinta-alatieto vyöhykkeestä, jonka vedensyvyys on 0–3 metriä. Suuri- ja Pieni-Palosella tieto saatiin suoraan SYKEN Syvyysalueet-aineistosta, kun taas Hirvijärvellä, Naarajärvellä, Tuusjärvellä, ja Vihtajärvellä alue digitoitiin Maanmittauslaitoksen Maastotietokannassa olleista syvyyskäyristä. Syvyysaluetiedon avulla järville laskettiin kasvittumisaste. ILMAVERSO I -hankkeessa laskenta tehtiin tarkemmin vertaamalla syvyysvyöhykkeellä olevan kasvillisuuden pinta-alaa vyöhykkeen kokonaispinta-alaan, mutta tässä tapauksessa laskenta tehtiin suoraviivaisemmin vertailemalla koko järven kasvillisuusvyöhykettä syvyysvyöhykkeen pinta-alaan. Kuvaindekseille oman ja toisen alueen kynnysarvoilla lasketut kasvittumisasteet on esitetty kuvassa 22. Kuvassa on myös referenssiarvona ilmakuvatulkinnalla laskettu kasvittumisaste. Järvet on järjestetty pystyakselille referenssiarvoltaan kasvittuneimmasta alaspäin.

Kasvittumisastevertailusta ei voi tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä pienen otoskoon takia. Joka tapauksessa tuloksia voi pitää kohtalaisena. Jokaisen kuvaindeksin huonon puolella on se, että vähintään yhdellä järvellä indekseistä lasketut arvot eroavat 5–10 prosenttiyksikköä referenssiarvosta.



Kuva 22. Kasvittumisasteet 0–3 metrin syvyyssvyöhykkeessä viidellä järvellä. Kasvillisuusvyöhykkeen pinta-alat on laskettu viidestä tutkittavasta kuvaindeksistä oman ja toisen alueen kynnsarvoilla sekä referenssitetona ilmakuvatulkinnasta.

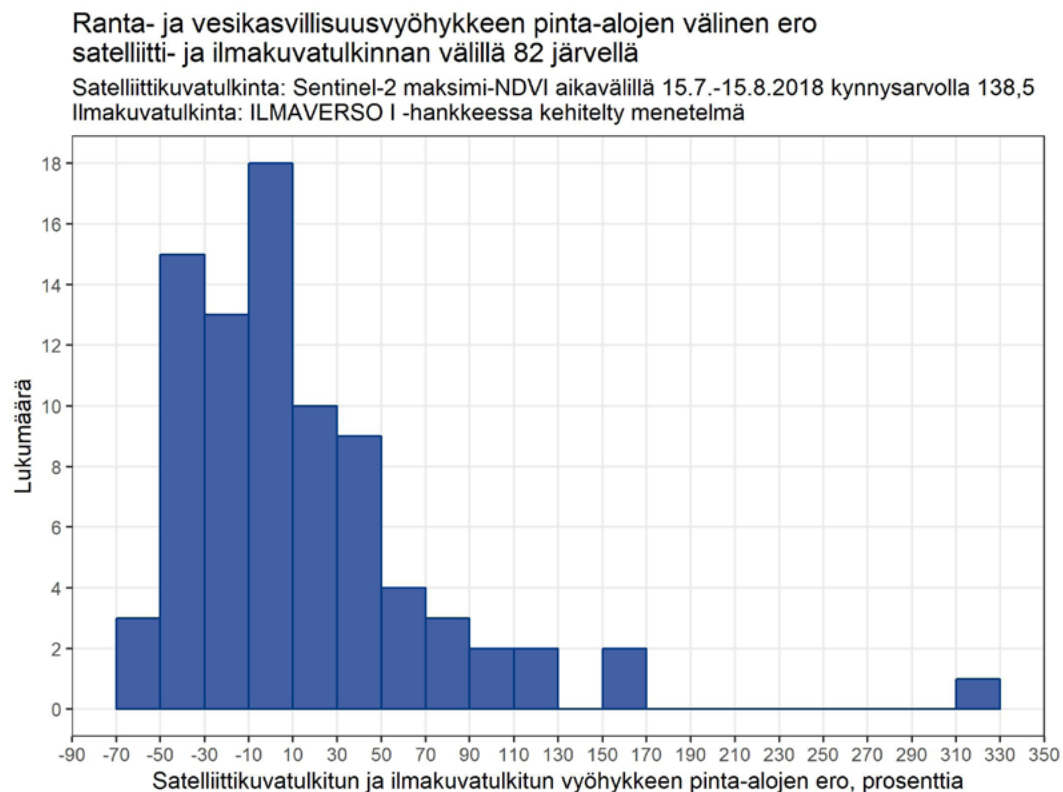
3. Valtakunnallisen NDVI-mosaiikin kynnystäminen

SYKE julkaisi yhdessä Ilmatieteen laitoksen kanssa vuoden 2019 aikana S2-kuvista laadittuja kuukausikohtaisia kuvaindeksimosaiikkeja, jotka olivat laajuudeltaan koko maan kattavia (SYKE 2019). NDVI on yksi aineistoon laadituista kuvaindekseistä, joten tutkimuksen lopuksi tutkittiin vielä tällaisen aineiston kynnystämiseen perustuvaa luokittelua suuremmalle joukolle järviä. Luokittelu tehtiin tämän raportin osassa 1 mainituille 82 järvelle (kaikilla olemassa ilmakuvatulkintaan perustuva kasvillisuustulkinta).

Tutkittavaksi kuukausikoosteeksi valittiin ajankohdalta 15.7.-15.8.2019 koostettu NDVI-mosaikki (jatkossa kutsutaan termillä kuukausi-NDVI). Mosaikointi perustuu myös tässä aineistossa ajankajson NDVI-arvoon maksimiin ja pikseliarvot on skaalattu välille [0...200]. Silmämääräisesti arvioiden kuukausi-NDVI:n sijaintivirhe on ilmansuunnaltaan sama kaakonsuuntainen, mutta etäisyydeltään kymmenen metriä suurempi kuin NDVI-, TC-muunnos- ja NDVI-maksimi-aineistoissa.

Kuukausi-NDVI-aineiston kynnystämiseen ei tehty samanlaista perusteellista valmistelua kuin Koillis-Savon ja Länsi-Kuopion järvien yhteydessä. Kynnysarvo optimoitiin yksinkertaisesti siten, että järvi-joukko jakautuisi mahdollisimman tasaisesti niihin, joilla satelliittikuvasta tulkittu ranta- ja vesikasvillisuuden pinta-ala olisi ilmakuvatulkittua suurempi tai toisinpäin. Kynnysarvon 138,5 käyttäminen johti tähän lopputulokseen.

Kuva 23 esittää järvijoukon jakaumaa, kun vertailaan satelliitti- ja ilmakuvatulkittua kasvillisuusvyöhykkeiden pinta-alan eroa. Suurella osalla järvistä erot ovat merkittäviä: äärimmäisinä tapauksina Ehoronjärven (järvitunnus 59.518.1.001) kasvillisuusvyöhykkeen pinta-ala on satelliittikuvatulkittuna yli kolme kertaa suurempi kuin ilmakuvatulkittuna, kun Ylä-Kousan (järvitunnus 04.396.1.002) vyöhykkeen pinta-ala noin 70 % pienempi. Vain 22 %:lla järvistä ero kasvillisuusvyöhykkeen pinta-aloissa jäi ± 10 %:n sisään (kuva 23).



Kuva 23. Satelliittikuvatulkittun ja ilmakuvatulkittun ranta- ja vesikasvillisuusvyöhykkeen pinta-alojen ero 82 järvellä.

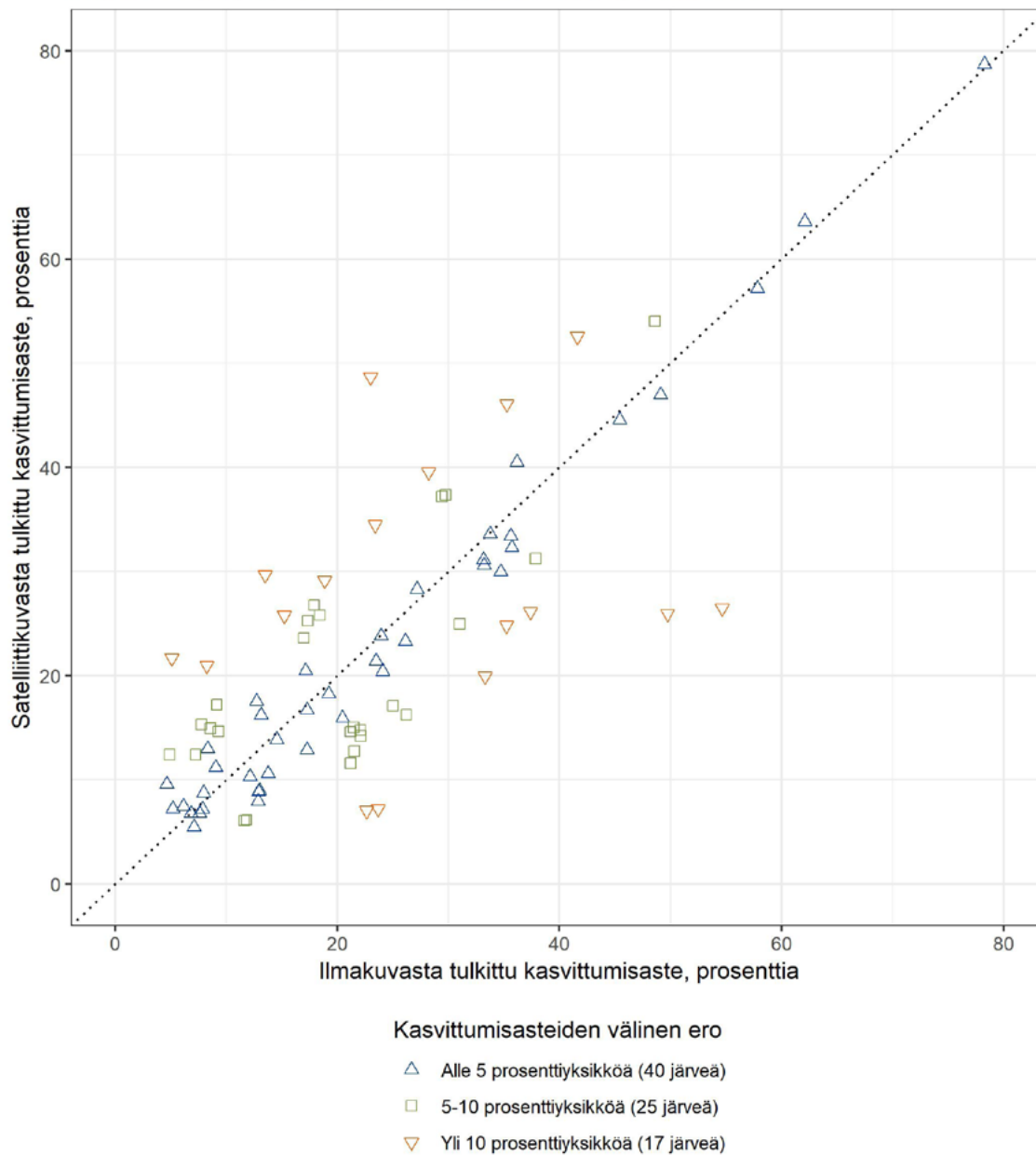
Kasvittumisasteiden ero satelliitti- ja ilmakuvatulkinnan välillä

Kasvittumisaste 0-3 metrin syvyysvyöhykkeessä

ILMAVERSO I ja II -hankkeissa ilmakuvatulkintat 82 järveä

Satelliittikuvatulkinta: Sentinel-2 maksimi-NDVI aikavälillä 15.7.-15.8.2018 kynnysarvolla 138,5

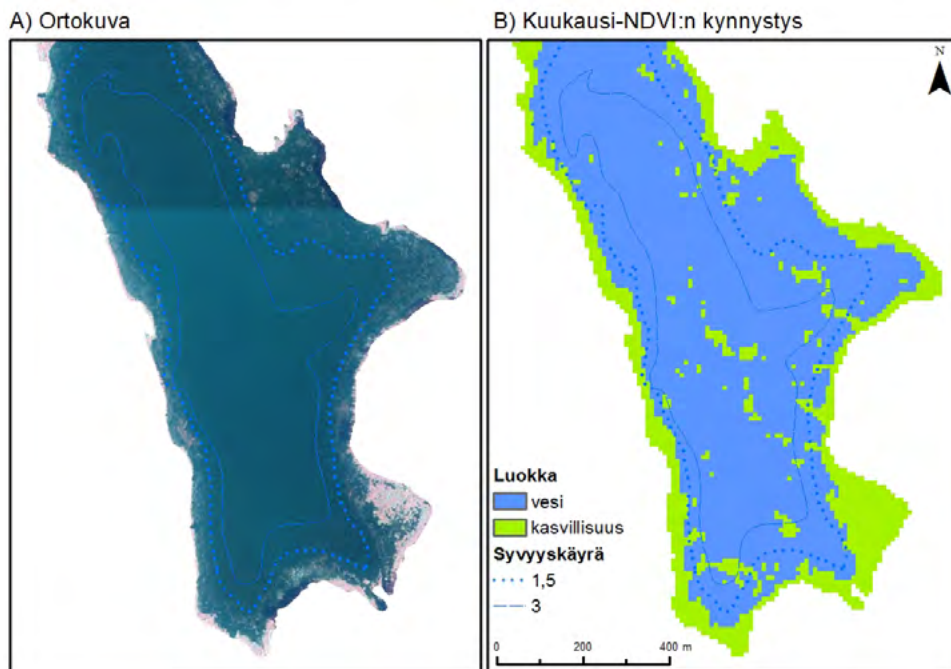
Ilmakuvatulkinta: ILMAVERSO I -hankkeessa kehitelty menetelmä



Kuva 24. Kasvittumisasteiden ero satelliitti- ja ilmakuvatulkinnan välillä 82 järvellä.

Tulkintojen välillä vertailtiin myös laskettuja kasvittumisasteita 0–3 metrin syvyysvyöhykkeessä. Satelliittikuvatulkinnan suuren maastoresoluution takia kasvittumisasteista käytettiin järven kasvillisuusvyöhykkeen kokonaispinta-alan ja 0–3 metrin syvyysvyöhykkeen pinta-alan osamäärää. Hieman yli puolella järvistä kasvittumisasteet erosivat yli 5 prosenttiyksikköä ja noin viidenneksellä yli 10 prosenttiyksikköä (kuva 24).

Karttatarkastelu osoittaa kuukausi-NDVI:stä kynnystämällä tehdyn luokittelun aiheuttavan Hernejärveltä esitetyn esimerkin tavoin (kuva 26) keltuslehtisten kasvujen aliluokittumista sekä avovesialueilla nähtäviä ylikuokittuneita pikseliryppäitä.



© Pohjois-Savon ELY-keskus, SYKE, ESA, MML 2019

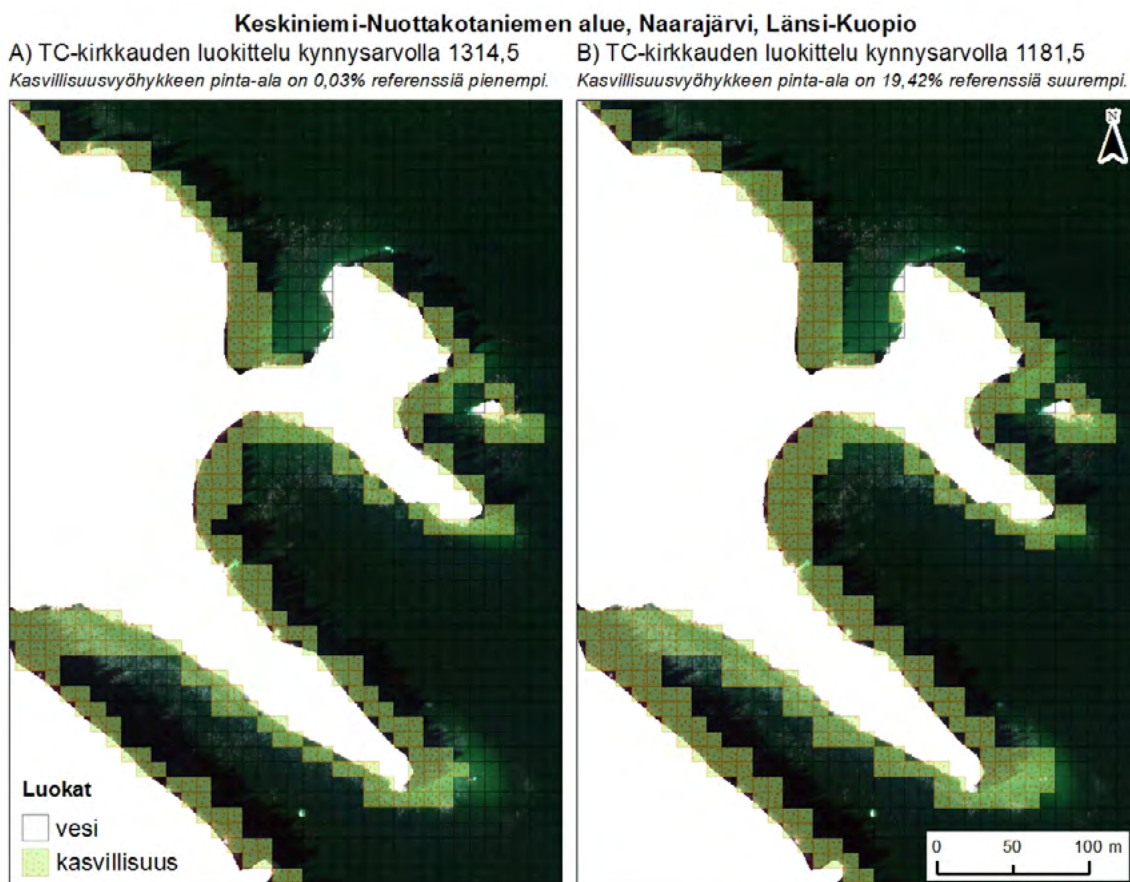
Kuva 25. Hernejärven Niuvanlahti ortokuvassa ja kuukausi-NDVI:stä kynnystämällä luokittelussa kasvillisuuskartassa.

4. Johtopäätökset

Tarkastelut osoittivat, että Sentinel-2 -satelliittikuvia voidaan käyttää vesikasvillisuuden pinta-alan kartoittamiseen kohtalaisesti, kun käytössä on ilmakuvatulkintaan perustuvaa maastototuustietoa. Tulokset eivät anna yksiselitteistä vastausta tutkittujen kuvaindeksien paremmuudesta toistensa suhteen. Erot eri alueille optimoiduissa kynnyksiarvoissa ovat Tasseled Cap -muunnosten kohdalla suhteellisen pienet. Toisaalta pieni ero Tasseled Cap -muunnosten kynnyksiarvoissa johtaa suurempaan vaikutukseen kasvillisuusvyöhykkeen pinta-alassa ja kasvittumisasteessa kuin NDVI:n käytössä. Ilmakuvan kuvaushetken verrattuna ajantasaisesta satelliittikuvasta lasketusta NDVI-indeksistä kynnyksistäminen tuotti paremman tuloksen kuin kolmen kuukauden NDVI-maksimiarvoista lasketun koosteen käyttö. Joka tapauksessa järvi- ja järvikohtaisissa kynnyksiarvoissa vaihtelu on suurta, joten laajemmalle alueelle sovitettavan kynnyksen optimointi vaatii aina useiden järvien maastototuusaineiston käyttöä.

Kuvaindeksien soveltuvuuden suhteen voidaan tehtyjen tarkasteltujen perusteella todeta, että mikäli maastototuutta on vain vähän käytössä, luokittelu kannattaa tehdä NDVI:n perusteella. Jos taas maastototuutta on runsaasti ja etenkin eri alueilta, niin silloin luokittelussa kannattaa soveltaa Tasseled Cap -kirkkausmuunnosta.

Tämän tutkimuksen tapa optimoida kynnyksiarvoja (ensin ilmakuvatulkinnan teko; tietojen sisällyttäminen ruutuihin ilmakuvatulkinnasta ja satelliittikuvatuotteesta; optimaalisimman kynnyksen laskeminen tilasto-ohjelmalla) on hyvin raskas. Jatkoon ja mahdollisen käytännön sovelluksen kannalta järkevintä olisi päästä tilanteeseen, jossa käyttäjä voisi paikkatieto-ohjelmistossa laittaa ilmakuvauksella tuotetun väri-infrakuvan ja satelliittituotteesta lasketun kuvaindeksin päällekkäin ja visuaalisesti hakea sopivimman kynnyksiarvon satelliittikuvaindeksille. Visuaalisesti tehtävässä kynnyksiarvon asettamisessa haasteeksi tulee tasapuolisen ali- ja



Kuva 26. TC-kirkkausindeksin luokittelu Naarajärvellä. Vasemmalla luokittelu Naarajärvellä optimoidulla kynnyksiarvolla ja oikealla lähellä sijaitsevan Suuri- ja Pieni-Paloselle optimoidulla kynnyksiarvolla.

yliluokittumisen arvioiminen. Tätä vaikeuttaa myös Sentinel 2 -satelliittikuvien systemaattinen sijaintivirhe.

Kuva 26 A esittää TC-kirkkausindeksin luokitte-
lua Naarajärvelle optimaalisimmalla kynnyksarvolla. Lopputuloksena kasvillisuusvyöhykkeen pinta-ala on lähes samankokoinen kuin referenssillä. Kuvassa 26 B taas kynnyksarvo on lähellä sijaitsevalta Suuri- ja Pieni-Paloselta, joka on melkein sama kuin 12 järvikohtaisen kynnyksarvon alakvartaali. Tällä kynnyksarvolla kasvillisuusvyöhyke kasvaa jo yli 7 hehtaaria referenssiä suuremmaksi. Kummassakin kuvassa näkyy lahtialueilla todennäköisesti kelluslehtisiä kasvustoja, jotka luokittevat systemaattisesti vedeksi. Kuvaparin kohdalla onkin todettava, ettei käyttäjä pysty päättämään optimaalisinta kynnyksarvoa ILMAVERSO-menetelmän ilmakuvatulkinnan tapaan pelkällä visuaalisella karttatarkastelulla.

Tutkimuksessa järvien kasvillisuusvyöhykkeen referenssipinta-ala oli laskettu 10 metrin maastoresoluutioon muunnetusta karttatasosta. Muutokset resoluutiossa muuttavat vyöhykkeiden pinta-
alaa: esimerkiksi Naarajärven kasvillisuusvyöhyke pinta-ala laskee 1,82 hehtaaria maastoresoluution muunnoksessa. Mikäli jatkossa satelliittikuvatulkinta tehdään asetelmassa, jossa ensin tehdään ilmakuvatulkinta ja satelliitti-indeksin kynnysoptimointi tehdään pienimmän alueiden välisen eron menetelmänä, kannattaa referenssinä käyttää alkuperäistä tarkemman resoluution pinta-ala-arvoa. Vaihtoehtoisesti mittakaavan kasvaessa voitaisiin Colditzin ym. (2018) tapaan laskea tarkempi osuus, jolla suurikokoinen pikseli luokitellaan kasvillisuudeksi sen sijaan, että käytettäisiin yksinkertaista 50 prosentin osuutta.

Sentinel-satelliittien ylilennot kuvaavat kerralla laajoja alueita Suomesta. Esimerkiksi Sentinel-2A-satelliitin ratataso 19.7.2018 (tässä tarkastelussa käytetty kuva) kulki Suomenlahdelta kohti Koillismaata kuvaten Inkoo-Posio-välisen linjan itäpuolen Suomesta. Tämä luo toiveita siitä, että luokittelu yhdellä satelliittikuvatiedoston alueella voitaisiin laajentaa muillekin samalla ylilennolla kuvatuille alueille. Ajatukseen täytyy kuitenkin suhtautua suurella varauksella, sillä ylilennon aikana kulma, jossa auringonvalo heijastuu maanpinnasta, muuttuu. Tämä vaikuttaa niin NDVI- kuin TC-muunnosten arvoihinkin, joskin vaikutusten tarkkaa suuruutta ei pystytä arvioimaan muuten kuin soveltamalla Pohjois-Savossa optimoituja kynnyksiä muiden aluei-

den järvellä ja vertaamalla ilmakuvatulkinnassa saatuihin referenssarvoihin. Tämän hankkeen resursseilla tätä tutkimusta ei pystytty vielä tekemään ja Sentinel 2-satelliittikuvien käyttöön vesikasvillisuustulkinnassa laajemmassa mittakaavassa jää merkittäviä jatkokehitystarpeita.

Mikäli S2-kuvista tehtävä vesikasvillisuustulkinta pystyttäisiin automatisoimaan vastaavasti kuin ulappa-alueiden vedenlaatutietoja rannikolta ja järvilta tällä hetkellä (SYKE 2020), voisi ajallisesti kasvava resoluutio ja esimerkiksi pidempiaikaisen keskiarvojen käyttö kompensoida yksittäisten kuvien/ajankohtien perusteella tehdyissä tulkinnoissa esiintyvää epävarmuutta suhteessa todellisiin kasvittuneiden alueiden pinta-aloihin. Tässä hankkeessa tehdyn tarkastelun perusteella automatisoitu menettely ei kuitenkaan näytä kovinkaan todennäköisesti mahdolliselta, vaan ajallisesti ja paikallisesti räätälöityjä tulkintamenetelmiä tarvitaan. Tällaista sovellusta tutkittiin hankkeen kolmannessa osiossa.

5. Lähteet

- Colditz, R. R., C. Troche, B. Vazquez, A. J. Wickel, R. Ressler (2018). Analysis of optimal thresholds for identification of open water using MODIS-derived spectral indices for two coastal wetland systems in Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 70, 13–24.
- ESA (2015). Sentinel-2 User Handbook. ESA Standard Document.
https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook, 24.7.2015. 64 s.
- ESA (2019a). Facts and figures.
http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Facts_and_figures, 3.10.2019.
- ESA (2019b). Sentinel-2 L1C Data Quality Report Issue 41.
https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report, 3.7.2019. 46 s.
- Fielding, A. H., J. F. Bell (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation* 24, 38–49.
- Kauth, R. J., G.S. Thomas (1972) The Tasseled Cap - A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 4B41–4B51.
- Marttila, J.-V., J. Aroviita, M. Törmä, S. Koponen, I. Autio, V.-M. Vallinkoski, M. Kuoppala, M. Rasilainen, A. Kanninen (2018). Kansallisen kuvausohjelman ilmakuvat vesikasvillisuuden runsastumisen ja tilan arvioinnissa. Raportteja 65/2018. 68 s.
- Nedkov, R. (2017). Orthogonal Transformation of Segmented Images from the Satellite Sentinel-2. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des sciences: sciences mathématiques et naturelles*. 70. 687–692.
- SYKE (2019). Sentinel-2 image index mosaics (S2ind) - Sentinel-2 kuvamosaiikit (S2ind).
<https://ckan.ymparisto.fi/dataset/sentinel-2-image-index-mosaics-s2ind-sentinel-2-kuvamosaiikit-s2ind>, 9.2.2021.
- SYKE (2020). Tietoa SYKE:n vedenlaadun kaukokartoitustuotteista.
<http://www.i4.ymparisto.fi/i4/fin/tuotteet/lisatietoja/>

OSA 3: Vesikasvillisuuden kartoitus satelliittikuvista EcoSat-menetelmällä

1. Johdanto

Yhtenä ranta- ja vesikasvillisuuden tulkintaan soveltuvana menetelmänä hankkeessa kokeiltiin valmista kaupallista tulkintapalvelua. Tällaisia palveluita on tarjolla varsin rajoitetusti ja tiedossa hankkeen aikana oli käytännössä vain yksi mahdollisuus: yhdysvaltalaisen Navico-yrityksen EcoSat-kasvillisuuskarttatuote. Digitaalisia navigointijärjestelmiä valmistavan Navicon lisäksi EcoSat- tuotannosta vastaa kaukokartoituspalveluja tarjoava saksalainen EOMAP-yritys, joka on käytännössä Navicon alihankkija palvelun tuotannossa.

EcoSat-menetelmä hyödyntää lähtökohtaisesti tarkan resoluution (maastoresoluutio 0,5–2 m) kaupallisia satelliittikuvia, joita toimittavat muun muassa Digital Globe (World View 2, 3 ja 4 -satelliiteista) ja Airbus Defense, Space (Pleiades). Palvelussa voidaan hyödyntää myös ESA:n Sentinel-ohjelman epätarkemman maastoresoluution kuvia (BioBase 2018). Keskimääräinen käsittelyaika tilauksesta tulosten toimittamiseen on 60 päivää.

Pohjois-Savon ELY-keskus kokeili EcoSat-tuotetta ensimmäisen kerran jo vuoden 2018 aikana lisälmen Haapajärvellä. Tulkittu kuva oli kaupallisen WorldView-2-satelliitin kuva vuodelta 2015 ja oli peräisin satelliitin omistaman DigitalGlobe -yhtiön arkistosta. Tässä kokeilussa vesikasvillisuuden tulkinta suoritettiin ohjaamattomana luokitteluna, jossa EcoSat käyttää objektipohjaista klusterointialgoritmiä ominaisuuksiltaan eroavien luokkien tunnistamiseksi. Tällöin käyttäjän tehtäväksi jäi nimetä jälkeensä EcoSatin muodostamat luokat. Maastototuutena Haapajärvellä oli käytössä ilma-

kuva MML:n arkistosta sekä kesällä 2018 droonilla kuvattuja viistoilmakuvia. Kokeilun perusteella menetelmä vaikutti lupaavalta, joten menetelmää päätettiin testata tarkemmin osana ILMAVERSO II -hanketta.

Pohjois-Savon ELY-keskus oli aiemmin käyttänyt jo useiden vuosien ajan Navicon samaan tuoteperheeseen kuuluvaa EcoSound-menetelmää, jossa kaikuluotaimen signaalista tulkitaan uposkasvillisuuden runsautta (ns. biovolyyomia).

2. Aineisto

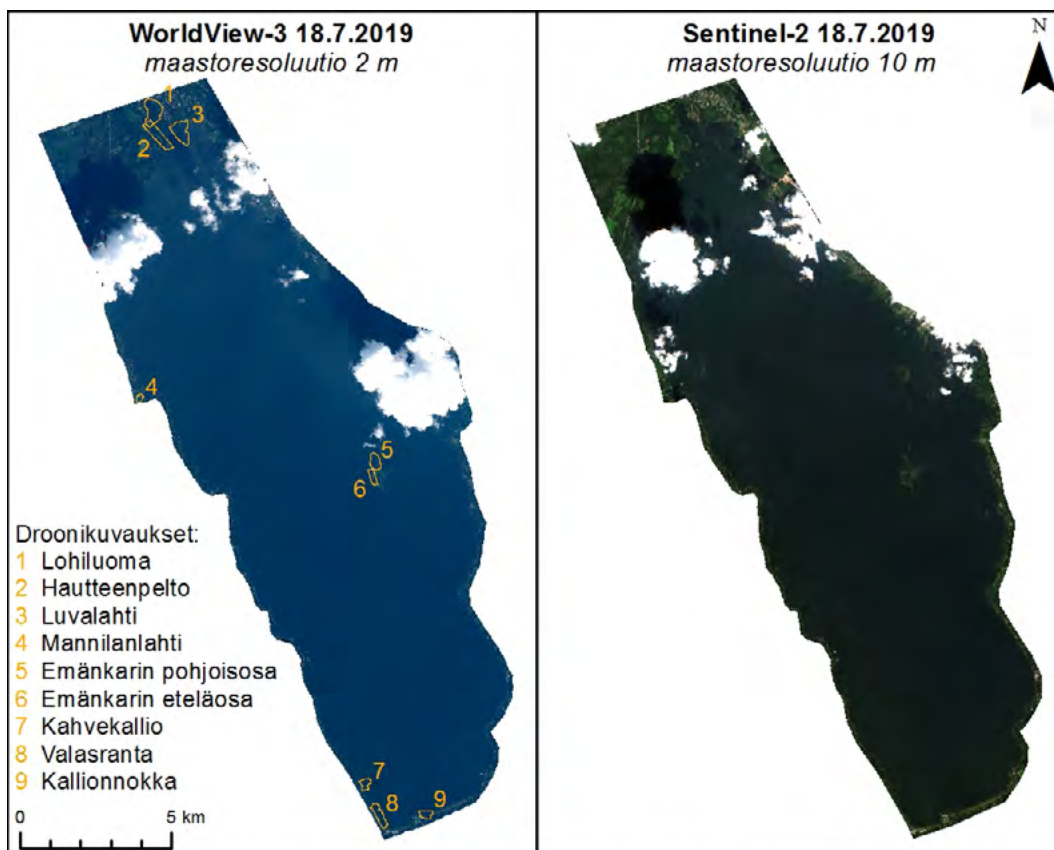
2.1. Testikohde ja satelliittikuva-aineisto

Testikohteeksi EcoSat-menetelmälle valittiin Säkylän Pyhäjärvi (järvinumero 34.031.1.001), joka on eräs Suomen tutkituimmista järvistä mm. pitkään jatkuneen aktiivisen hanketoiminnan seurauksena. Järven vesikasvillisuutta on tutkittu paljon myös aiemmin (Maristo 1941, Huovari 1967, Tamminen 1978, Kalpa 1999, Toivola 2009, Leka 2010). Aiemmat tutkimukset muodostivat hyvän pohjan maastotöiden suunnittelulle ja muodostavat vertailukohtaan myös tässä hankkeessa saatujen tulosten arvioinnille. Kirkasvetisen Pyhäjärven uposkasvillisuus on erityisen runsasta, mutta paikoin myös ruovikot ja muiden ilmaversoisten vyöhykkeet ovat laajoja. Kelluslehtistä kasvillisuutta on paikoin runsaasti. Järvi on pinta-alaltaan suuri eli kohde, jossa lähtökohtaisesti satelliittikuvapohjainen, laajalle alueelle soveltuva menetelmä on kustannustehokas.

Pyhäjärven tarkan resoluution satelliittikuvatilauksessa sovittiin, että EcoSat-prosessointi tehdään

ajankohdaltaan sopivalle kuvalle, jolle kuvien tarjoaja (Digital Globe) takaa alle 15 prosentin pilvipeiton. EcoSat-prosessointi tehtiin 18.7.2019 kuvatulle WorldView3-kuvalle (myöh. WV3). Pilvipeittoon liittyvä riski kävi toteen eikä käyttöön saatu kuva ollut täysin pilvetön. Kuvassa mm. Säkylän taajaman edustan vesialue, joka on kasvillisuuden runsasta ja monimuotoista, jäi pilvien peittoon (kuva 27). EOMAP teki WV3-kuvalle alustavan segmentoinnin hankkeen maastotyön pohjaksi.

Maastotyön pohjaksi toimitetussa raakasatelliittikuvassa ja segmenttitasossa huomattiin geolokaatiovirhe. Segmenttitaso muutettiin EUREF FIN TM35FIN -koordinaattijärjestelmään ja sitä asetoitiin 20 metriä länteen ja 16 metriä pohjoiseen, jotta segmenttien sijainnit olisivat silmämääräisesti kohdillaan suhteessa Maanmittauslaitoksen pohjakarttoihin. EOMAP:lta saatujen kommenttien perusteella mahdollisia syitä spatiaaliseen epävarmuuteen ovat esimerkiksi se, ettei kuvattava kohde ole suoraan satelliitin kulkureitin alapuolella ja satelliitin yleinen geolokaatiovirhe yhdessä ortorektifikaatioon käytetyn pintamallin virheiden kanssa.



© Pohjois-Savon ELY-keskus 2019, WorldView-3: © DigitalGlobe 2019, Sentinel-2: © ESA 2019

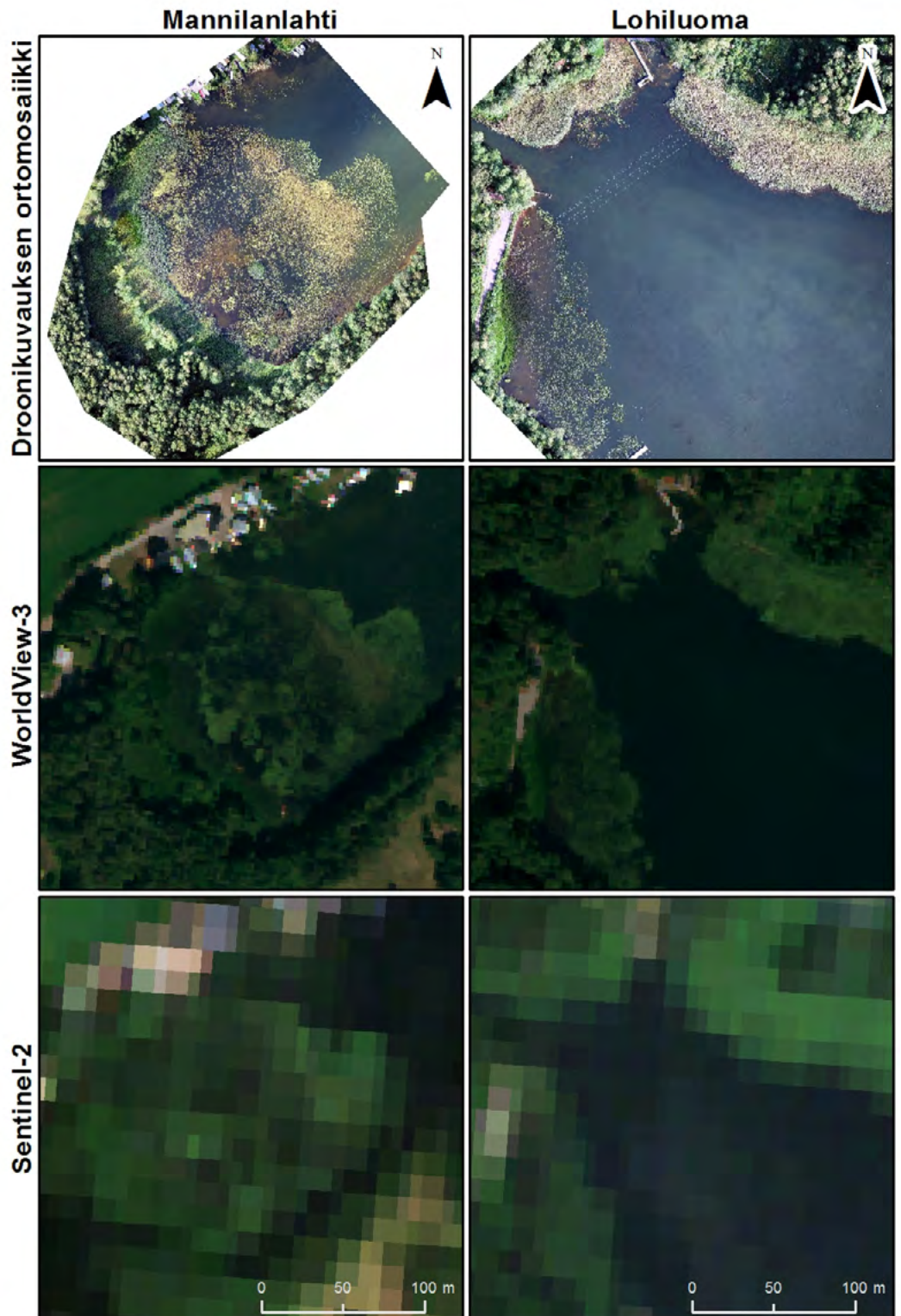
Kuva 27. Säkylän Pyhäjärvi WorldView-3 ja Sentinel-2-satelliittikuvissa 18.7.2019 ja droonikuvausten alueet 20.-22.8.2019.

Myös satelliittikuville tehty uudelleenprojisointi, taustakartan omat geolokaatiovirheet ja GIS-järjestelmän sisäiset projisointivirheet sovittaessa taustakarttaa ja satelliittikuvaa yhteen vaikuttavat havaittaviin eroavaisuuksiin.

EcoSat-menetelmällä toisena satelliittikuva-aineistona tulkittiin Sentinel-2-kuvaa, joka oli kuvattu samana päivänä kuin WV3-kuva. Kuvauksen eri kellonajoista johtuen kuviin tulleet pilvet ja niiden

varjot ovat eri paikoissa. EOMAP sovelsi S2-raakakuvalle omaa ilmakehävaikutusten korjausalgoritmiaan. S2-kuvassa on havaittavissa visuaalisesti noin 10 metrin geolokaatiovirhe, kun kuvaa verrataan pohjakarttoihin ja drooniortokuvaan, mutta EOMAP ei tehnyt uudelleenasetointia tälle kuvalle. 10 metrin maastoresoluutio rajoittaa jo huomattavasti kasvillisuudessa visuaalisesti havaittavia piirteitä, kuten nähdään kuvasta 28.

Kuva 28. Kolmen eri maastoresoluution kaukokartoituskuva Mannilanlahden ja Lohiluoman alueelta.



EOMAP tuotti S2-kuvalla luokittelun kahdella eri pienimmällä kartoitettavalla yksiköllä (MMU, "minimum mapping unit"), joka kuvaa pienintä kartalla havaittavaa aluetta. Pienimmillään MMU on sama kuin satelliittisensorin resoluutio, jota tarkempia yksityiskohtia ei pystytä kuvasta erottamaan. Toisaalta liian pieni MMU voi johtaa liian kohinaiseen ja "täyteen ahdettuun" lopputulokseen, jossa kasvustot eivät ole selkeästi havaittavissa. Muuttamalla MMU:ta ylöspäin pienet kasvustotilkut sulautuvat suurempiin muodostumiin tehden siten pääasialliset kasvillisuusyhteisöt selvimmin erottuviksi (Bio-base 2018). S2-kuva luokiteltiin 100 m² MMU:lla, joka sama kuin itse S2-kuvan resoluutio, ja karkeammalla 500 m² MMU:lla.

2.2. Maastotiedon kerääminen

Pyhäjärven kasvillisuuden tulkinnassa käytettiin EcoSatin ohjatun luokittelun menetelmää. Siinä käyttäjä kerää maastoaineiston, josta muodostetaan eri kasvillisuustyyppisiä kuvaavia tukialueita tulkinta-algoritmien opettamiseen.

Maastotiedon keräämiseen käytettiin kolmea päämenetelmää. Ensimmäisessä menetelmässä käytiin segmenteillä fyysisesti veneellä tai vedessä kahlaten (*in situ*). Toiseksi lennätettiin miehittämättömä ilma-alusta (droonia), jolla kuvattiin pysty- ja viistokuvia (kuva 30 on esimerkki jälkimmäisestä). Kolmanneksi tehtiin veneeltä uposkasvillisuuden ja pohjamuotojen kaikuluotauksia.



Kuva 29. Maastotiedon keräämistä varten pienikokoista DJI Mavic 2 Pro -droonia lennätettiin myös veneestä käsin. Nousu- ja laskeutumispaikkana toimi veneen keulaan asetettu alusta. Kuva: Antti Kanninen.

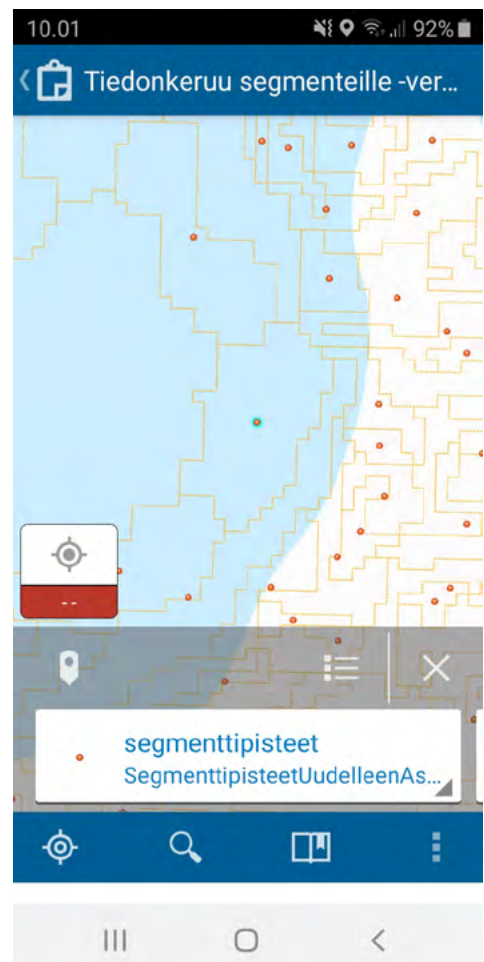
Kuva 30. Droonilla kuvattu viistokuva Hautteenpellon edustalta. Kuvasta erottuu keskeltä järvikaisla, oikealta järviruoko ja veden pinnalla kelluva ulpukka.



Maastotietojen kirjaamiseksi *in situ* käytössä oli kaksi järjestelmää. Ensimmäisessä vaihtoehdossa segmenteistä lasketut geometriset painopisteet vietiin shapefile-muodossa GPS-tallennuslaitteeseen (Trimble GeoExplorer GeoXH 6000) taustatasoksi. Tallennustiedot kirjattiin laitteelle luotuun mediakirjastoon. Laitte mahdollisti myös valokuvien kuvaamisen. Laitteen tarkkuus on valmistajan mukaan 0,1 metriä VRS-verkon tarkkuudella.

Toisena vaihtoehtona segmenttipolygonit ja -pisteet vietiin ArcGIS Online -palveluun, jossa niistä tehtiin verkkokartta. Polygonit toimivat tausta-aineistona, kun taas tiedot tallennettiin sentroidipisteisiin. Maastotiedot tallennettiin matkapuhelimiin asennettavalla Collector for ArcGIS -sovelluksella, jolla edellä mainittu verkkokartta oli käytettävissä (kuva 31). Sovellus tallensi sentroidipisteille myös puhelimella otettuja kuvia. Paikannustarkkuus sovelluksella oli 2–3 metriä.

Ilmakuvauksiin käytettiin kahta droonia: kuluttajille suunnattua DJI Mavic 2 Pro -multikopteria ja ammattilaisille suunnattua, tarkan ilmakuvauksen DJI Phantom 4 RTK -multikopteria. Drooneilla suoritetut kartoituslennot tarkempine tietoineen ovat esitettyinä kuvassa 27 ja taulukossa 9. Kartoituslentojen pystykuvat kuvattiin 120 metrin korkeudesta. Kartoituksissa kuvien sivuttainen päällekkäisyys oli 75 prosenttia tarkoittaen, että lentolinjojen välinen etäisyys oli 38 metriä. Kuvien päällekkäisyys pitkittäissuunnassa oli 85 prosenttia. Ortomosaikit tuotettiin Dronedeploy-pilvipalvelulla.



Kuva 31. Kuvankaappaus maastotietojen keräämisessä käytetystä Collector for ArcGIS -sovelluksesta. Kuvassa on kartalta valittuna yksi segmenttipiste. Painamalla valkoisella pohjalla olevaa "segmenttipisteet"-pönnähdusikkunaa avautuu uusi valikko, jossa tallennetaan segmentin tiedot.

Taulukko 9. Dronikartoitukset Säkylän Pyhäjärvellä.

Kartoitettava alue	Pinta-ala, hehtaaria	Ilma-alus	Kuvauspäivämäärä
Lohiluoma	38	DJI Phantom 4 RTK	21.8.2019
Hautteenpelto	33	DJI Phantom 4 RTK	22.8.2019
Luvalahti	34	DJI Mavic 2 Pro	21.8.2019
Mannilanlahti	4	DJI Phantom 4 RTK	20.8.2019
Emänkari pohjoisosa	15	DJI Mavic 2 Pro	22.8.2019
Emänkari eteläosa	9	DJI Phantom 4 RTK	22.8.2019
Kahvekallio	12	DJI Mavic 2 Pro	20.8.2019
Valasranta	20	DJI Mavic 2 Pro	20.8.2019
Kallionokka	11	DJI Mavic 2 Pro	20.8.2019

Kartoituslennoissa tuotettavien pystykuvien lisäksi droneilla kuvattiin viistokuvia. Kuvauskorkeus vaihteli 15–50 metrin välillä. Pääsääntöinen kuvauskorkeus oli 30 metriä. Kuvat tuotiin käsittelyvaiheessa paikkaan sidottuina pisteinä paikkatietojärjestelmään.

Luotausaineisto kerättiin Lowrance HDS-5-käikuluotaimella. Luotainaineistosta tuotettiin Navicon EcoSound-palvelulla karttoja järven syvyysprofiilista, biovolyymistä ja pohjan koostumuksesta (kuva 32). Biovolyymikartoissa kuvattava suure on biovolyymprosentti, joka kuvaa vedenalaisen kasvillisuuden täyttämää osuutta vesipatsaasta. Pohjan koostumus on taas EcoSound-kehittäjien luoma suhteellinen ja jatkuva-asteikollinen suure, joka kuvaa pohjan akustista heijastuvuutta. Suure saa sitä isompia arvoja, mitä kovempi ja kaikuluotaussignaaleja heijastavampi pohja on (BioBase 2019).

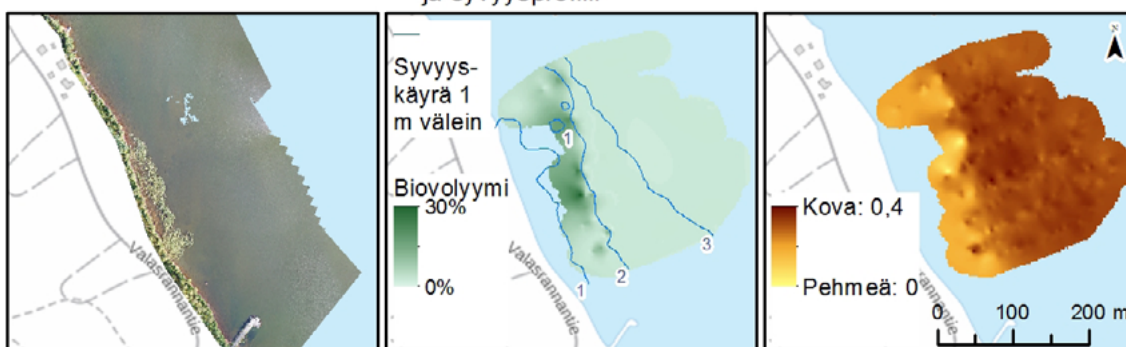
Kaikuluotaukseen perustuen nimettiin vesiruttoa ja vettä (uposkasvillisuudesta vapaata järvenpohjaa) edustavia segmenttejä. Lajitason tietoa EcoSound-menetelmällä ei saada, mutta EcoSound-karttojen avulla pystyttiin varmistamaan, onko segmentti kauttaaltaan vesiruton peitossa tai onko se kauttaaltaan kasvillisuudesta vapaa.

Valasranta, Säkylän Pyhäjärvi

A) Droniortomosaiikki

B) Biovolyymprosentti ja syvyysprofiili

C) Pohjan koostumus



© Pohjois-Savon ELY-keskus, MML, BioBase (<https://www.biobasemaps.com/>), Navico, Inc. 2019

Kuva 32. EcoSound-tuotteella luodut kartat syvyysprofiilista, biovolyymistä ja pohjan koostumuksesta Säkylän Pyhäjärveltä.

2.3. EcoSat-tulkintamenetelmän evaluointi

Kerätystä maastoaineistosta koostettiin ohjatun luokittelun opetusaineistoksi 270 nimettyä segmenttiä. Segmenttejä vastaavan kasvillisuustyyppin päättelyyn käytettiin kaikkia maastotiedon lähteitä ja niitä myös yhdisteltiin esimerkiksi siten, että ortoilmakuvamosaiikin tulkinnaissa hyödynnettiin *in situ* -havaintoja silloin kun ortokuvan suorassa visuaalisessa tulkinnaissa oli ongelmia. Segmentit luokittain on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Nimetyt segmentit EcoSat-tuotteen ohjatun luokittelun opettamiseen luokittain.

Luokka		Nimettyjen segmenttien lukumäärä menetelmittäin		
Suomenkielinen nimi	Latinankielinen nimi	In situ	Kaikuluotaus	Droonikuva
Järviruoko	Phragmites australis	21		42
Järvikaisla	Schoenoplectus lacustris	2		16
Leveäosmankäämi	Typha latifolia	3		14
Luikka	Eleocharis sp.	4		4
Järvikorte	Equisetum fluviatile	2		2
Sara	Carex sp.	2		
Ulpukka	Nutar lutea	18		47
Uistinviita	Potamogeton natans			10
Vesitatar	Persicaria amphibia			3
Palpakko	Sparganium sp.			3
Vesirutto	Elodea canadensis	8	6	5
Vesi		9	31	10
Rakennettu ympäristö		2		1
Kallio		3		4

2.4. EcoSat-tulkintamenetelmän validointi

Osa (20 %) maastoaineistosta jätettiin pois opetusaineistosta ja sitä käytettiin EcoSat-menetelmällä tuotettujen luokittelujen riippumattomaan validointiin.

Taulukko 11. Nimetyt segmentit EcoSat-kasvillisuuskartan validointiin luokittain.

Luokka		Nimettyjen segmenttien lukumäärä menetelmittäin		
Suomenkielinen nimi	Latinankielinen nimi	In situ	Kaikuluotaus	Droonikuva
Järviruoko	Phragmites australis	5		11
Järvikaisla	Schoenoplectus lacustris			4
Leveäosmankäämi	Typha latifolia			4
Ulpukka	Nutar lutea	4		12
Uistinviita	Potamogeton natans			2
Vesirutto	Elodea canadensis	2	1	
Vesi		2	8	3
Kallio		1		

2.5. Tulkintamenetelmä

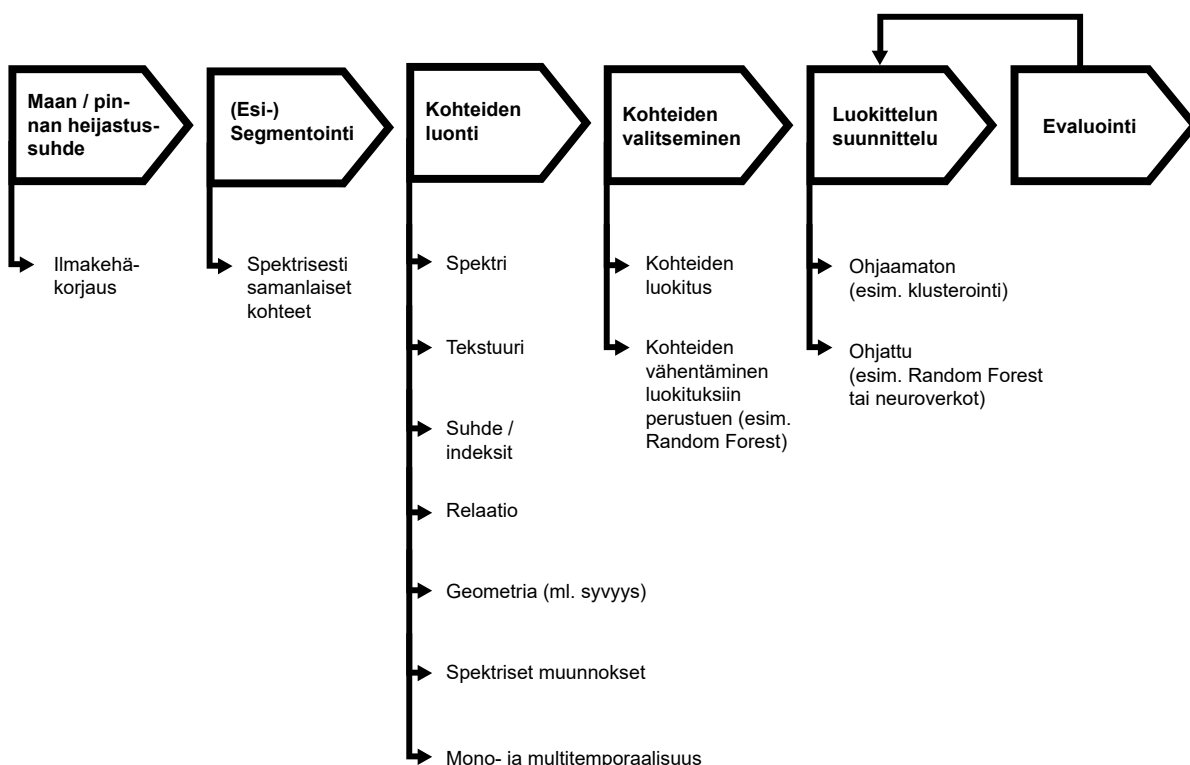
EcoSat-palvelu on kaupallisena menetelmänä osittain liikesalaisuuksien piirissä, joten menetelmää ei pystytä tarkasti kuvailemaan tässä raportissa. Palveluntuottajat ovat kuitenkin kuvanneet prosessin vaiheet satelliitin raakakuvasta segmentointiin ja edelleen luokitteluun kuvassa 33. Kuva esittelee myös eri vaiheisiin vaikuttavia tekijöitä. Ohjatussa luokittelussa opetussegmenttien perusteella muodostetaan koneoppimismenetelmin luokittelusääntöjä, joiden perusteella myös nimeämättömät segmentit luokitellaan. Lopputuloksena on eri kasvillisuustyyppisiä tai kasvilajeja kuvaava luokiteltu kasvillisuuskartta.

2.6. BioBase

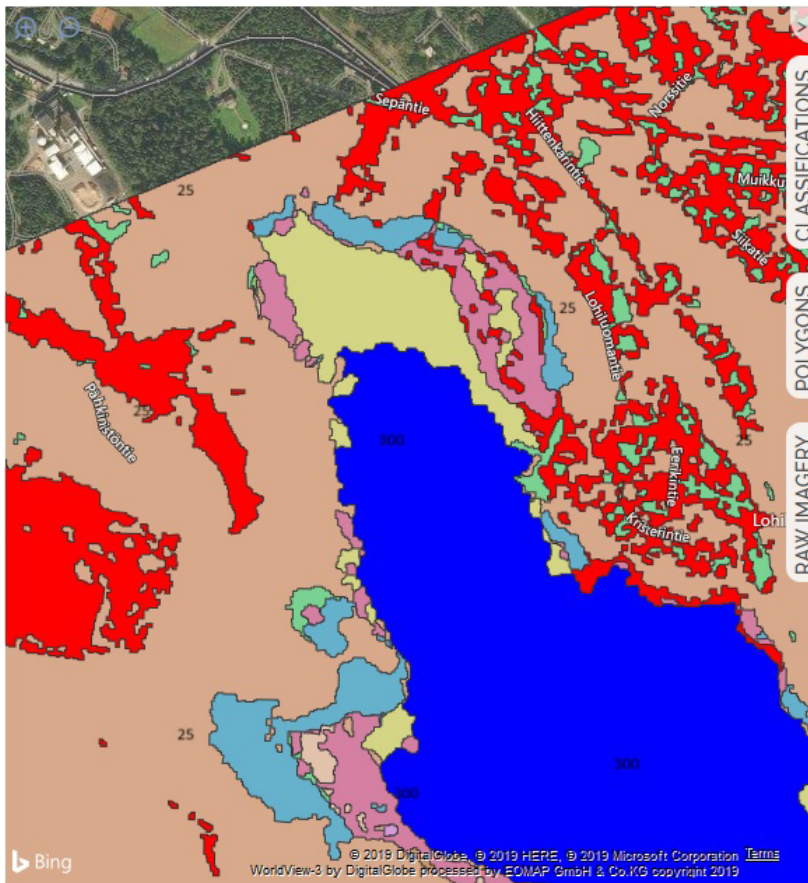
BioBase on pilvipohjainen alusta, joka automatisoi spatiaalisen aineiston prosessoinnin ja karttojen luomisen. BioBasen työkaluilla GIS-aineiston käyttöön perehtymättömät käyttäjät voivat tarkastella EcoSat- ja EcoSound-tuotteilla tuotettuja karttoja ja raportteja. Edistyneet GIS-käyttäjät voivat halutessaan viedä BioBase-aineistoja muihin GIS-ohjelmistoihin esimerkiksi overlay-analyysyä varten.

BioBase-karttanäkymässä käyttäjä voi tarkastella luokittelun tuloksia ja tarvittaessa yhdistellä tai poistaa luokkia (kuva 34). Myös yksittäisten kuvien luokkaa voi muuttaa manuaalisesti. BioBase mahdollistaa myös työkalun validointipisteiden luomiseen, mikäli ne kerätään luokittelun jälkeen.

BioBase-raporttinäkymä sisältää tiedot luokkien pinta-aloista. Tulokset esitetään koko tutkittavalta alueelta (vesimuodostuma ja sitä ympäröivä vyöhyke) ja pelkältä vesimuodostuman alueelta. Vesimuodostumien rajat BioBase määrittää itse: esimerkiksi Pyhäjärvellä BioBase-polygonin pinta-ala on 157,2 hehtaaria, kun taas Maanmittauslaitoksen ylläpitämässä maastotietokannassa pinta-ala on 155,3 hehtaaria. Jos karttanäkymässä tehdään manuaalisia muutoksia, käyttäjän tulee uudelleenprosessoida aineisto muutosten saamiseksi kartalle ja raporttiin.



Kuva 33. EcoSat-palvelun vaiheet satelliittikuvan käsittelyssä kasvillisuuskarttoiksi (Bindel 2019).



Lake S-P Emergent Veg WV3 100 mmu Global Classifications

	Id	Id 2	Classification
	2		Eleocharis
	3		Elodea canadensis
	4		Equisetum
	5		Nuphar lutar
	6		Persicaria amphibia
	7		Phragmites
	8		Potamogeton natans
	9		Schoenoplectus
	10		Sparganium
	11		Typha
	25		Other wetland forest
	50		Upland
	51		Upland Grass
	130		Unconsolidated sediment
	180		Man made objects
	251		Rock
	290		Cloud cloud shadow
	300		Open Water

[All Major Class Ids & Colors](#)

• ID/Class: Original Classification ID

Kuva 34. BioBase-alustan karttanäkymä.

3. Tulokset

3.1. Luokitusten tarkkuus

EcoSat-menetelmällä tuotetut vesikasvikartat on esitetty kuvissa 35–37. EOMAP ei tuonut luokitteluihin sara-luokkaa, koska siitä oli vain kaksi opetussegmenttiä. Samoin järvikorte- ja palpakkoluokat puuttuvat S2-perusteisista luokitteluista liian pienen opetussegmenttimäärän ja muista luokista heikosti eroavien spektristen ominaisuuksien perusteella. Luokitteluiden kokonaistarkkuudet (oikein luokituneiden segmenttien osuus kaikista nimetyistä segmenteistä) on esitetty taulukossa 12.

EcoSat-luokitteluiden lajikohtaisia tarkkuuksia vertailtiin laskemalla tuottajan ja käyttäjän tarkkuudet (taulukko 13) sekä virhematriisit (liitteet c, d ja e). Tuottajan tarkkuus ilmaisee todellisudessa luokkaan *i* kuuluvien segmenttien todennäköisyyttä tulla kartalla luokitetuksi luokkaan *i*, kun taas käyttäjän tarkkuus ilmaisee kartalla luokkaan

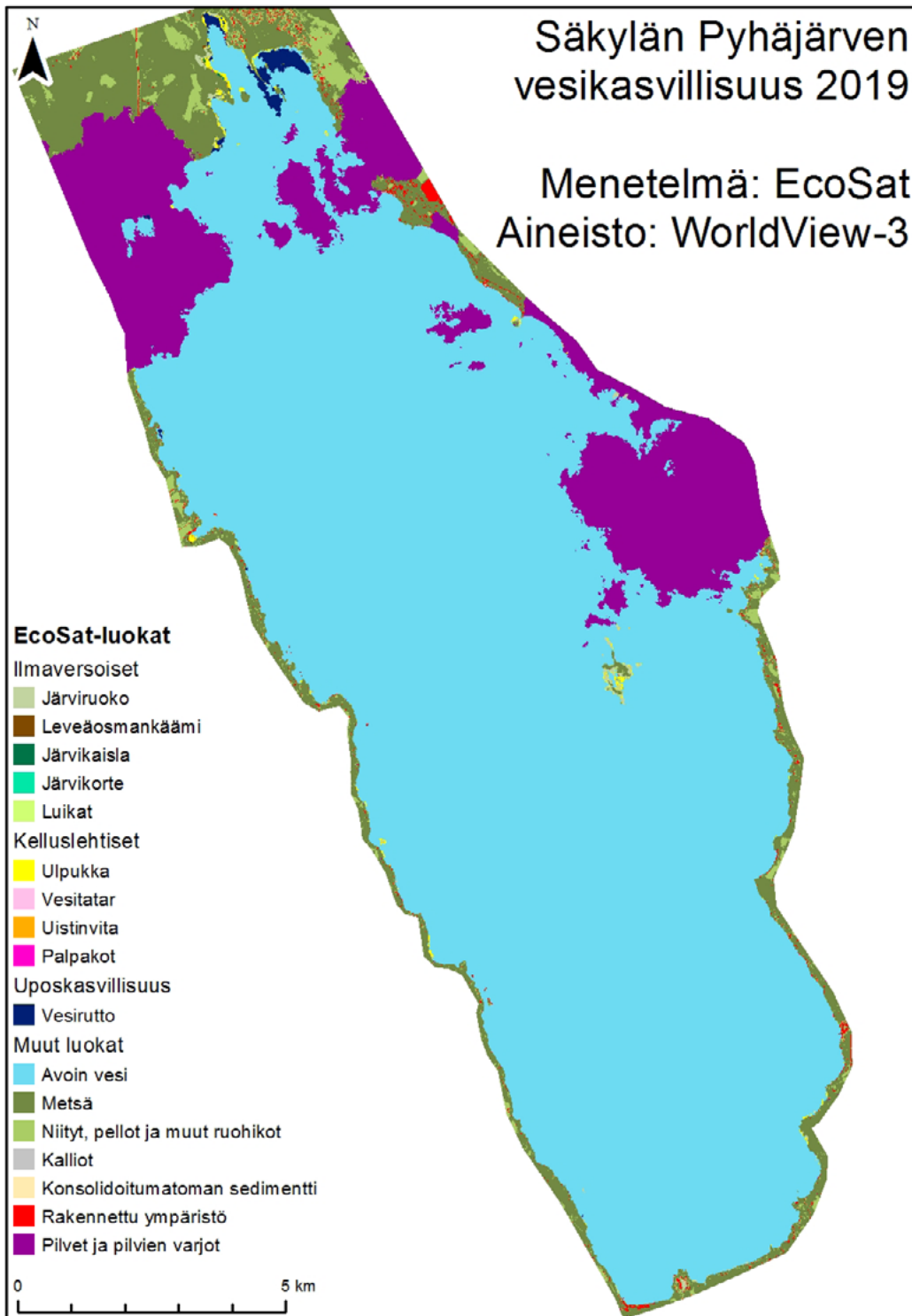
i luokitettujen havaintojen todennäköisyyttä kuulua todellisuuudessa luokkaan *i*. Segmenttimääriltään suurimmissa luokissa (yli 20 segmenttiä) WV3-perusteinen luokittelu oli pääsääntöisesti niin tuottajan kuin käyttäjän tarkkuuksissa S2-perusteisia parempi. Etenkin järviruo'on ja leveäosmankäämin kohdalla erot luokitteluiden välillä olivat suuret. Poikkeuksellisesti ulpukalla tuottajan tarkkuudet olivat S2-perusteissa hiukan paremmat, joskin käyttäjän tarkkuudet olivat heikkomat. Segmenttimääriltään pienet luokat luokittuivat epätarkasti.

Taulukko 12. EcoSat-menetelmällä tehtyjen luokittelujen tarkkuudet.

Luokiteltu aineisto	Luokittelun kokonaistarkkuus	
	Opetussegmentit	Validointisegmentit
WorldView-3	74 %	75 %
Sentinel-2, MMU 100 m ²	62 %	66 %
Sentinel-2, MMU 500 m ²	61 %	69 %

Taulukko 13. EcoSat-luokkien tuottajan (TT) ja käyttäjän (KT) tarkkuudet (%) WV3- ja S2-perusteisissa luokitteluissa. Tarkkuusluvut laskettiin sekä opetus- että validointisegmenteistä koostuneesta joukosta.

Luokka	Ikm	WorldView-3		Sentinel-2, MMU 100 m ²		Sentinel-2, MMU 500 m ²	
		TT	KT	TT	KT	TT	KT
Järviruoko	79	81	81	58	72	61	72
Järvikaisla	22	73	89	59	54	55	52
Leveäosmankäämi	21	52	92	5	33	5	33
Luikka	8	13	100	25	33	13	33
Järvikorte	4	0	0	–	–	–	–
Sara	2	0	0	–	–	–	–
Ulpukka	81	83	79	89	63	86	66
Uistinviita	12	75	100	92	73	83	71
Vesitatar	3	33	100	0	0	0	0
Palpakko	3	33	100	–	–	–	–
Vesirutto	22	50	92	36	67	32	70
Avoin vesi	63	94	67	76	76	81	71
Rakennettu ympäristö	3	67	100	33	25	33	25
Kallio	7	29	100	0	0	0	0

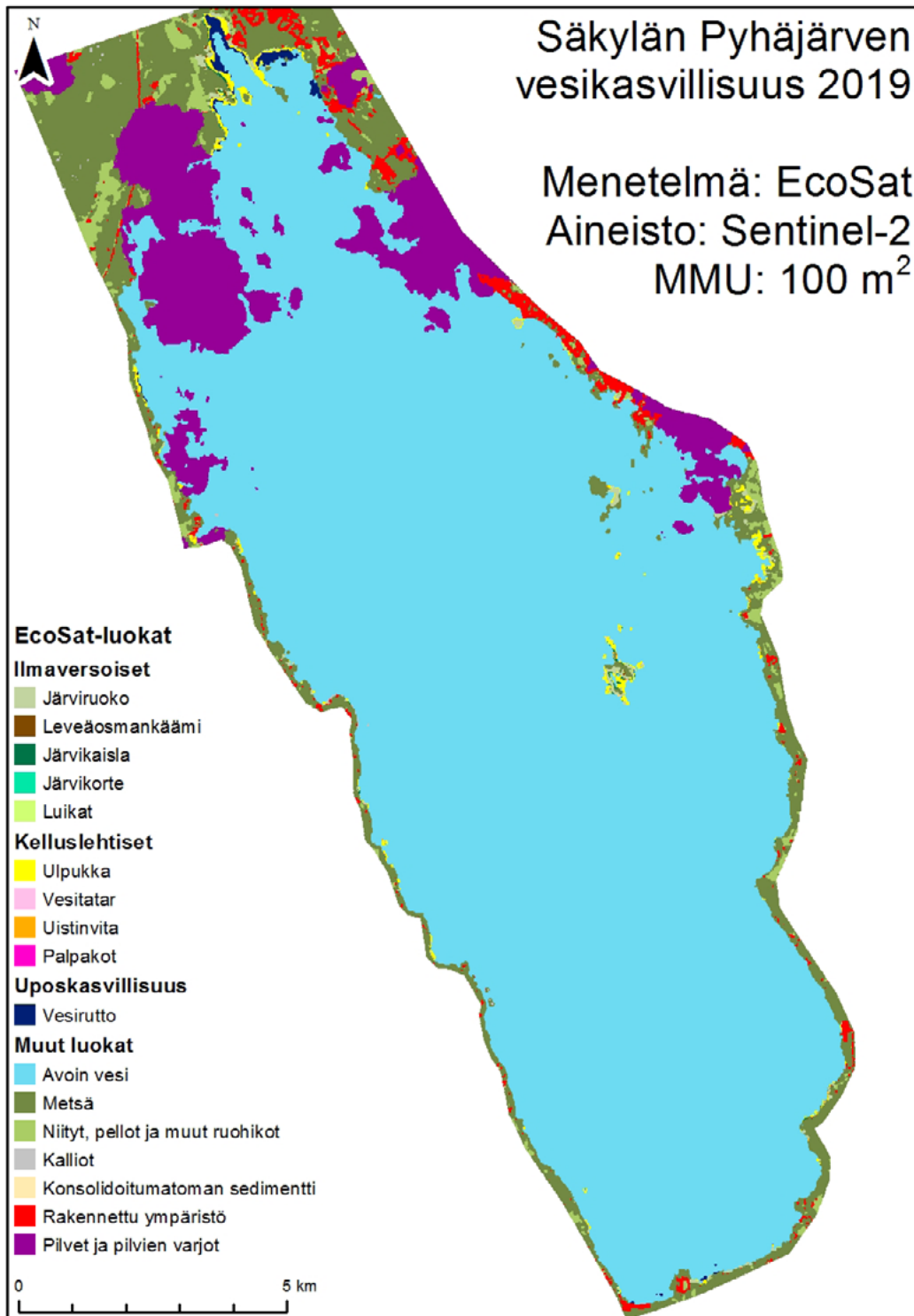


© Pohjois-Savon ELY-keskus 2019

Alkuperäinen WorldView-3-satelliittikuva: © DigitalGlobe 2019

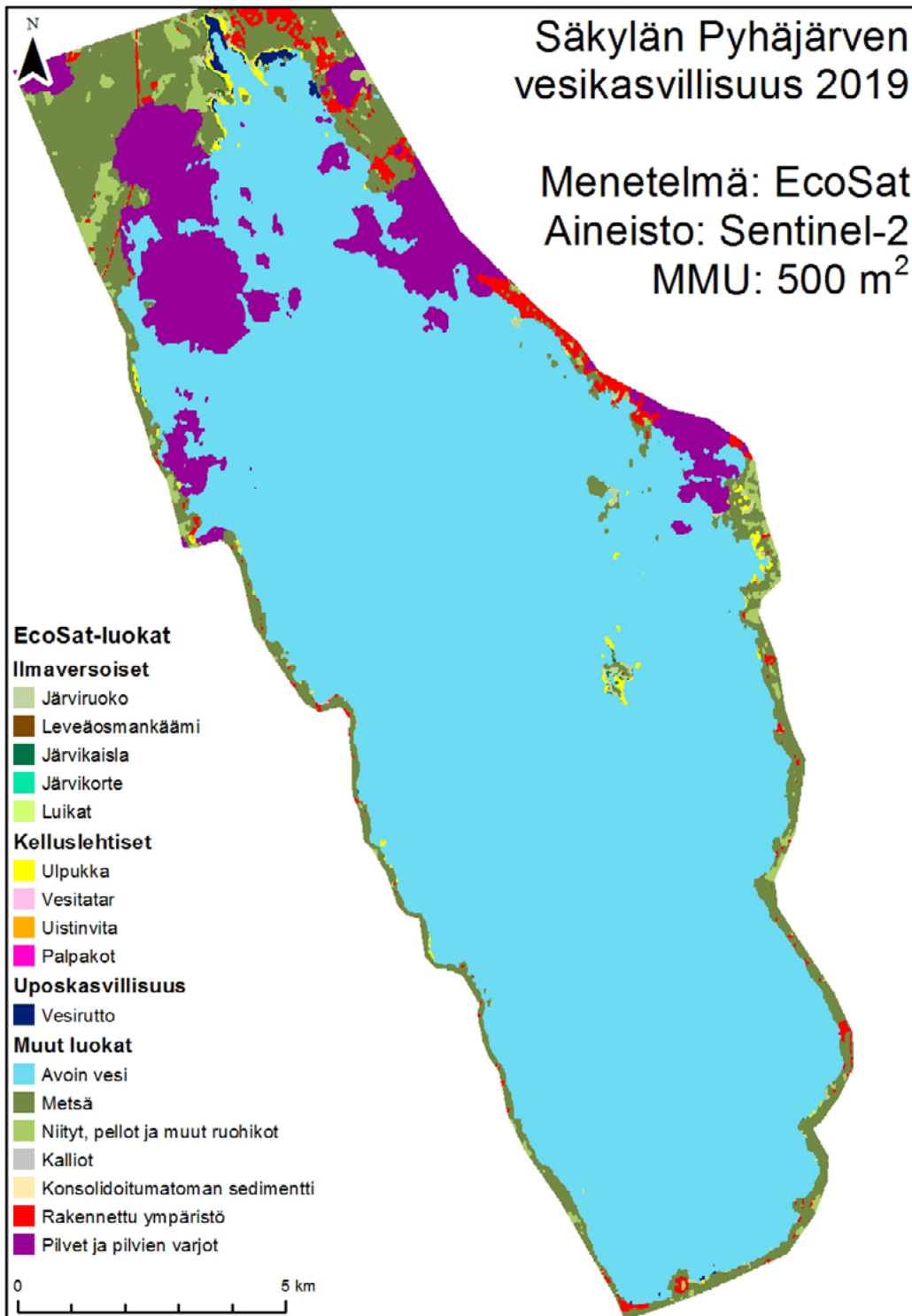
EcoSat-luokittelu: © BioBase (<https://www.biobasemaps.com/>), Navico, Inc., EOMAP GmbH & Co. KG 2019

Kuva 35. Säkylän Pyhäjärven vesikasvillisuus vuonna 2019 perustuen WorldView-3-satelliittikuvasta tehtyyn tulkintaan EcoSat-menetelmällä.



© Pohjois-Savon ELY-keskus 2019
Alkuperäinen Sentinel-2-satelliittikuva: © ESA 2019
EcoSat-luokittelu: © BioBase (<https://www.biobasemaps.com/>), Navico, Inc., EOMAP GmbH & Co. KG 2019

Kuva 36. Säkylän Pyhäjärven vesikasvillisuus vuonna 2019 perustuen Sentinel-2-satelliittikuvasta tehtyyn tulkintaan EcoSat-menetelmällä 100 m² MMU:lla.



© Pohjois-Savon ELY-keskus 2019
Alkuperäinen Sentinel-2-satelliittikuva: © ESA 2019
EcoSat-luokittelu: © BioBase (<https://www.biobasemaps.com/>), Navico, Inc., EOMAP GmbH & Co. KG 2019

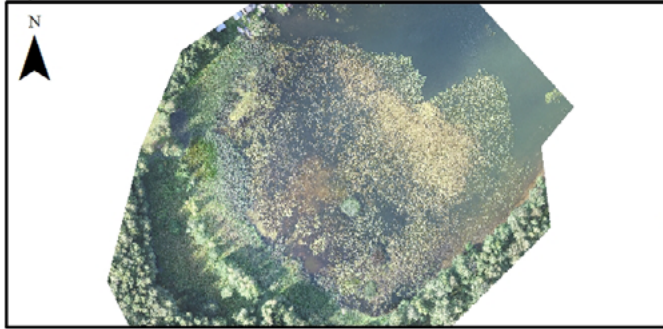
Kuva 37. Säkylän Pyhäjärven vesikasvillisuus vuonna 2019 perustuen Sentinel-2-satelliittikuvasta tehtyyn tulkintaan EcoSat-menetelmällä 500 m² MMU:lla.

3.2. Tutkimusaluekohtaiset tarkastelut

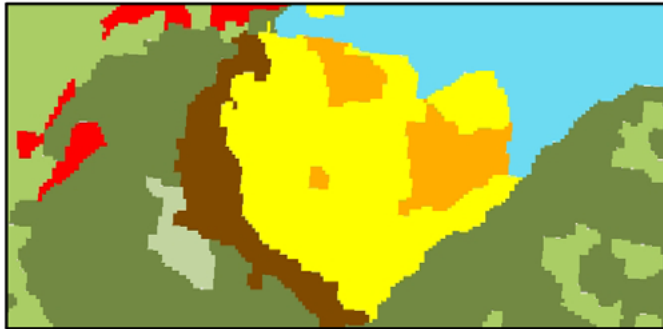
Kuvat 39–42 esittävät vesikasvillisuutta suurimitakaavaisilla kartoilla muutamalla alueella. Seuraavassa tarkempia huomioita luokittelujen onnistumisesta kyseisillä alueilla:

- Mannilanlahdella luokitelluista kartoista puuttivat järvikaislakasvustot lahden pohjukasta. Syynä tähän voivat olla kasvustojen pieni pinta-ala ja drooniviistokuvista havaittavat lakoontuneet kaislakasvustot. Ainoastaan WV3-kuvalle tehty luokittelu sisältää lahden pohjukkaa kiertävän osmankäämivyöhykkeen. Kaikki luokittelut ovat kutakuinkin luokitelleet ulpukka- ja uistinvitavyöhykkeet oikein. Alueen vesiruttokasvustot ovat taas systemaattisesti luokituneet avovedeksi.
- Lohiluomalla S2-luokitteluissa ulpukkavyöhykkeet ovat liian suuria ja ruokovyöhykkeet vastaavasti liian pieniä. WV3-luokittelussa ne ovat suurin piirtein oikein. Ainoastaan WV3-luokittelu sisältää Lohiluoman järvikortevyöhykkeen, joskin spatiaalisessa vastaavuudessa on puutteita, sillä luokituneessa vyöhykkeessä on rannan pensaitakin, muttei harvaa kortteikkaa.
- Luvalahdella droonikuvista selvästi erottuvat vesiruttokasvustot ovat luokituneet avoimeksi vedeksi WV3-kuvaan perustuvassa luokittelussa. S2-luokituksissa avoimeksi vedeksi luokittumista on vähemmän, mutta toisaalta kuvien 40 C ja D alalaidassa vesiruttokasvustoja on taas luokitunut ulpukaksi. EcoSat-menetelmän opetusaineistoon sisältyi viisi luikkaa edustavaa segmenttiä. Luokitelluissa lopputuotteissa luikaksi on oikein luokitunut kuitenkin vain yksi segmentti oikein niin WV3- kuin S2-luokitteluisakin. S2-luokitteluiden uistinvita- ja vesitatar-segmentit ovat Luvalahdella väärinluokituneita. Lisäksi S2-luokitteluissa 30 metrin vyöhyke rantaviivasta ulospäin on jostain syystä luokitunut metsäksi. Syynä voi olla vesikasvisegmenttien MMU:ta pienempi koko.
- Emänkarin Kankurilla pelkästään WV3-luokittelussa alueen päätrendi on oikein: maa-alueilla kasvaa puita ja pensaita, ja siitä pohjoiseen laaja järviruokokasvusto. Ruovikon ulkoreunat ovat kuitenkin väärinluokituneet ulpukaksi. WV3-luokittelussa on myös kaksi vesitatar-kasvustoa neljästä luokitunut oikein, kun alueen harvat luikkakasvustot ovat systemaattisesti luokituneet vedeksi. S2-luokitteluiden järvikaislaa ja uistinvitaa ei alueella todellisuudessa ole. Myös pohjoinen ruovikko on lähes kokonaan väärinluokitunut ulpukaksi.

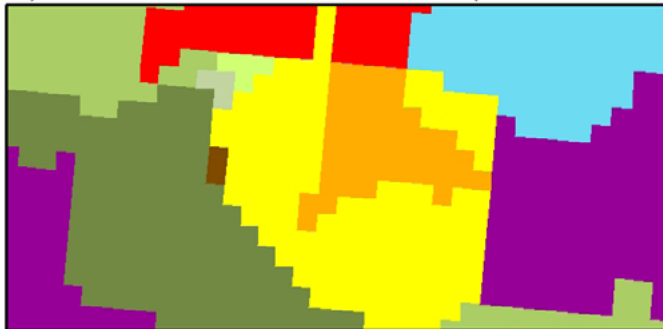
A) Dronikuvausten ortomosaiikki



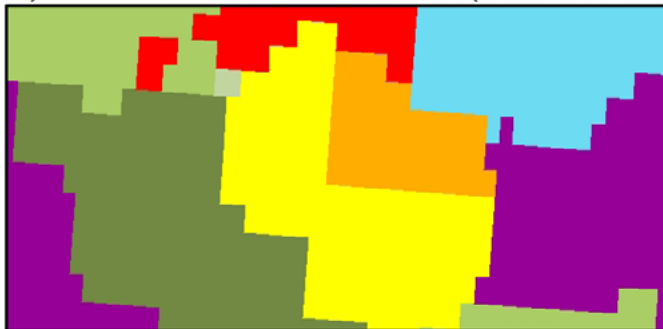
B) Luokittelu WorldView-3-kuvasta



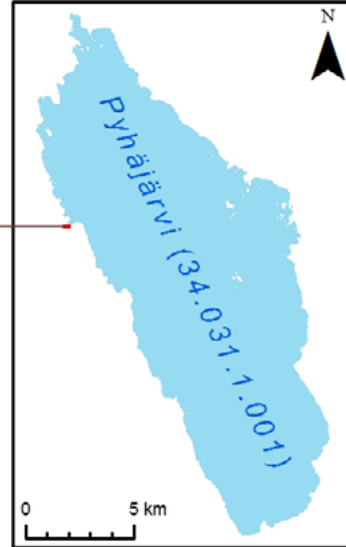
C) Luokittelu Sentinel-2-kuvasta (MMU 100 m²)



D) Luokittelu Sentinel-2-kuvasta (MMU 500 m²)



Mannilanlahti



EcoSat-luokat

Ilmaversoiset

- Järviruoko
- Leveäosmankäämi
- Järvikaisla
- Järvikorte
- Luikat

Kelluslehtiset

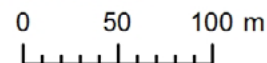
- Ulpukka
- Vesitatar
- Uistinviita
- Palpakot

Uposkasvillisuus

- Vesirutto

Muut luokat

- Avoin vesi
- Metsä
- Niityt, pellot ja muut ruohikot
- Kalliot
- Konsolidoitumattoman sedimentti
- Rakennettu ympäristö
- Pilvet ja pilvien varjot



© Pohjois-Savon ELY-keskus, MML 2019

Alkuperäinen WorldView-3-satelliittikuva: © DigitalGlobe 2019, Sentinel-2-satelliittikuva: © ESA 2019

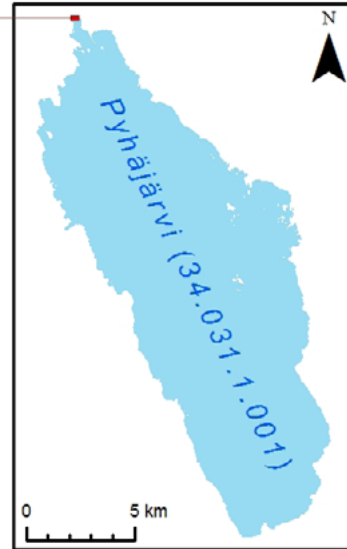
EcoSat-luokittelu: © BioBase (<https://www.biobasemaps.com/>), Navico, Inc., EOMAP GmbH & Co. KG 2019

Kuva 38. Mannilanlahden vesikasvillisuus EcoSat-menetelmällä määritettynä.

A) Droonikuvausten ortomosaikki



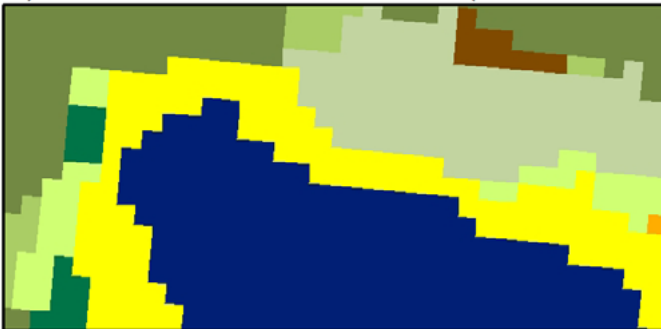
Lohiluoma



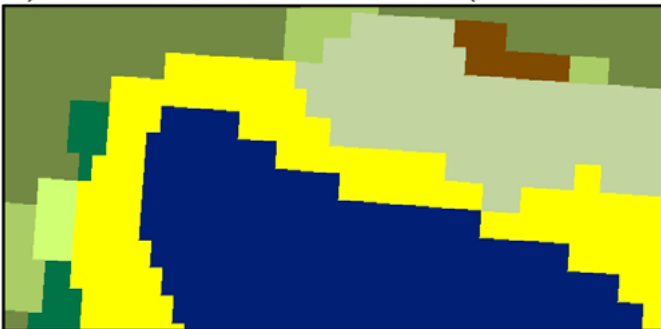
B) Luokittelu WorldView-3-kuvasta



C) Luokittelu Sentinel-2-kuvasta (MMU 100 m²)



D) Luokittelu Sentinel-2-kuvasta (MMU 500 m²)



EcoSat-luokat

Ilmaversoiset

- Järviruoko
- Leveäosmankäämi
- Järvikaisla
- Järvikorte
- Luikat

Kelluslehtiset

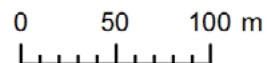
- Ulpukka
- Vesitatar
- Uistinvita
- Palpakot

Uposkasvillisuus

- Vesirutto

Muut luokat

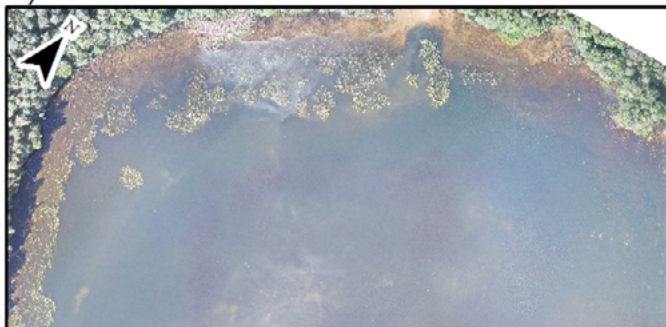
- Avoin vesi
- Metsä
- Niityt, pellot ja muut ruohikot
- Kalliot
- Konsolidoitumaton sedimentti
- Rakennettu ympäristö
- Pilvet ja pilvien varjot



© Pohjois-Savon ELY-keskus, MML 2019
 Alkuperäinen WorldView-3-satelliittikuva: © DigitalGlobe 2019, Sentinel-2-satelliittikuva: © ESA 2019
 EcoSat-luokittelu: © BioBase (<https://www.biobasemaps.com/>), Navico, Inc., EOMAP GmbH & Co. KG 2019

Kuva 39. Lohiluoman vesikasvillisuus EcoSat-menetelmällä määritettynä.

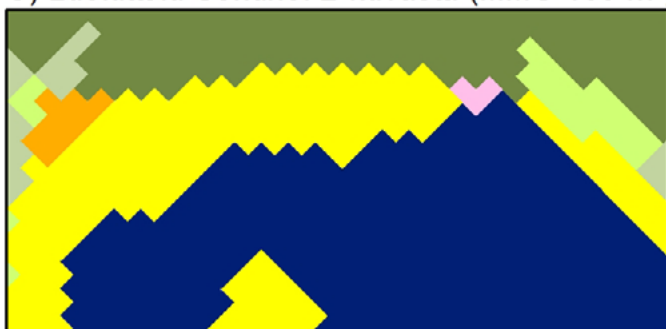
A) Dronikuvausten ortomosaiikki



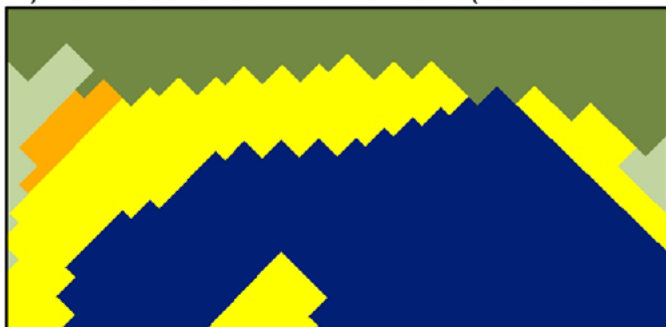
B) Luokittelu WorldView-3-kuvasta



C) Luokittelu Sentinel-2-kuvasta (MMU 100 m²)



D) Luokittelu Sentinel-2-kuvasta (MMU 500 m²)



Luvalahti



EcoSat-luokat

Ilmaversoiset

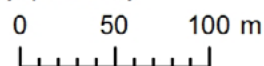
- Järviruoko
 - Leveäosmankäämi
 - Järvikaisla
 - Järvikorte
 - Luikat
- Kelluslehtiset**
- Ulpukka
 - Vesitatar
 - Uistinviita
 - Palpakot

Uposkasvillisuus

- Vesirutto

Muut luokat

- Avoin vesi
- Metsä
- Niityt, pellot ja muut ruohikot
- Kalliot
- Konsolidoitumattoman sedimentti
- Rakennettu ympäristö
- Pilvet ja pilvien varjot



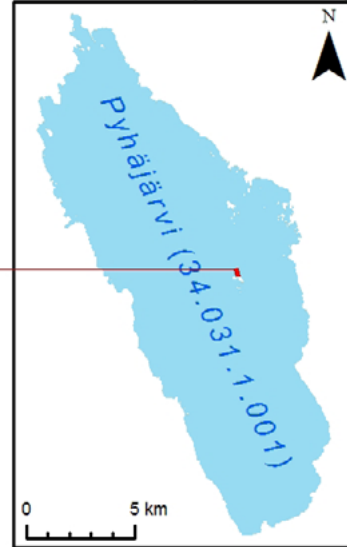
© Pohjois-Savon ELY-keskus, MML 2019
 Alkuperäinen WorldView-3-satelliittikuva: © DigitalGlobe 2019, Sentinel-2-satelliittikuva: © ESA 2019
 EcoSat-luokittelu: © BioBase (<https://www.biobasemaps.com/>), Navico, Inc., EOMAP GmbH & Co. KG 2019

Kuva 40. Luvalahden vesikasvillisuus EcoSat-menetelmällä määritettynä.

A) Droonikuvausten ortomosaikki



Kankuri (Emänkari)



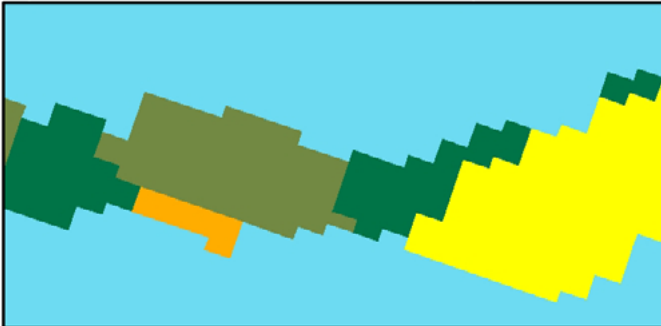
B) Luokittelu WorldView-3-kuvasta



C) Luokittelu Sentinel-2-kuvasta (MMU 100 m²)



D) Luokittelu Sentinel-2-kuvasta (MMU 500 m²)



EcoSat-luokat

Ilmaversoiset

- Järviruoko
- Leveäosmankäämi
- Järvikaisla
- Järvikorte
- Luikat

Kelluslehtiset

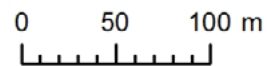
- Ulpukka
- Vesitatar
- Uistinviita
- Palpakot

Uposkasvillisuus

- Vesirutto

Muut luokat

- Avoin vesi
- Metsä
- Niityt, pellot ja muut ruohikot
- Kalliot
- Konsolidoitumattoman sedimentti
- Rakennettu ympäristö
- Pilvet ja pilvien varjot



© Pohjois-Savon ELY-keskus, MML 2019
 Alkuperäinen WorldView-3-satelliittikuva: © DigitalGlobe 2019, Sentinel-2-satelliittikuva: © ESA 2019
 EcoSat-luokittelu: © BioBase (<https://www.biobasemaps.com/>), Navico, Inc., EOMAP GmbH & Co. KG 2019

Kuva 41. Kankurin vesikasvillisuus EcoSat-menetelmällä määritettynä.

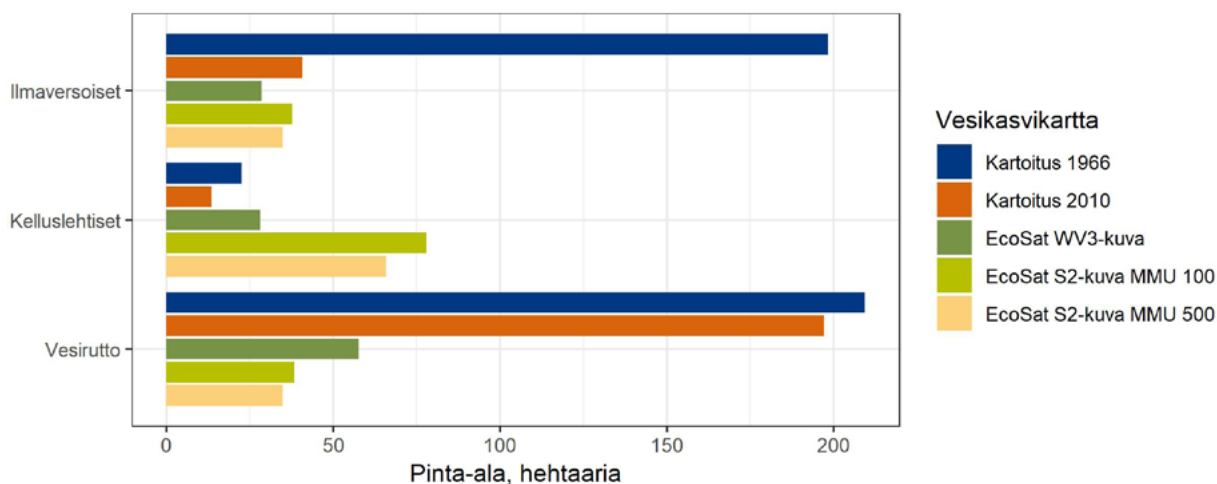
3.3. Vertailu aiempiin kartoituksiin

Kasvillisuusluokkien pinta-alojen vertailtiin aikaisempiin kartoituksiin ainoastaan niiltä alueilta, joissa ei ole kummankaan satelliittikuvan alueella pilviä ja pilvien varjoja. S2-kuvaan perustuvissa luokituksissa kapeat niemialueet luokitteuivat vesikasvillisuudeksi, joten tämän virheellisen luokittumisen huomioon ottamiseksi vertailussa rajauduttiin vielä ainoastaan alueelle, joka vuoden 2019 maastotietokannassa oli merkitty vedeksi. Rajattu alue kattoi 85 % järven pinta-alasta. Rajatulla alueella kasvillisuusvyöhykkeitä verrattiin vuosien 1966 (Huovari 1967) ja 2010 (Leka 2011) kartoitusten paikkatietoaineistoihin. Huovarin julkaisusta vyöhykkeet digitoitiin paikkatietomuotoon. Kyseisen julkaisun kartassa kasvillisuusvyöhykkeet on esitetty ainoastaan elomuotoluokittain (ilmaversoiset, kelluslehtiset, uposkasvit) pois lukien lajitasolla esitetty vesirutto (*Elodea canadensis*).

Vertailuun soveltuvalla alueella ilmaversoisten pinta-ala supistui 79 % vuosien 1966 ja 2010 välillä (kuva 42). 2010-luvulla ilmaversoinen vyöhyke on supistunut edelleen pinta-alaltaan 7–30 % (vaihteluväli eri EcoSat-luokittelujen perusteella). Näissä luvuissa ei siis ole mukana järven rantaviivan ulkopuolella olevaa vyöhykkeen kehitystä. S2-perusteiset luokittelut osoittaisivat siellä pinta-alan kasvua, WV3-perusteinen ei niinkään. Osa tästä kasvusta selittyy kuvassa 41 havaittavassa pensaiden ja puiden väärinluokittumisen järkeväksi.

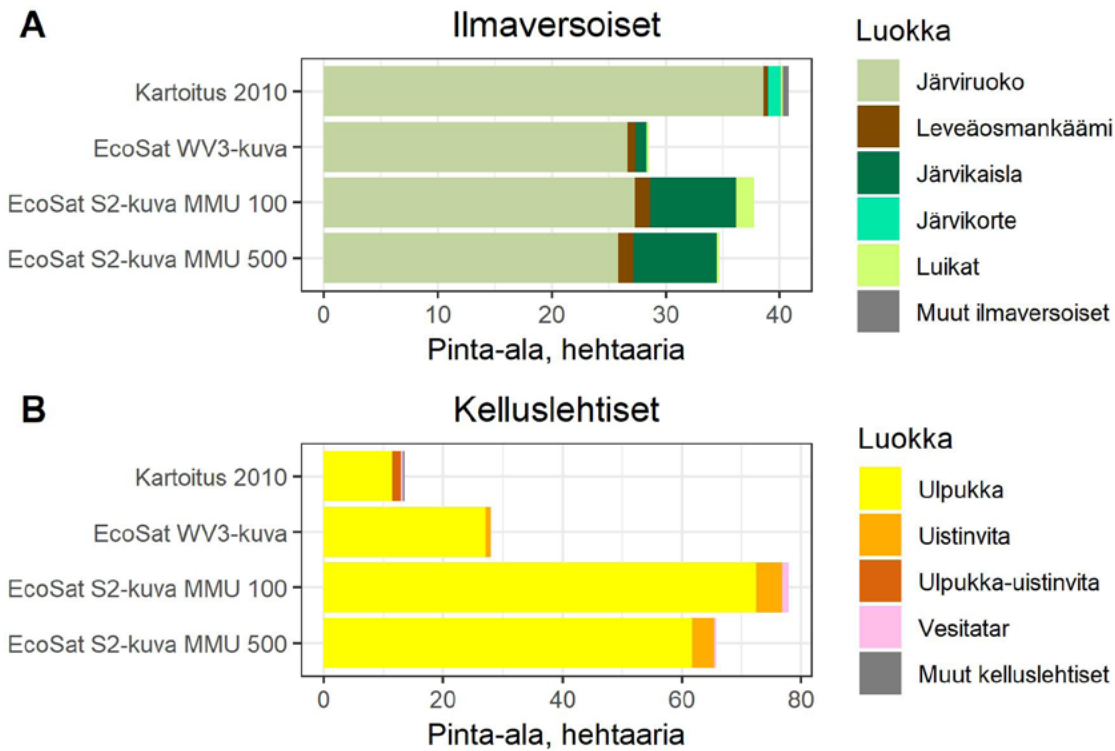
Kelluslehtisten pinta-ala supistui 40 % vuosien 1966 ja 2010 välillä, minkä jälkeen kymmenessä vuodessa pinta-ala olisi satelliittikuvatulkintojen perusteella kasvanut 108–478 % (vaihteluväli eri EcoSat-luokittelujen perusteella; kuva 43). Kartatarkastelu drooniortokuvia vasten osoittaa, että S2-perusteisissa luokituksissa kelluslehtiset kasvustot ovat spatiaalisesti liian leveitä. Tämä selittää kyseisten luokkien heikompaa käyttäjän tarkkuutta S2-perusteisilla luokituksilla (taulukko 13).

Vesiruton esiintymisalue oli vuosien 1966 ja 2010 kartoitusten välillä supistunut 6 % vertailuun soveltuvalla alueella (kuva 43). EcoSat-luokittelut viittaavat 2010-luvulla kasvustojen laajuuden supistumiseen 70–82 % riippuen luokitteluun käytetystä satelliittikuvasta ja MMU:sta. WV3-perusteisessa luokittelussa on huomionarvoista se, että Kalasaaren, Hiittenkarin ja Uusiluodon väliseltä alueelta on raakasatelliittikuvasta nähtävillä ohuita pilvien varjoja. Pilvien ja pilvien varjojen luokan sijaan alue on luokitteutunut laajasti vesirutoksi toisin kuin S2-perusteisissa luokituksissa. Vuosien välisessä tarkastelussa vesiruton esiintymisalueet eivät ole täysin vertailukelpoisia, sillä vuosien 1966 ja 2010 kartoituksissa vesiruton esiintymisalueet menivät osin päällekkäin ilmaversoisten ja kelluslehtisten vyöhykkeiden kanssa. EcoSat-luokittelussa sen sijaan segmentti voi edustaa vain yhtä luokkaa kerrallaan. Joka tapauksessa vesiruton pinta-ala ei todellisuudessa ole vähentynyt niin dramaattisesti kuin edellä esitetyt vertailut osoittavat. Vesirutto esiintymillä on satelliittikuvissa kovin samanlaiset



Kuva 42. Ilmaversoisen ja kelluslehtisen kasvillisuuden sekä vesiruton pinta-alat vuosina 1966, 2010 ja 2019 Säkylän Pyhäjärvellä niiltä alueilta, joissa vuoden 2019 satelliittikuvissa ei ollut pilviä tai pilvien varjoja. Vuoden 2019 tulokset ovat eritelty sen mukaan, että mitä satelliittikuvaa ja MMU:ta on käytetty.

spektriset ominaisuudet kuin avoimella vedellä, joten EcoSat-menetelmällä esiintymiä ei pystytä havaitsemaan sitä tehokkaasti. Aiemmissä tutkimuksissa vedenalaista kasvillisuutta on tutkittu eri menetelmillä, jopa sukeltamalla.



Kuva 43. Ilmaversoisen ja kelluslehtisen kasvillisuuden pinta-alat lajeittain vuosina 2010 ja 2019 Säkylän Pyhäjärvellä niiltä alueilta, joissa vuoden 2019 satelliittikuvissa ei ollut pilviä tai pilvien varjoja. Vuoden 2019 tulokset ovat eritelty käytetyn satelliittikuvan ja MMU:n mukaan.

4. Johtopäätökset ja jatkokehityskohteet

4.1. Maastotiedon keruu ja muu menetelmän käyttäjältä vaadittu toiminta

Droonikuvaamisella pystytään keräämään aineistoa tehokkaasti myös vaikeammin kuljettavilta alueilta. Kuvauskoptereiden käytössä on järviympäristössä tiettyjä käytännön hankaluuksia. Maastotöissä käytössä olleessa veneessä oli keulassa alusta, jonka päältä droonin pystyi nostamaan ilmaan varovasti. Vaikka vene oli tiukasti ankkuroituna matalaan veteen, vene voi lentotyön aikana liikkua ja droonin laskeutuminen tulee ohjata manuaalisesti. Pilotilta vaaditaan siis hyvää rutiinia droonin ohjaamisessa.

Lentotoiminta on tyypillisesti VLOS-toimintaa, jossa pilotilla on koko lennon ajan näköyhteys ilmalukseen. VLOS-toiminta ei vaadi ilmailuviranomaiselta haettavaa ilmatilavarausta. VLOS-toiminta rajoittaa lentotyön toimintasädettä lennätyspaikasta. Pienempikokoiseen Mavic-drooniin näköyhteys ulottui noin 500 metrin päähän ja suurempikokoiseen Phantom-drooniin noin 800 metrin päähän.

Kun jatkossa tehdään kasvillisuuskartoituksia sekä käymällä kohteessa *in situ* että kuvaamalla droonilla, on hyödyllistä tehdä droonikartoitukset ensin Live Map -ominaisuutta hyödyntäen. Tällöin RPAS-järjestelmän näyttölaitteelle saadaan reaaliaikainen kartta, jota voidaan hyödyntää jo maastossa kasvillisuudeltaan mielenkiintoisissa paikoissa käyntiin. Pyhäjärven maastokampanjassa jäi esimerkiksi saraikkokasvustojen maastototouden keruu vähälle huomiolle, koska saraikkoja ei havaittu veneestä tai rantapisteistä. Drooni-ilmakuvakartoissa näkyy mahdollisesti saraikkoon viittaavaa kasvustoa, mutta olisi ollut tarpeen todentamassa se paikan päällä tai lähempää otetuilla viistokuvilla. Osin tämän kasvillisuustyyppin jääminen vähälle huomiolle oli myös maastotöiden suunnittelussa ollut epäkohta.

Maastototuusaineiston keräämisen kentällä parhaaksi käytännöksi osoittautui drooni-ilmakuvauksen lisäksi itse luodun ArcGIS Online palvelun käyttäminen mobiililaitteilla. Se oli käytännössä tuottava ja käytännöllinen tapa aineiston tallentamiseen, vaikka vaatikin ennakkovalmisteluja toimistolla. Palveluntuottajan suosittelema metodi maastototouden keräämiseksi olisi Navicon edustamien

luotainten hyödyntäminen maastototuuksien tallentamisessa. Luotainlaitteen käyttö navigointi- ja tallennuslaitteena vaatisi kuitenkin käytännössä sitä, että veneellä pystyttäisiin liikkumaan kunkin nimettävän segmentin keskipisteeseen tai lähelle sitä. Tiheissä kasvustoissa ja lähellä rantaa tämä on käytännössä mahdotonta. Kyseessä on luonnollisesti valmistajan halu hyödyntää omia tuotteitaan prosessissa.

Maastototouden kerääminen oli joka tapauksessa suhteellisen työlästä: työpari vietti järvellä kolme kokonaista työpäivää ja aineiston jatko-prosessointi toimistolla vei noin neljä työpäivää (mukaan lukien droonikuvien ortomosaiכון vaatimat työvaiheet). Kyse oli kuitenkin kokeilu-luonteisesta toiminnasta tässä hankkeessa. Jatkossa maastotyöt olisi hyvä suunnitella vieläkin tarkemmin, jotta kaikista kartoitettavista luokista tulisi nimettyjä segmenttejä vähintään kymmenen kappaletta.

Geolokaatiovirhe lisäsi käyttäjältä tarvittavaa työpanosta ja lisäsi ylimääräisen työvaiheen. Satelliittikuva-aineisto sekä segmenttiaineisto olivat kooltaan isoja ja niiden käsittely paikkatietojärjestelmässä kankeaa. Virheen korjaamista maastotiedon keräämisjärjestelmiä varten segmenttiaineistosta rajattiin pienempi osa, jolle tehtiin aikaisemmin mainittu noin 26 metrin uudelleenaseointi. Keruujärjestelmien tehokkaampaa käyttöä varten tiedostokokojen supistuminen oli hyvä asia, mutta vaarana on, että kaikilta maastossa esiin tulevilta mielenkiintoiseksi osoittautuvilta alueilta ei pystytä keräämään tietoa.

4.2. Kustannukset

EcoSat-prosessointi 182 km² tutkimusalueelta Pyhäjärvellä maksoi WV3-kuvalla noin 12 000 euroa ja S2-kuvalla noin 5 000 euroa. Arkistokuville tehty prosessointi on hivenen edullisempaa, mutta tässä tapauksessa kyseessä oli kalliimpi tasking-tyyppinen tehtävänanto, jossa prosessointi sovittiin tehtäväksi aikavälin 15.7.-30.8.2019 sellaisen päivän WV3-kuvalla, jossa tutkimusalueesta korkeintaan 15 % olisi pilvien peitossa. Mikäli pilvipeiton määrää haluttaisiin edelleen vähentää, kustannukset nousisivat. Sentinel-2-kuvien käyttö aineistoläh-

teenä vähentää menetelmän soveltamisen kustannuksia olennaisesti, mutta samalla lopputuotteen eli kasvillisuuskartan tarkkuus heikkenee selvästi, kuten tehdyt tarkastelut osoittavat.

Menetelmää voi pitää varsin kalliina, kun varsinaisen ostopalvelun (satelliittikuvat, tulkinta, aineistojen toimitus) lisäksi menetelmä vaatii käyttäjältä melko merkittävää omaa työpanosta maastotuusaineiston keräämisessä. Tässä hankkeessa käyttäjien työpanos oli suurempi kuin sen voitaisiin olettaa olevan, mikäli menetelmään laadittaisiin suomalaisen järviympäristön parhaiten soveltuvat menettelytapaohjeet ja rutiinit. Palvelu on vielä osin kehitysasteella ja vaatii mm. aktiivista yhteydenpitoa palveluntarjoajiin.

Verrattuna perinteiseen lajistokartoitukseen esimerkiksi päävyöhykelinjamenetelmällä (Kuoppala ym. 2008) kustannukset ovat selvästi suuremmat suurenkin järven ollessa kyseessä. Pyhäjärven kokaisen järven lajistokartoituksen toteuttaminen ympäristöhallinnon seurantaohjeiden (Järvinen ym. 2019) mukaan (18 päävyöhykelinjaa) voi arvioida maksavan raportointeeneen 5000–6000 euroa. Suora kustannusvertailu eri menetelmien välillä ei tietenkään ole täysin mielekäästä, sillä menetelmät tuottavat sisällöltään ja kattavuudeltaan varsin erilaisia tietoja.

4.3. Menetelmän hyödynnettävyys

Valta-Hulkosen ym. (2003) tutkimuksessa tulkittiin Onkiveden pohjoispuolella kuvattuja väri-infrailmakuvia kahdella eri menetelmällä. Visuaalisesti tehdyssä luokittelussa, jossa alue luokiteltiin kahdeksaksi pääosin lajitasolla olevaksi luokaksi, kokonaistarkkuus oli 81 % (ilman uposlehtisten luokkaa 90 %). Digitaalisesti tehdyssä luokittelussa, jossa suurvesikasvillisuus luokiteltiin elomuodon tai fenotyyppin ja kasvuston peittoasteen mukaan kudeksi luokaksi, kokonaistarkkuus oli 83 %.

Hussonin ym. (2016) pohjoisruotsalaisella Östträsketin järvellä tehdyssä tutkimuksessa taas viisi koealuetta (koko 100 x 100 metriä) kuvattiin kiinteäsiipiseen miehittämättömään ilma-alukseen kytketyllä tosivärikameralla. Alueet luokiteltiin objektipohjaisesti Random Forest -menetelmällä seitsemäksi dominoivaksi valtalajiluokaksi. Luokitteluiden kokonaistarkkuudet olivat 52–69 %.

Morales-Barqueron ym. (2019) kirjallisuuskatsauksessa vertailtiin kaukokartoitusaineistoista tehtyjä maanpeite- ja vedenpohjapeiteluokitteluita. Katsauksessa tarkastelluissa 92 maisematason (tutkimusalue alle 8000 km²) tutkimuksessa, jotka oli julkaistu vuosina 1998–2017, luokittelun keskimääräinen kokonaistarkkuus oli 76,8 % (keskihajonta ±14,8 %). Katsauksen kirjoittajat huomauttavat, etteivät tutkimukset ole täysin vertailukelpoisia, koska esimerkiksi otannan spatiaaliset yksiköt (muusta kuva-aineistosta katsottu pikseli tai pikseliklusteri; maastosta kerätty GPS-piste tai koealue) ja otantamenetelmät (otokset, näytteet) eroavat. Lyonsin ym. (2018) tutkimus osoitti, että kokonaistarkkuus voi poiketa jopa 40 % opetus- ja validointiosien valinnassa tapahtuvan satunnaisvaihtelun takia.

Edellä esitettyihin tutkimuksiin vertaillen WW3-kuvalle EcoSat-menetelmällä tehty luokittelu oli tarkkuudeltaan kaukokartoitustutkimuksen keskitasoa (kokonaistarkkuus opetusosalla 74 %, validointiosalla 75 %). S2-kuvalle tehdyissä luokittelussa tarkkuustaso oli alempi.

Hankkeessa pyrittiin vertailemaan tuotettuja vesikasvikarttoja myös vanhoihin kartoitustuloksiin, mutta vertailua ei voida pitää erityisen luotettavana, koska eri aikoina käytetyt menetelmät vaihtelevat. Pyhäjärven ilmaversoisen kasvillisuuden radikaali väheneminen 1960-luvun tilanteesta on dokumentoitu jo aiemmin. Nyt saadun kartoitustuloksen perusteella vähentyminen olisi jatkunut. Suurin muutos olisi tapahtunut kelluslehtisessä kasvillisuudessa, joka olisi lisääntynyt merkittävästi viimeisen kymmenen vuoden aikana. Vuosien 2010 ja 2018 päävyöhykelinjatutkimusten aineisto ei kuitenkaan erityisesti tue tätä, joten kyse lienee kartoitusmenetelmien erilaisuudesta johtuvasta virhepäätelmästä. Sama pätee uposkasvillisuuteen, jossa menetelmien väliset erot lienevät vielä merkittävämpiä. Eri menetelmillä tehtyjen kartoitusten tulosten vertailusta ei voidakaan tehdä kovin vahvoja johtopäätöksiä.

Saatujen kokemusten perusteella EcoSat-menetelmä voi olla käyttökelpoinen myös Suomessa esim. yksittäisissä suurissa järviä koskevissa rantavyöhykkeen erillistutkimuksissa, joissa on tarpeen selvittää tarkemmin eri elomuotojen tai lajien kasvustoja laajuutta. Perinteiseen maastokartoituksen ja esimerkiksi ilmakuvatutkimuksen yhdistävään vesikasvikartoitukseen menetelmä voi tarjota hyvän vaihtoehdon. Järvien vesikasvillisuuden rutiiniseurantoihin menetelmästä ei kuitenkaan ole apua korkeiden kustannustensa vuoksi.

5. Lähteet

- Bindel, M. (2019). Emergent/Marsh and Floating-leaf vegetation mapping from very high-resolution satellite imagery. Seminaariesitys. 27.2.2019.
- BioBase (2018). <https://blog.biobasemaps.com/2018/08/15/training-ecosat-vegetation-classifications-user-tips>, 15.8.2018.
- BioBase (2019). <https://blog.biobasemaps.com/2019/04/11/composition-algorithm-improved/>, 11.4.2019.
- Huovari, P. (1967). Satakunnan Pyhäjärven vesikasvillisuuden pääpiirteet. Tie- ja vesirakennushallitus. Turku, 25.5.1967. Moniste 10 s., kartakkeet, liitteet ja valokuvat (168 kpl).
- Husson, E., F. Ecke, H. Reese (2016). Comparison of Manual Mapping and Automated Object-Based Image Analysis of Non-Submerged Aquatic Vegetation from Very-High-Resolution UAS Images. *Remote Sensing* 8(9):724.
- Järvinen, M., J. Aroviita, S. Hellsten, S. M. Karjalainen, M. Kuoppala, K. Meissner, H. Mykrä, K.-M. Vuori (2019). Jokien ja järvien biologinen seuranta – näytteenotosta tiedon tallentamiseen. <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BB948034F-7F9D-4EAB-A153-92FA2DDEDBBE%7D/29725> Versio 6.9.2019.
- Kalpa, A. (1999). Säkylän Pyhäjärven rantakasvillisuus kesällä 1997. Alueelliset ympäristöjulkaisut 121. Lounais-Suomen ympäristökeskus. 58 s.
- Kuoppala, M., S. Hellsten, A. Kanninen. (2008). Sisävesien vesikasviseurantojen laadunvarmennus. Suomen ympäristö 36/2008. 93 s.
- Leka, J. (2011). Säkylän Pyhäjärven vesikasvillisuus vuonna 2010. Pyhäjärvi-instituutin julkaisu B: 22. 37 s.
- Lyons, M. B., D. A. Keith, S. R. Phinn, T. J. Mason, J. Elith. (2018). A comparison of resampling methods for remote sensing classification and accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment* 208, 145–153.
- Maristo, L. (1941). Die Seetypen Finnlands auf floristischer und vegetationsphysiognomischer Grundlage. *Annales Botanici Societatis Zoologicae-Botanicae Fennicae Vanamo* 15(5), 1–312.
- Morales-Barquero, L., M. B. Lyons, S. R. Phinn, C. M. Roelfsema. (2019). Trends in Remote Sensing Accuracy Assessment Approaches in the Context of Natural Resources. *Remote Sensing* 11(19): 2305.
- Tamminen, K. (1978). Pyhäjärven kasvillisuuden ilmakuvioiden tulkinta. Moniste 2 s. Turku.
- Toivola, M. (2009). Säkylän Pyhäjärven uposkasvillisuuden kartoitus. Pyhäjärvi-instituutti. Moniste 20 s. ja liitteet.
- Valta-Hulkkonen K., S. Partanen & A. Kanninen (2003). Remote Sensing as a Tool in the Aquatic Macrophyte Mapping of a Eutrophic Lake: a Comparison Between Visual and Digital Classification. Conference: Scan-GIS'2003 - The 9th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science, 4–6 June 2003, Espoo, Finland - Proceedings.

OSA IV: Vesikasvitulkinta Picterra-menetelmällä

Pohjois-Savon ELY-keskuksella tutustuttiin kevään 2020 aikana sveitsiläiseen kaupalliseen Picterra-kaukokartoitustuotteeseen (Internet-osoite: <https://picterra.ch/>). Selainpohjaisesti käytettävää ja koneoppimisalgoritmeja hyödyntävää tuotetta mainostetaan muun muassa rakennusten, rikkakasvien ja eläinten määrittämiseen kaukokartoitusaineistoista. Picterralla tehtiin pienimuotoiset testit ranta- ja vesikasvillisuusvyöhykkeen määrittämiseen kansallisen ilmakehuohjelman väri-infrakuvasta ja ruovikkojen määrittämiseen droniortomosaikista.

Picterra tarjoaa kuvaruudigitointiin perustuvan helpokäyttöisen tavan määriteltävän luokan opettamiseen kuvasta: käyttäjä piirtää ensin kuvaan opetusalueen ja tämän jälkeen polygonikuvioita opetusalueen sisällä olevista luokiteltavista kohteista. Manuaalisesti tehtävän opetusvaiheen jälkeen Picterra laskee ilmaisimen (detector), jolla tulkitaan kuvan loppualue tai aivan erillinen kuva. Huomattavaa Picterrassa on, että ilmaisimella voidaan tehdä vain yhdelle luokalle kerrallaan. Picterralla tehtävää tulkintaa voidaan tehdä myös georeferoimattomille valokuville.

Ensimmäisessä testissä tutkittiin väri-infrakuvasta tehtävää ranta- ja vesikasvillisuusvyöhykkeen määrittämistä. Opetettavana kuvana oli Pienen Vehkalahden (järvitunnus 04.612.1.014) pohjoisosa vuoden 2019 ilmakehässä (kuvan koko 143,4 hehtaaria). Kuvaa oli rajattu Ranta10-aineiston järvi- ja vesikasvillisuusvyöhykkeen alueelta. Järven vesikasvillisuus on monimuotoista, joten opetettavia alueita tarvittiin runsaasti kaikenlaisen kasvillisuuden huomioon ottamiseksi. 0,2–1,5 hehtaarin kokoisia opetusalueita kertyi lopulta 17 kappaletta. Opetusalueiden määrittämiseen kului aikaa 1 tunti, joka sisälsi ilmaisimen toiminnan testaamista samaan kuvaan piirretyillä testialueilla. Aika on tällä järvellä kutakuinkin sama kuin ILMAVERSO-menetelmällä, sillä radiometrisen häiriöiden takia järvi tuli jakaa kolmeen osaan ja kullekin osalle tuli määrittää omat kynnyksensä.

ILMAVERSO-menetelmällä kasvillisuusvyöhykkeen pinta-ala oli 34,2 hehtaaria, kun taas Picterralla pinta-ala oli 27,7 hehtaaria. Visuaalisesti arvioiden Picterran lopputulos oli laadukas (kuva 44). Palpakkokasvustot ja taustasta heikosti erottuva

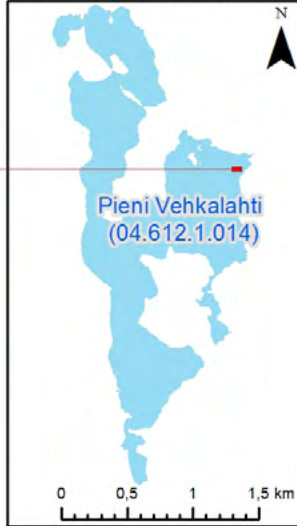
harva vesikasvillisuus eivät sisällyneet Picterran luomaan vyöhykkeeseen, mikä selittää pienemmän pinta-alan. Todettakoon, että Picterra ei pystynyt luokittelemaan rantapuuston langettaman varjon alle jäävää kasvillisuutta, vaan varjoista johtuva virhe on ILMAVERSO- ja Picterra-meneteimillä sama.

Pienellä Vehkalahdella opetettua mallia sovellettiin myös Savonjärven (järvitunnus 04.511.1.030) ilmakehulle, jonka Blom Kartta oli kuvannut Suomen Metsäkeskuksen tilauksesta vuonna 2015. 81,7 hehtaarin kokoiselta järveltä ILMAVERSO-menetelmällä kasvillisuusvyöhykkeen pinta-ala tuli 12,1 hehtaaria, kun taas Picterralla vyöhykkeeksi tuli vain 4,6 hehtaaria.

Toiseksi Picterralla testattiin ruovikkojen määrittämistä Säskylän Pyhäjärven droniortomosaikkeista (kts. raportin osa 3). Opetettavana alueena toimi DJI Phantom 4 RTK -dronilla kuvattu Lohiluoman pohjoisosa ja sovellettavana alueina toimivat samalla laitteella kuvatut Lohiluoman eteläosa, Hautteenpelto ja Krapan saari Emänkarin eteläpuolelta. Visuaalisesti arvioiden Picterra pystyi tunnistamaan niin valossa kuin varjossa olevat ruovikot, mutta virheellisiä positiivisia tunnistamisia sijoittui kaislikoihin, varjossa oleviin osmankäämikasvustoihin ja lehtipuihin. On kuitenkin huomattava, että opetettavalla alueella ei ollut kaislikoita, joten paremmalla suunnittelulla ruovikkojen ja kaislikoiden ero on opetettavissa.

Picterran hyödyntämistä kannattaa tutkia jatkosakin. ILMAVERSO-menetelmän rajoitteisiin kuuluu se, ettei yhdellä järvellä määritettyjä kynnyksarvoja voi soveltaa suoraan toiselle. Olisikin kiinnostavaa tietää, voisiko yhdellä tai parilla järvellä tehtyä opetustyötä laajentaa onnistuneesti edes saman kuvaustyön tehneen tahon saman vuoden kuville. Picterran kallis kultalisenssitaso (645 Yhdysvaltojen dollaria kuussa, tilanne syyskuu 2020) mahdollistaa myös ohjelmointirajapinnan, jolloin Picterra-alustalle voidaan tuoda ja tulkita kuvia ohjelmallisesti. Koska ILMAVERSO- ja Picterra-menetelmällä tuotetuissa pinta-aliatiedoissa on kuvan 44 mukaisesti eroa, mahdollisesti Picterra-menetelmällä tulkituille järville ei voida soveltaa raportin ensimmäisessä osassa esitettyjä tilanarvioinnin tilastollisia malleja, vaan ne vaativat oman mallikehityksensä.

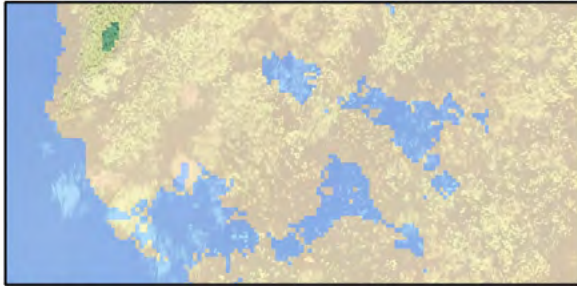
A) Kansallisen kuvausohjelman ilmakekuva, 16.7.2018 **Asikkalanlahti**



B) Drooniortomosaikki, 1.8.2019

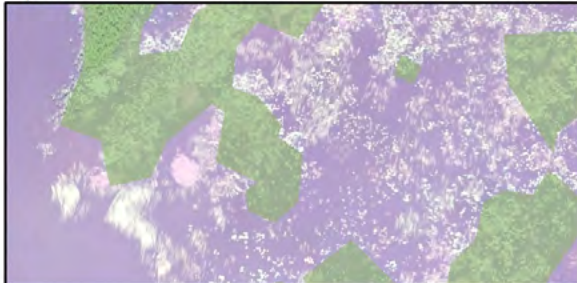


C) Ilmakuvatulkinta ILMAVERSO-menetelmällä, taustalla drooniortomos.

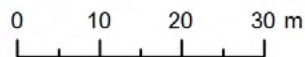


- rantakasvillisuus
- vesikasvillisuus
- avoin vesi

D) Ilmakuvatulkinta Picterra-menetelmällä, taustalla drooniortomosaikki



- ranta- ja vesikasvillisuus



© Pohjois-Savon ELY-keskus
 Ilmakekuva ja indeksikartta © MML 2020
 Picterra-tulkinta: © Picterra SA (<https://picterra.ch>) 2020

Kuva 44. Ilmakekuva ja drooniortomosaikki sekä ilmakekuvatulkinnat ILMAVERSO- ja Picterra-menetelmillä Pieneen Vehkalahteen kuu-
 luvalta Asikkalanlahdelta.

Yhteenveto

Kansallisen kuvausohjelman ilmakuvista tehtävän vesikasvillisuustulkinnan menetelmäkokonaisuus tulkintaprosesseineen ja siihen liittyvine tilanarvioinnin menetelmineen on tämän hankkeen myötä (osa 1) valmis ja sovellettavissa humusjärville. Käytännön haasteita aineiston tuottamisessa tällä menetelmällä kuitenkin edelleen on, sillä pääasiassa ilmakuvissa olevien radiometrinen häiriöiden takia vain noin puolessa tässä hankkeessa tutkittaviksi valituista järivistä pystyttiin lopulta tekemään onnistunut kasvillisuustulkinta. Onnistuneistakin tulkinnoista 74 prosentissa jouduttiin käyttämään työläämpää menetelyä, jossa järvi jaetaan erikseen tulkittaviin osa-alueisiin. Kansallisen kuvausohjelma uusien aineistojen parilta viime vuodelta ei ole osoittautunut laadultaan paremmaksi tulkintamenetelmän soveltamiseen. Kuvausohjelmassa kesäkuvausvaukset voivat sopivien sääolosuhteiden sattuessa ajoittua jo alkukesään, joka ei ole sopiva ajankohta vesikasvillisuuden runsauden kartoittamiseksi; näin tapahtui esimerkiksi vuosina 2018 ja 2019, jolloin kesäkuvausvaukset painottuivat jo kesäkuulle. Toisaalta kansallisen kuvausohjelman sykli tulee tihtymään viidestä vuodesta kolmeen, joten tulkintoihin käyttökelpoisten ilmakehän aineiston määrä on kasvussa. Vaikka kuvausohjelman kattavuus on teoriassa hyvä, nämä käytännön hankaluudet rajoittavat mahdollisuuksia järvi-kohtaiseen tarpeeseen perustuvaan aineiston hankintaan.

Avoimesti saatavilla olevat Sentinel-2-kaksosatelliittien MSI-instrumentilla otetut kuvat mahdollistavat ajallisesti kattavamman aineistolähteen kartoittamista varten. Vaikka satelliittikuvien spatiaalinen tarkkuus on vuosien mittaan parantunut, S2-kuvien 10 metrin maastoresoluutio on edelleen lähtökohtaisesti suuri Suomen järvien kapeiden littoraalivyöhykkeiden kartoittamiseen. S2-kuvien hyödyntämistä rajoittaa myös vuoden 2018 ja 2019 kuvissa havaittava geolokaatiovirhe. Vaikka kynnystämistekniikalla tehdyt tulkinnot onnistuivat tunnuslukujen perusteella kohtalaisesti, eivät lopputulokset karttatarkastelussa vaikuta mielekkäiltä. Automatisoidumpien vesikasvitulkintojen teko ei vaikuta tämän selvityksen perusteella kovinkaan suoraviivaiselta, jos lainkaan mahdolliselta. Vuoden 2020 S2-kuvien perusteella vaikuttaa, että visuaalisesti arvioiden geolokaatiovirheet ovat pienenty-

neet. Jatkotutkimus suuremmalla ja alueellisesti kattavammalla otoskoolalla sekä tarkentuneemmalla tutkimusasetelmalla vahvistaisi käsitystä kynnystekniikalla tehtävien tulkintojen potentiaalista. Muita menetelmällisesti kehittyneempiä tulkintavaihtoehtoja voi olla jatkossa ajankohtaista tutkia.

EcoSat-menetelmällä vesikasvillisuuden lajituksen tulkintatarkkuus on kaukokartoitustutkimukselle tyypillistä keskitasoa, kun aineistona on kaupallinen WorldView-3-satelliittikuva. Kaupallinen tulkintaprosessi kalliilla kuva-aineistoilla nostaa kustannukset toistasataa neliökilometriä suurella alueella (kuten esimerkkikohteemme Säkylän Pyhäjärvi) kuitenkin kymmeniintuhansiin euroihin, joten menetelmästä ei ole järvien vesikasvillisuuden rutiiniseurantoihin menetelmäksi, vaan se soveltuu lähinnä yksittäisiin hankkeisiin.

Koneoppimismenetelmiin perustuva kaupallinen Picterra-tuote tuotti lupaavia tuloksia ilmakuvien vesikasvitulkinnan alustavissa testauksissa, joten tuotteen hyödyntämistä kannattaa tutkia lisää ja jatkaa kokeiluja.

Tämän hankkeen kokemusten perusteella luontevin jatkotoimenpide olisi ELY-keskusten pintavesien seurantatyössä tehtävä ILMAVERSO-tulkintojen tuottaminen isommalle joukolle järviä. Aineistoa voitaisiin koota henkilöresurssien puitteissa joko omana työnä tai ostaa tulkintaa palveluna hankkeessa luodun menetelmäohje- ja työkalukokoelman tuella. Tämän avulla saataisiin lisää aineistoa, jolla pystyttäisiin validoimaan luotuja tilastollisia malleja ja kehittää menetelmää edelleen avuksi käytännön vesikasvillisuuden luokittelutyöhön. Myös kokeiluja muilla aineistolähteillä ja tulkintamenetelmillä, etenkin Picterra-tuotteella, kannattaa jatkaa.

Järvien vesikasvillisuuden tilanarvioinnin ja siihen liittyvän kaukokartoituksen menetelmäkehityksen suhteen tulee huomata, että eri menetelmillä tuotetuissa kasvillisuustulkinnoissa on aina eroja. Projektissa kehitetty tilanarvioinnin menetelmä on lähtökohtaisesti toimiva ainoastaan ILMAVERSO-menetelmällä tulkittavan aineiston kanssa. Näin ollen muilla aineistolähteillä tai tulkintamenetelmillä tuotetulle aineistolle tulee kehittää omat tilastolliset mallinsa tilanarviointia varten ja mallintaminen vaatii lisäresursseja.

Liitteet

Liite a Tulkinta-avain vesikasvillisuuden tunnistamiseen kansallisen ilmakuvausohjelman väri-infrakuvista.

Vasemman yläkulman ortokuvakartta on mittakaavassa 1:1000. Ortokuvien symboliikka-asetukset ovat ArcMapin vakioasetusten mukaiset:

- Stretch Type: Percent Clip
- Percent Clip Minimum: 0,5
- Percent Clip Maximum: 0,5
- Apply Gamma Stretch; 1, 1, 1

Ortokuvakartan keskellä oleva oranssi ympyrä esittää pystykuvan keskipistettä, jonka koordinaatit ETRS-TM35FIN -järjestelmässä ovat kartan yläpuolella.

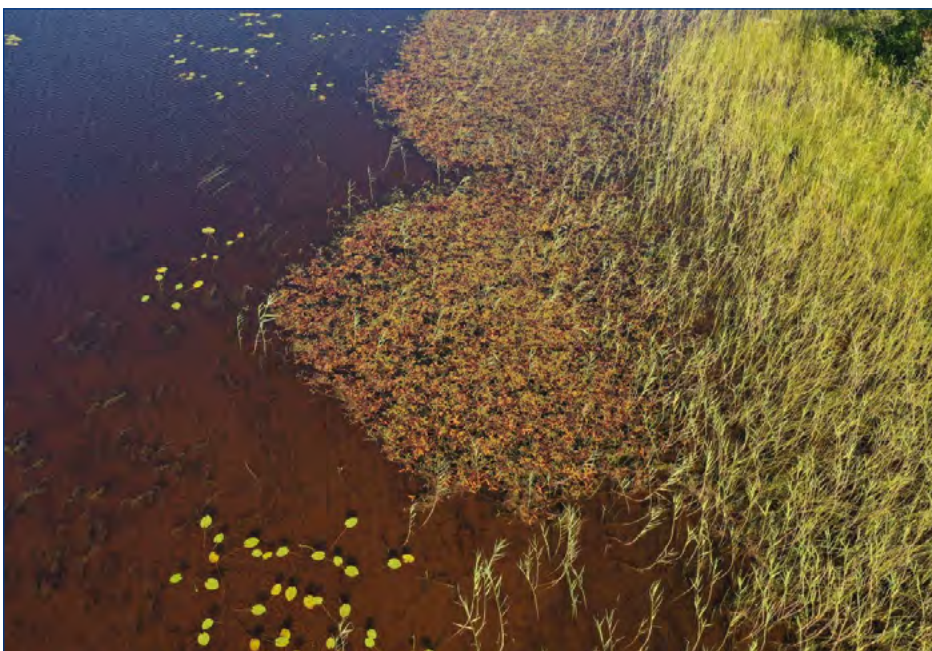
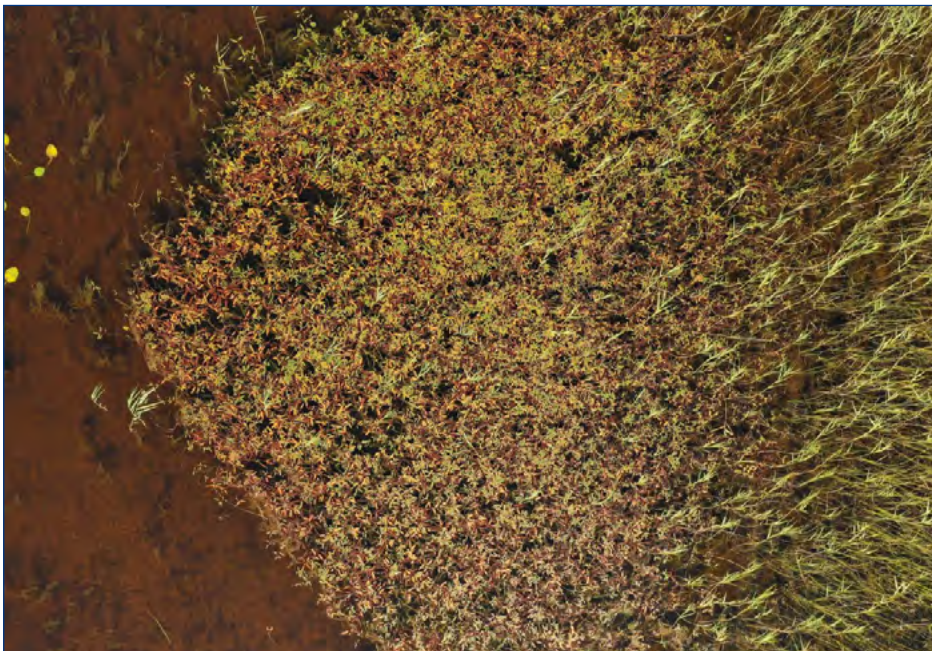
Sivun keskellä esitettävä pystykuva ja alalaidassa esitettävä viistokuva on kuvattu 10 metrin korkeudesta. Ne on kuvattu kameran suunta pohjoiseen päin. Ortokuvan keskikohta ei kaikissa viistokuvissa kohdistunut keskelle.

X=565 930, Y=6 973 332



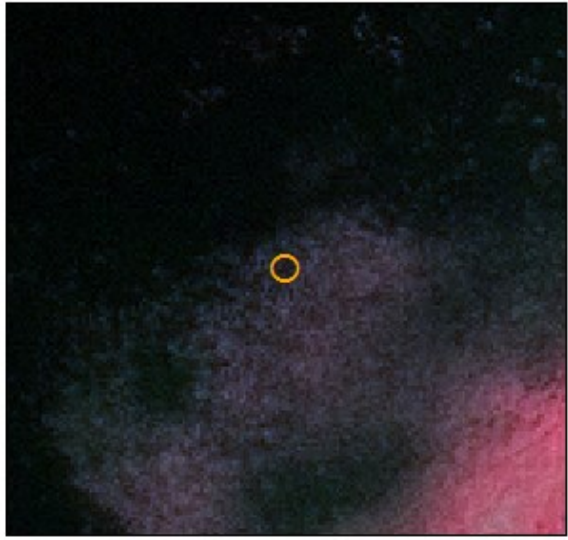
Kuvan keskipisteen kasvuston muodostavat

- Uistinviita (*Potamogeton natans*)
- Järviruoko (*Phragmites australis*)

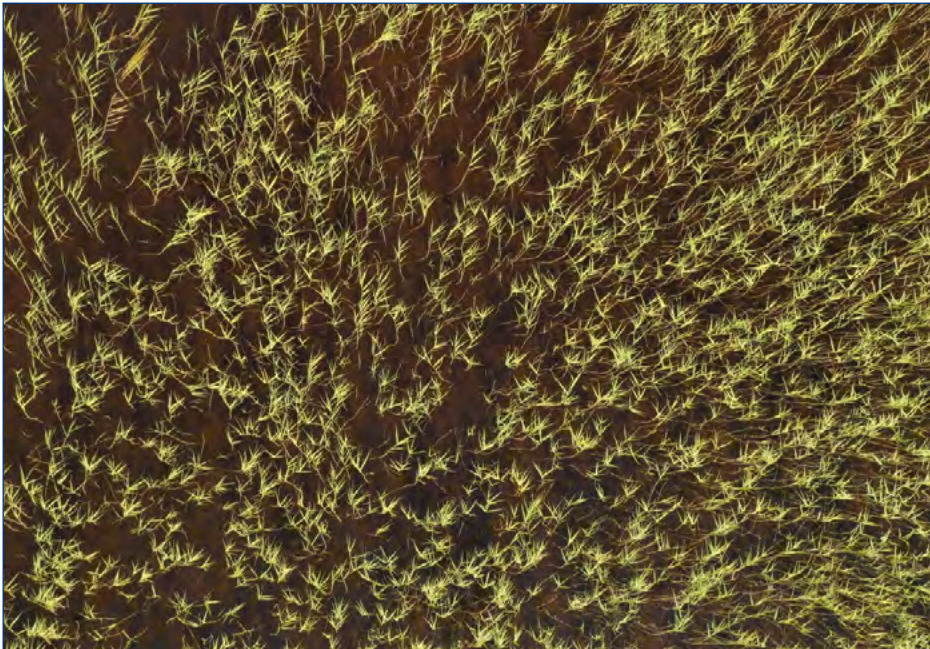


- Kuvauspaikka: Tuusjärvi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 28.8.2019

X=565875, Y=6973281

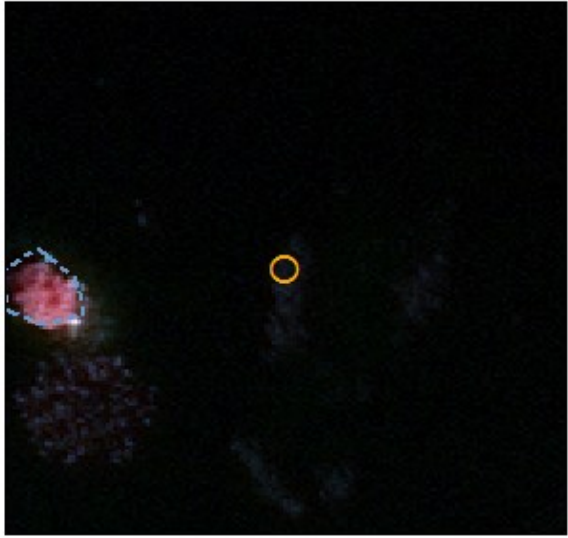


- *Phragmites australis*



- Kuvauspaikka: Tuusjärvi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 28.8.2019

X=565823, Y=6973387

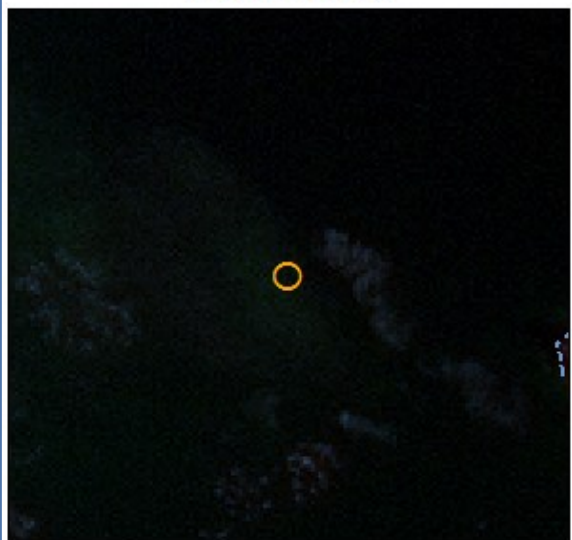


- Palpakko (*Sparganium sp.*)

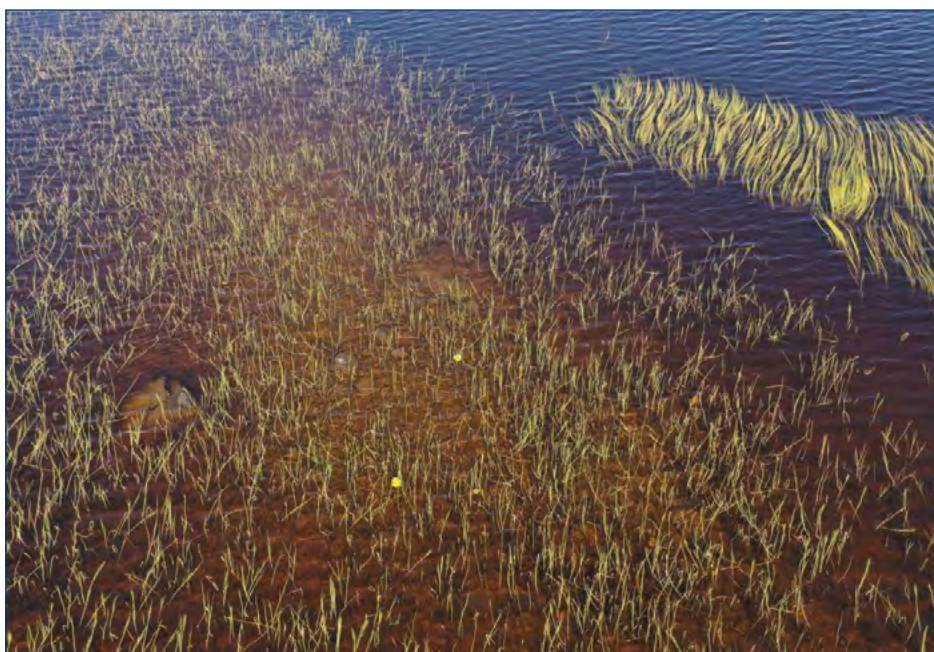


- Kuvauspaikka: Tuusjärvi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 28.8.2019

X=565 746, Y=6 973 396

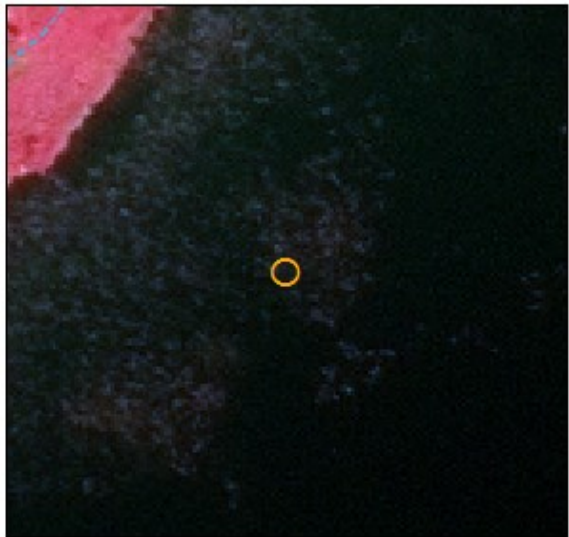


- Nuottaruoho (*Lobelia dortmanna*)
- Matala kivikkopohja
- Sparganium sp.

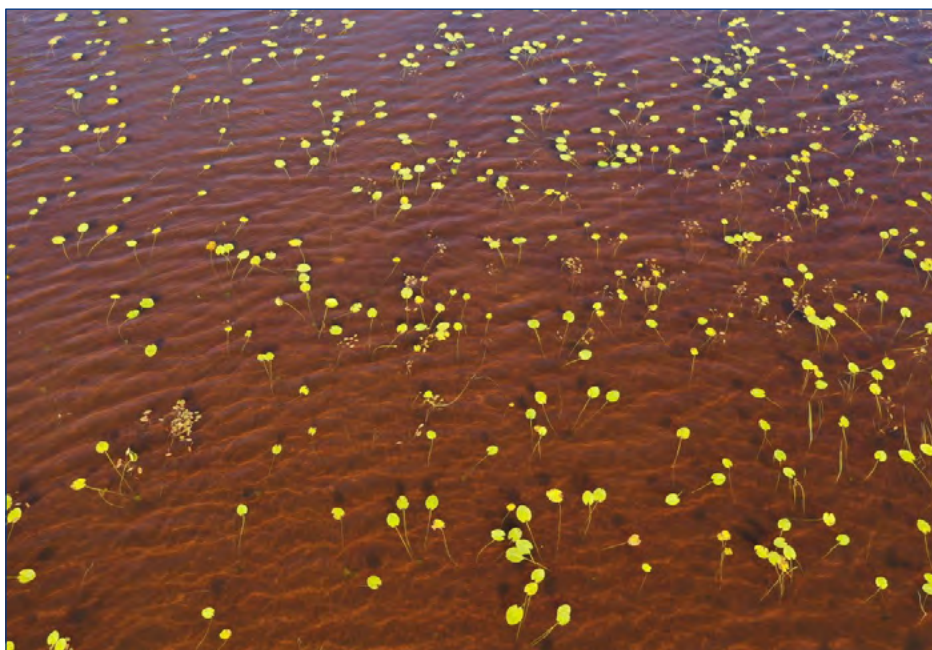
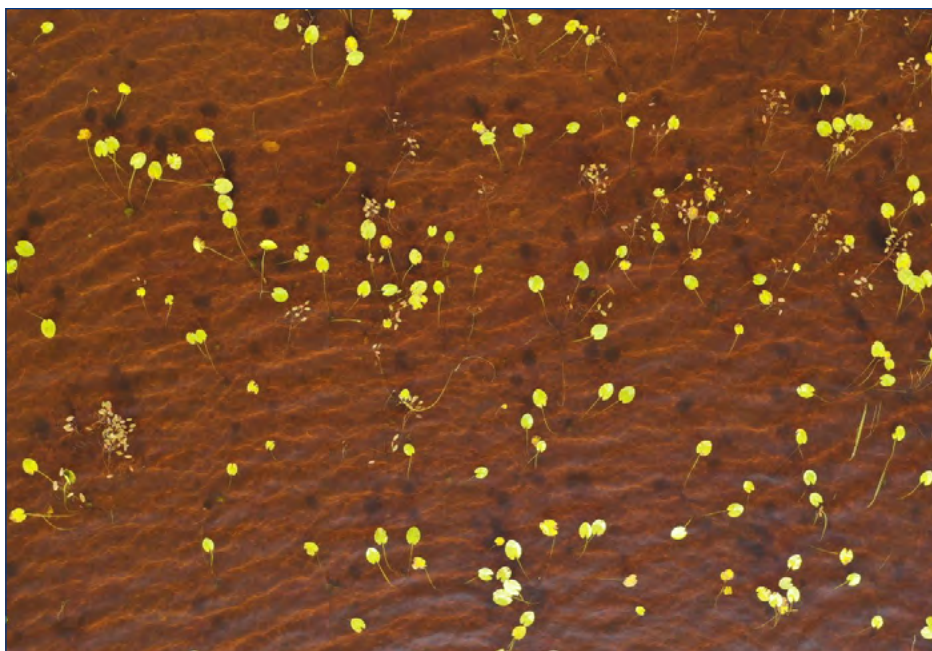


- Kuvauspaikka: Tuusjärvi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 28.8.2019

X=565063, Y=6973342



- Ulpukka (*Nuphar lutea*)
- Matala hiekkapohja



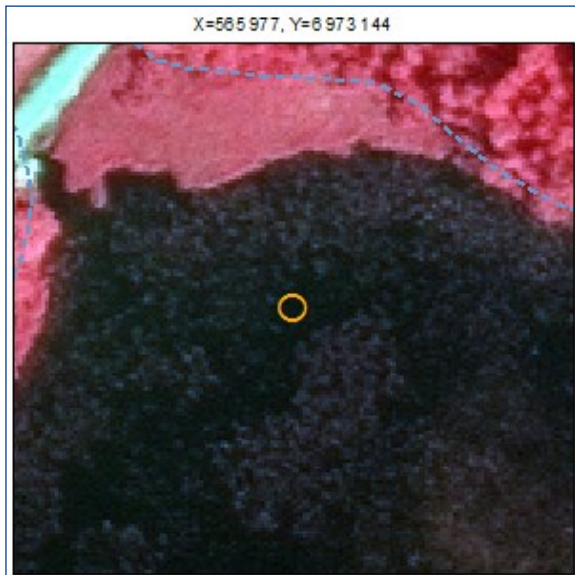
- Kuvauspaikka: Tuusjärvi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 28.8.2019



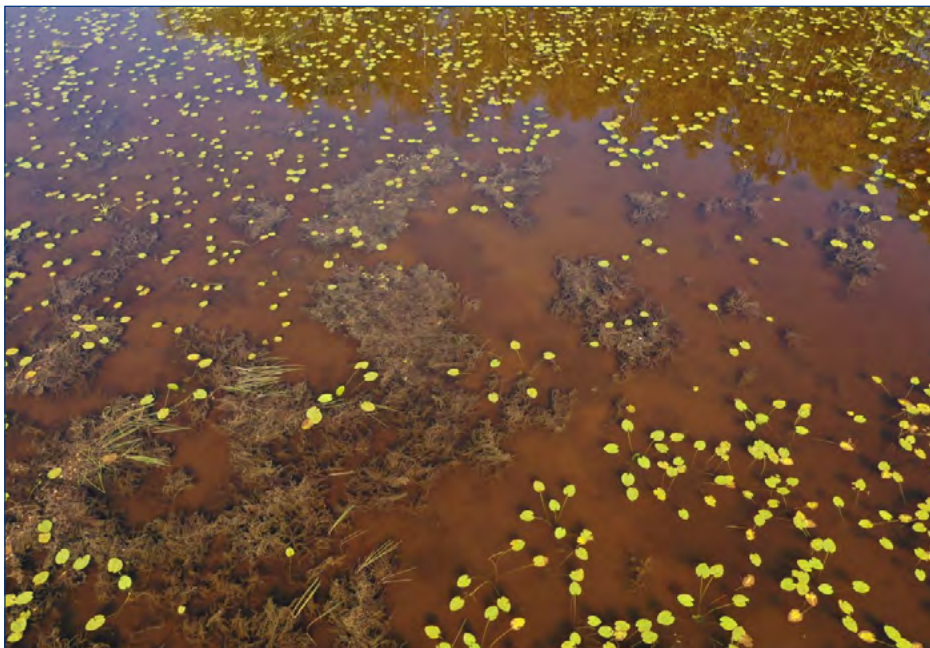
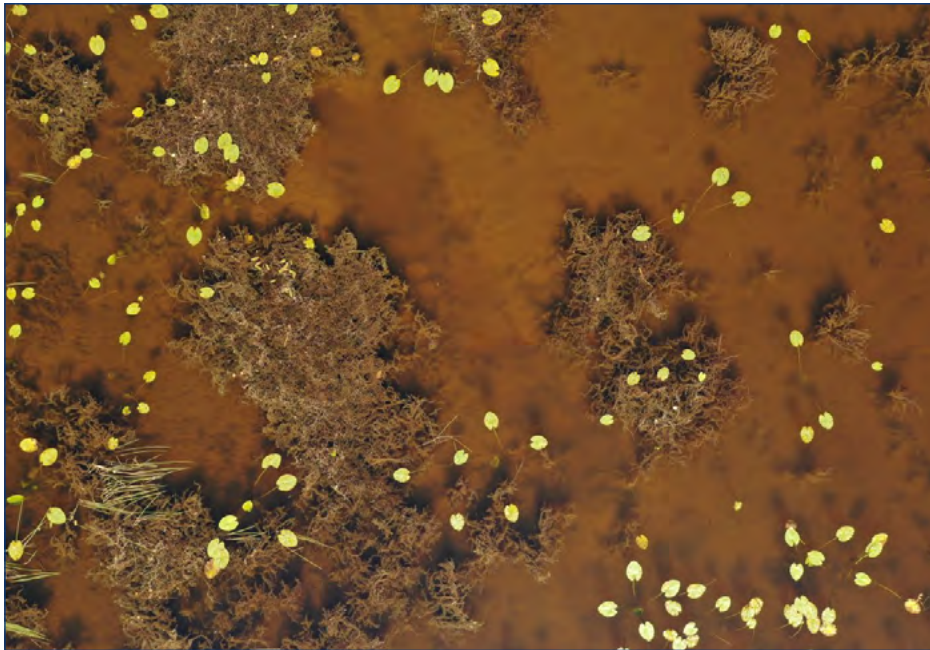
- Rantakasvillisuutta (saroja, heiniä, järviruokoa, kurjenjalkaa)



- Kuvauspaikka: Tuusjärvi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 28.8.2019

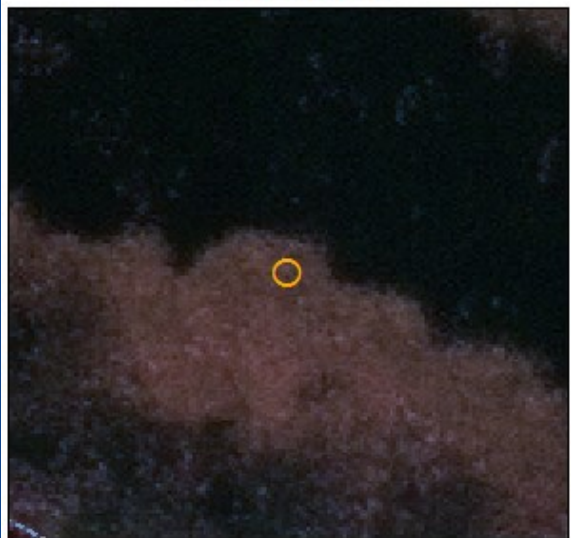


- *Nuphar lutea* (seassa myös palpakko)
- Vesisammalia
- Matala mutapohja

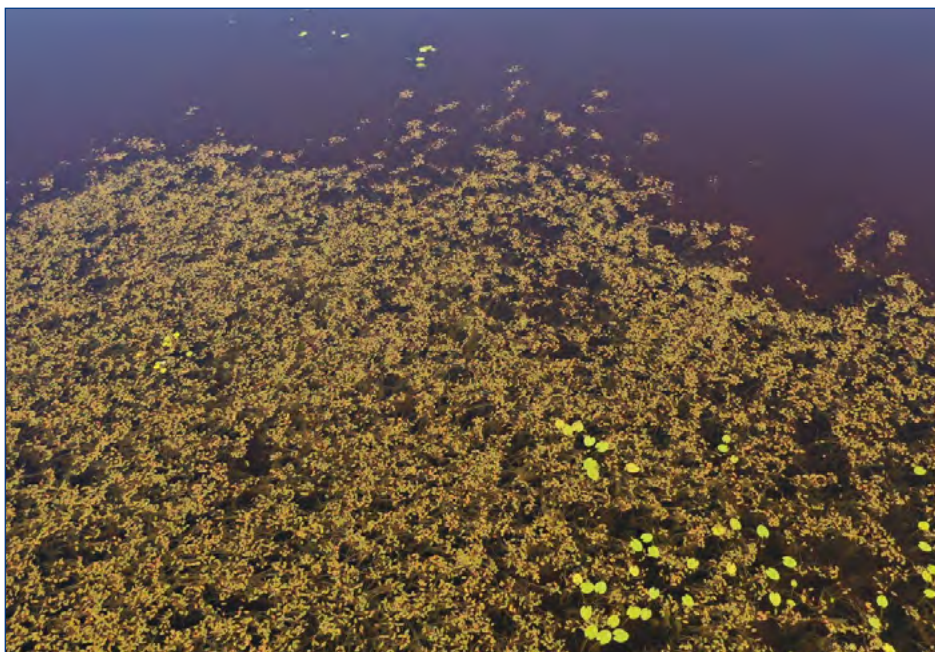
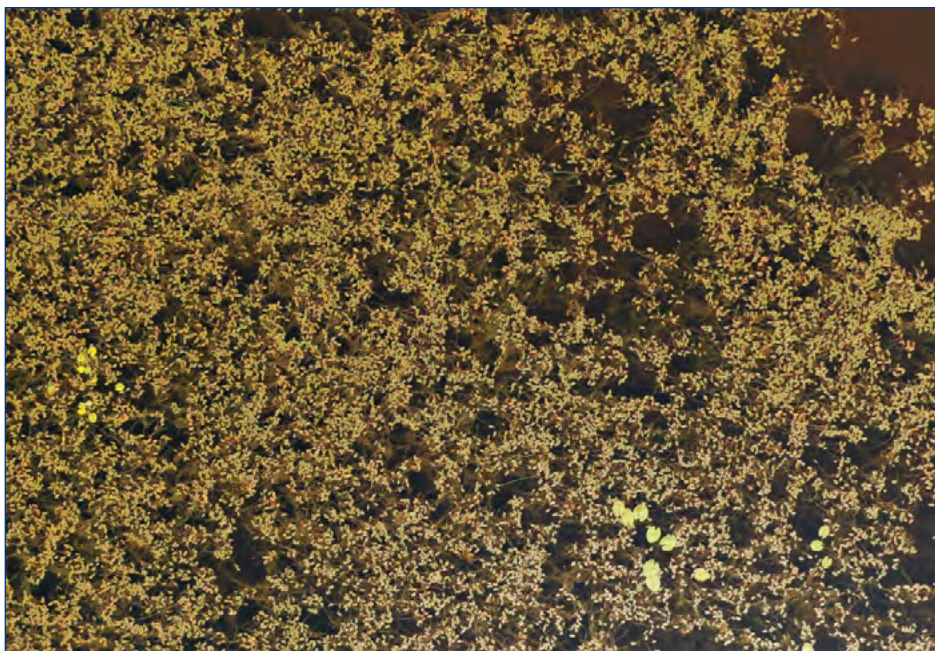


- Kuvauspaikka: Tuusjärvi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 28.8.2019

X=566005, Y=6973055

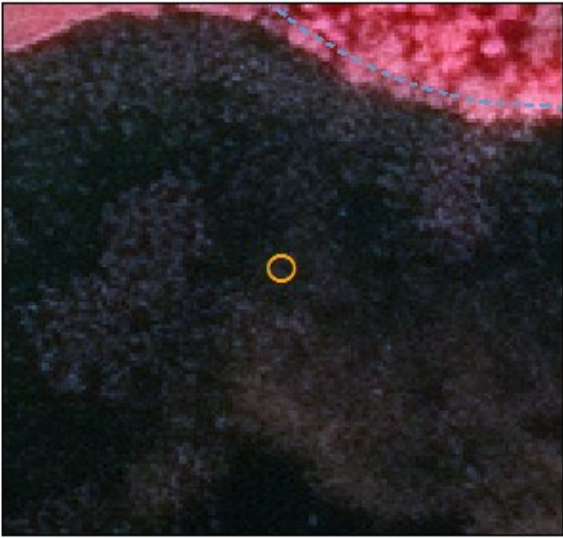


- *Potamogeton natans*

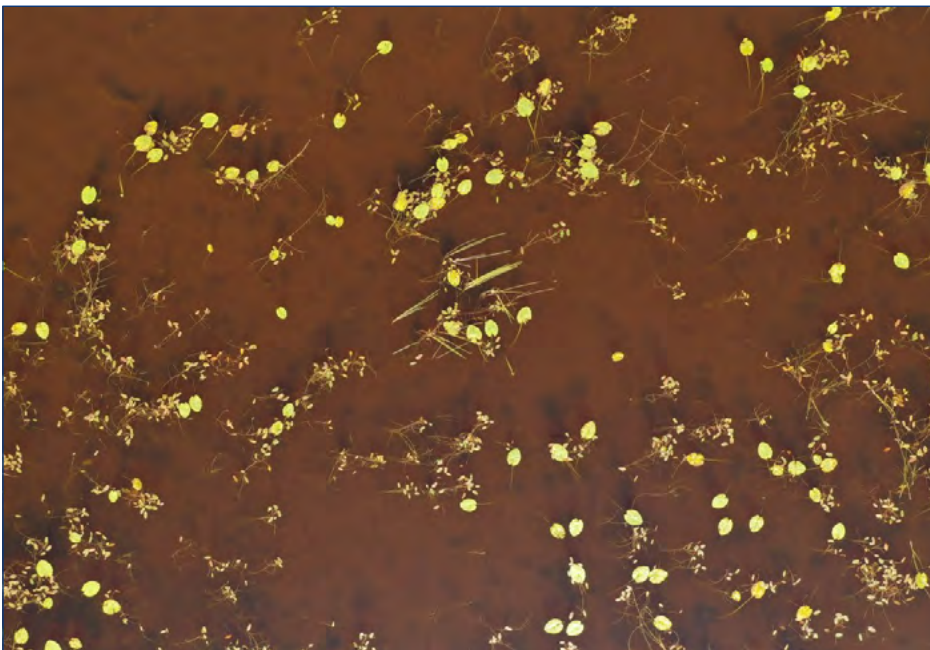


- Kuvauspaikka: Tuusjärvi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 28.8.2019

X=566 002, Y=6 973 130

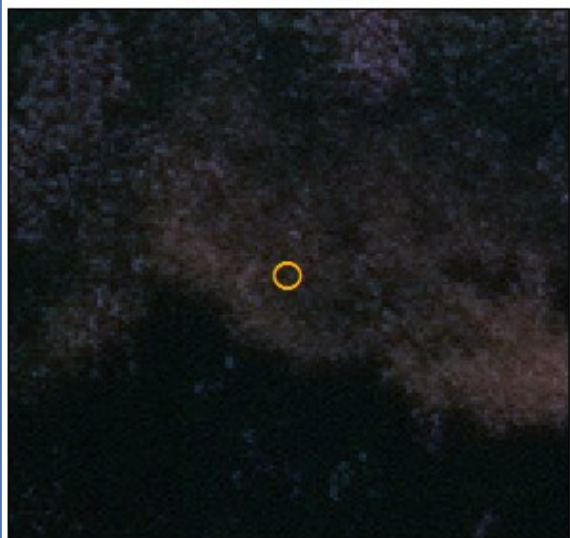


- *Nuphar lutea*
- *Potamogeton natans*
- *Sparganium* sp. (niukasti)

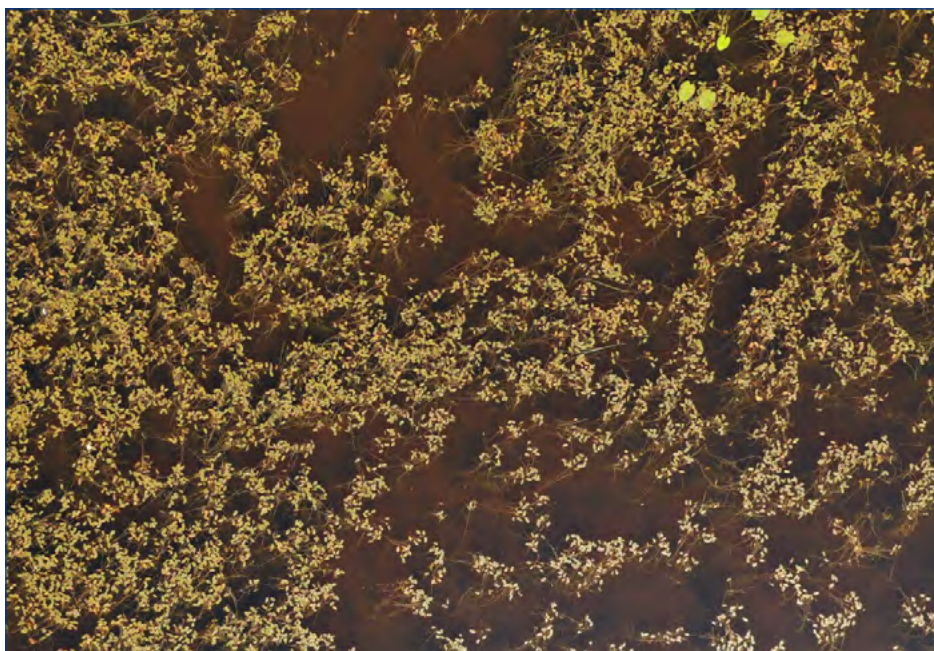


- Kuvauspaikka: Tuusjärvi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 28.8.2019

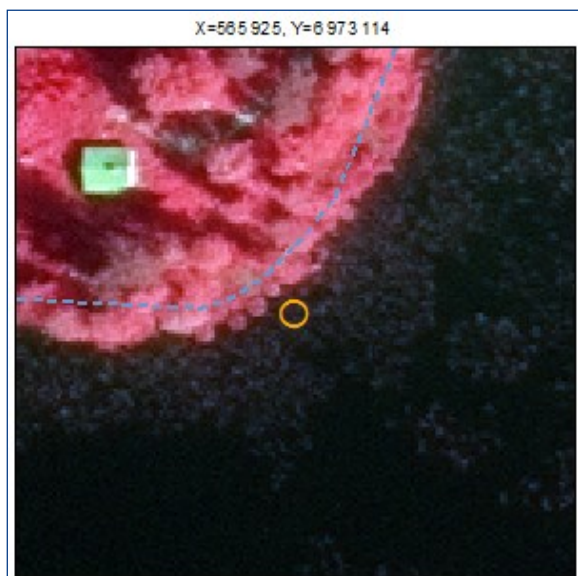
X=566 015, Y=6 973 107



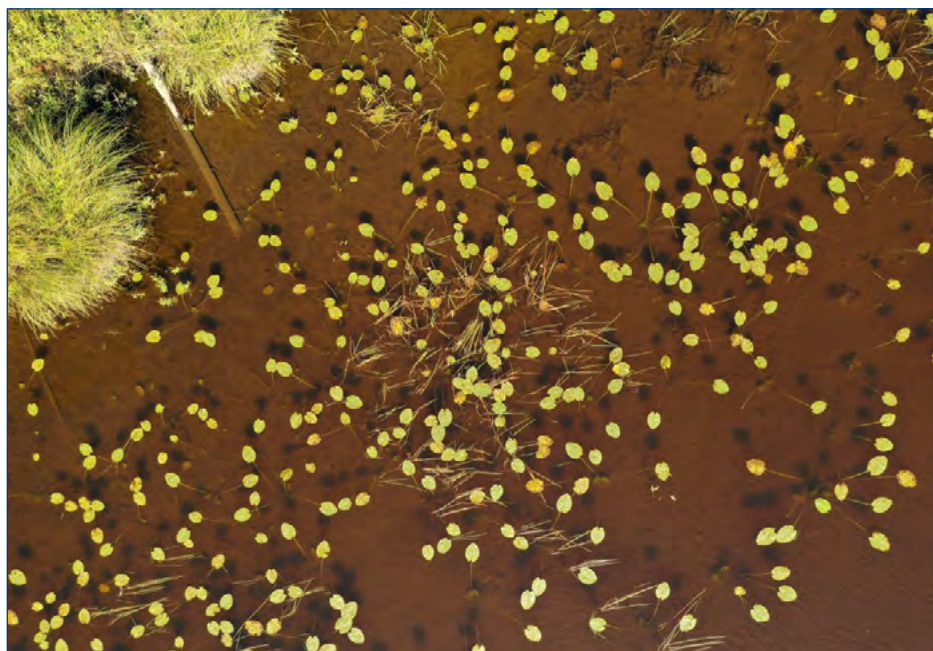
- *Potamogeton natans*
- *Nuphar lutea* (niukasti)



- Kuvauspaikka: Tuusjärvi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 28.8.2019

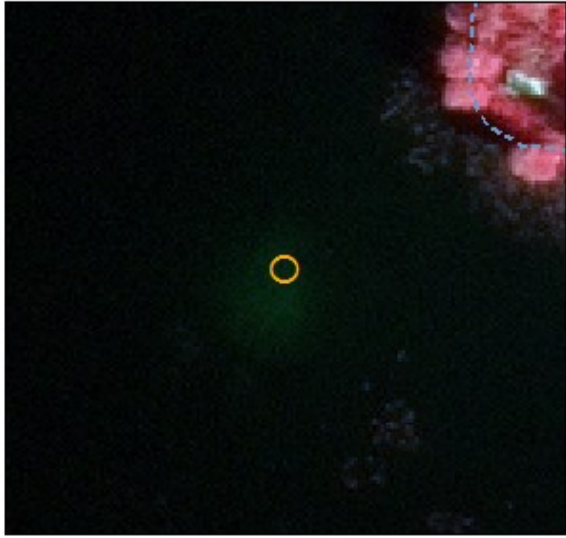


- *Nuphar lutea*
- *Sparganium sp.*

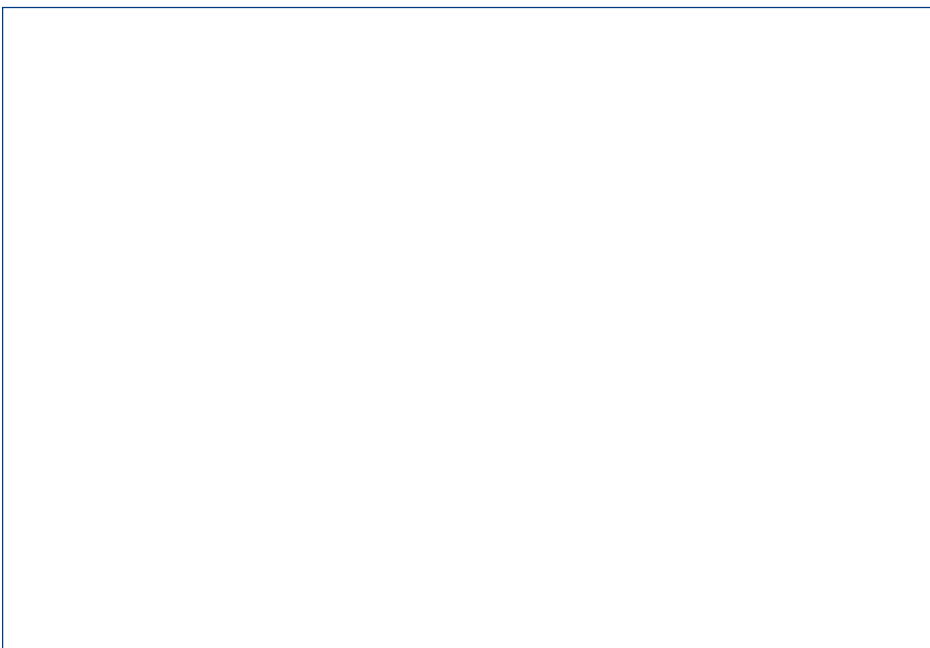


- Kuvauspaikka: Tuusjärvi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 28.8.2019

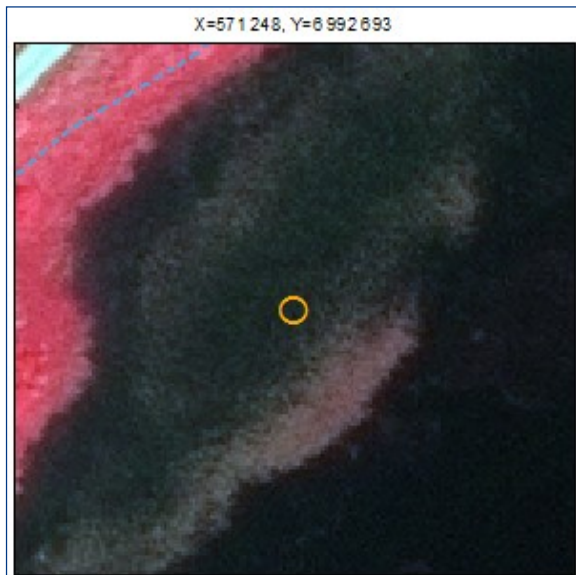
X=565 832, Y=6 973 100



- Matala hiekka- ja kivipohja
- Pystykuvat 85 metrin korkeudesta.
- Viistokuvaa ei saatavilla.



- Kuvauspaikka: Tuusjärvi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 28.8.2019



- *Potamogeton natans*
- Järvikorte (*Equisetum fluviatile*)

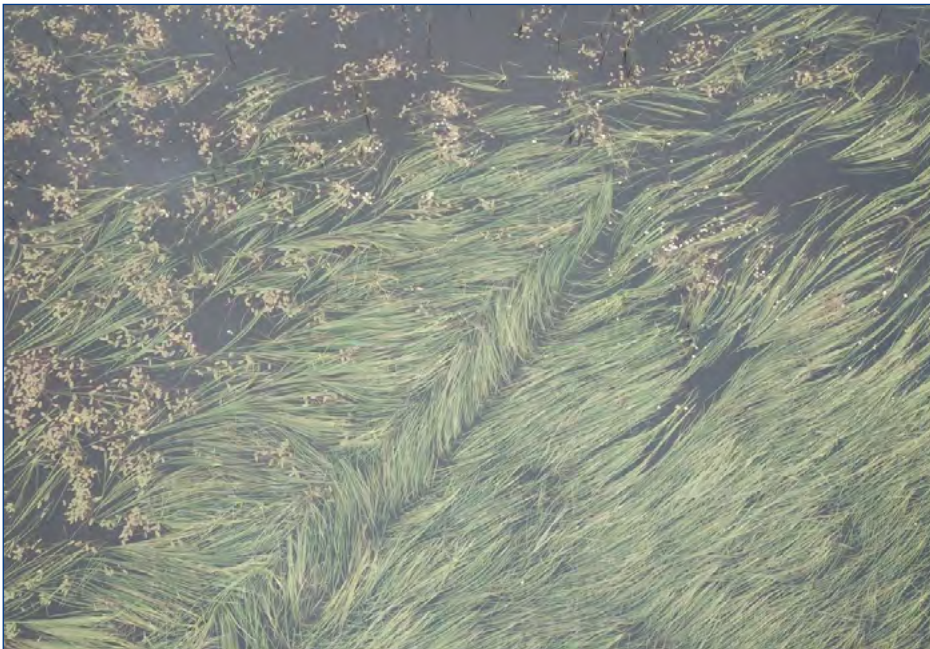


- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=571 282, Y=6 992 709



- *Sparganium sp.* (huom. kasvusto mahdollisesti varhaisemmassa kehitysvaiheessa ilmakuvasa kuin droonikuvassa)
- *Potamogeton natans*



- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvas 16.7.2018
- Droonikuvas 1.8.2019

X=571 338, Y=6 992 759

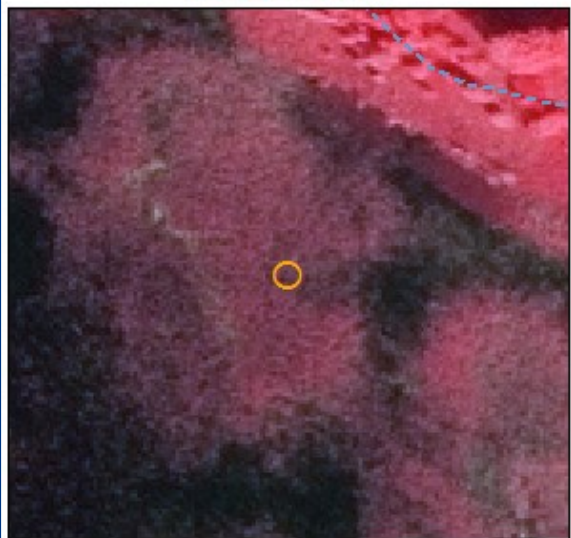


- *Potamogeton natans*
- *Sparganium sp.*
- *Nuphar lutea*



- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=571 405, Y=6 992 812

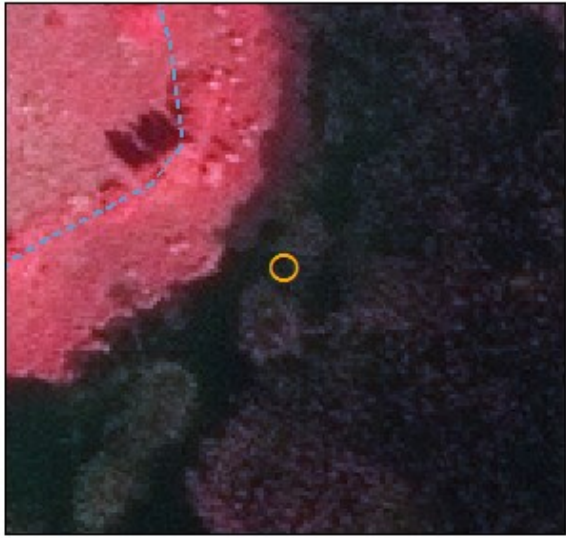


- *Phragmites australis*
- *Nuphar lutea*
- *Carex* sp. (tn. pullosara *C. rostrata*)



- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=571 332, Y=6 992 789

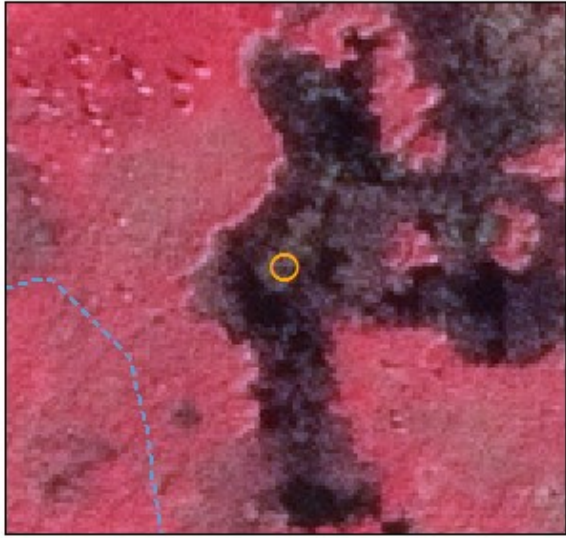


- *Nuphar lutea*
- *Sparganium sp. (emersum?)*
- *Nymphaea sp.*
- *Sagittaria sp.*
- *Uposkasvillisuutta (Elodea canadensis?)*

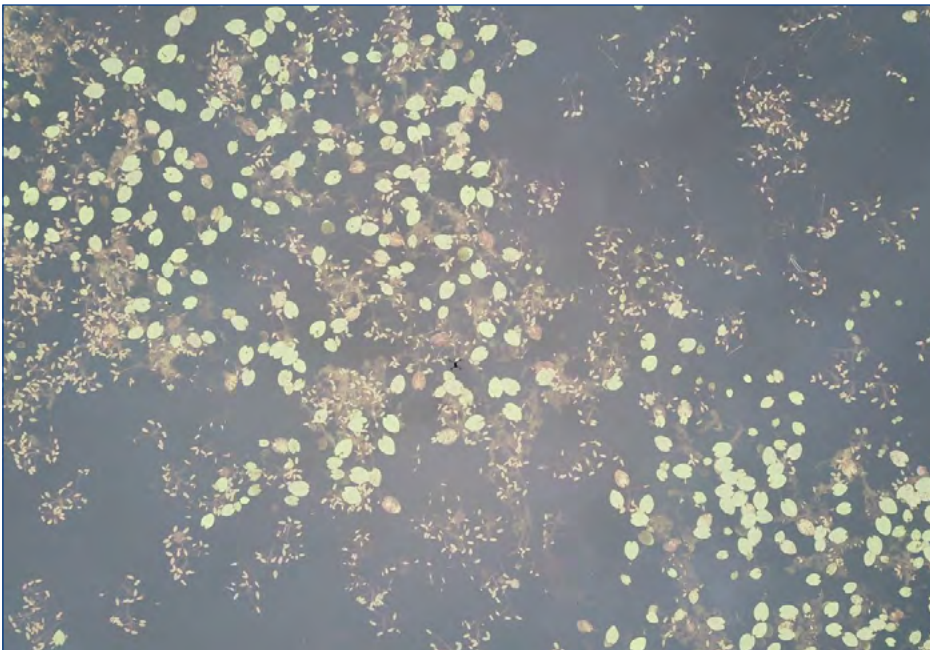


- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=571 502, Y=6 992 793

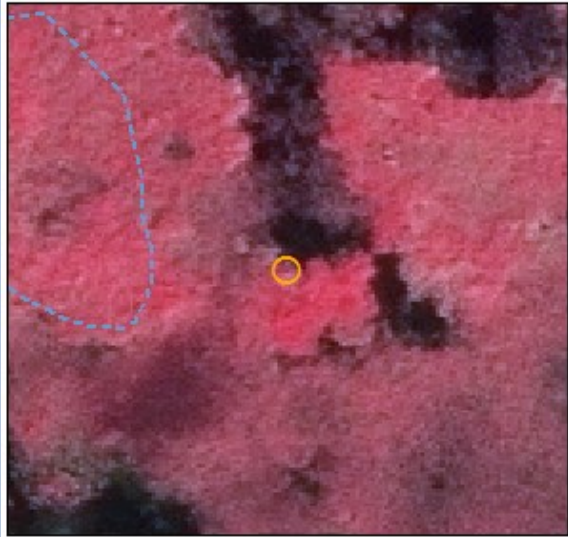


- *Potamogeton natans*
- *Nuphar lutea*



- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=571 503, Y=6 992 756

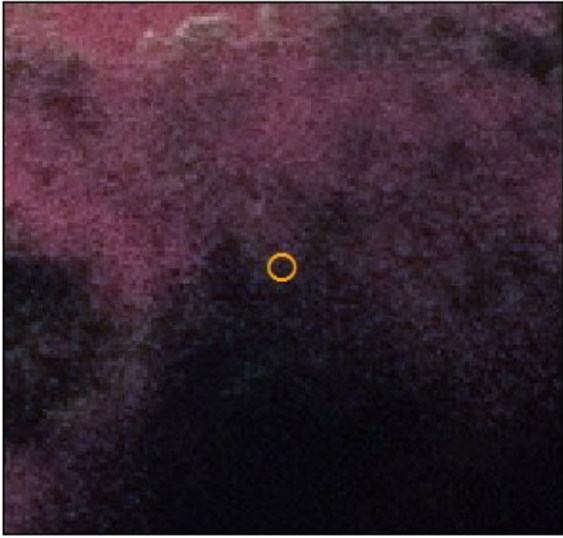


- *Carex* spp.
- *Phragmites australis*
- Muuta rantakasvillisuutta (esim. *Cicuta virosa*)

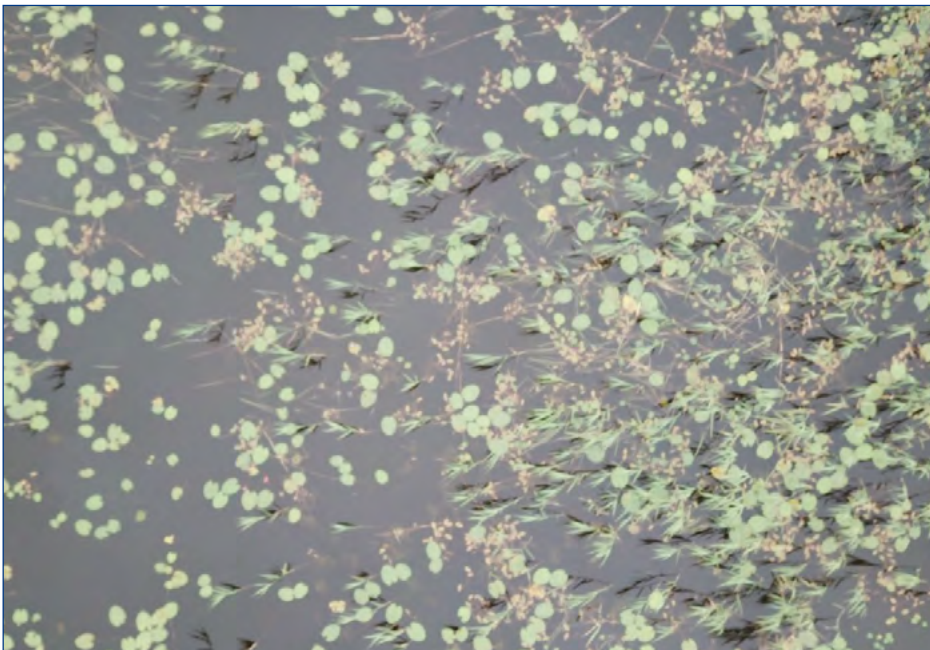


- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=571545, Y=6992681



- *Nuphar lutea*
- *Phragmites australis*
- *Potamogeton natans*



- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=571577, Y=6992771

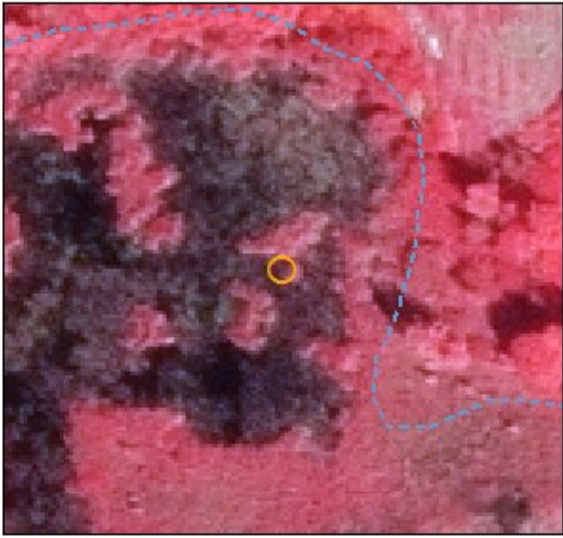


- *Carex sp.*
- *Phragmites australis*



- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

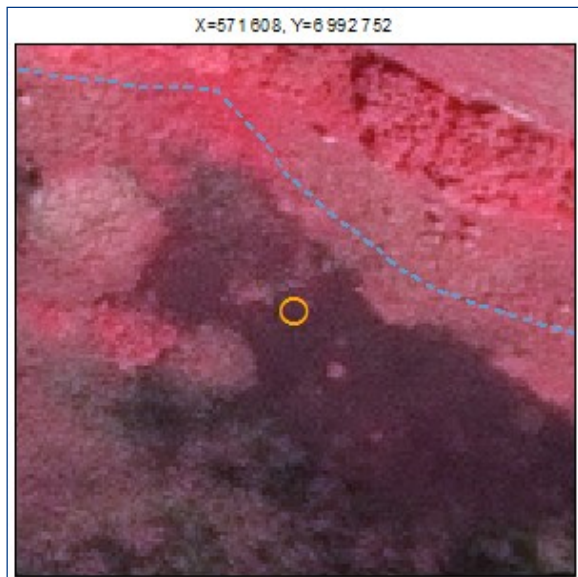
X=571 538, Y=6 992 804



- *Carex* sp. + rantakasvillisuutta (kuten *Cicuta virosa*)
- *Nuphar lutea*
- *Potamogeton natans*



- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019



- *Carex rostrata* (?)
- *Phragmites australis*



- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=571692, Y=6992735

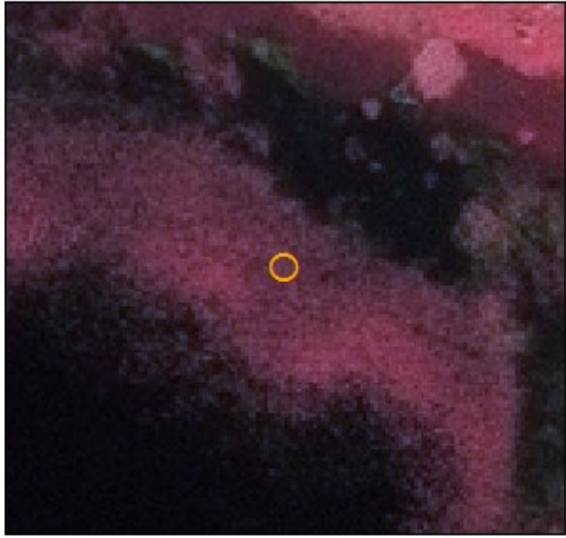


- *Carex rostrata* (?)
- *Calamagrostis* sp.
- *Phragmites australis*
- Rantakasvillisuutta (esim. *Lysimachia thyrsiflora*)



- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

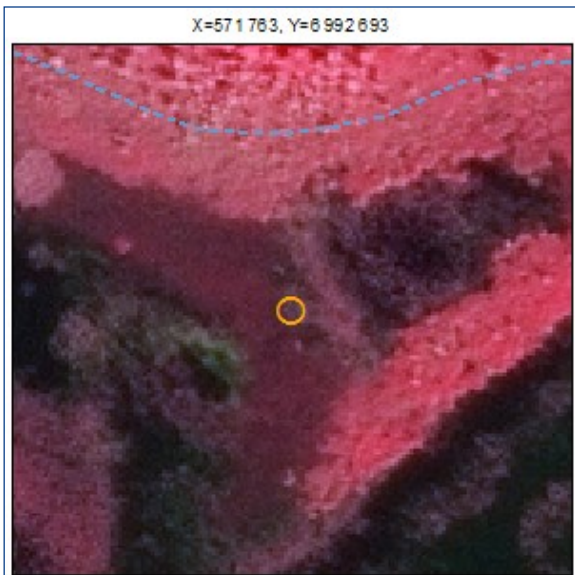
X=571706, Y=6992684



- *Phragmites australis*
- *Nuphar lutea*



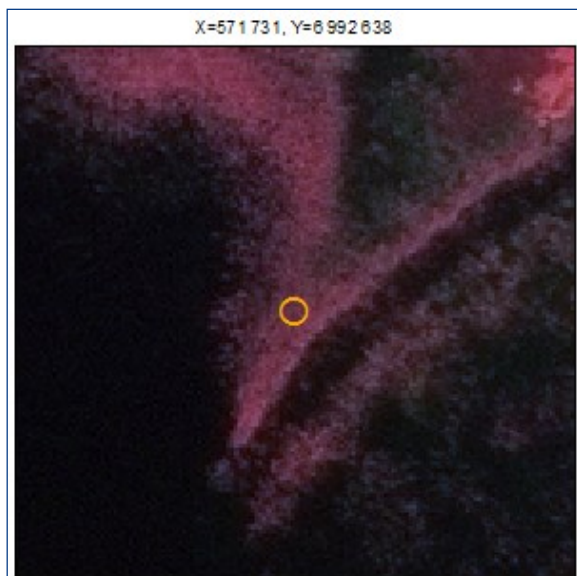
- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019



- *Equisetum fluviatile*
- *Phragmites australis*
- *Potamogeton natans* + *Nuphar lutea*



- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019



- *Phragmites australis*
- (+ *Nuphar lutea*)



- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=571812, Y=6992681



- *Sagittaria natans*
- *Sparganium emersum*
- *Nuphar lutea*
- *Nymphaea spp.*
- *Potamogeton natans*



- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=571 799, Y=6 992 700

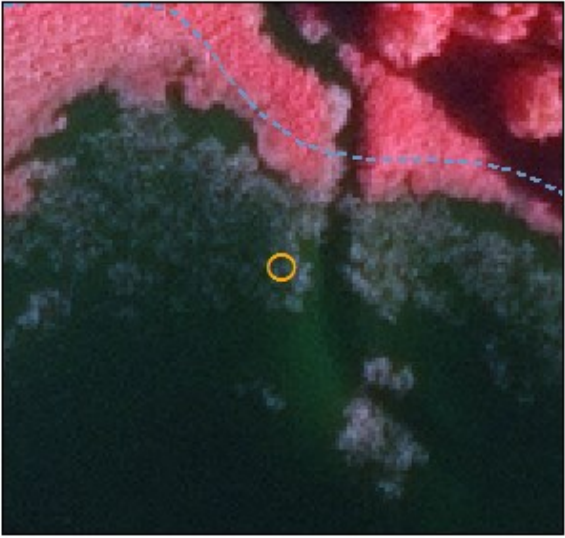


- Rantakasvillisuutta (mm. *Carex* sp., *Comarum palustre*, *Lysimachia thyrsoiflora*, *Cicuta virosa*)

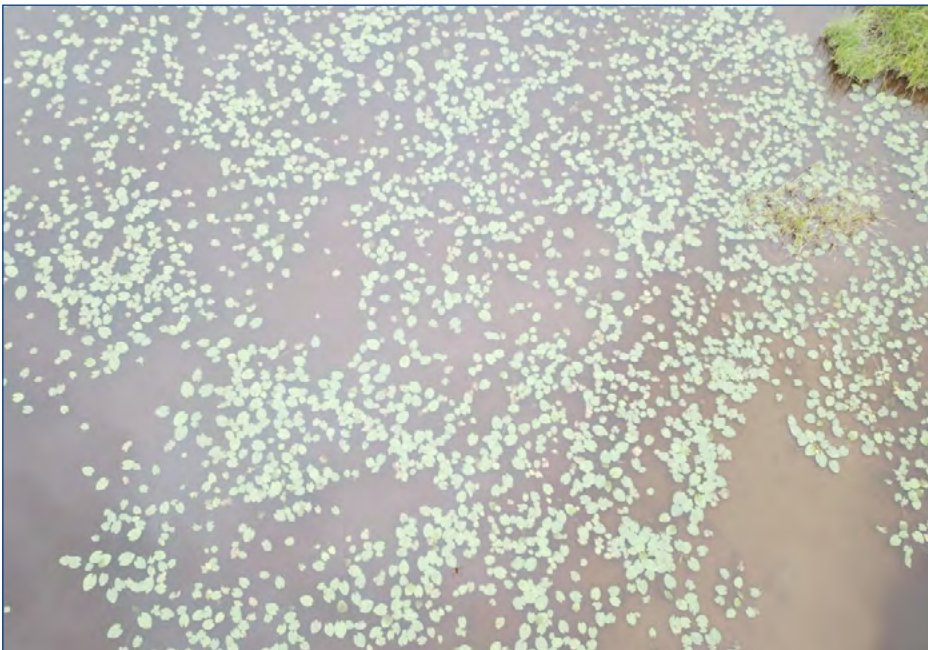


- Kuvauspaikka: Pieni Vehkalahti
- Ilmakuvaus 16.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=562377, Y=6988583

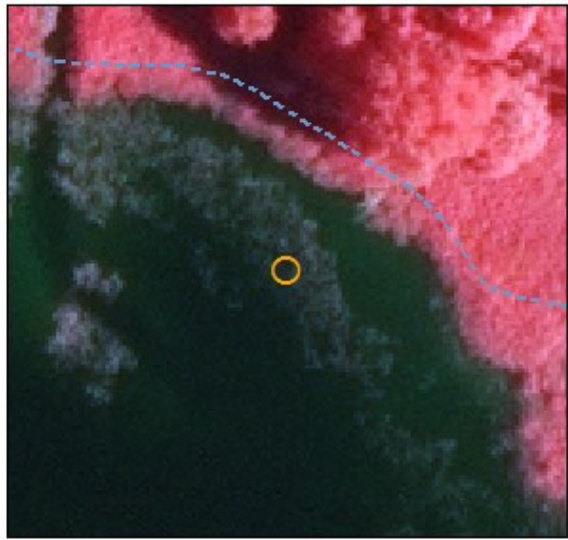


- *Nuphar lutea*



- Kuvauspaikka: Akonvesi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

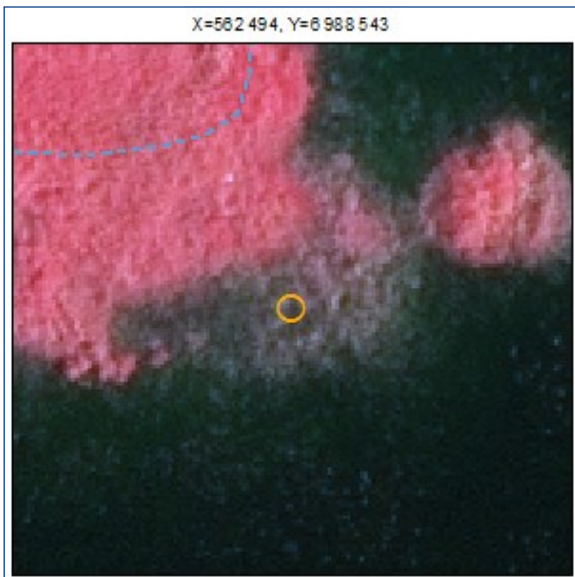
X=562418, Y=6988569



- *Nuphar lutea*



- Kuvauspaikka: Akonvesi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

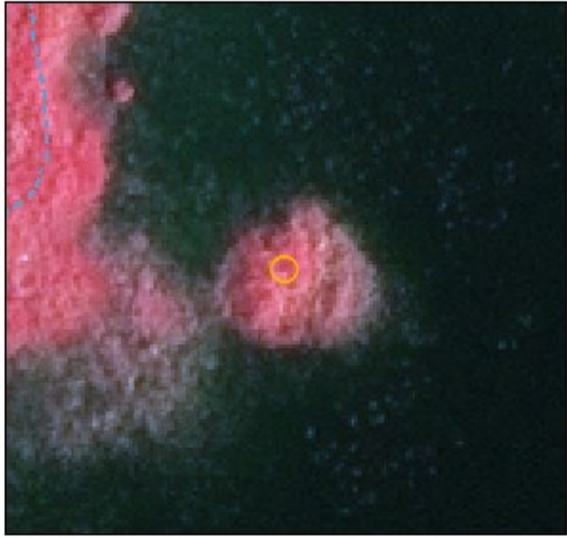


- *Phragmites australis*



- Kuvauspaikka: Akonvesi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=562 521, Y=6 988 560

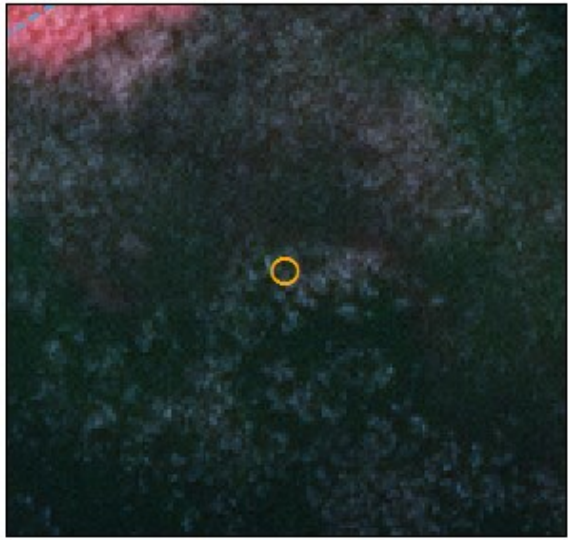


- *Phragmites australis*
- *Carex* sp.

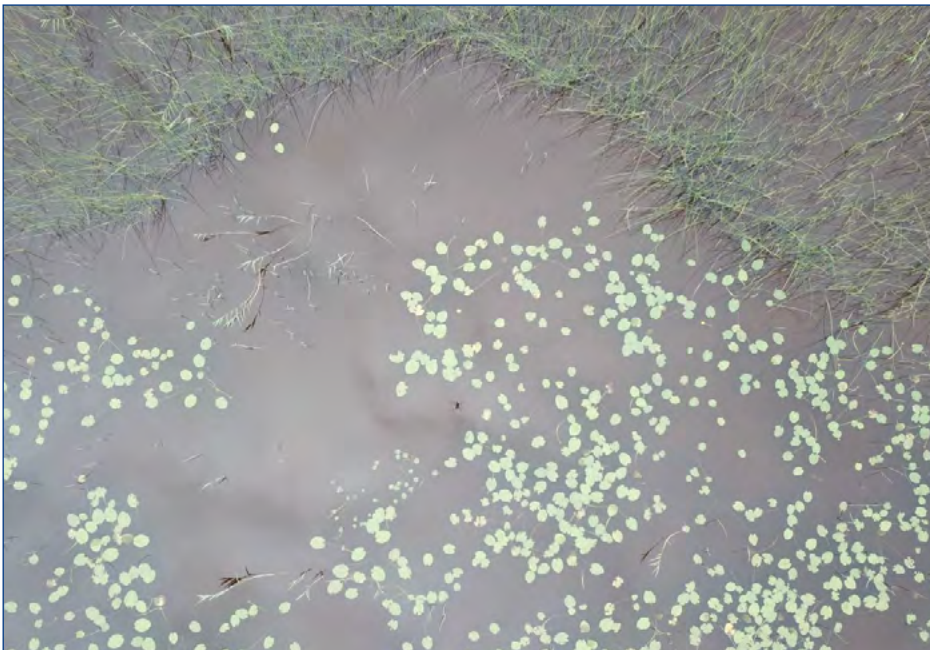


- Kuvauspaikka: Akonvesi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=562606, Y=6988621

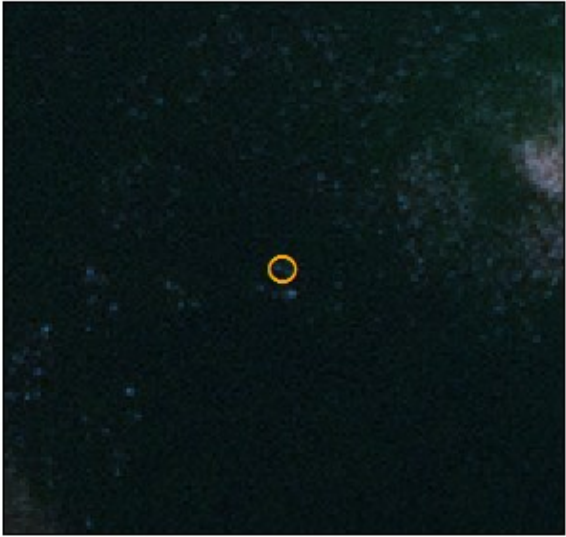


- *Nuphar lutea*
- Järvikaisla (*Schoenoplectus lacustris*)
- (+ *Phragmites australis*)



- Kuvauspaikka: Akonvesi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=582724, Y=6988653

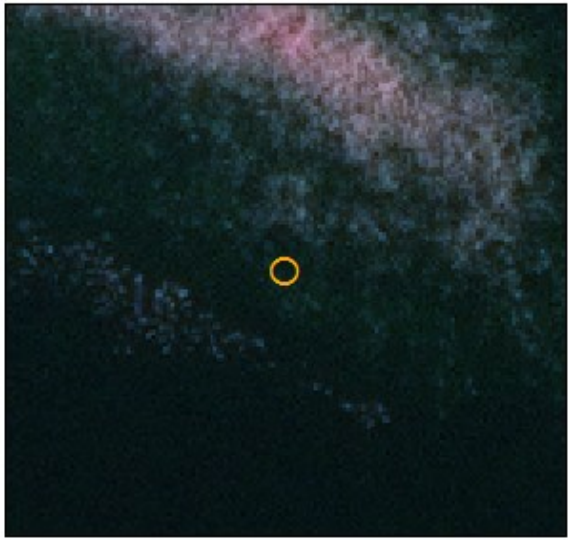


- *Nuphar lutea*



- Kuvauspaikka: Akonvesi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

X=562881, Y=6988626




- *Phragmites australis*



- Kuvauspaikka: Akonvesi
- Ilmakuvaus 17.7.2018
- Droonikuvaus 1.8.2019

Liite b Karttasarja satelliitti- ja ilmakuvista tehdyistä vesikasvillisuustulkinnoista osassa II tutkituilla järvillä.

Kartoissa harmaasävytaustakartan päälle on ensimmäiseksi asetettu ilmakuvista tehty vesikasvitulkinta, joka on tehty ILMAVERSO I –hankkeessa kehitetyllä menetelmällä. Ilmakuvatulkinta (maastoresoluutio 0,5 m) toimii referenssi- eli maastototuusaineistona satelliittikuvatulkintoille. Ilmakuvatulkinnassa järvi on jaettu seuraavan kolmeen luokkaan:

-  Rantakasvillisuus
-  Vesikasvillisuus
-  Vesi

Ilmakuvatulkinnat on tehty tutkimusalueella 1 (Koillis-Savon järvet) 16.–17.7.2018 otetuista ilmakuvista ja tutkimusalueella 2 (Länsi-Kuopion järvet) 16.8.2015 otetuista ilmakuvista.

Karttoihin on tuotu ilmakuvatulkinnan päälle satelliittikuvasta tehty kaksiluokkainen vesikasvillisuustulkinta. Tulkintojen lähtömateriaalina on Sentinel-2A-satelliitin MSI-instrumentilla otettu 19.7.2018 otettu kuva, josta on laskettu kaksi kuvaindeksiä: normalisoitu kasvillisuusindeksi (NDVI, arvot skaalattu tavanomaisesta lukuväliltä [-1...+1] lukuvälille [0...1]) ja Tasseled Cap –kirkkausmuunnos. Kuvaindekseistä tehty luokittelu on tehty tutkimusalueelle 1 optimoiduilla kynnysarvoilla. Satelliittikuvatulkintojen luokat ovat esitetty kartalla osittain läpinäkyvällä esittämistavalla seuraavasti:

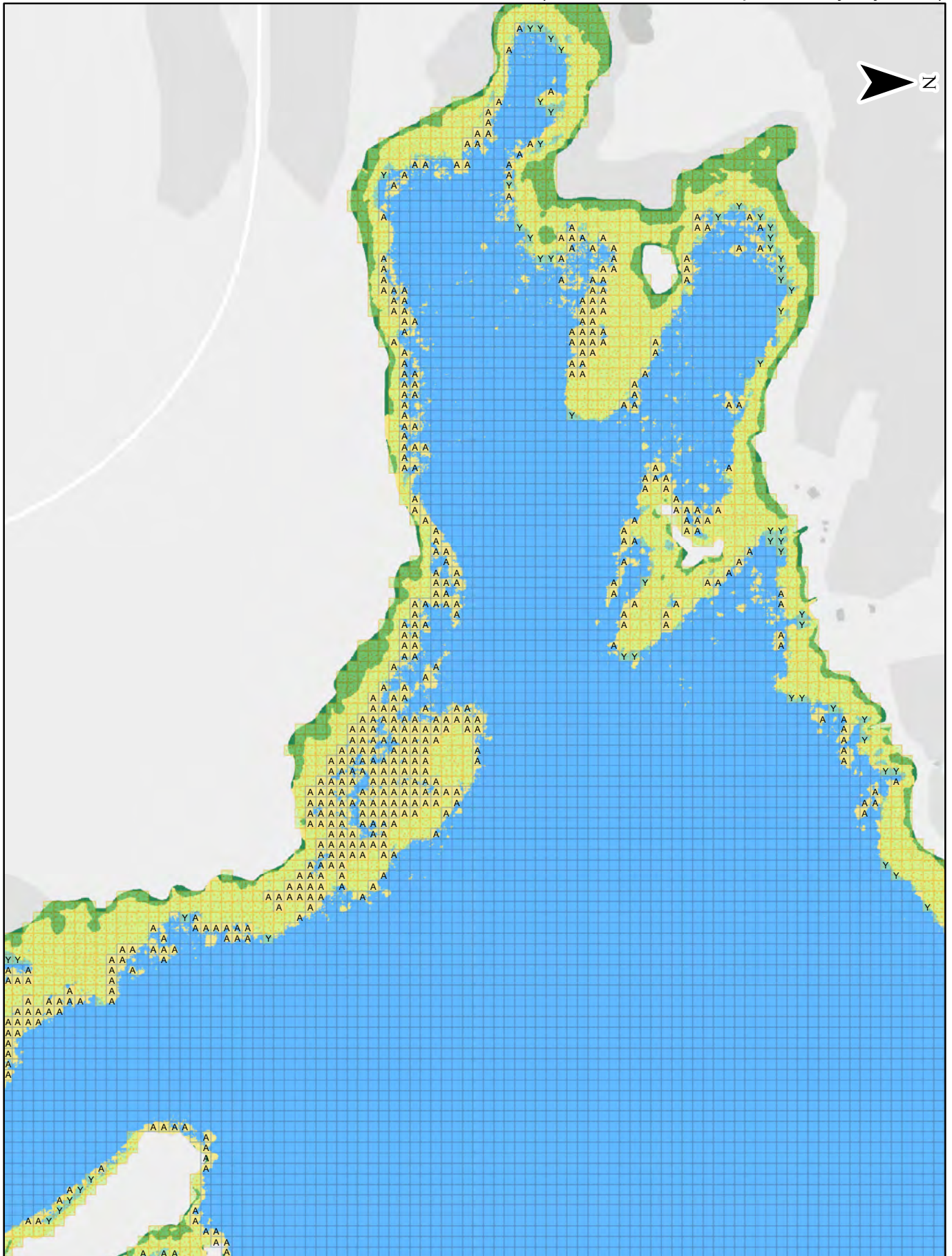
-  Kasvillisuus
-  Vesi

Ilma- ja satelliittikuvatulkintojen vertailua varten ilmakuvatulkinta yleistettiin satelliittikuvan resoluutioon (10 m). Yleistyksessä ilmakehän aineiston luokittelu muutettiin myös samaan binäärimuotoon (kasvillisuus ja vesi).

Kartat sisältävät seuraavat merkinnät ilma- ja satelliittikuvatulkintojen vertailusta:

- A Ilmakuvatulkinnan mukaan ruutu kuuluu kasvillisuusluokkaan, mutta satelliittikuvatulkinnassa se luokituu vedeksi.
- Y Ilmakuvatulkinnan mukaan ruutu kuuluu vesiluokkaan, mutta satelliittikuvatulkinnassa se luokituu kasvillisuudeksi.

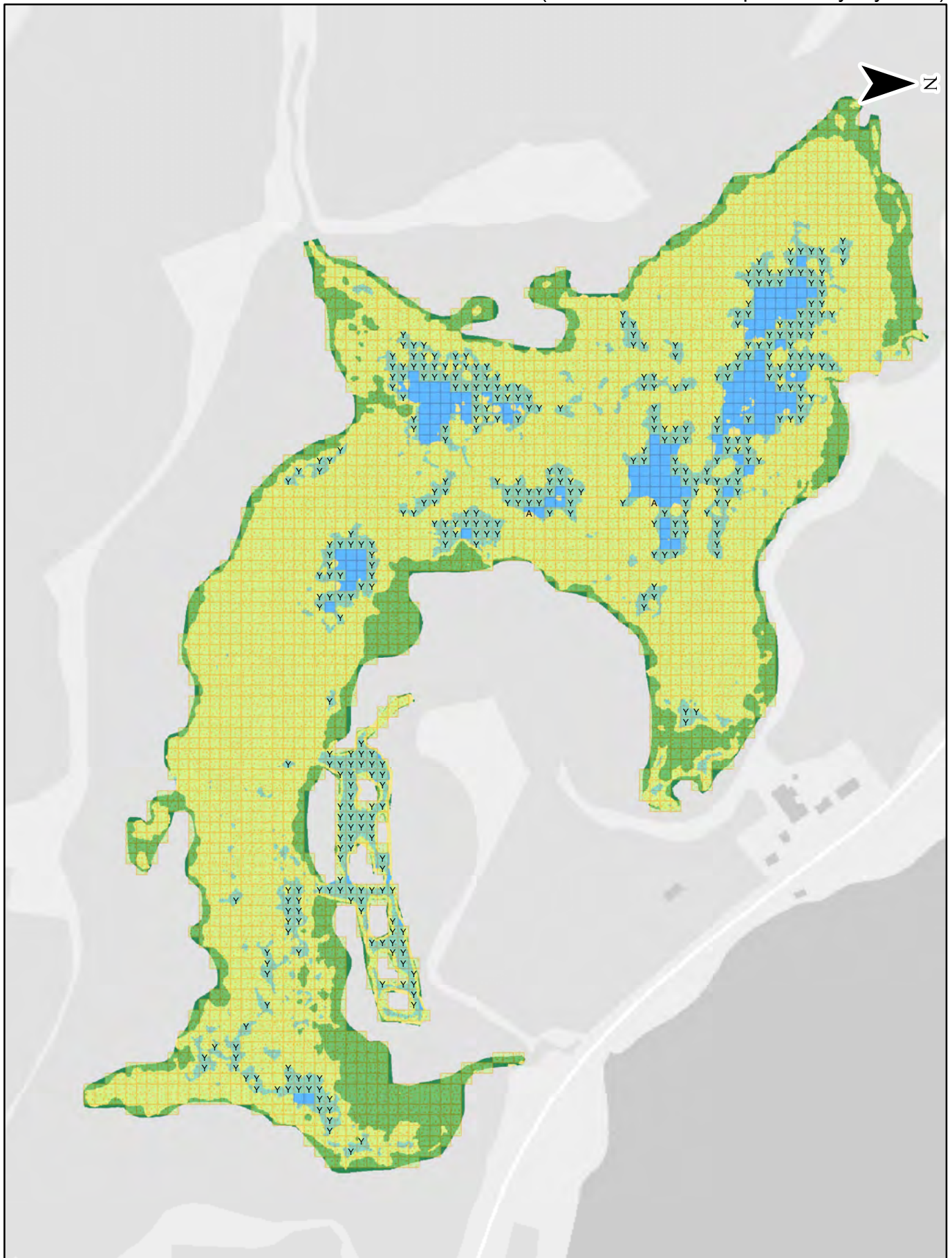
Huom. Liitteen koon pitämiseksi kohtuullisena siinä ei esitä tutkimuksessa käytettyjä muita kuvaindeksejä (NDVI-maksimi heinä -syyskuussa 2018, Tasseled Cap –vihreys- ja kosteusmuunnokset). Liitteessä ei myöskään esitä karttoja tutkimusalueella 2 optimoitujen kynnysarvojen käytöstä.



0 50 100 200 300 m

Keskimmäinen
Tutkimusalue 1 (Koillis-Savon järvet)

Satelliittikuvatulkinta NDVI-kuvaindeksin
kynnystykseen perustuen arvolla 115,5
(tutkimusalueelle 1 optimoitu kynnysarvo)



0 50 100 200 300 m

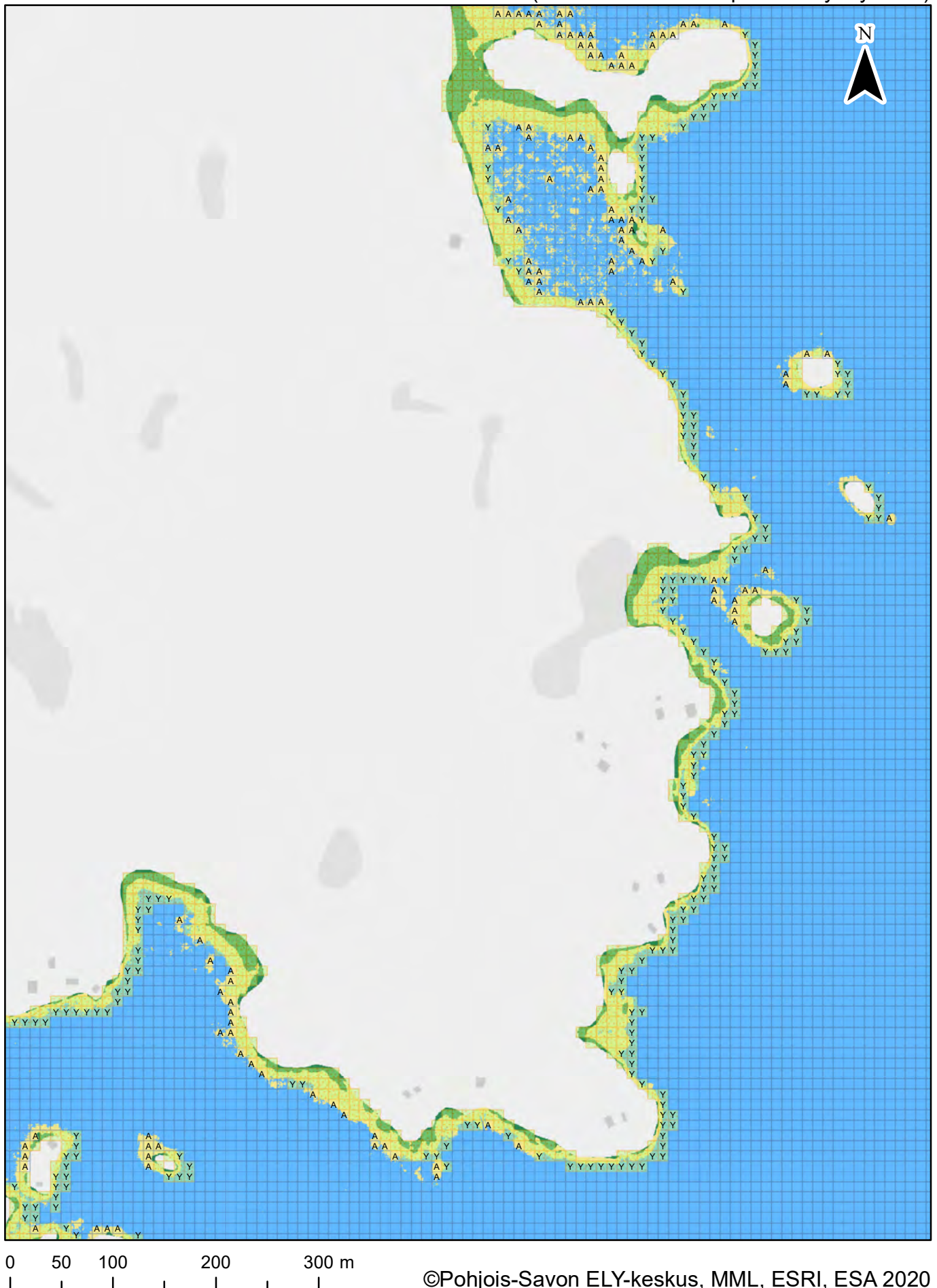
©Pohjois-Savon ELY-keskus, MML, ESRI, ESA 2020

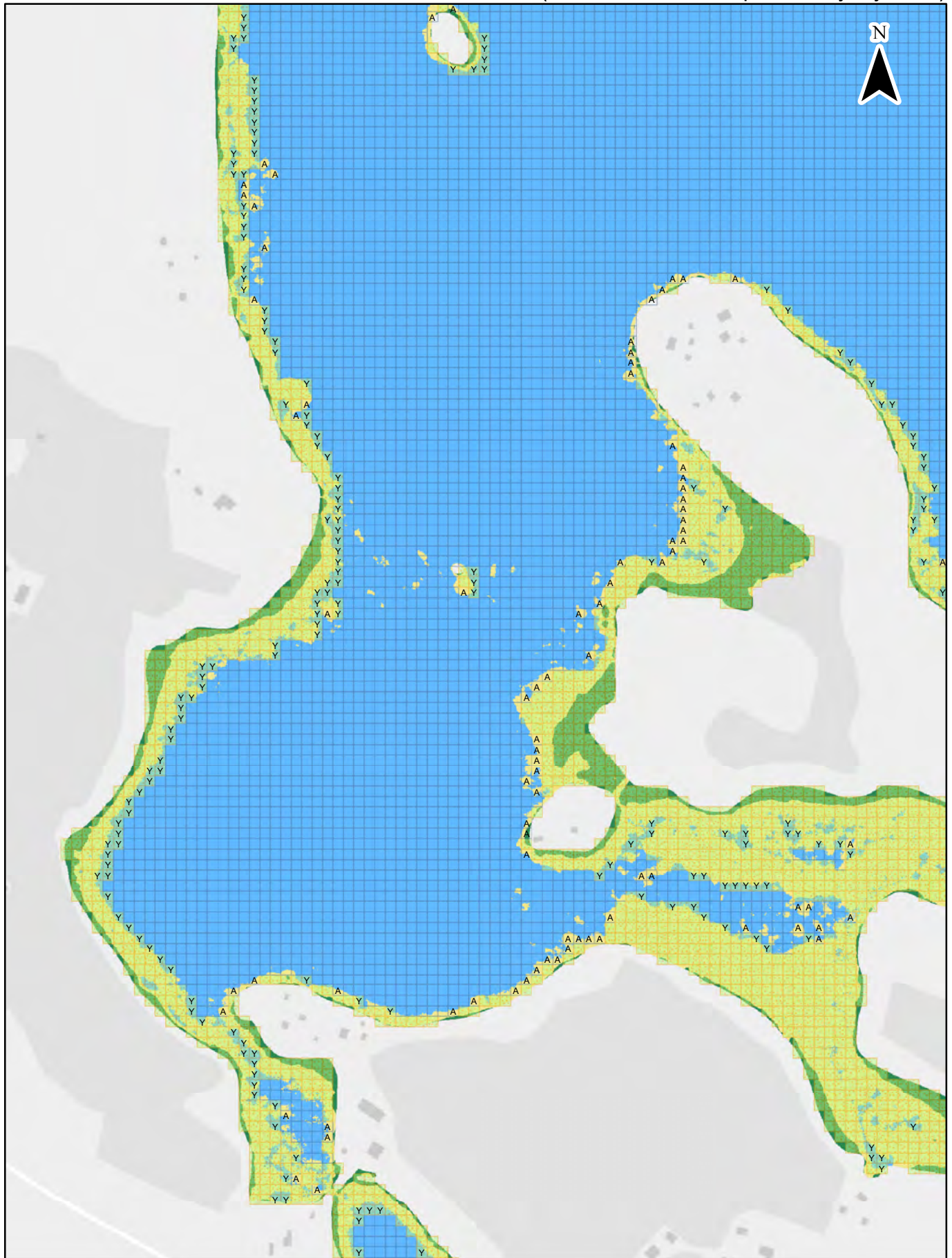


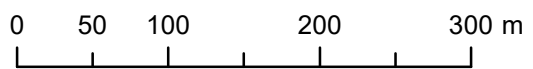
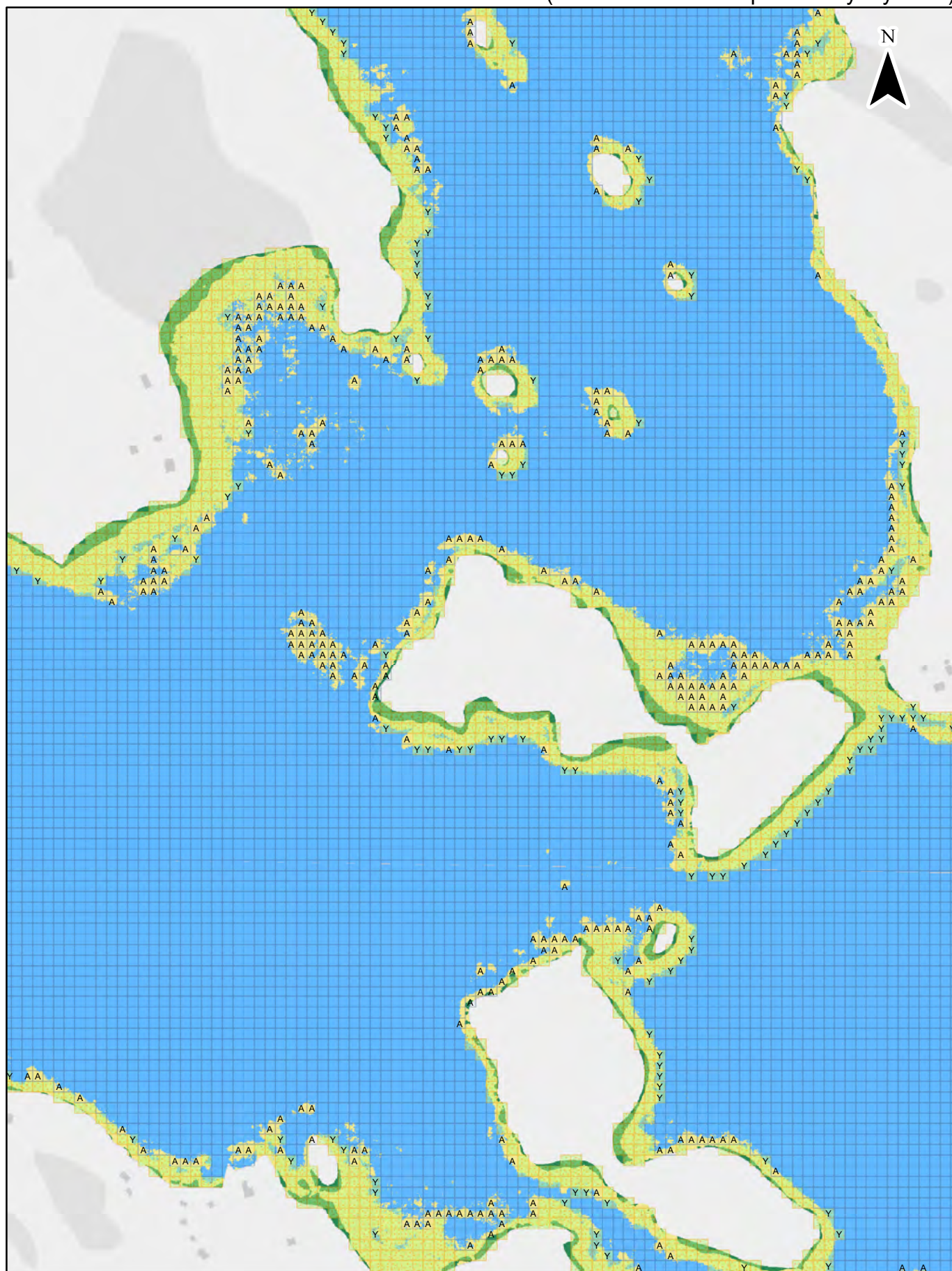
0 50 100 200 300 m

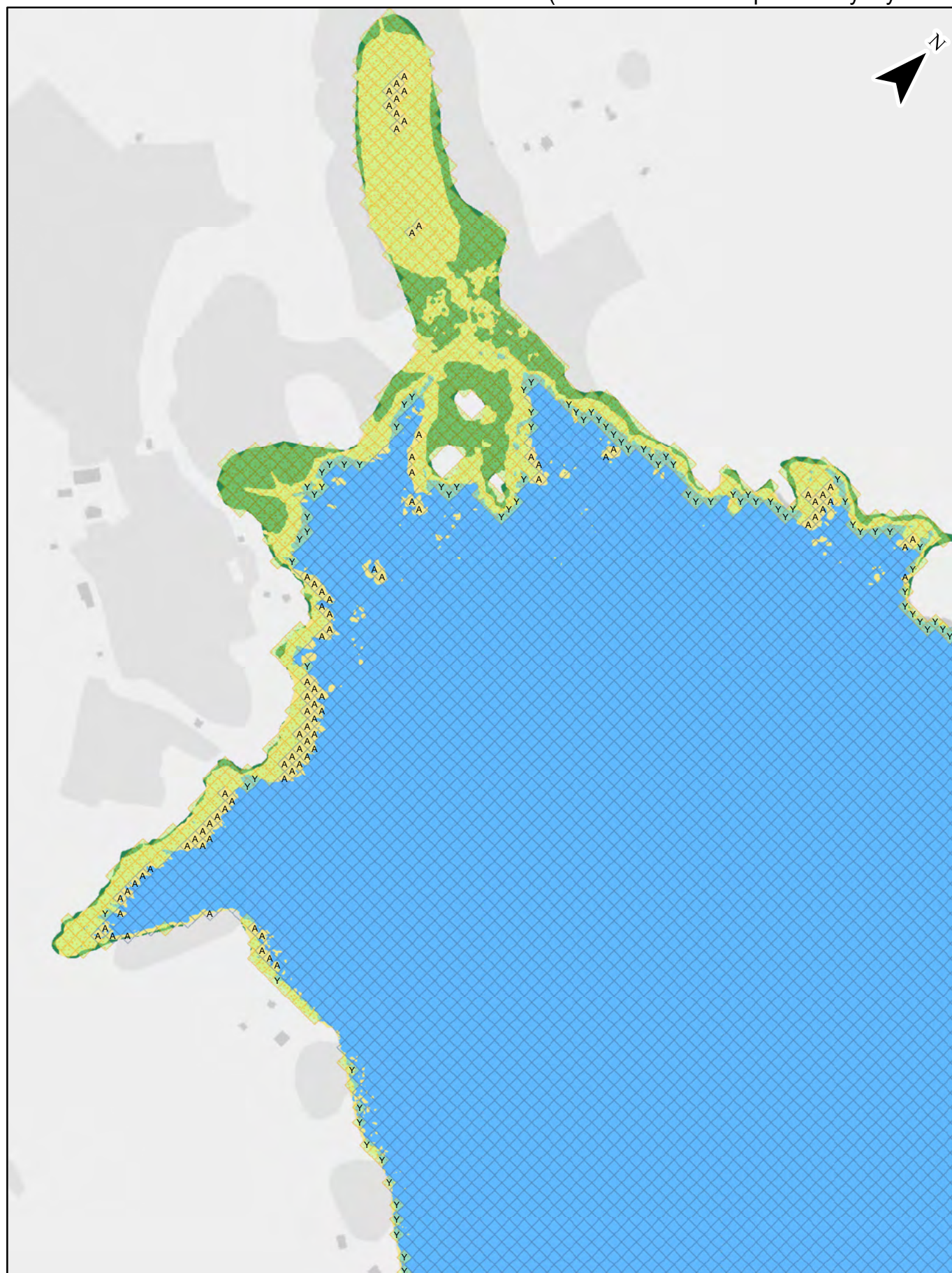
Saarijärvi (Äljänänniemi)
Tutkimusalue 1 (Koillis-Savon järvet)

Satelliittikuvatulkinta NDVI-kuvaindeksin
kynnystykseen perustuen arvolla 115,5
(tutkimusalueelle 1 optimoitu kynnysarvo)





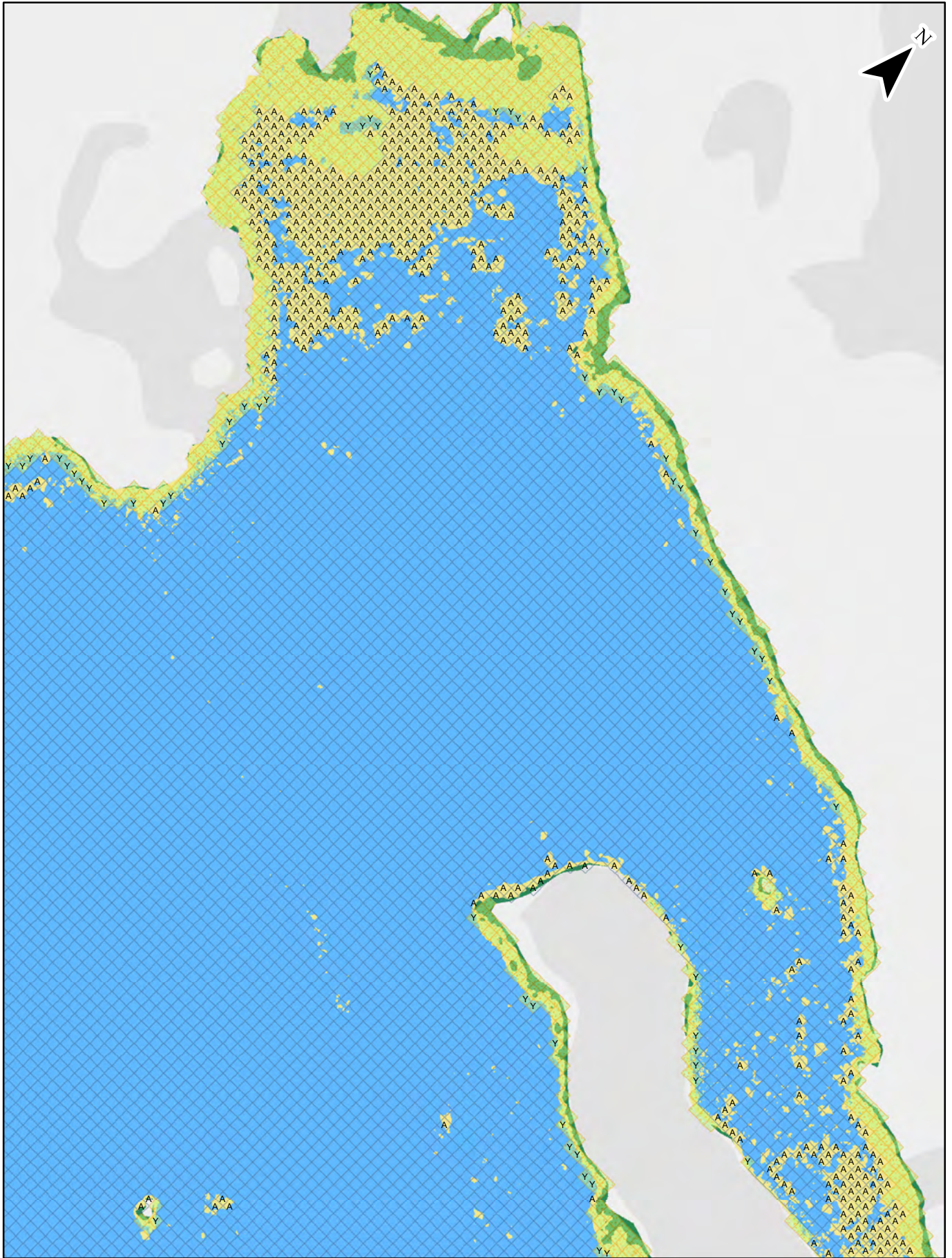


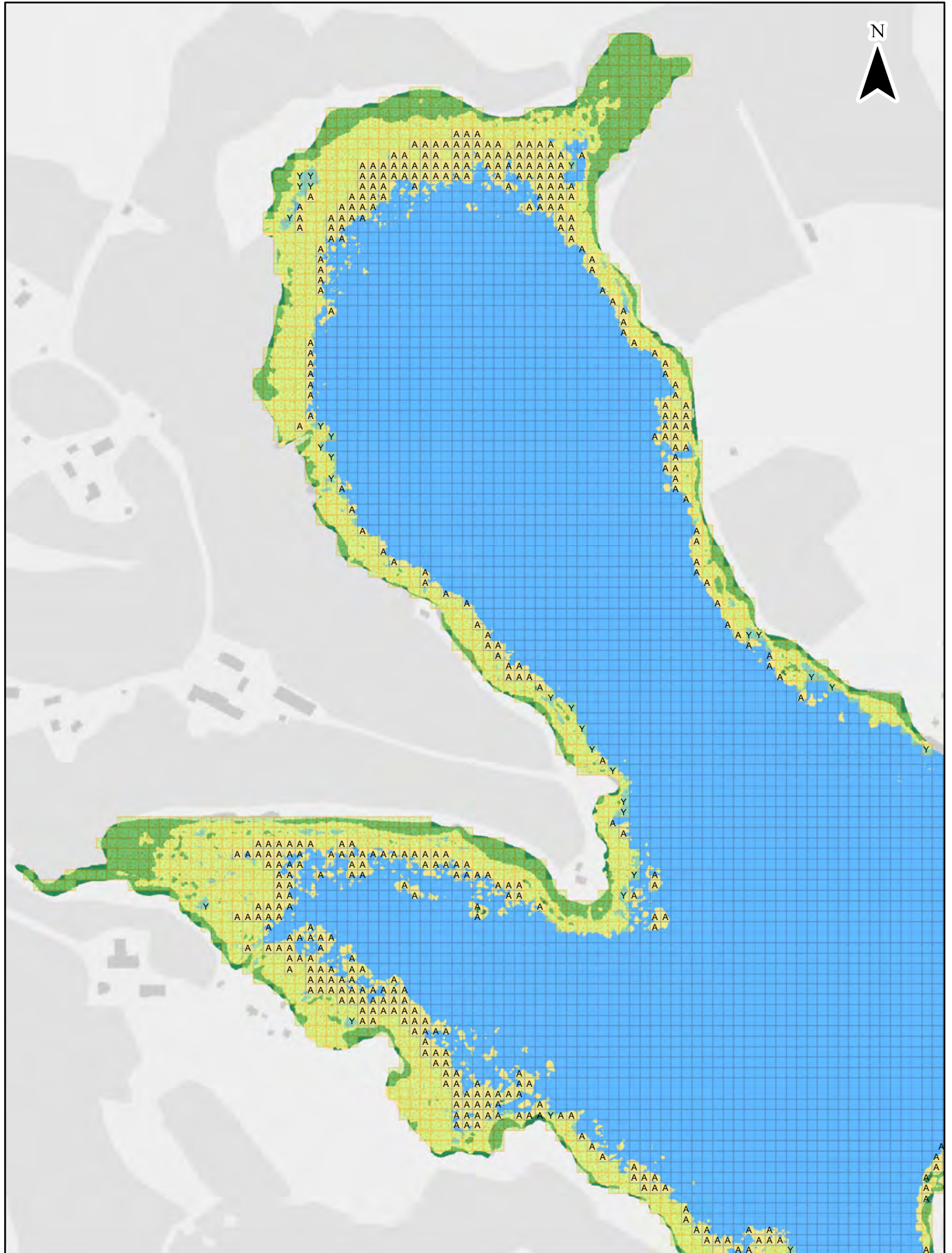


0 50 100 200 300 m

©Pohjois-Savon ELY-keskus, MML, ESRI, ESA 2020





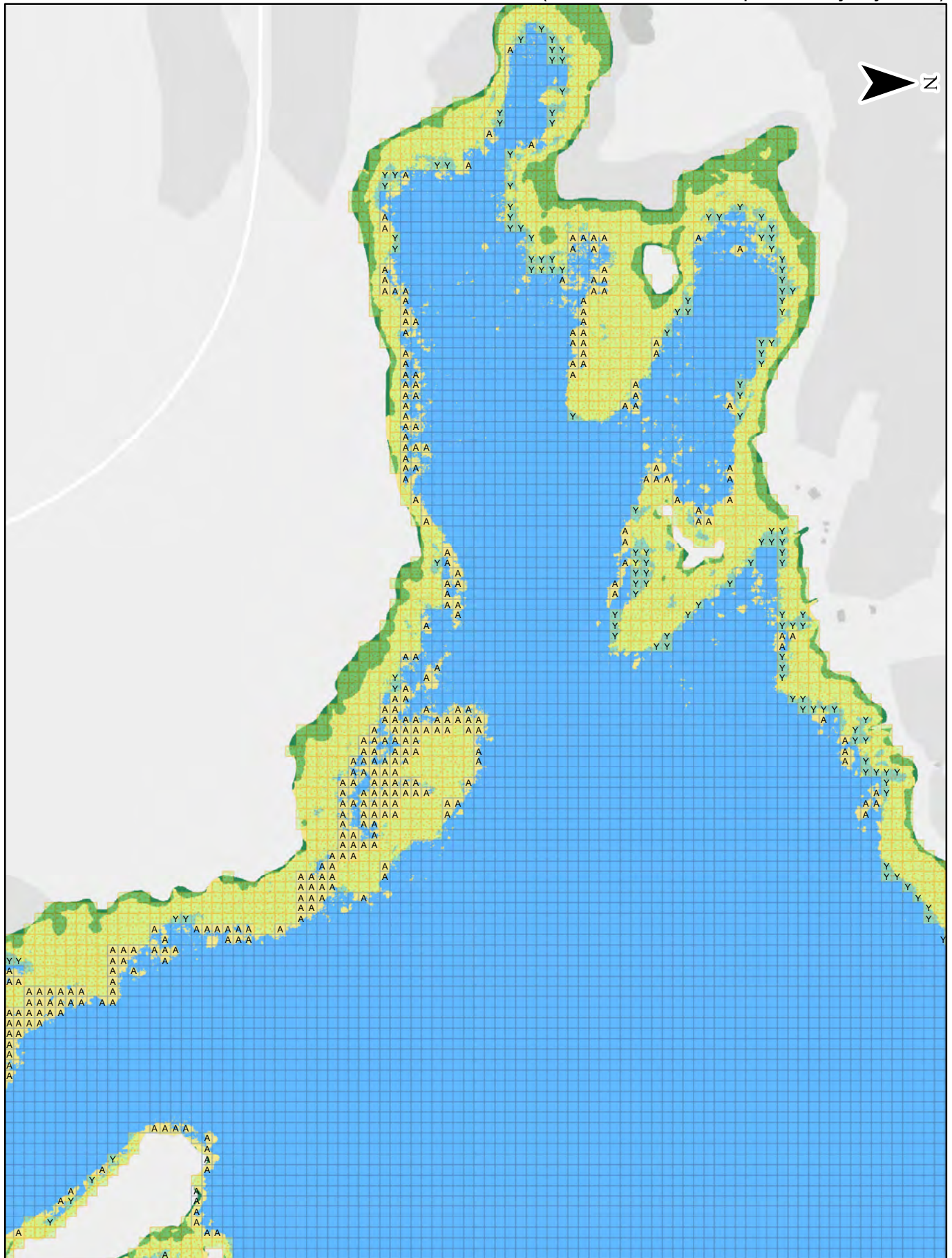


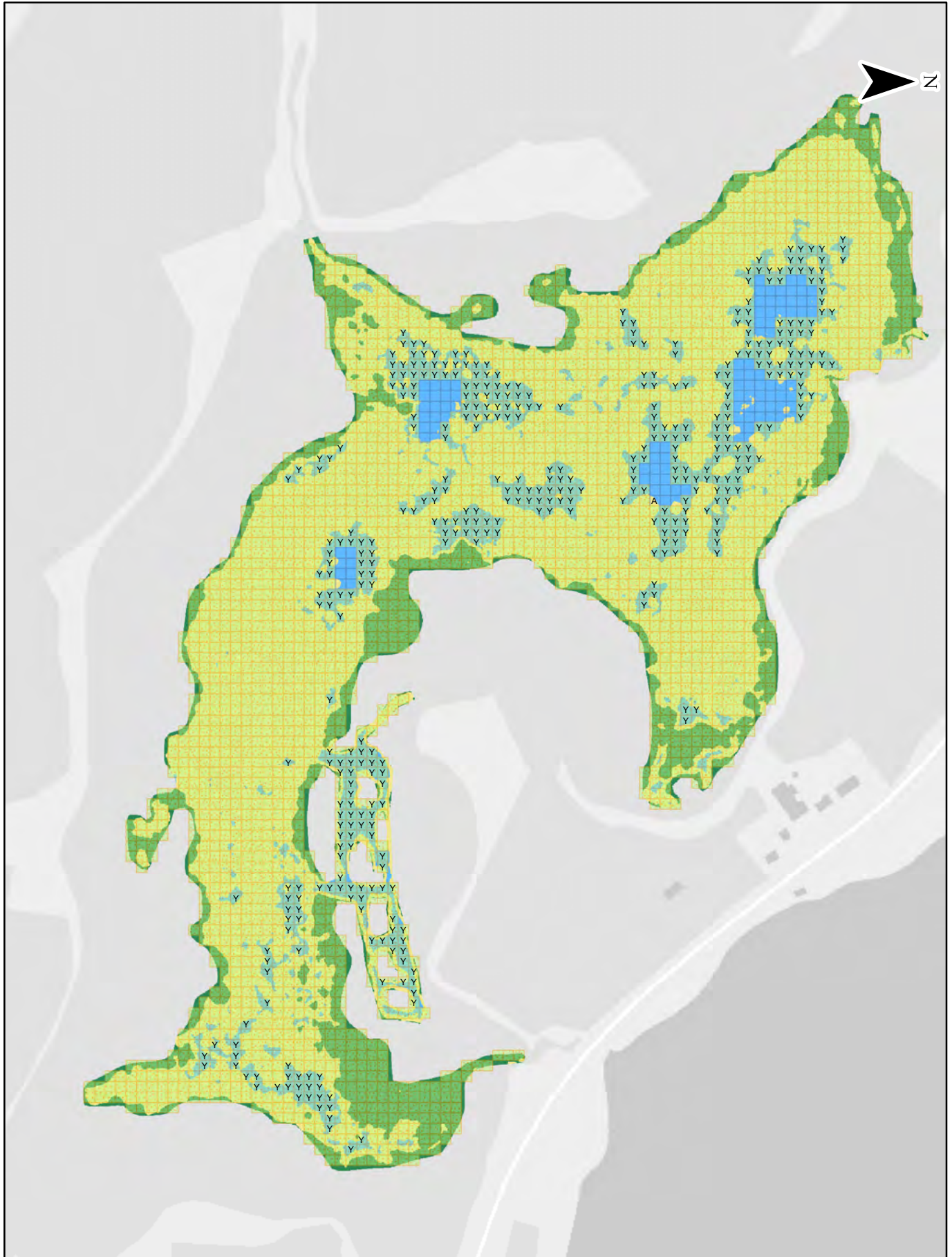
0 50 100 200 300 m





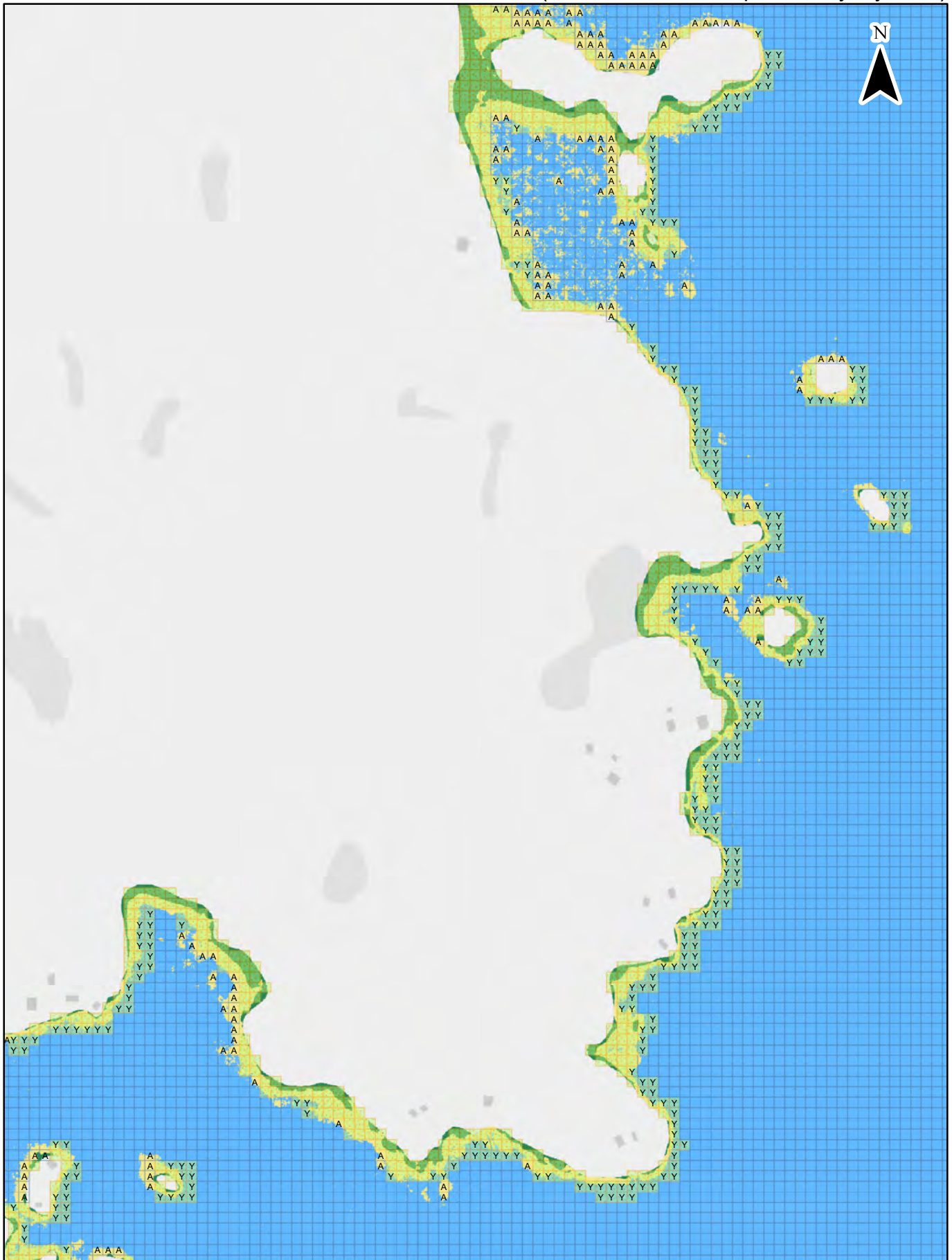
0 50 100 200 300 m



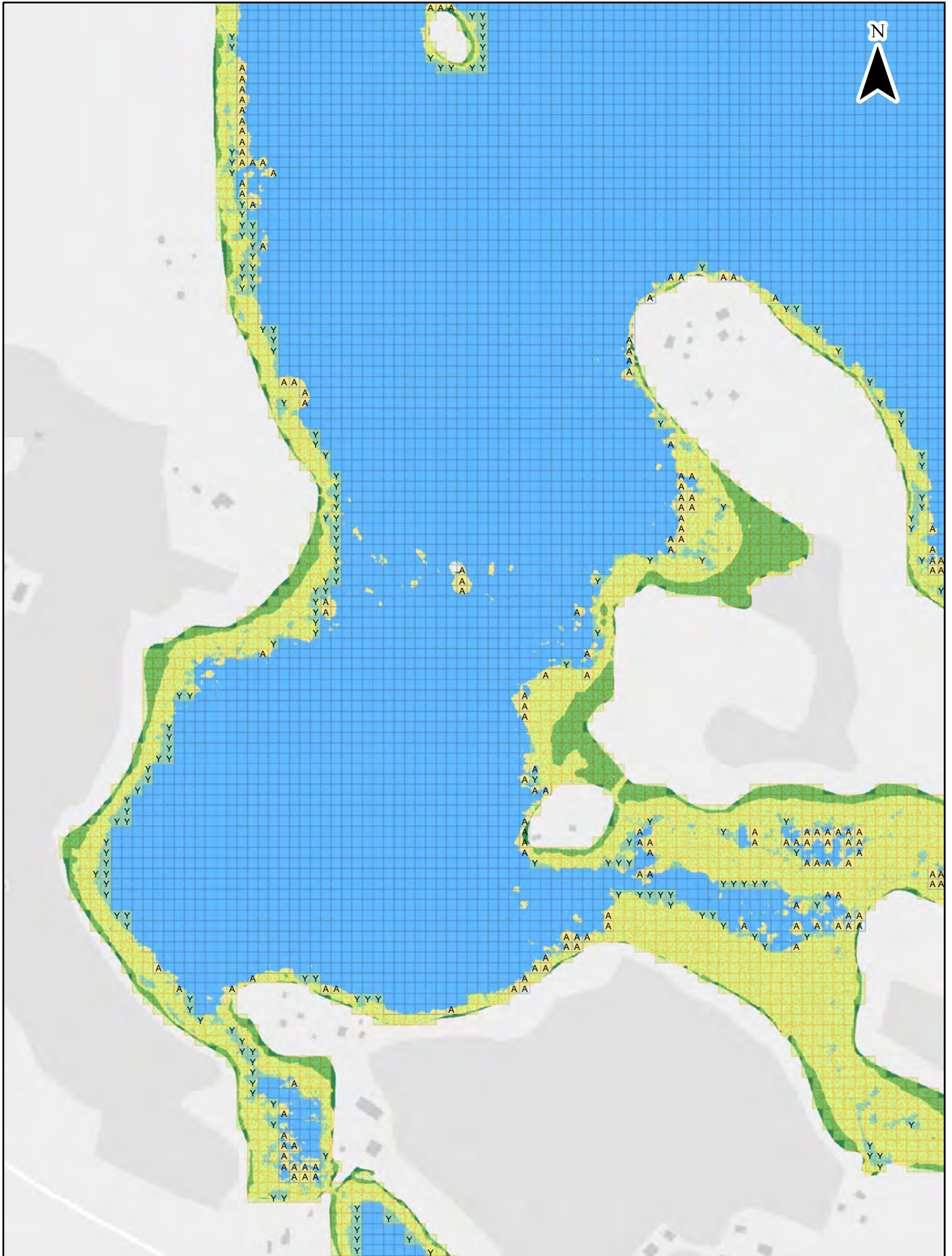


0 50 100 200 300 m



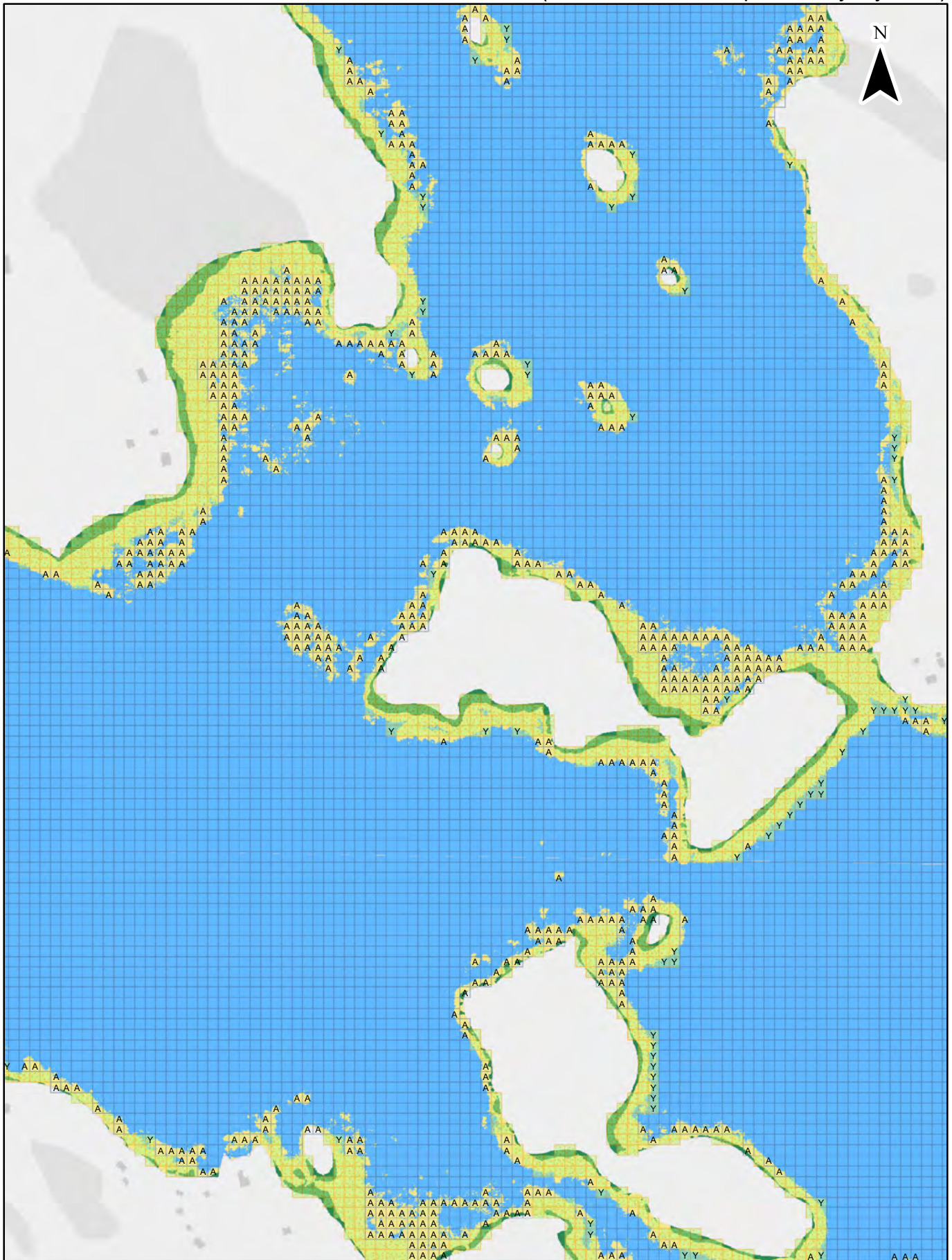


0 50 100 200 300 m

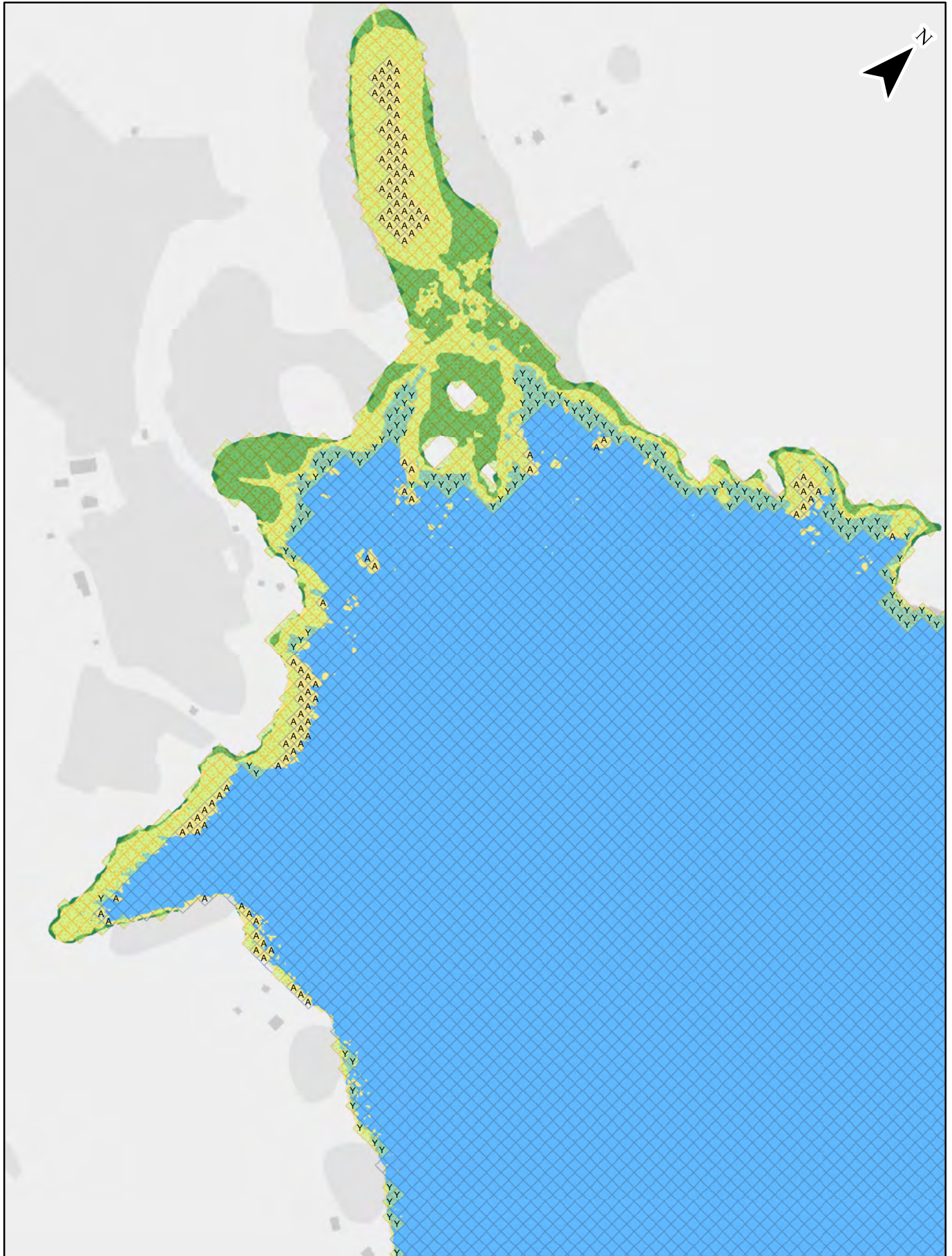


0 50 100 200 300 m

©Pohjois-Savon ELY-keskus, MML, ESRI, ESA 2020

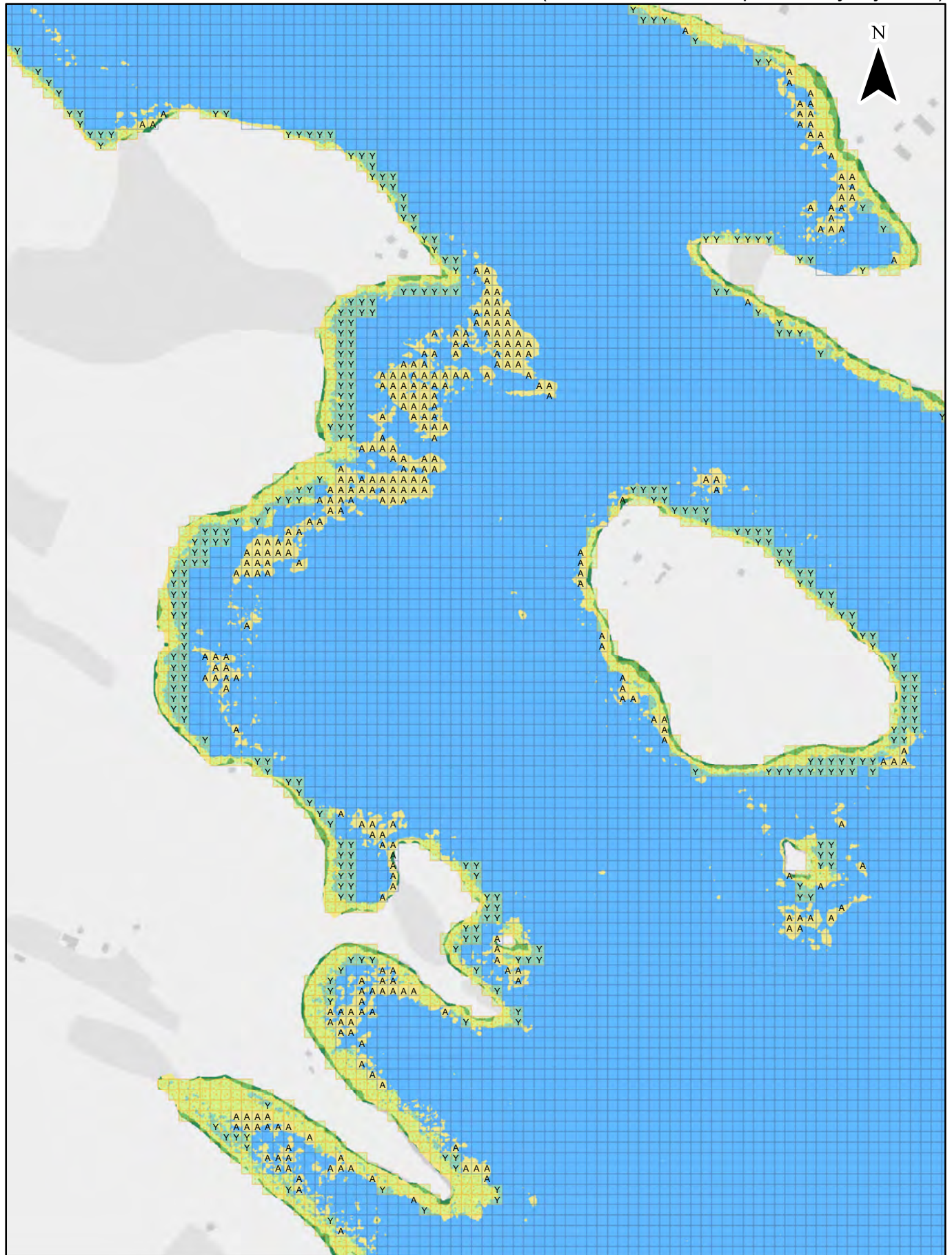


0 50 100 200 300 m

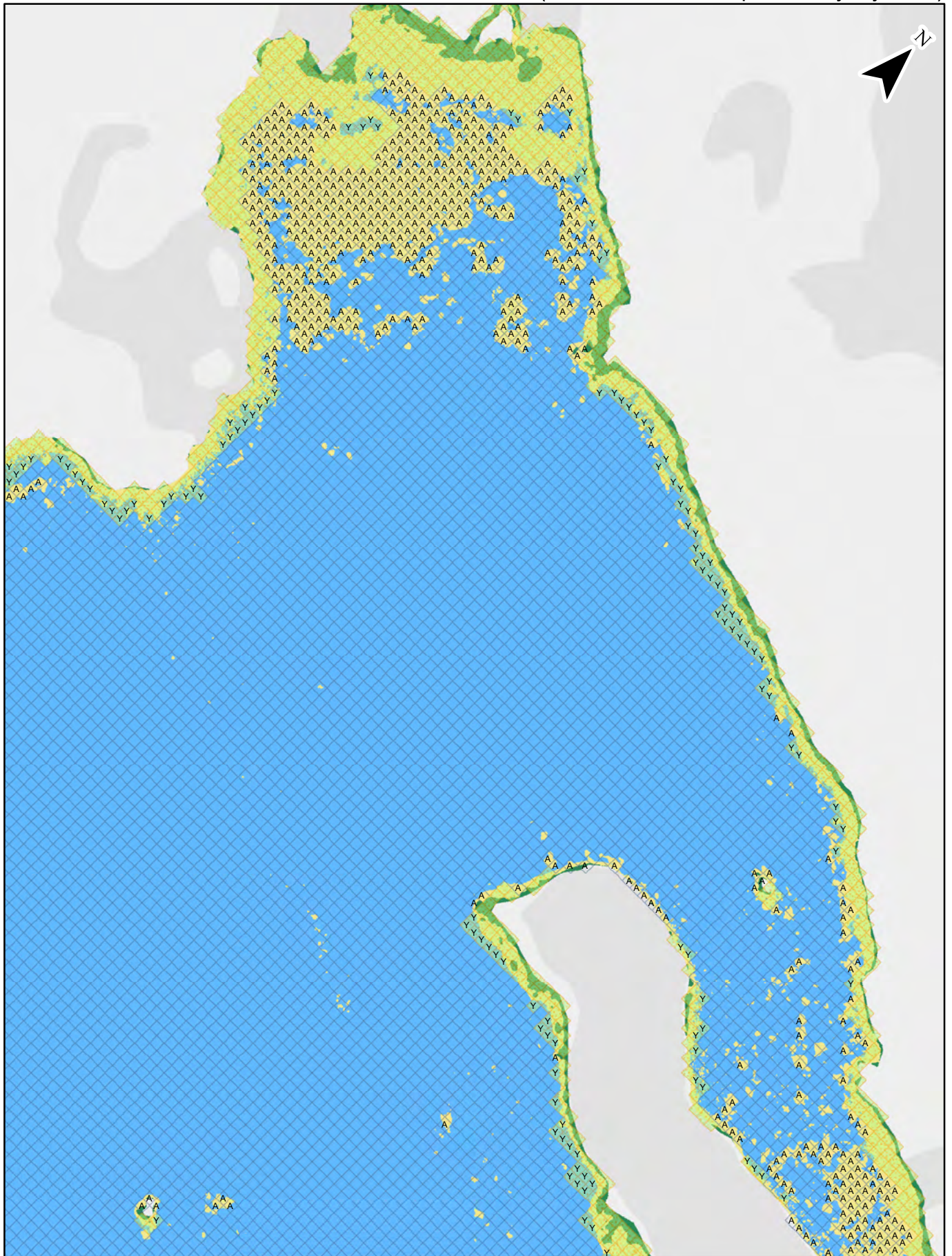


0 50 100 200 300 m

©Pohjois-Savon ELY-keskus, MML, ESRI, ESA 2020

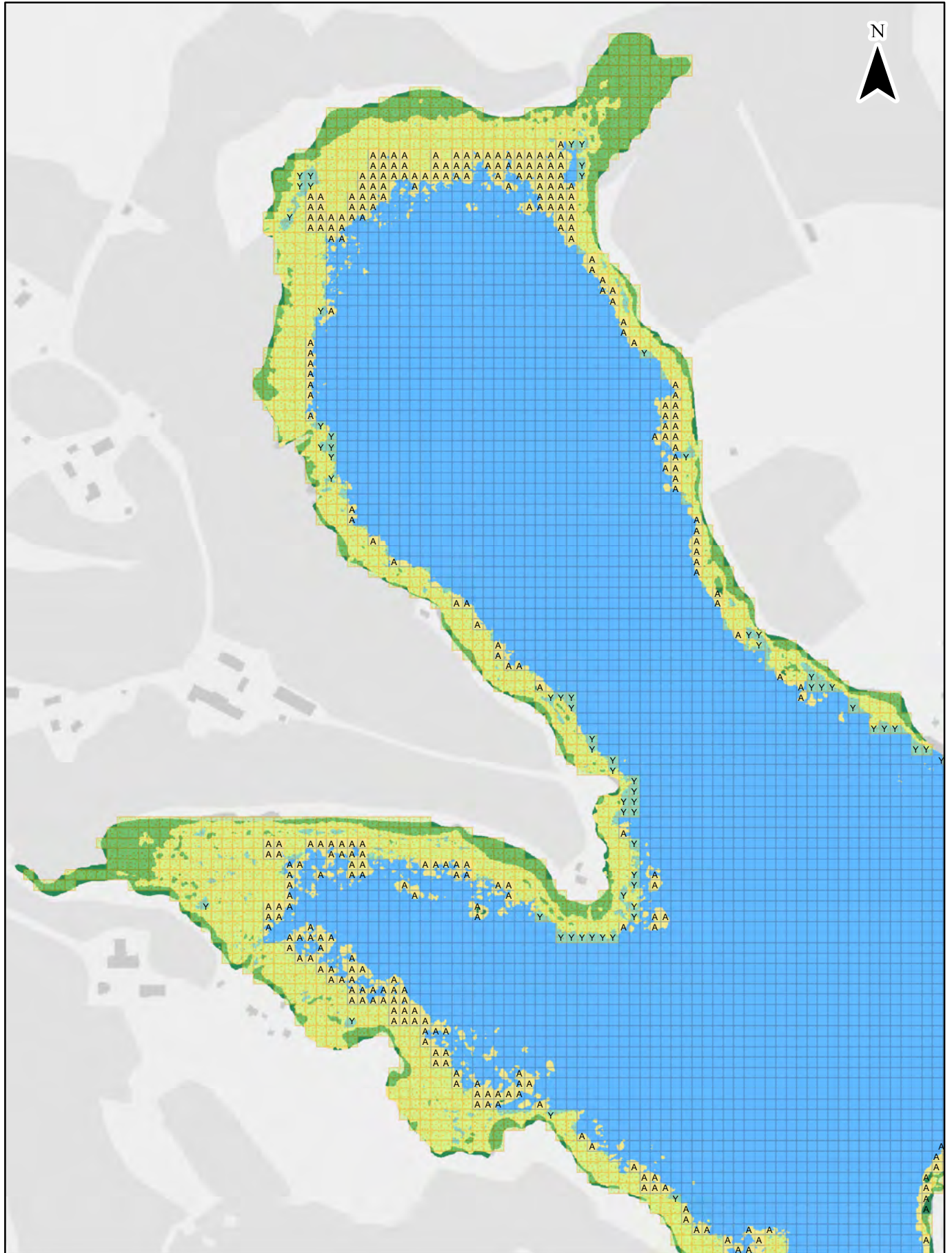


0 50 100 200 300 m

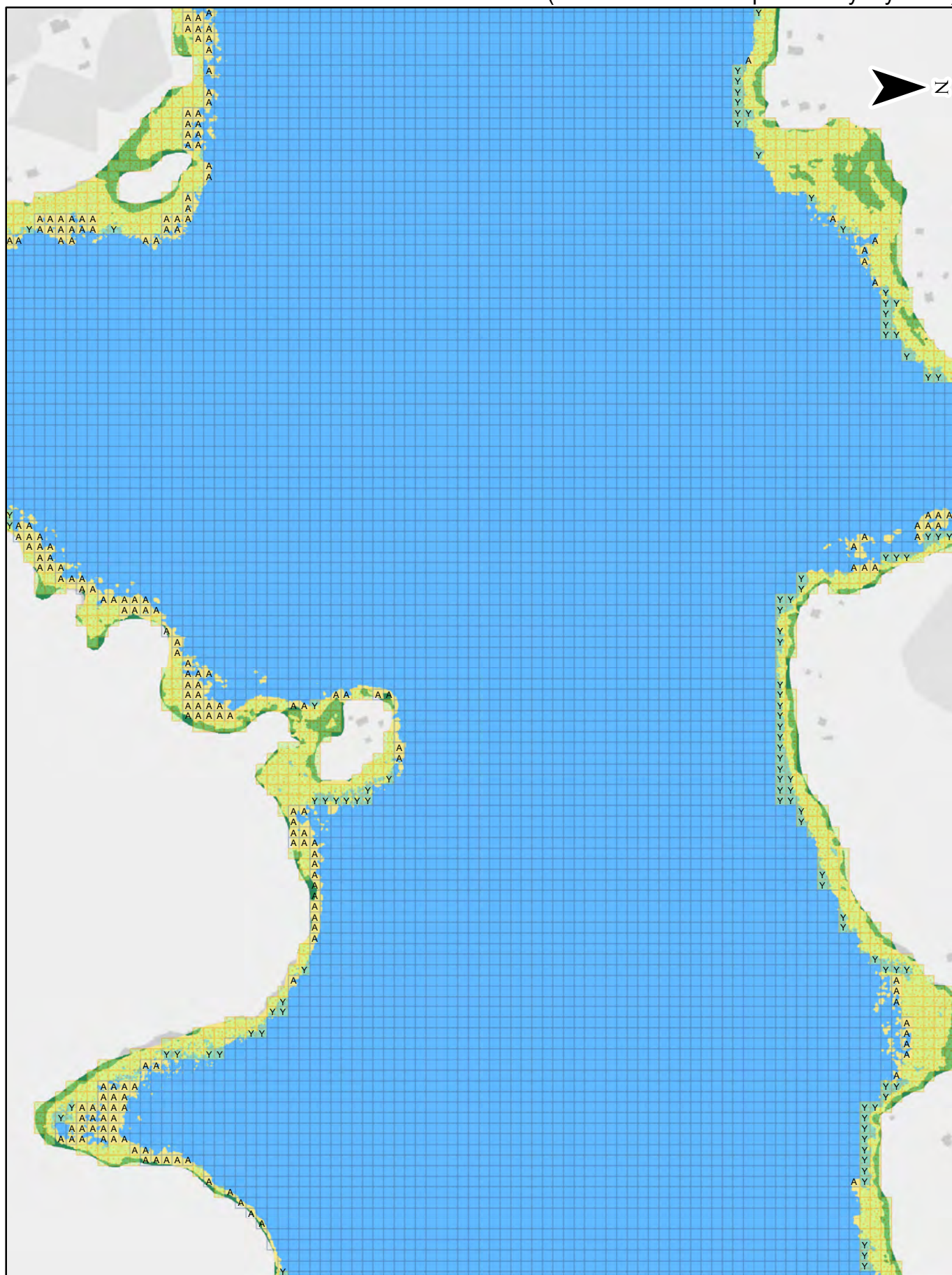


0 50 100 200 300 m

©Pohjois-Savon ELY-keskus, MML, ESRI, ESA 2020



0 50 100 200 300 m





0 50 100 200 300 m

Liite c Virhematriisi WorldView-3 -kuvasta luokittain

		Referenssiaineisto																	
		Carex sp.	Eleocharis sp.	Elodea canadensis	Equisetum fluviatile	Rakennettu ympäristö	Nuphar lutar	Avoin vesi	Metsä	Persicaria amphibia	Phragmites australis	Potamogeton natans	Kallio	Schoenoplectus lacustris	Sparganium sp.	Typha latifolia	Niityt, pellot ja muut ruohikot	Summa	
EcoSat-luokiteltu WorldView-3 -aineisto	Carex sp.	0																	0
	Eleocharis sp.		1																1
	Elodea canadensis			11				1											12
	Equisetum fluviatile				0														0
	Rakennettu ympäristö					2													2
	Nuphar lutar		2				67				7	2		6		1			85
	Avoin vesi	1	4	10			3	59		1	4		4		2				88
	Metsä		1		2	1	1	3	0		3	1	1				3		16
	Persicaria amphibia									1									1
	Phragmites australis						10				64						5		79
	Potamogeton natans											9							9
	Kallio												2						2
	Schoenoplectus lacustris				2										16				18
	Sparganium sp.															1			1
	Typha latifolia										1						11		12
Niityt, pellot ja muut ruohikot	1		1						1							1	0	4	
Summa	2	8	22	4	3	81	63	0	3	79	12	7	22	3	21	0		330	

Liite d Virhematriisi Sentinel-2 -kuvasta luokittain (MMU 100 m²)

		Referenssiaineisto																	
		Carex sp.	Eleocharis sp.	Elodea canadensis	Equisetum fluviatile	Rakennettu ympäristö	Nuphar lutar	Avoin vesi	Metsä	Persicaria amphibia	Phragmites australis	Potamogeton natans	Kallio	Schoenoplectus lacustris	Sparganium sp.	Typha latifolia	Niityt, pellot ja muut ruohikot	Summa	
EcoSat-luokiteltu Sentinel-2 -aineisto (MMU 100m ²)	Carex sp.	0																	
	Eleocharis sp.		2		1		1				1						1		6
	Elodea canadensis			8			1	2							1				12
	Equisetum fluviatile				0														0
	Rakennettu ympäristö			2		1		1											4
	Nuphar lutar	1	1	7		1	72	4			17	1		6	1	3			114
	Avoin vesi		1	5			3	48		1	3		1		1				63
	Metsä		3			1	3	5	0	1	5		4				3		25
	Persicaria amphibia									0									0
	Phragmites australis							3			46		2	2		11			64
	Potamogeton natans			1						1	1	11		1					15
	Kallio												0						0
	Schoenoplectus lacustris	1			3		1				4				13		2		24
	Sparganium sp.															0			0
	Typha latifolia										2						1		3
Niityt, pellot ja muut ruohikot																	0	0	
Summa	2	8	22	4	3	81	63	0	3	79	12	7	22	3	21	0		330	

Liite e Virhematriisi Sentinel-2 -kuvasta luokitellain (MMU 500 m²)

		Referenssiaineisto																	
		Carex sp.	Eleocharis sp.	Elodea canadensis	Equisetum fluviatile	Rakennettu ympäristö	Nuphar lutar	Avoin vesi	Metsä	Persicaria amphibia	Phragmites australis	Potamogeton natans	Kallio	Schoenoplectus lacustris	Sparganium sp.	Typha latifolia	Niityt, pellot ja muut ruohikot	Summa	
EcoSat-luokiteltu Sentinel-2 -aineisto (MMU 500m ²)	Carex sp.	0																0	
	Eleocharis sp.		1								1					1		3	
	Elodea canadensis			7				2							1			10	
	Equisetum fluviatile				0													0	
	Rakennettu ympäristö			1		1	1	1										4	
	Nuphar lutar			8		1	70	3			12	2		6	1	3		106	
	Avoin vesi	1	1	6			5	51		1	5		1		1			72	
	Metsä		4			1	3	3	0	1	7		4				4	27	
	Persicaria amphibia									0									0
	Phragmites australis								3		48		2	3			11		67
	Potamogeton natans			1			1				1		10		1				14
	Kallio													0					0
	Schoenoplectus lacustris	1	1		4		1				3				12		1		23
	Sparganium sp.															0			0
	Typha latifolia											2					1		3
	Niityt, pellot ja muut ruohikot											1						0	1
Summa	2	8	22	4	3	81	63	0	3	79	12	7	22	3	21	0		330	

Julkaisusarjan nimi ja numero Raportteja 48/2020				
Vastuualue Ympäristö ja luonnonvarat				
Tekijät Juho-Ville Marttila Jukka Aroviita Minna Kuoppala Antti Kanninen		Julkaisuaika Tammikuu 2021		
		Kustantaja /Julkaisija Pohjois-Savon elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus		
		Hankkeen rahoittaja /toimeksiantaja Ympäristöministeriö		
Julkaisun nimi Eri mittakaavaiset kaukokartoitusmenetelmät järvien rantavyöhykkeen kasvillisuuden seurannassa ja tilanarvioinnissa				
Tiivistelmä Kaukokartoitus mahdollistaa alueellisesti kattavan ja kustannustehokkaan tavan ympäristön tilan seuraamiseen. Yksi kaukokartoituksen sovelluskohde on järvien ranta- ja vesikasvillisuuden kartoittaminen, jota varten kehitettiin uusi tulkintamenetelmä Pohjois-Savon ELY-keskuksen ja Suomen ympäristökeskuksen hankkeessa ”Kansallisen kuvausohjelman ilmakuvat vesikasvillisuuden runsastumisen ja tilan arvioinnissa” (ILMAVERSO OHKE) vuosina 2018–2019. Tulkintamenetelmää sovellettiin erityisesti niin sanotun kasvittumisasteeseen perustuvaan kasvillisuuden tilan arviointiin. Tässä raportoitavassa jatkohankkeessa em. tulkintamenetelmällä analysoitujen järvien määrää kasvatettiin tilanarviointimenetelmän jatkokokehtämistä varten. Kansallisen kuvausohjelman tuottamissa ilmakuvissa on radiometrisiä häiriöitä, joiden takia menetelmän mukainen kasvillisuustulkinta pystyttiin tekemään vain noin puolelle alun perin tutkittavista järvistä. Lopulta yhteensä 84 järven tulkinta-aineisto saatiin koottua. Tästä aineistosta järville laskettiin kasvittumisaste-tunnusluku, jota käytettiin tilastolliseen ennustavaan mallinnukseen. Mallinnus ja tilanarviointi onnistuivat luotettavimmin runsashumuksissa järvissä sekä pienissä ja keskisuurissa humusjärvissä. Kasvittumisasteeseen perustuvat tila-arviot olivat näissä järvityypeissä selkeästi yhteydessä valuma-alueen kuormituspaineeseen ja vedenlaatuun. Ilmakuvatulkintaan liittyvien rajoitteiden vuoksi projektissa tutkittiin myös muiden aineistolähteiden hyödyntämistä. Sentinel-2-satelliittien optisille kuville laskettiin kuvaindeksejä, jotka luokiteltiin vettä ja kasvillisuutta kuvaaviksi luokiksi kynnystämällä. Näin tehtyjen luokittelujen tarkkuus oli ilmakuvatulkintoihin verrattuna tilastollisten tunnuslukujen valossa suhteellisen hyvä, mutta karttatarkastelu osoitti suuria virheitä. Optimaalisten kynnysarvojen määrittäminen ei myöskään ollut yksiselitteistä, joten alueellisesti laajan järvijoukon laadukas kasvillisuustulkinta ei vaikuta tällä menetelmällä mahdolliselta. Projektissa testattiin myös ensimmäistä kertaa Suomessa kaupallista EcoSat-kaukokartoitustuotetta, jolla satelliittikuvista pystytään luokittelemaan vesikasvillisuutta lajikohtaisesti. EcoSat-menetelmää sovellettiin Säskylän Pyhäjärvellä, jossa maastototuusaineistoa kasvu- toista kerättiin miehittämättömällä ilma-aluksilla kuvaamalla, kaikuluotaamalla sekä suorilla maastohavainnoilla. Droonikuvaus osoittautui tehokkaaksi menetelmäksi aineiston keräämiseen. Korkean maastoresoluution optisen WorldView-3-satelliittikuvan EcoSat-luokittelun kokonaistarkkuus (74 prosenttia) oli kaukokartoitustutkimuksien hyvää perustasoa. Suurten kustannusten vuoksi menetelmästä ei kuitenkaan ole vesikasvillisuuden rutiiniseurannan avuksi, mutta se voi soveltua suurten järvien tapauskohtaisiin tutkimuksiin. Raportin lopussa luodaan vielä lyhyt katsaus kaupallisen Picterra-kaukokartoitustuotteen käyttämisestä ilma- ja droonikuvista tehtäviin vesikasvitulkintoihin.				
Asiasanat (YSA:n mukaan) kaukokartoitus, ilmakuvat, satelliittikuvat, miehittämättömät ilma-alukset, vesikasvillisuus, seuranta, ekologinen tila				
ISBN (Painettu)	ISBN (PDF)	ISSN-L	ISSN (painettu)	ISSN (verkkopainettu)
	978-952-314-901-4	2242-2846	2242-2846	2242-2854
www	URN	Kieli	Sivumäärä	
www.doria.fi/ely-keskus	URN:ISBN:978-952-314-901-4	Suomi	145	
Kustannuspaikka ja -aika Kuopio 2020				

DOCUMENTATION PAGE

Publication series and numbers Reports 48/2020				
Area(s) of responsibility Environment and Natural Resources				
Author(s) Juho-Ville Marttila Jukka Aroviita Minna Kuoppala Antti Kanninen		Date January 2021	Publisher Centre for Economic Development, Transport and the Environment for North Savo	
		Financier/commissioner Ministry of the Environment		
Title of publication Eri mittakaavaiset kaukokartoitusmenetelmät järvien rantavyöhykkeen kasvillisuuden seurannassa ja tilanarvioinnissa (Multi-scale Remote Sensing Applications of Lake Macrophyte Abundance and Status Monitoring)				
Abstract Remote sensing enables spatially wide-ranging and cost-effective environmental monitoring. Remote sensing methods have been applied to map aquatic macrophytes of boreal lakes relatively frequently. Recently, we developed a novel interpretation method in the project 'Lake Macrophyte Abundance Monitoring and Status Assessment Based on Data of the Finnish National Aerial Photography Programme' in 2018–2019. The interpretation method is applied especially for macrophyte status assessment based on the percentage of vegetated littoral (PVL). In this follow-up project the number of lakes analysed with the above-mentioned method was increased to further develop the status assessment method. Since there were radiometric interferences in the input airborne orthophotos, only about the half of the lakes initially selected for the study were suitable for a valid vegetation interpretation. Nevertheless, 84 lakes were successfully interpreted and the PVL calculated. The values for expected PVL under reference conditions were defined using statistical predictive modelling. Modelling and status assessment were reliable on humus-rich lakes and medium-sized humic lakes. Status assessments on these lake types were clearly related to catchment area load and water quality. Since there are limitations in the aerial orthophoto interpretation, we studied the use of other data sources. Image indices computed from Sentinel-2 optical satellite images were classified by thresholding into classes representing vegetation and water to create a vegetation map comparable to the maps based on airborne data. This approach showed relatively good classification accuracies in numbers, but the map review showed significant misclassifications. In addition, it's not unambiguous to detect the optimal threshold value using this approach. Therefore, producing high-quality lake macrophyte interpretation using this approach does not seem potential with a spatially and numerically wide range of lakes. We also tested a commercial remote sensing product called EcoSat for the first time in Finland. The product uses optical satellite imagery of shallow bodies of water and delivers species-specific habitat maps. The EcoSat method was applied on Lake Pyhäjärvi in Southwestern Finland. The clear-water lake is shallow and mesotrophic. We collected training data related to nearshore vegetation and benthic habitats using direct in situ -observations, aerial drone imaging and echo sounding. Drone imagery turned out to be the most effective way to collect the ground truth data. Using very high-resolution WorldView-3 satellite imagery produced a 74 per cent overall classification accuracy. Due to its high costs, the method is not suited to assist the routine monitoring program of aquatic vegetation in Finland, but it could be applied to studies of large boreal lakes on a case-by-case basis. At the end of this report, we provide a short overview of another commercial remote sensing interpretation product called Picterra, which was used for aquatic vegetation classification from aerial and drone-based imagery.				
Keywords remote sensing, aerial images, satellite images, unmanned aircraft vehicles, aquatic vegetation, monitoring, ecological status				
ISBN (print)	ISBN (PDF) 978-952-314-901-4	ISSN-L 2242-2846	ISSN (print) 2242-2846	ISSN (online) 2242-2854
www www.doria.fi/ely-keskus		URN URN:ISBN:978-952-314-901-4		Language Teksti
Place of publication and date Kuopio 2020		Number of pages 145		

RAPORTTEJA 48 | 2020

**ERI MITTAKAAVAISET KAUKOKARTOITUSMENETELMÄT JÄRVIEN RANTAVYÖHYKKEEN
KASVILLISUUDEN SEURANNASSA JA TILANARVIOINNISSA**

Pohjois-Savon elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus

ISBN 978-952-314-901-4 (PDF)

ISSN-L 2242-2846

ISSN 2242-2854 (verkkojulkaisu)

URN:ISBN:978-952-314-901-4

www.doria.fi/ely-keskus | www.ely-keskus.fi