

Koneoppimis pohjaiseen ilmakuvatulkintaan perustuva järvien vesikasvillisuuden tilanarviointi

ILMAVERSO III OHKE -hankkeen loppuraportti

JUHO-VILLE MARTTILA, POHJOIS-SAVON ELINKEINO-, LIIKENNE- JA YMPÄRISTÖKESKUS

ANTTI KANNINEN, POHJOIS-SAVON ELINKEINO-, LIIKENNE- JA YMPÄRISTÖKESKUS

JUKKA AROVIITA, SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS

JONNA PUOSKARI, POHJOIS-SAVON ELINKEINO-, LIIKENNE- JA YMPÄRISTÖKESKUS

SISÄLLYS

1	Johdanto	2
2	Aineisto	4
2.1	Ortokuva-aineisto	4
2.2	Järvivesimuodostumat	4
2.3	Maankäytön, maanpeitteen ja kuormituksen aineistot.....	5
2.4	Syvyysaineisto.....	5
2.5	Muut yhdistetyt ominaisuustiedot	5
3	Menetelmä.....	6
3.1	Paikkatiedon esikäsittely	6
3.2	Geospaatialinen Picterra-koneoppimismalli	6
3.3	Mallinnetun aineiston tarkastus ja lisämuuttujien liittäminen	9
3.4	Vertailu- ja valittujen kuormitettujen järvijoukkojen valinta	10
3.5	Kasvittumisasteen laskenta ja vaihtelu	12
3.6	Vertailuolosuhteiden ja vertailuarvon mallinnus	13
3.7	Ekologinen laatusuhde ja tilanarviointi	18
3.8	Kasvittumisasteen ja vesienhoidon tilamuuttujien välinen suhde	21
3.9	Kasvittumisasteen käyttö neljännellä vesienhoitokaudella	23
4	Aineiston julkaisu	24
5	Pohdinta.....	25
6	Summary in English	28
7	Lähteet.....	30
Liite a.	Taulukot lämpösumman kehittymisestä	31

1 JOHDANTO

Suurvesikasvillisuutta koostumusta käytetään ilmentämään järvien tilaa osana vesistöjen ekologisen tilan arviointia (esim. Aroviita ym. 2019). Suurvesikasvillisuuden eli makrofyyttien runsautta on arvioitu jo pitkään kaukokartoitusaineistojen, kuten ilmakuvien (esim. Meriläinen ja Toivonen 1979) ja satelliittikuvien (esim. Nelson ym. 2006), avulla.

Aiemmissa tutkimuksissa (Leka ym. 2003, Vallinkoski ym. 2004, Kanninen 2012) on osoitettu, että ilmakuvilta erottuva vesikasvillisuuden runsaus, ns. kasvittumisaste, on yhteydessä sekä järven rehevyyteen, että havaittuun vesikasvilajiston tilaan. ”Kasvittumisaste” määritetään vertaamalla ilmakuvassa näkyvää ja paikkatietopohjaisella tulkintamenetelmällä mitattavissa olevaa vesikasvillisuuden kokonaispinta-alaa järven syvyysvyöhykkeiden perusteella määritettyyn vesikasvillisuuden mahdolliseen kasvialueeseen.

Pohjois-Savon ELY-keskuksen hankkeessa ”Kansallisen kuvausohjelman ilmakuvat vesikasvillisuuden tilan ja runsastumisen arvioinnissa (ILMAVERSO-OHKE)” (Marttila ym. 2018) kehitettiin tulkintamenetelmä järvien ranta- ja vesikasvillisuusvyöhykkeiden laajuuden määrittämiseen. Lähtöaineistona tälle menetelmälle olivat Maanmittauslaitoksen (MML) hallinnoimat avoimet ilmakuva-aineistot. Menetelmä perustui NDVI-kuvaindeksin luokitteluun kynnystämistekniikalla. Monen eri kuvaajan tuottamissa väri-infrakuvissa oli kuitenkin merkittäviä NDVI-arvoihin vaikuttavia sävyeroja, joten kynnysarvot tuli valita järviakohtaisesti, monissa tapauksissa jopa järvenosakohtaisesti.

Hankkeessa ”Eri mittakaavaiset kaukokartoitusmenetelmät järvien rantavyöhykkeen kasvillisuuden tilan arvioinnissa ja seurannassa (ILMAVERSO II OHKE)” (Marttila ym. 2020) NDVI-kynnystämällä ilmakuvatulkittujen järvien määrää kasvatettiin 84 kappaleeseen. Menetelmää yritettiin soveltaa 170 järvelle, mutta erilaisten häiriötekijöiden takia tulkinta onnistui vain noin puolessa järvistä. Koska järviakohtaisten kynnysarvojen määrittäminen oli työlästä ja koska aineistossa oli paljon NDVI-kynnystämiseen soveltumattomia järviä, haluttiin tarkastella vaihtoehtoisia ratkaisutapoja kaukokartoitusmenetelmiin perustuvalle vesikasvitulkinnalle.

NDVI-kynnystämistekniikan soveltamista on tutkittu myös Sentinel-2-satelliittien optisiin kuviin (Marttila ym. 2020). Kyseiset kuvat ovat ilmaiseksi ja avoimesti saatavilla, minkä lisäksi ajallinen kattavuus on hyvä: todennäköisyys on korkea sille, että vesikasvien kasvukauden osalta sopivalta ajankohdalta on vuosittain tarjolla pilvetöntä satelliittikuvaa. Tilastollisten tunnuslukujen valossa satelliittikuvista tehdyt tulokset olivat suhteellisen hyviä, mutta karttatarkastelu osoitti suuria virheitä. 10 metrin maastoresoluutio on liian karkeaa Suomen järvien kapeiden litoraalivyöhykkeiden kartoittamiseen. Lisäksi kuvien hyödyntämistä rajoitti kuvissa havaittu noin kymmenen metrin systemaattinen geolokaatiovirhe.

ILMAVERSO II -hankkeessa tutkittiin jo pienimuotoisesti Picterra-palvelun hyödyntämistä (Marttila ym. 2020). Kyseessä on selainpohjainen palvelu kohteiden tunnistamiseen kaukokartoitusaineistoista. Palvelun avulla luodaan ja käytetään pilvipalvelussa ajettavia koneoppimismalleja. Picterra-palvelua käytetään käyttäjäystävällisellä käyttöliittymällä, joten käyttäjän ei tarvitse itse olla ohjelmistokehityksen osaaja (<http://picterra.ch>).

Pohjois-Savon ELY-keskuksella oli käytössään lyhytaikaisia Picterra-lisenssejä vuosien 2021–2022 aikana. Koekäytön aikana koneoppimismalleja testattiin mm. vesistöjen kuormitusriskiä aiheuttavien maataloustoiminnan kohteiden, kuten lietesäiliöiden, rehumaajien, jaloittelutarhojen ja kuivalantaloiden, tunnistamiseen. Samalla jatkettiin myös mallien kehittämistä vesikasvillisuusvyöhykkeen tunnistamiseksi ilmakuvista. Alustavat kokeilut yleismallilla, joka pystyisi tunnistamaan vesikasvillisuusvyöhykkeen luotettavasti eri vuosien eri sävyisistä kuvista, olivat rohkaisevia. Kehittämistyötä jatkettiin

ympäristöministeriön rahoituksella hankkeessa “Koneoppimispohjaiseen ilmakuvatulkintaan perustuva järvien vesikasvillisuuden tilanarviointi - menetelmän jatkokehityshanke (ILMAVERSO III)”, jonka tulokset raportoidaan tässä raportissa.

2 AINEISTO

2.1 ORTOKUVA-AINEISTO

Vesikasvillisuustulkinnan lähtöaineisto oli koko maan kattava MML:n väri-infraortokuvien arkisto vuosilta 2012–2023. Ortokuva tarkoittaa yksittäisistä ilmakuvista tehtyä orto-oikaistua yhdistelmää ja vastaa geometrialtaan karttaa.

Väri-infraortokuvissa pikseleihin on tallennettu tieto kolmella värikanavalla: lähi-infrapunasäteily sekä punaisen ja vihreän valon aallonpituusalueilta heijastuva säteily. Väri-infrakuvia kutsutaan myös vääräväriviksi, sillä tietokonenäytön RGB-kanaville aallonpituuskanavat ovat asetettu niin, ettei esitettävä kuva vastaa alkuperäisiä ihmissilmän havaitsemia värisävyjä.

Maanmittauslaitoksen ortokuvamateriaali vuosilta 2012–2015 ovat Maanmittauslaitoksen, Maaseutuviraston ja Suomen metsäkeskuksen itsenäisesti tekemistä tai tilaamista ilmakuvauksista. Vuonna 2016 käynnistyi kansallinen ilmakuvausohjelma, jossa edellä mainittujen virastojen kuvaustarpeet yhdistettiin suunnitelmalliseksi kokonaisuudeksi. Siirtymäkaudella 2016–2019 virastojen ydintoiminnan varmistamiseksi tehtiin myös ilmakuvaussuunnitelmaa täydentäviä muita ilmakuvauksia, mutta vuodesta 2020 lähtien kuvaukset on toteutettu täysin suunnitelman mukaisesti. Tuolloin ohjelman rahoitus ja hallinta siirtyi KALLIO-yhteistyöelimelle, jonka toimintaan osallistuvat maa- ja metsätalousministeriö, ympäristöministeriö, puolustusministeriö, Suomen metsäkeskus, Metsähallitus, Ruokavirasto, Suomen ympäristökeskus (SYKE) ja Maanmittauslaitos.

Kansallisessa ilmakuvausohjelmassa Suomi on jaettu alueisiin, jotka pohjoisinta Lappia lukuun ottamatta ilmakuvaataan 3 vuoden välein. Puolet kuvauksista tehdään keväällä ennen kuin puissa on lehtiä ja toinen puoli kesällä, kun puissa on jo täydet lehdet. Kesäkuvauksissa alue myös laserkeilataan Kansallisen laserkeilausohjelman mukaisesti. Mikäli alue kuvataan esimerkiksi kesällä 2020, seuraavat kuvaukset ovat keväällä 2023, sitä seuraavat kesällä 2026 jne.

MML ei julkaise tarkkaa tietoa siitä minkä päivämäärän ilmakuvauksesta kukin ortokuvan pikseli on. Sen sijaan MML julkaisee polygonivektorimuotoisen karttatasoja vuosittaisiin ilmakuvauksiin kuuluneista alueista. Karttatasot ovat ladattavissa osoitteesta: <https://www.maanmittauslaitos.fi/laserkeilaus-ja-ilmakuvaus> (tilanne 28.1.2025). Tämän perusteella voidaan laskea aikaväli, jota järven pikselit ortokuvassa ovat. Samassa yhteydessä määritetään myös järven kattaneet ilmakuvauksessiot, kuvaajat ja kuvauksen tilaajat.

2.2 JÄRVIVESIMUODOSTUMAT

Kasvillisuusvyöhykkeen tunnistaminen rajattiin järvien rantaviivan sisäpuoliseen osaan ortokuvasta. Rantaviiva-aineistona tähän tarkoitukseen toimi Suomen ympäristökeskuksen hallinnoiman Vesipuidedirektiivin mukaiset vesimuodostumat 3. suunnittelukausi -aineistokokonaisuuden (myöhemmin raportissa nimityksenä VHS-järvet) polygonivektorimuotoiset järvivesimuodostumat. Polygonigeometrian kyseiset vesimuodostumat ovat saaneet 1:10 000 mittakaavaisen Ranta10-aineiston pohjalta, jonka tuottamisesta vastaa myös SYKE.

Ranta10-aineistoon pohjautuneet järvipolygonien geometriat olivat monissa tilanteissa huonolaatuisia: rantaviivageometriassa saattaa olla kymmenien metrien sijaintivirhe. 277 järven kohdalla polygonigeometria korvattiin MML:n maastotietokannan vakavesien geometrialla.

Aineistosta rajattiin Picterra-malliajoon ne järvivesimuodostumat, jotka olivat ensisijaiselta tyypiltään pieniä humusjärviä (Ph), keskisuuria humusjärviä (Kh), runsashumuksisia järviä (Rh), matalia humusjärviä

(Mh) tai matalia runsashumuksisia järviä (MRh). Neljännen vesienhoitokauden valmistelussa tehtyä tyypittelyn tarkistusta ei ole huomioituna.

Jatkossa tässä raportissa termillä järvi tarkoitetaan järvivesimuodostumaa.

2.3 MAANKÄYTÖN, MAANPEITTEEN JA KUORMITUKSEN AINEISTOT

Vemalan paikkatietoaineistot on tuotettu Suomen ympäristökeskuksen operatiivisella WSFS-Vemala - kuormitusmallilla. Vemala-mallissa on sisäinen valuma-aluejako, joka koostuu yli 200 000 uoman ja järven valuma-alueesta. Valuma-alueet ovat jaettu vesi- ja maa-alueisiin. Lopputuotteena ovat kolme karttatasoa: Vemalan valuma-alueet, vesimuodostumat ja maa-alueet. Vemalan vesimuodostuman määritelmä ei ole täysin sama kuin edellä esitetyillä järvivesimuodostumilla. Vemala-aineistosta käytettiin 31.1.2024 avoimesti jaettavana ollutta tietoa.

Vemalan valuma-alueille on laskettu monia tietoja valuma-alueen maankäyttöön ja maanpeitteeseen liittyen. Turvemaihin (ojitetut ja ojitetut turvemaat; turvetuotantoalueet) on Vemalan valuma-alueisiin laskettu Soiden ojitustilanne SOJT_09b1 -aineistosta, jonka tuottanut myös SYKE.

Vemala-aineiston lisäksi valuma-alueen maankäyttöä kuvaavaa tietoa yhdistettiin SYKE:n Biomon-hankkeessa tuotetusta aineistosta.

2.4 SYVYYSAINIISTO

Järvien syvyystiö on vesistöjen perustietovarannosta (VesipetoDW). On huomioitavaa, että tietovarannossa syvyystiö on järvikohtainen, ei vesimuodostumakohtainen. Tietojen yhdistäminen tehtiin järvitunnuksen perusteella. 18 järvimuodostumalle, jotka olivat järvestä erikseen rajattuja osia, pystytettiin erikseen yhdistämään nimenomaisesti SYKE:n paikkatietomuotoiseen syvyyssaineistoon pohjautuva vesimuodostumakohtainen syvyystiö.

Vesivarojen perustietovarannoista tuotiin tieto luotaajasta, luotauspäivämäärästä ja luotausmenetelmästä, keskisyvyydestä ja suurimmasta syvyydestä. Lisäksi varannon tiedoista laskettiin 0–3 metrin syvyyvyöhykkeen pinta-ala.

2.5 MUUT YHDISTETYT OMINAISUUSTIEDOT

Edellä mainittuun tietojoukkoon yhdistettiin lisäksi tieto järven kuulumisesta MaaMet-seurantaan sekä päävyöhykemenetelmällä tehtyyn vesikasvillisuuden lajistoseurantaan.

Rakennetun alueiden osuus valuma-alueesta liitettiin SYKE:n Biomon-hankkeesta saadusta taulukosta. Osuus määriteltiin CORINE 2018 -aineistoon perustuen.

3 MENETELMÄ

3.1 PAIKKATIEDON ESIKÄSITTELY

Järvivesimuodostuma-aineiston rajaaminen haluttuihin järvityyppeihin (Ph, Kh, Rh, Mh, MRh) ja ilmakuvaustiedon liittäminen tehtiin ArcMap 10.8.1.4362 -ohjelmalla. Tässä vaiheessa saatiin jo tietoon järviä, joiden pikselit ortokuvassa olivat varmasti aikavälin 1.7.–10.9. ulkopuolella. Tällaiset järvet poistettiin joukosta.

Analyysi VHS-järvien ja maastotietokannan vakavesien välisistä geometriaeroista sekä geometrioiden korvaaminen tehtiin taas QGIS 3.30 -ohjelmalla. Korvattavien kohteiden valinta perustui päällekkäisanalyysiin Symmetrical Difference -työkalulla, jonka kautta saatiin tieto geometrisessa leikkauksessa jäljelle jäävistä ”pirstaleista”, jotka eivät olleet tasoissa päällekkäin. Korvaaminen tehtiin 277 järvelle, joissa pirstaleiden pinta-ala oli vähintään 7 prosenttia järvivesimuodostumien pinta-alasta ja joissa karttatarkastelulla vesimuodostumien raja-alueet olivat yhteneväiset.

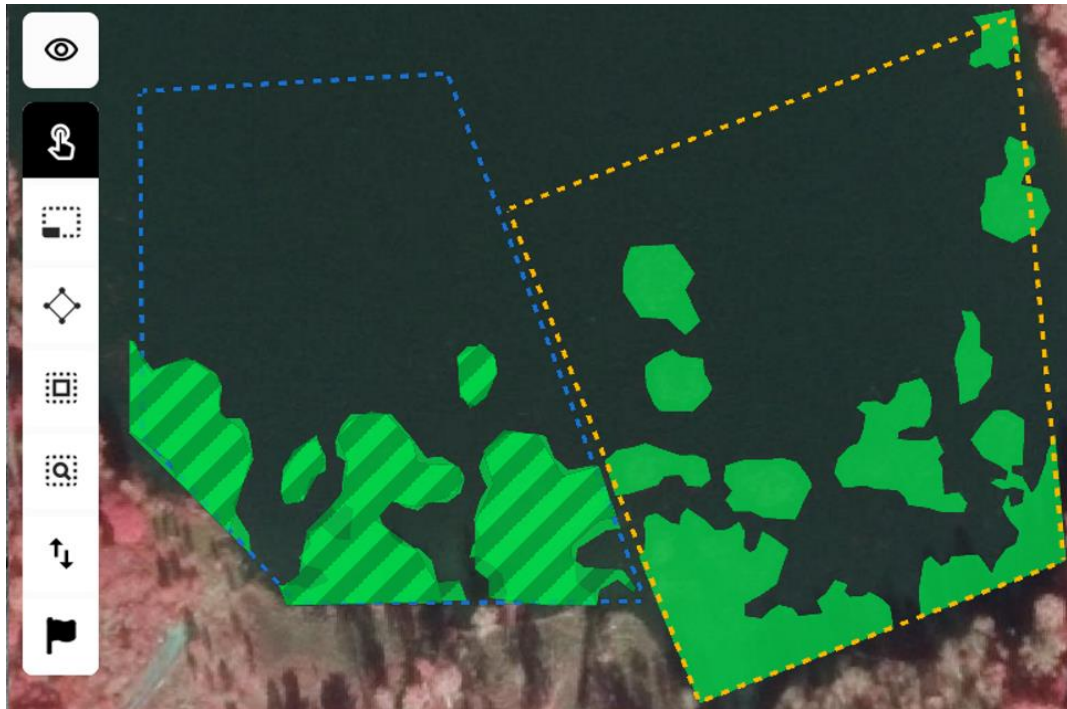
Aineistosta rajattiin tässä vaiheessa pois myös vuoden 2021 kesäkuvatut järvet. Kyseinen joukko koostui vain 155 kappaletta järviä Lapista ja Koillismaalta, jotka olivat kuvattu niinkin varhain kuin 1.7.-9.7.2021. Tämän joukon lukuisat järvet sisälsivät kaiken lisäksi paljon aallokosta aiheutuvaa heijastusta.

3.2 GEOSPATIAALINEN PICTERRA-KONEOPPIMISMALLI

Pohjois-Savon ELY-keskuksen satelliitti- ja ilmakuvien sekä paikkatiedon hyödyntämisen kehittämishankkeessa pilotoitiin koneoppimismenetelmien käyttöä kohteiden tunnistamisessa kaukokartoitusaineistoista. Käytetty tekniikka oli sveitsiläisen Picterra-nimisen yrityksen selainpohjainen palvelu. Mallien opettamista ja ajamista varten Picterra Enterprise -lisenssi oli käytössä kolmena eri ajankohtana: 1.12.2021–28.2.2022; 15.8.2022–14.11.2022; 1.5.2023–30.4.2024.

Aikaisemmissa ILMAVERSO-hankkeissa (Marttila ym. 2018, Marttila ym. 2020) oli todettu ortokuvien sisältämien radiometristen sävyerojen vaikeuttavan kasvillisuusvyöhykkeen luokittelua. Tämän vuoksi koneoppimismalleja luotiin vaihteittain. Ensimmäisessä vaiheessa kokeiltiin, voidaanko kasvillisuusvyöhyke tunnistaa onnistuneesti samalla kuvauslennolla kuvatuille eri järville. Lisäksi ensimmäisessä vaiheessa testattiin kohteiden tunnistamista sekä tosiväri- että väri-infraortokuvista. Toisessa vaiheessa testattiin tunnistamisen luotettavuutta saman kuvaajan saman kesän eri ilmakuvauksessiodien välillä, kolmannessa vaiheessa saman kesän sisällä eri kuvaajien kuvien välillä ja neljännessä vaiheessa yleismallia eri vuosien kuvien välillä. Opetusaineistoa ei ole siis kerätty satunnaisotannalla, vaan valinta muistuttaa ryväsotantaa.

Vesikasvivuöhykkeen tunnistamiseen käytettiin alueiden ja tekstuurien tunnistamiseen soveltuvaa Picterran segmentaatiomoodia. Lopputuloksena on vyöhykemäinen alue lukumääräisesti laskettavien kohteiden sijaan. Mallin opettaminen tehdään digitoimalla polygoneja, joiden alueella kuvan pikselit kuuluvat vyöhykkeeseen (kuva 1). Vyöhyke koostui siis niin emergentistä rantakasvillisuudesta kuin keskivedenpinnan alapuolella sijaitsevasta kelluslehtisten ja ilmaversoisten kasvien muodostamasta varsinaisesta vesikasvillisuudesta. Digitointityö aloitettiin ArcMapin normaaleilla digitointityökaluilla taitepisteitä hiirellä manuaalisesti klikkaillen. Koska pinta-altaan pienimpien kasvustojen klikkaileminen olisi ollut aivan liian työlästä, alle 15 neliömetrin kasvustoja ei digitoitu. Vuonna 2023 löytyi tehostavaksi työkaluksi QGIS-plugin ”Polygon by clicking in map image”. Vielä enemmän työtä tehosti vuonna 2024 Picterran alustalleen lanseeraama ”AI magic wand” -työkalu. Kaikilla kolmella eri menetelmällä luotu aineisto on arkistoitu SYKE:n verkkoasemalle.



Kuva 1. Havainnekuva Picterra-palvelun karttanäkymästä, jossa opetetaan vesikasvillisuusvyöhykkeen tunnistamista väri-infraortokuvasta. Opetusalue on merkitty oranssilla katkoviivalla ja tarkkuusalue sinisellä. Vesikasvillisuusvyöhykkeeseen kuuluvat pikselit ovat esitetty tasaisen vihreinä polygoneina. Picterran mallintamat vyöhykkeet ovat esitettynä myös vihreinä kuvioina, mutta kahdella sävyllä raidoitettuna.

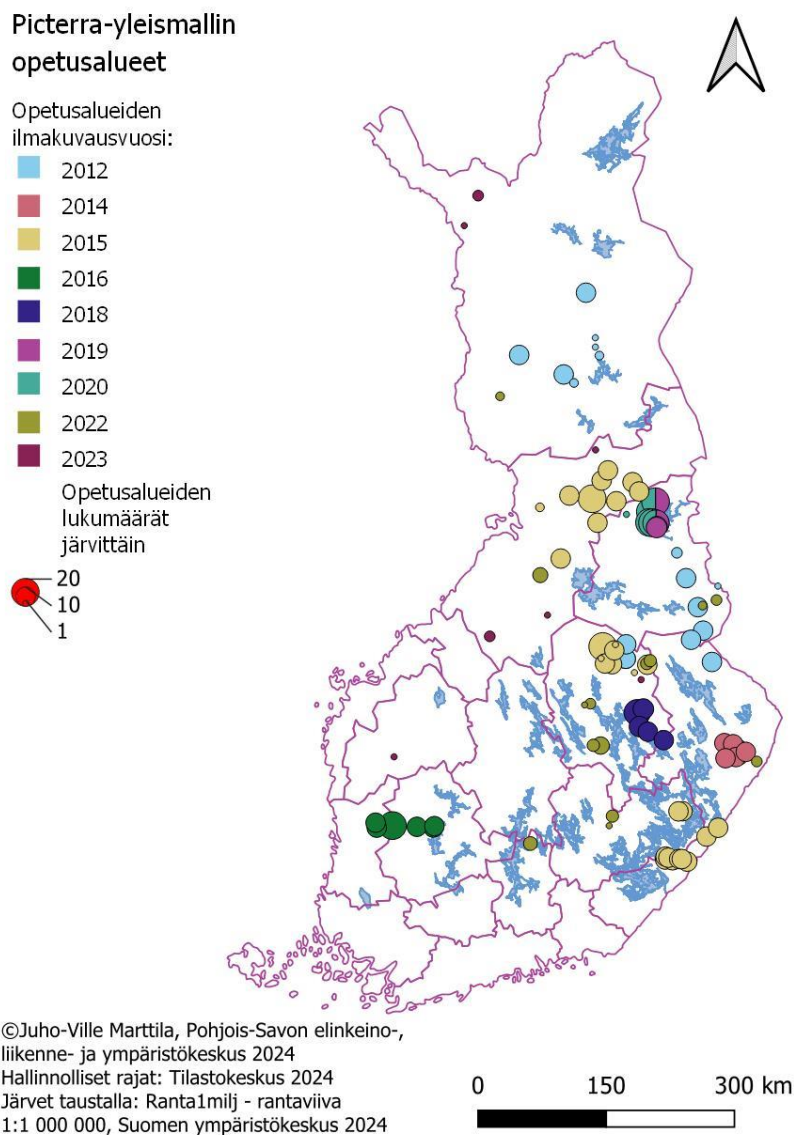
Ensimmäisen vaiheen tuloksista todettiin, että Picterra-koneoppimismalli pystyi tunnistamaan vesikasvillisuusvyöhykkeen väri-infraortokuvista hieman paremmin kuin tosivärikuvista. Aineistoverailuja tehdessä mallien onnistumisprosentin laskenta perustui Jaccardin indeksiin, jossa referenssikuvioiden ja mallinnettujen kuvioiden erillisyyttä verrataan niiden päällekkäisyyteen (leikkauksen suhde unioniin). Väri-infraortokuvien käyttöön perustuvat mallit olivat onnistumisprosentiltaan noin 3 prosenttiyksikköä tosivärikuvista tehtyjä malleja parempia.

Opetusaineistossa 91 järvelle piirrettiin ensisijaisesti 1,0 hehtaarin kokoisia (vaihteluväli 0,5–1,5 ha) opetusalueita. Opetusaineiston kerääminen aloitettiin vuosien 2014–2020 ilmakuvista niin, että ilmakuvauksessiohjelmaisissa malleissa opetusalueita oli kymmenen kappaletta järveä kohti (Kh-tyypin järville 20 kappaletta). Kun yleismallin toteuttaminen alkoi vaikuttaa toteuttamiskelpoiselta, jäljelle jääneiden vuosien ilmakuvista digitoitiin lisää järviä, mutta opetusalueiden määrät per järvi jäivät pienemmäksi resurssisyistä. Yleismalliin sisältyneiden opetusalueiden maantieteellinen jakautuminen, opetusalueiden määrä järvittäin ja opetusalueiden ilmakuvavuosien jakauma on esitetty kuvassa 2.

Picterra-yrityksen tekniset asiantuntijat autoivat mallinnusparametrien optimaalisessa asettamisessa parhaan tarkkuuden saavuttamiseksi. Vaikka ilmakuvavärisävyjen natiiviresoluutio on 50 senttimetriä, Picterra-yleismalli tuotti paremman tuloksen käytettäessä 35 senttimetrin spatiaalista resoluutiolla. Tällöin opetusalgoritmin käyttämät opetustilat sisälsivät sopivan määrän vyöhykkeeseen kuuluvia pikseleitä ja muita tausta pikseleitä. Lopullisessa yleismallissa käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 1. Malliparametrien tarkempi kuvaus löytyy Picterran dokumentaationsivusto: <https://docs.picterra.ch/>.

Taulukko 1. Vuosien 2012-2023 ilmakuvista tehdyssä Picterra-koneoppimismallissa käytetyt parametrit (suluissa englanninkieliset nimitykset Picterra-käyttöliittymässä).

Picterra-yleismallin parametri (detector setting)	Arvo
Spatiaalinen resoluutio	35 cm
Koulutusvaiheiden lukumäärä (training steps)	1400
Koulutustiilien koko	416
Tunnistustyyppi (detection type)	segmentaatio
Lopputuotteen geometriatyyppi (output type)	polygoni
Kustomoitu kokosuodatin (custom filter size)	10–∞ m ²
Neuroverkkomalli	ResNet50
Taustapoininnan suhde (background sampling ratio)	0,3



Kuva 2. Opetusaineiston spatiaalinen jakauma ilmakuvavuosineen ja opetusalueiden lukumäärineen järviin. Opetusaineistosta 30 prosenttia on vuodelta 2015, 16 prosenttia vuodelta 2012, 14 prosenttia vuodelta 2014 ja muilta vuosilta 5–7 prosenttia koko opetusaineistosta. Kahdeksalla kainuulaisella järvellä opetusaineistoa on kahdelta ilmakuvavuodelta, muilta vain yhdeltä.

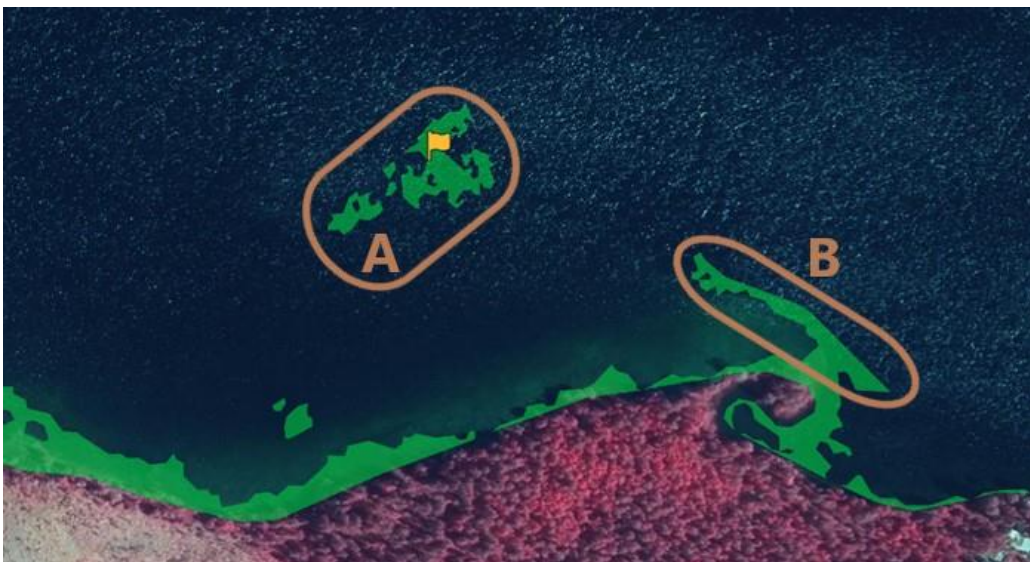
Koneoppimismallin tarkkuuden mittaamiseksi opetusaineiston järville luotiin myös niin sanottuja tarkkuusalueita (kuva 1). Nämäkin alueet olivat myös 0,5–1,5 ha kokoisia ja silmämääräisesti tunnistettu vesikasvivyöhyke kuvaruutudigitoitiin referenssisegmenteiksi niin kuin opetusalueillakin. Koneoppimismalli tuotti mallinnetun vyöhykkeen tarkkuusalueille, jolloin mallinnuksen tarkkuutta voitiin mitata. Picterra muutti syyskuussa 2022 segmenttimoodissa tarkkuuden mittaamisessa käytetyn laskentatavan pikselikohtaiseen F-arvoon:

$$F_1 = \frac{tp}{tp + \frac{1}{2}(fp + fn)}$$

jossa tp on todellisten positiivisten, fp virheellisten positiivisten ja fn virheellisten negatiivisten pikseleiden lukumäärä. Picterra perusteli tähän tarkkuuslukuun siirtymistä sillä, että se on alalla vakiintuneemmin käytössä. Ilmakuvaussessiokohtaiset mallit olivat tarkkuudeltaan 86–94 %. Vuosille 2012, 2022 ja 2023 ei jäänyt työaikaa muodostaa ilmakuvaussessiokohtaisia malleja, vaan niille muodostettiin suoraan saman vuoden eri sessioista koostuva mallit: tarkkuudeltaan ne olivat siksi hieman heikompia (74–81 %). Kaikista eri sessioista ja vuosilta kerätystä opetus- ja tarkkuusaineistosta (777 opetus- ja 275 tarkkuusaluetta) yhdistetyn yleismallin tarkkuus oli 89,92 %.

3.3 MALLINETUN AINEISTON TARKASTUS JA LISÄMUUTTUIJEN LIITTÄMINEN

Picterra-yleismallin tuottamat yksiosaiset polygonit eksportoitii QGIS-ohjelmaan, jossa aineisto tarkistettiin kuvaruudulta silmämääräisesti ja tunnistettiin virheelliset tulkinnot, joita päätyi mallinnustuloksiin mittavasta koneoppimismallin opettamistyöstä huolimatta. Tarkistuksen aikana aaltoheijastuksista ja leväautoista johtuvia virheellisiä positiivisia tunnistuksia (vesikasvillisuudeksi tunnistettu muu ilmiö veden pinnalla) poistettiin aineistosta, mutta muut havainnot järveltä jätettiin mukaan (kuva 3). Mikäli virheelliset havainnot olivat täysin kiinni todellisissa positiivisissa havainnoissa, järven koko tulkinta poistettiin. Lisäksi tarkastelussa kävi ilmi järviä, jotka oli ilmakuvaattu osin aikaikkunan 1.7.–10.9. ulkopuolella (kuva 4). Silloinkin järven koko tulkinta poistettiin. Kokonaan aineistosta poistettavaksi päätyi 215 mallinnetun järven joukko.



Kuva 3. Esimerkki Picterra-mallinnuksen aallokkoheijastuksista tuottamista virhetulkinnoista. Mikäli virheellisesti tunnistetut osat kuvaa olivat todellisesta vesikasvillisuusvyöhykkeestä irrallisia (merkitty kuvaan tunnuksella A), ne deletoitii. Mikäli taas virheellisesti tunnistettu osa oli kiinni todellisessa vyöhykkeessä (kuvassa tunnuksella B), virheellinen osa rajattiin manuaalisesti pois QGIS:n ”Reshape features” -digitointityökalulla.



Kuva 4. Esimerkkikartta alueesta, jolla on suoritettu ilmakuvauksia kahtena päivämääränä (violetilla viivoituksella merkitty alue 12.5.2023 ja oranssilla 16.7.2023). Sekä Haapajärven että Rehakan ominaisuustietoihin tallennetaan ilmakuvauspäivämääräksi 12.5.–16.7.2023. Mallinnetun aineiston tarkastusvaiheessa huomataan, että Haapajärven länsiosaa on kuvattu 12.5.2023 perustuen kuvassa nähtävään sävyeroon. Täten Haapajärvi poistetaan aineistosta. Rehakan pikselit huomataan taas olevan kokonaan 16.7. ilmakuvasta. Rehakka jätetään aineistoon, mutta ilmakuvauspäivämäärien ominaisuustietoon ei tehdä muutoksia.

Silmämääräisesti laatuvarmistettu aineisto prosessoitiin järviakohtaisiksi moniosaisiksi polygoneiksi. Tämän jälkeen laskettiin järveltäin kasvillisuusvyöhykkeen pinta-ala. Moniosaisiin polygoneihin liitettiin sijaintiin perustuen (QGIS:n Join attributes by Location -työkalu) tiedot VHS-järvistä sekä Vemalan valuma-alueista ja vesimuodostumista.

Tarkastusprosessin jälkeen tilastolliseen analysointiin oli koossa 2690 järven joukko. Koska yksittäisen vesimuodostuman kasvillisuusvyöhyke saattoi olla tulkittu useamman vuoden kuva-aineistosta, uniikkeja järviä oli aineistossa 1789.

3.4 VERTAILU- JA VALITTUJEN KUORMITETTUIJEN JÄRVIJOUKKOJEN VALINTA

Vertailuolosuhteiden mallintamista ja sen toimivuuden testaamista varten aineistosta valittiin joukko lähes luonnontilaisia, matalakuormitteisia järviä vertailujoukoksi. Näiden järvien rinnalle muodostettiin myös selvästi ravinnekuormitteisten järvien valittu joukko. Joukkoihin kuuluvien järvien tuli täyttää seuraavat ehdot:

- Kaikuluotaus perustuu takymetri- tai DGPS-paikannukseen (laadukas syvyysaineisto).
- Pohjoissuomalaiset järvet (Oulujoen vesistöalueella tai siitä pohjoisempana) on ilmakuvattu aikaisintaan 10.7.
- Picterra-prosessorin rajauksessa käytetyn järvipolygonin ja luotausaineiston pinta-alat eroavat korkeintaan 2 prosenttia.
- Picterra-prosessorin rajauksessa käytetyn järvipolygonin ja Vemalan vesimuodostuma-aineiston järvipolygonin pinta-alat eroavat toisistaan korkeintaan 3 prosenttia.
- Joukkoihin kuuluvat järvet eivät saa sijaita vierekkäisillä 3. jakovaiheen vesistöalueilla.

- Mikäli järveltä on useammalta vuodelta vesikasvitulkinta, niin järvi pystyi kuulumaan joukkoon ainoastaan kerran.
- Järven ilmakuvatulkinnassa ei ole edes lievää aaltoheijastuksen aiheuttamaa häiriötä.

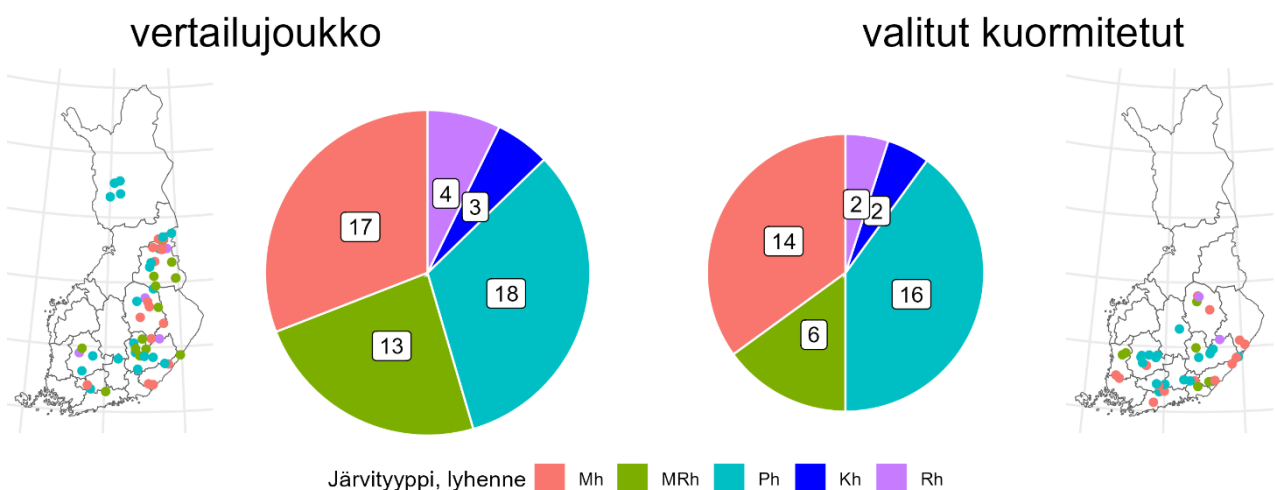
Vertailujoukkoon kuuluvien järvien tuli täyttää lisäksi kaikki seuraavat ehdot:

- Ekologinen tila vähintään hyvä 3. VHS-kauden ekologisessa luokittelussa.
- Peltujen osuus valuma-alueella on korkeintaan 6 prosenttia.
- Turvetuotantoalueen osuus valuma-alueella on korkeintaan 0,5 prosenttia.
- Turvetuotantoa lähivaluma-alueella on korkeintaan 2 hehtaaria.
- Rakennetun maan osuus valuma-alueella on korkeintaan 5 prosenttia.
- Vesimuodostumaan tuleva kokonaisfosforin kuormitus pistekuormituksesta on alle 1 kg/v.
- Valuma-alueen turvemaista ojitettua on korkeintaan 30 prosenttia.

Valittujen kuormitettujen järvien joukon tuli taas täyttää jokin seuraavista ehdoista:

- Peltujen osuus valuma-alueella on yli 8 prosenttia.
- Turvetuotantoa lähivaluma-alueella on yli 10 hehtaaria.
- Rakennetun maan osuus valuma-alueella on yli 8 prosenttia.
- Vesimuodostumaan tuleva kokonaisfosforin kuormitus pistekuormituksesta on yli 250 kg/v.
- Valuma-alueen turvemaista ojitettua yli 50 prosenttia.

Vertailujoukon ehdot täyttivät 55 järveä ja valittujen kuormitettujen ehdot 40 järveä. Joukkojen jakauma järvityypeittäin piirakkakuvioiden ja kartalla on esitetty kuvassa 4. Joukkojen jakauma erilaisten tunnuslukujen mukaan on taas esitetty taulukossa 2. Valintakriteereiden takia runsashumuksisten ja keskisuuriin humusjärvien osuus jäi pieneksi vaikuttaen myöhempään asetelmaan vertailuolosuhteiden mallintamisessa. Pinta-alan, keskisyvyyden ja väriluvun perusteella vertailujoukko ja valittujen kuormitettujen järvien joukko olivat suhteellisen samanlaisia. Sen sijaan turvemaiden osuus oli vertailujoukolla suurempaa: valuma-alueiden syrjäisten latvaosuuksien turvemailla sijaitsevat paljon tarkoilla menetelmillä kaikuodotettu ja vertailuolosuhdevaatimukset muuten täyttäneitä järviä. Valituilla kuormitetuilla järvillä peltujen osuus ja kokonaisfosforipitoisuus olivat odotetusti vertailujoukkoa korkeammat.



Kuva 4. Matalakuormitteisten järvistä koostuva vertailujoukko ja aineistolaadultaan laadukkaista valituista kuormitetuista järvistä koostuva joukko järvityypittäin. Kartat piirakkakuvioiden ulkopuolella esittävät joukon maantieteellisiä sijainteja.

Taulukko 2. Vertailuolosuhteiden mallintamiseen valitun vertailujoukon ja valittujen kuormitettujen järvien joukon tunnuslukuja (keskiarvo ja vaihteluväli). Mitattu ja asiantuntija-arvioon perustuva väriluku puuttuu osalta järvistä.

Status	Lkm	Pinta-ala (ha)	Keski- syvyys (m)	Turve- maiden osuus (%)	Pelto-jen osuus (%)	Kokonais- fosfori (µg/l)	Mitattu väriluku (µg Pt/l)	Asiantun- tija- arvioon perustuv a luonnol- linen väriluku (µg Pt/l)
Vertailu- joukko	55	240 (48– 2902)	3,6 (0,5– 10,4)	23 (5–45)	1 (0–5)	17 (7–48)	88 (30–300)	64 (25–200)
Valittu kuormitettu joukko	40	273 (52– 1570)	3,3 (0,6– 9,5)	13 (2–33)	12 (0–24)	37 (14–171)	78 (35–200)	59 (20–115)

Vertailujoukon ja valittujen kuormitettujen joukon ulkopuolelle jääneet järvet luokiteltiin vielä muihin kuormittamattomiin ja muihin kuormitettuihin järviin edellä esitettyjen vertailujoukon maankäytön ja pistekuormituksen raja-arvojen mukaisesti. Tässä raportissa nimityksenä näille neljälle järvi-joukolle käytetään statusjoukko-termiä.

3.5 KASVITTUMISASTEEN LASKENTA JA VAIHTELU

Aikaisemmat tarkastelut (Marttila ym. 2018, Marttila ym. 2020) eivät osoittaneet suurta eroa vertailuolosuhteiden mallinnustuloksissa sen suhteen, että käytettiin vesikasvillisuuden mahdollista esiintymisaluetta kuvaavana syvyysvyöhykkeenä 0–1,5 metriä vai 0–3 metriä. Tässä hankkeessa käytettiin jälkimmäistä, sillä se oli luotausaineiston perusteella määriteltävissä suuremmalle joukolle järviä ja se on ekologisesti perustellumpi (ilmakuvilla näkyvän uloimman kasvillisuuden muodostava kelluslehtisten lajiryhmä esiintymisalue ulottuu useimmiten yli 1,5 metrin syvyyteen). Kasvittumisaste laskettiin kaavalla:

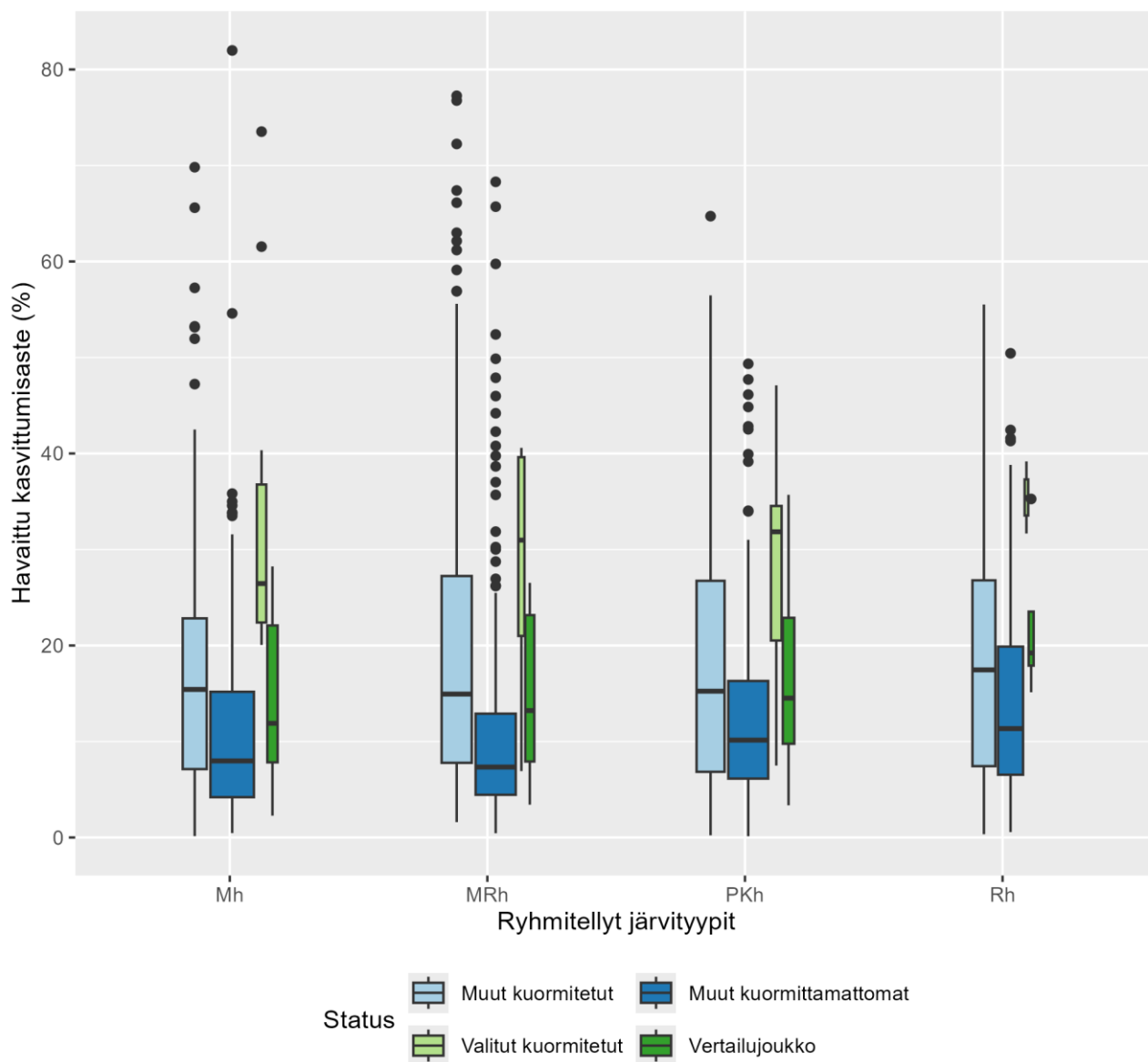
$$\frac{\text{Ilmakuvatulkittu ranta- ja vesikasvillisuuden pinta-ala}}{\text{0–3 metrin syvyysvyöhykkeen pinta-ala}} \times 100 \%$$

Kasvittumisaste laskettiin 1440 järvi-kuvausvuosiyhdistelmälle (saman järven tulkinta useammalta vuodelta huomioiden 965 erillistä järveä).

Järvityypeittäin ja statusluokittain tarkastettuna (kuva 5) kasvittumisasteen vaihtelu on verrattain suurta. Vertailujoukon ja valittujen kuormitettujen kasvittumisasteet ovat muita statusjoukkoja keskimäärin suurempia: ilmiötä selittää heinäkuun alkupuolella ilmakuvaattujen pohjoissuomalaisten järvien suuri osuus (nämä eivät päätyneet laadullisesti parhaisiin vertailujoukkoihin tai valittujen kuormitettujen joukkoihin). Järvityypeittäin tarkasteltuna kasvittumisasteen jakaumat ovat suhteellisen samanlaiset poikkeuksena muutamista järvistä koostuva runsashumuksisten järvien joukko.

Kasvittumisasteen jakauma

Koko järvijoukko (n=1454)



Kuva 5. Kasvittumisasteen jakauma järvityypeittäin ja statusjoukoittain ryhmiteltynä. Laatikoiden koot ilmaisevat joukkoon kuuluvien järvien lukumäärää. Pieniä ja keskisuuria humusjärviä käsitellään yhteisenä joukkona PKh.

3.6 VERTAILUOLOSUHTEIDEN JA VERTAILUARVON MALLINNUS

Vertailuolosuhteiden mallinnus suoritettiin tässä hankkeessa uudelleen. Syynä tähän oli erot kasvittumisasteissa eri ilmakuvatulkintamenetelmien välillä sekä erilainen määritelmä turvemaiden osuudelle tutkimusten välillä. Aikaisemmissa ILMAVERSO-hankkeissa kasvittumisasteen vertailuolosuhteiden mallintaminen toteutettiin järvityypeittäin ryhmittelemällä. Tällä pyrittiin hallitsemaan luontaisen vaihtelun aiheuttamaa hälyä, jotta ihmistoiminnan aiheuttamat muutokset voitaisiin tunnistaa luotettavasti. Koska kaksi järvityyppiä jäi vertailujoukossa aliedustetuksi ja koska kasvittumisasteen jakaumat olivat tyyppien välillä suhteellisen samankaltaiset, päädyttiin vertailuolosuhteet mallintamaan tässä työssä yhdellä kaikilla järvityypit kannattaneella mallilla. Malli kalibroitiin 55 järven vertailujoukolla.

Kasvittumisasteen luontaisen vaihtelun mallinnusmenetelmänä käytettiin lineaarista regressiota. Selittäviksi muuttujiksi malliin tarjottiin taustatietoja vertailujoukon järvien luontaisista, ihmistoiminnasta riippumattomista ominaisuuksista, kuten altaan morfologiasta (keskisyvyys, suurin syvyys, pinta-ala, liuskaisuus) ja valuma-alueesta (turvemaiden osuus valuma-alueesta, vesistöjen osuus valuma-alueesta, turvemaiden osuus valuma-alueen maa-alueesta).

Selittävien muuttujien valinnassa malliin hyödynnettiin R-ohjelman leaps-kirjaston regsubsets-funktiota. Kyseisellä funktiolla tehtiin muuttujavalinta kattavan etsinnän (exhaustive search) menetelmällä, joka testaa jokaisen mahdollisen yhdistelmän parhaan ratkaisun löytämiseksi. Mittareina mallin suorituskyvylle käytettiin niin korjattua selitysstettä kuin Schwartzin informaatiokriteeriä (BIC). Otoskokoon perusteella enimmäislukumääränä selittäviä muuttujia mallivalintaan oli 5. **Lopulliseksi kasvittumisasteen vaihtelua vertailujärvien joukossa selittäviksi muuttujiksi valikoituivat turvemaiden osuus, vesistöjen osuus ja liuskaisuus** (taulukot 3 ja 4). Suurimman syvyyden tai keskisyvyyden lisääminen neljänneksi muuttujaksi olisi nostanut mallin korjattua selitysstettä tai BIC-lukua, mutta neljäs muuttuja ei olisi ollut tilastollisesti merkitsevä, joten pidättäydyttiin kolmen muuttujan mallissa. Kolme muuttujaa pystyi selittämään 50 % kasvittumisasteen vaihtelusta vertailuolosuhteissa (taulukko 3).

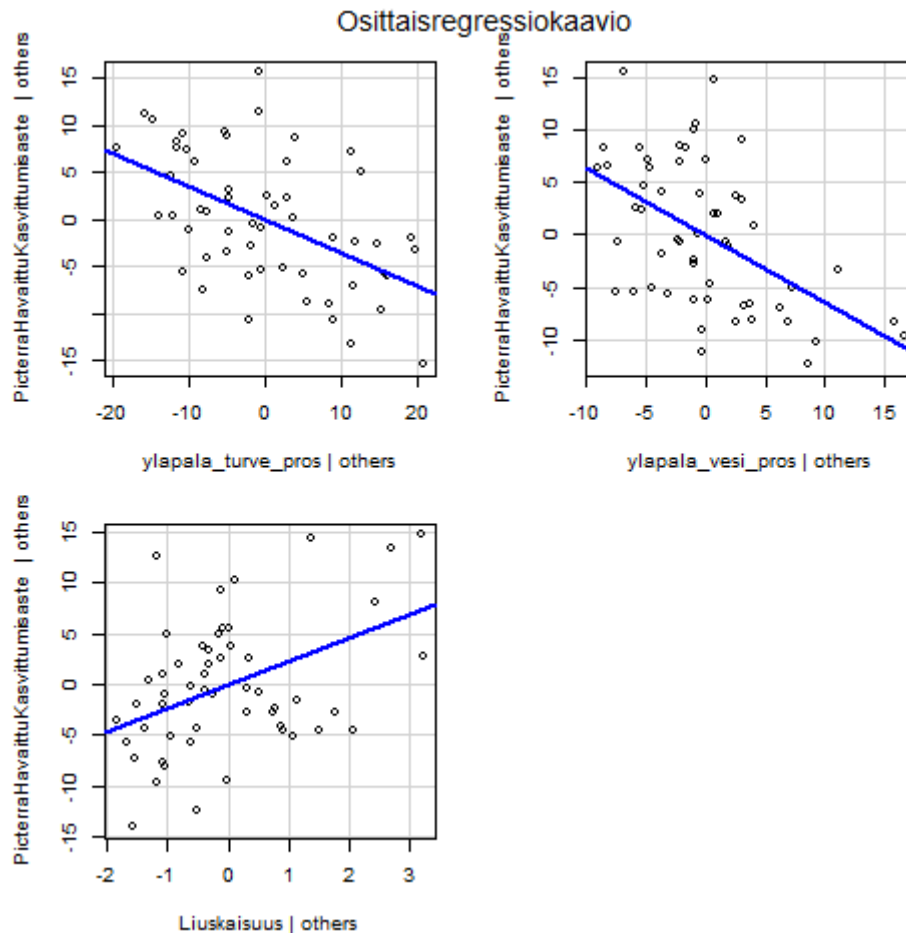
Kasvittumisasteen suhde turvemaiden osuuteen ja vesistöjen osuuteen oli negatiivinen eli mitä enemmän järven valuma-alueella oli turvemaita tai vesistöjä, sitä alhaisempi järven luontainen kasvittumisaste oli (taulukko 4). Vastaavasti kasvittumisasteen suhde liuskaisuuteen oli positiivinen: rantaviivaa ollessa suhteessa pinta-alaan enemmän (enemmän lahtia ja salmia), kasvittumisaste oli taas korkeampi. Mallin selittävien muuttujien suhteet kasvittumisasteeseen vertailujoukossa, kun muiden selittävien muuttujien vaikutus on rajattuna pois, ovat esitetty osittaisregressiokaavioissa (kuva 6).

Taulukko 3. Kasvittumisasteen vertailuarvojen ennustamisen lineaarinen regressiomalli yleisine tunnuslukuineen

Tunnusluku	
F-luku	17,0
p-arvo	<0,001
Selitysstaste	0,50

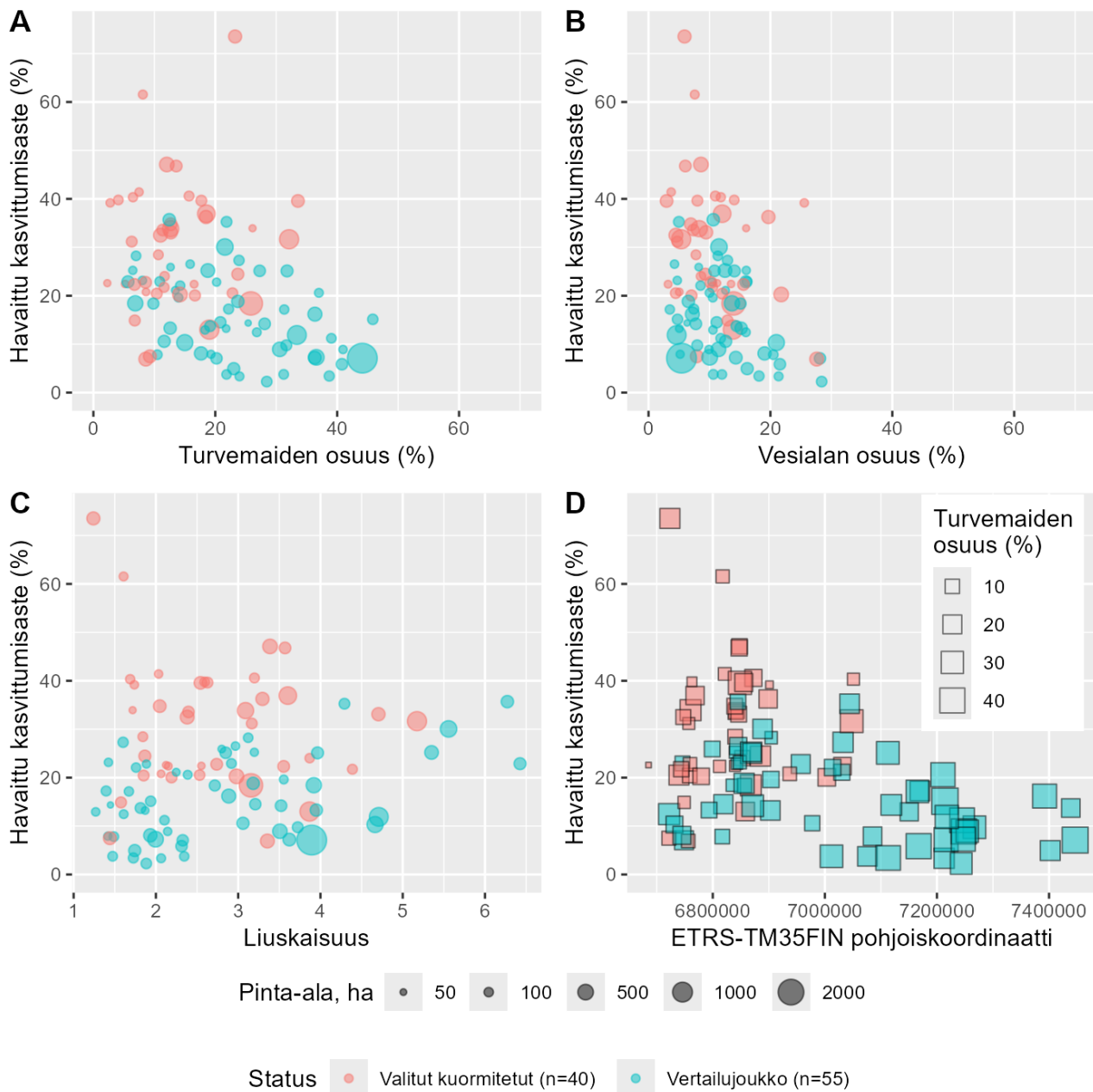
Taulukko 4. Kasvittumisasteen vertailuarvojen ennustamisen lineaarinen regressiomalli selittävien muuttujien tunnuslukuineen.

Muuttuja	Regressiokerroin	Keskivirhe	p-arvo	Vaihteluväli
Turvemaiden osuus	-0,35	0,08	<0,001	5,7–45,8 %
Vesialan osuus	-0,64	0,15	<0,001	3,5–28,4 %
Liuskaisuus	2,29	0,68	0,001	1,3–6,4
Vakio	25,16	3,76	<0,001	

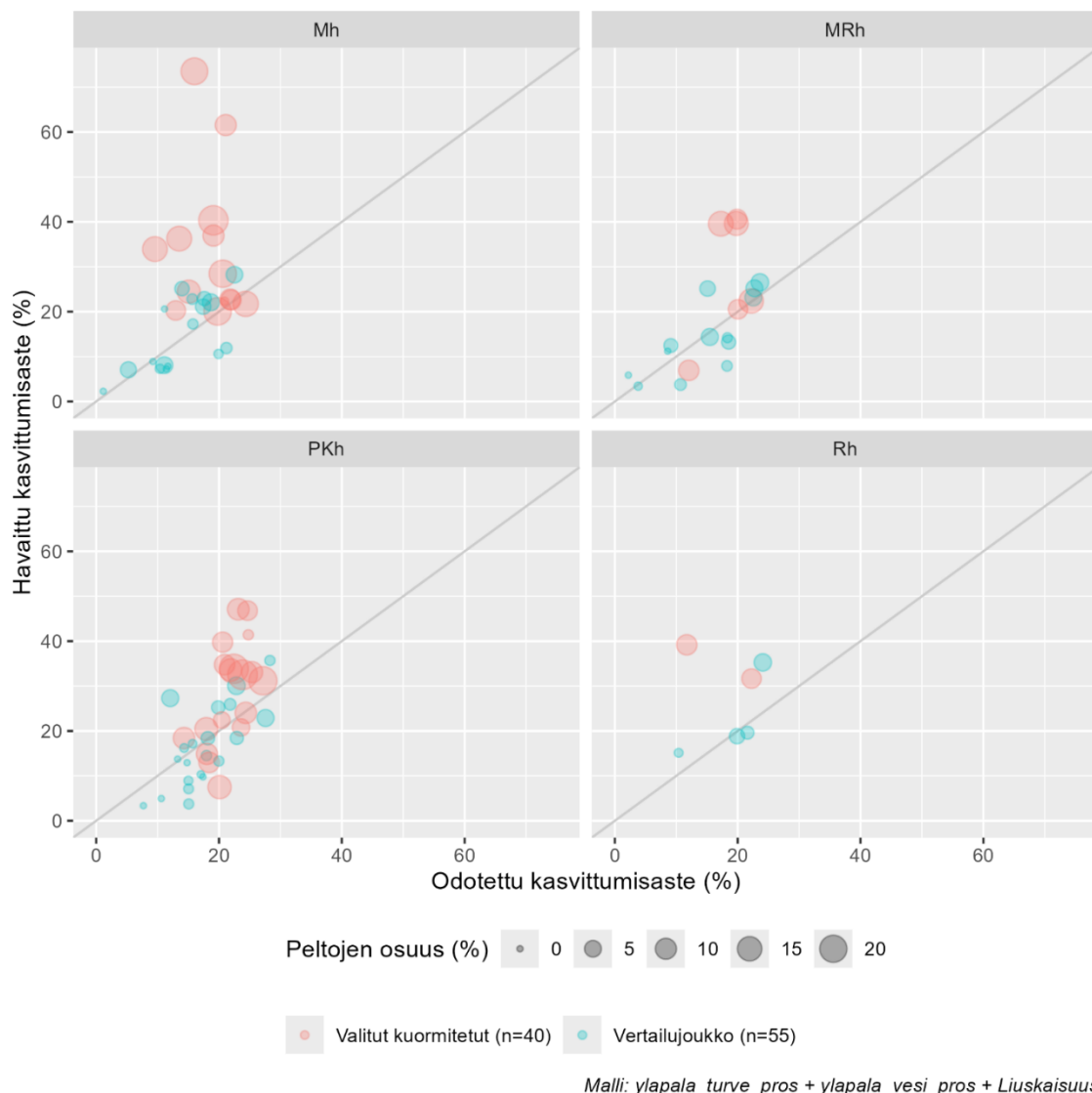


Kuva 6. Osittaisregressiokaavio kasvittumisasteen vertailuosuuhdemallista kaikkine selittävine muuttujineen (`ylapala_turve_pros` = turvemaiden osuus järven valuma-alueesta; `ylapala_vesi_pros` = vesialan osuus järven valuma-alueesta). Kunkin selittävän muuttujan kaaviosta on poistettu muiden muuttujien vaikutukset.

Kuvassa 7A-C on esitetty hajontakuvioiden vertailuosuuhdemallin selittävien muuttujien suhdetta kasvittumisasteeseen ilman muiden selittävien muuttujien vaikutusten poistamista. Kuvioissa on esitetty vertailujoukon lisäksi valittujen kuormitettujen järvien joukko. Kuvioista on nähtävissä, että vaikka useiden kuormitettujen järvien kasvittumisaste oli osittain vertailujärvien vaihtelun sisällä, niin kuormitetuissa järvissä kasvittumisasteet olivat keskimääräistä suuremmat. Maantieteellistä vaihtelua aineistossa oli niin, että luontainen kasvittumisaste laski pohjoiseen päin mentäessä (kuva 7D). Vaihtelu selittyy sillä, että Pohjois-Suomessa on enemmän soita ja pohjoisen viileämmässä ilmastossa perustuotanto on vähäisempää (luontaisesti pienempi vesikasvien biomassa ja sitä kautta ilmakuvilla näkyvä kasvillisuuden vähäisempi määrä).



Kuva 7. Vertailuolosuhteiden malliin tulleiden selittävien muuttujien suhde kasvittumisasteeseen hajontakuviaina esitettynä. Luonnontilaiset vertailujärvet ovat merkitty sinisillä ja valitut kuormitetut järvet punaisilla symboleilla. Pyöreän pistesymbolin koko esittää järven pinta-alaa. Kuvioiden esittämät selittävät muuttujat x-akselilla ovat kuviossa A turvemaiden osuus, B vesistöjen osuus ja C liuskaisuus. Lisäksi kuvio D esittää järvien pohjoiskoordinaattia suhteessa kasvittumisasteeseen. Neliskulmaisen pistesymbolin koko esittää turvemaiden osuutta.



Kuva 8. Vertailuolosuhdemallinnukseen perustuvan odotetun kasvittumisasteen suhde havaittuun kasvittumisasteeseen neljässä eri järvityypissä. Luonnontilaiset vertailujärvet ovat merkitty sinisillä ja valitut kuormitetut järvet punaisilla symboleilla.

Vertailuolosuhteiden mallin hyvyystarkastelu tehtiin sovittamalla malli takaisin kalibrintiaineistoon ja tarkastelemalla havaittujen ja mallinnettujen arvojen suhdetta (kuva 8). Havaitut arvot vastasivat melko hyvin mallinnettua arvoa, eli malli vaikuttaisi ennustavan luontaista vaihtelua verrattain hyvin. Peltovaltaisten valuma-alueiden järvissä kasvittumisaste oli yleensä suurempi kuin mitä niillä mallien perusteella luontaista olisi ollut.

Regressiomalli sovitettiin tämän jälkeen koko muulle aineistolle odotettujen vertailuarvojen ennustamiseksi. Aineisto sisälsi joitakin järviä, joilla turvemaiden ja vesialan osuus oli vertailujoukon vaihteluväliä selkeästi suurempaa: 12 järveä sai negatiivisen odotetun kasvittumisasteen. Näistä 6 järveä, joilla vesialan osuus oli yli 30 prosenttia, poistettiin aineistosta, sillä kyseistä kynnysarvoa suuremmat vesialan osuudet havaittiin johtuvan virheellisestä valuma-alueen rajauksesta Vemala-aineistossa. Jäljellejääneillä 6 järvellä, jolla odotettu kasvittumisaste todellisuudessa olisi hyvin alhainen, odotettu kasvittumisaste väliltä [-2,9...-0,3] muutettiin arvoksi 0 selkeyden vuoksi.

3.7 EKOLOGINEN LAATUSUHDE JA TILANARVIOINTI

Kasvittumisaste-muuttuja ilmentää järven vesikasvillisuuden tilaa kasvillisuuden runsastumisen kautta. Mitä suurempi kasvittumisaste, sitä enemmän järven rantavyöhykkeestä on vesikasvillisuuden peittämää ja sitä umpeenkasvaneempi järvi on. Järvien vesikasvillisuuden lisääntyminen rehevöitymisen edetessä on hyvin tunnettu ilmiö ja sillä voidaan olettaa olevan yhteys myös vesikasvilajiston koostumuksen muutokseen.

Vesienhoitolain mukaisessa ekologisessa tilanarvioinnissa käytettävä ekologinen laatusuhde (ELS) määritellään havaitun ja odotetun (vertailuarvo) tilamuuttujan arvon suhteena (esim. Aroviita ym. 2019). Vertailuarvo kuvaa muuttujan odotettua arvoa vertailuolosuhteissa eli lähellä luonnontilaa tai lähellä luonnontilaa vastaavissa olosuhteissa. Kasvittumisastemuuttujan tapauksessa vertailuarvo arvioitiin vähiten ihmistoiminnan vaikuttamien järvien havaintojen perusteella mallintamalla edellisessä luvussa kuvatulla tavalla.

Kasvittumisaste määritellään tässä työssä ilmakuvilta tulkitun kasvillisuuspinta-alan ja 0–3 metrin syvyysvyöhykkeen pinta-alojen suhteena eli se kuvaa kasvillisuuden peittämän alan osuutta (%) järven kolmea metriä matalamman syvyysvyöhykkeen alasta. Muuttujan teoreettinen vaihteluväli on 0–100 %, mutta käytännössä koko 0–3 metrin syvyysvyöhyke ei koskaan, edes umpeenkasvun edettyä pitkälle, ole syvimmiltä eli uloimmilta osiltaan kokonaan ilmakuvissa näkyvän vesikasvillisuuden (pääasiassa ilmaversoiset ja kelluslehtiset lajit) peittämää. Syvemmissä osissa rantavyöhykettä kasvillisuuden esiintymistä alkavat rajoittaa mm. valon riittävyys, pohjanlaatu, aallokkovoimien vaikutus ja kasvifysiologiset seikat. Tämä ilmenee tarkasteltaessa koko järvijoukon havaitun kasvittumisasteen jakaumaa (kuva 5). Matalissa järvissä (Mh- ja MRh-tyyppin järvet) jakauma ulottuu korkeimmillaan noin 80 prosenttiin ja syvemmissä tyypeissä noin 60 prosenttiin.

Jakaumatarkasteluun perustuvia kasvittumisasteen käytännössä havaittuja maksimiarvoja pidettiin ELS-laskennassa kasvittumisasteen maksimiarvoina (sen sijaan, että olisi käytetty suoraan teoreettista maksimia 100 %), joten ELS Mh- ja MRh-järville laskettiin kaavalla:

$$ELS_{Mh,MRh} = \frac{80 \% - \text{havaittu kasvittumisaste}}{80 \% - \text{odotettu kasvittumisaste}}$$

ja PKh- ja Rh-järville kaavalla:

$$ELS_{PKh,Rh} = \frac{60 \% - \text{havaittu kasvittumisaste}}{60 \% - \text{odotettu kasvittumisaste}}$$

ELS saa arvon 1, jos havaittu kasvittumisaste vastaa odotettua. ELS pienenee kasvittumisasteen lisääntyessä saavuttaen arvon 0 teoreettisessa maksimiarvossa. Näin ollen huonoin mahdollinen kasvillisuuden tila (ELS=0) saavutetaan kun havaittu kasvittumisaste on matalissa järvissä 80 % ja syvemmissä järvissä 60 %.

Luokkarajat kasvittumismallille asetettiin järviakohtaisesti, sillä vertailuarvotkin mallinnettiin järviakohtaisesti. Vastaavalla tavalla on toimittu myös järvisyvänteiden pohjaeläimistön tilaluokittelussa (Aroviita ym. 2019). Kasvittumisasteen katsottiin kuvastavan vain kasvittumisen lisääntymistä ihmistoiminnan vaikutuksen lisääntyessä, joten luokkarajat määriteltiin vain vertailuarvoa suuremmille kasvittumisasteille. Vertailuarvoja pienempien kasvittumisasteiden merkitys vaatisi lisätutkimusta.

Tilaluokkien rajat asetettiin poikkeamana vertailuarvosta, joka kuvaa keskimääräistä erinomaista eli luontaista tilaa. Erinomaisen tilaluokan raja määriteltiin vertailuarvomallin keskimääräisen ylemmän 95. prosentin luottamusvälin avulla niin, että luokkien erinomainen ja hyvä raja-arvo (E/Hy) asetetiin kaikille järville yhtä monta kasvittumisasteen prosenttiyksikköä suuremmaksi kuin kyseessä oleva ylempi luottamusväli keskimäärin oli vertailuarvoa suurempi. Menettelyn avulla luokan erinomainen leveyden määräytymisessä voidaan ottaa huomioon vertailuarvomallin epävarmuus: tarkemmassa mallissa hajontaa

on vähemmän ja erinomaisen tilan luokan leveys (luottamusvälit) voi olla kapeampi kuin tilanteessa, missä vertailuvaihtelu pystytään selittämään heikommin.

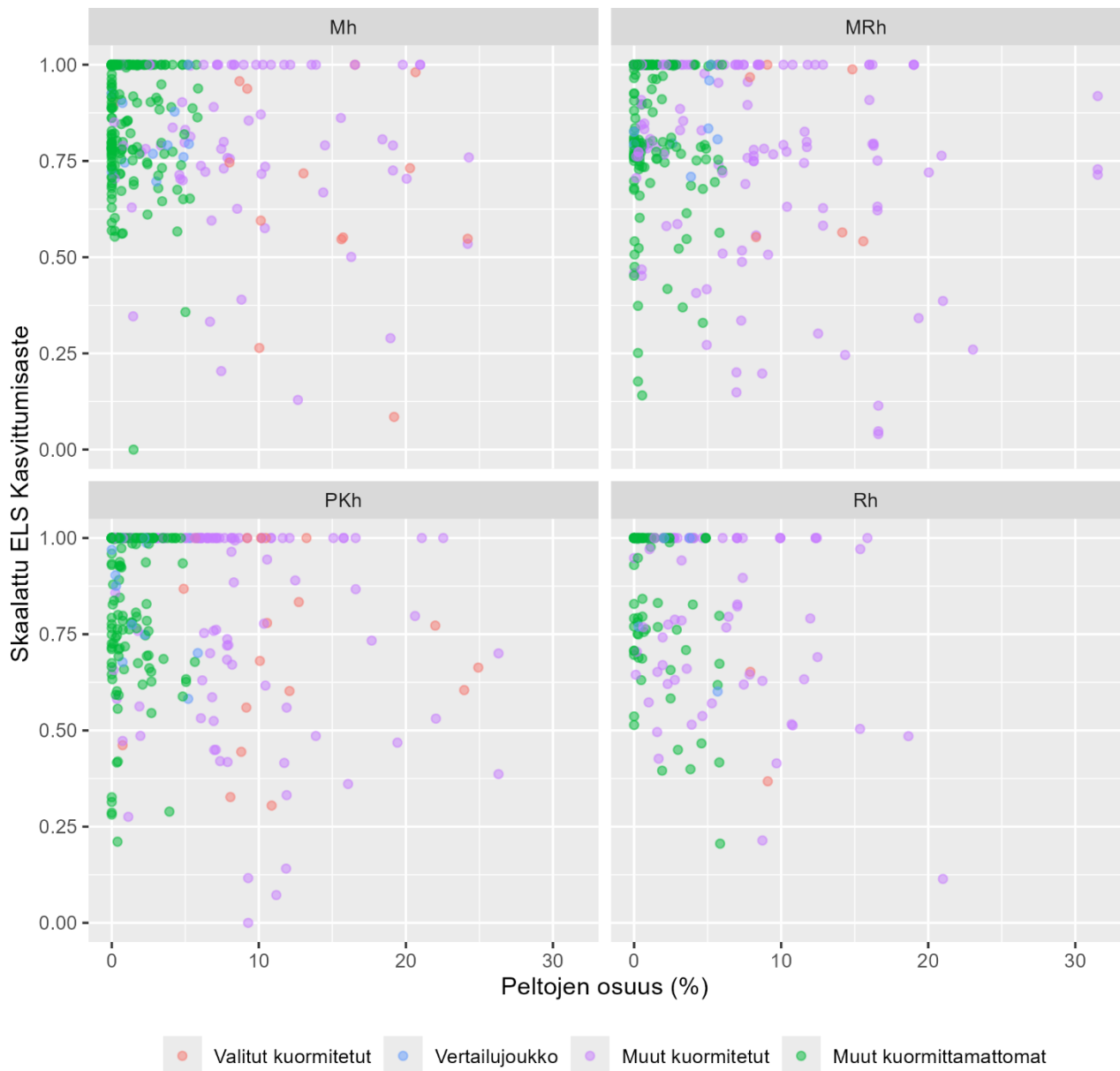
Erilaisien ELS-laskukaavojen takia vertailujoukko jaettiin kahtia (Mh,MRh; PKh,Rh) luottamusvälilaskentaan. Kumpikin joukko sai kuitenkin saman lopputuloksen: E/Hy-luokkarajaksi tuli edellä kuvatun määrittelyn perusteella vertailumallin arvo (odotettu kasvittumisaste) + 3 %. Kullekin järvelle erikseen asetettiin muiden tilaluokkien rajat jakamalla E/Hy-ajan ja luokan huono alarajan väli neljään tasaväliseen osaan (taulukko 5).

Käytännön tilaluokittelussa luokittelumuuttujien arvot muunnetaan skaalatuksi ELS-arvoiksi tasaväleille niin, että skaalatusta ELS-arvosta on suoraan pääteltävissä muuttujan tilaluokka (kts. Aroviita ym. 2019). Skaalatut ELS-arvot ovat yhteismitallisia, joten eri muuttujien ja laatutekijöiden skaalatuista ELS-arvoja voi suoraan verrata keskenään ja laskea esim. muuttujien välisiä keskiarvoja. Skaalauksen ovat kuvanneet tarkemmin Aroviita ym. (2019) ja Marttila ym. (2020).

Tarkastelimme lopuksi kasvittumisasteen tila-arvion (sELS) suhdetta paineisiin. Kasvittumisaste muuttujana on yhteydessä rehevyyttä kuvaaviin paineisiin, kuten peltojen osuuteen ja ihmisperäiseen kuormitukseen (kuvat 9 ja 10). Kasvittumisasteen ELS pieneni peltoisuuden kasvaessa (vertailujoukolla ja valituilla kuormitetuilla järvillä $r = -0,45$; koko järvijoukolla $r = -0,33$). Voimakkainta korrelaatio oli tyypissä Rh (Rh-vertailujoukolla ja Rh-valituilla kuormitetuilla järvillä $r = -0,75$; kaikilla Rh-järvillä $r = -0,38$). Myös ihmisperäisen kokonaisfosforipitoisuuteen peilaten negatiivinen korrelaatio oli kohtalainen (vertailujoukolla ja valituilla kuormitetuilla järvillä $r = -0,44$; koko järvijoukolla $r = -0,33$).

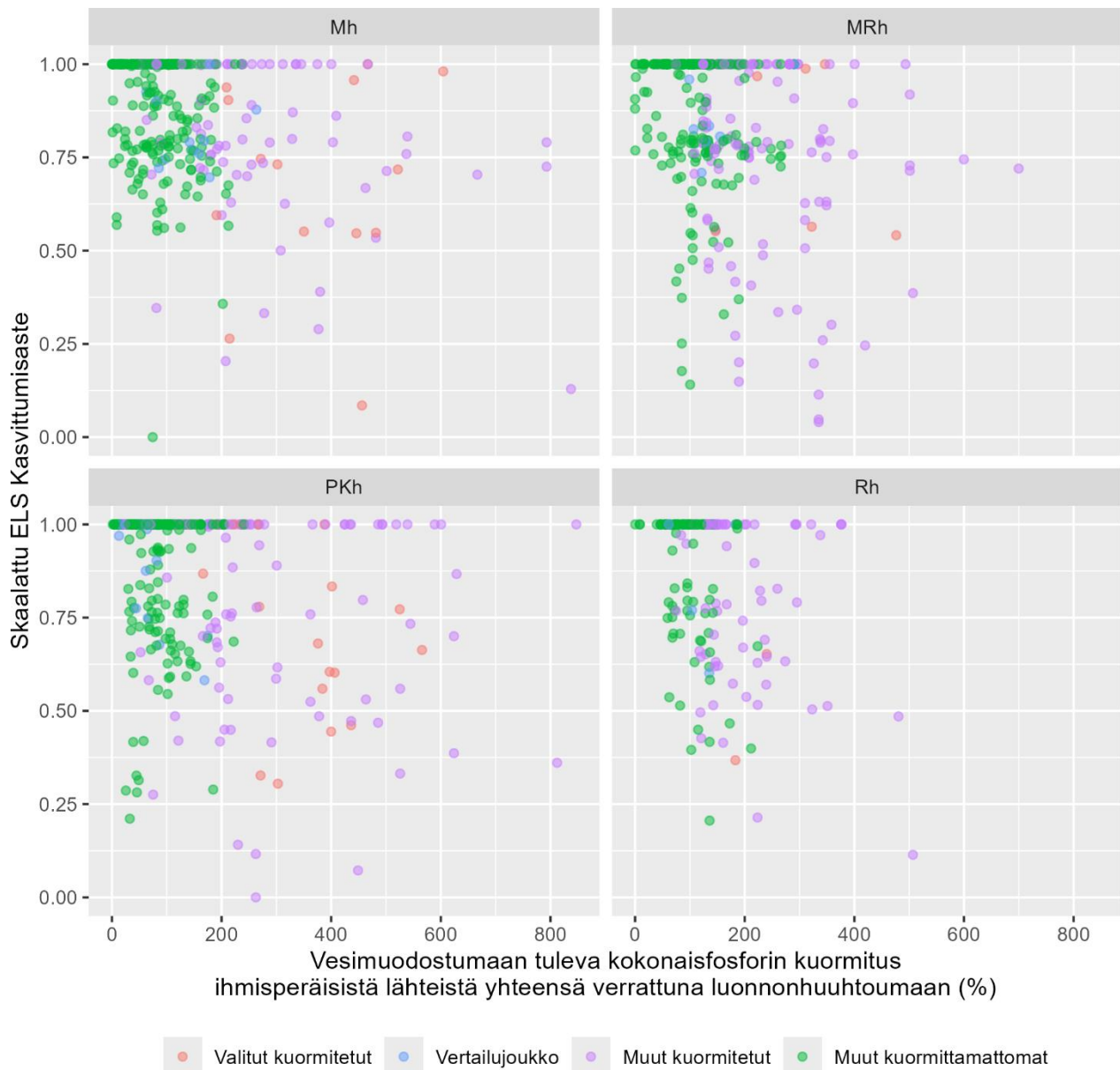
Taulukko 5. Kasvittumisasteen luokkarajojen määrittely.

Luokkaraja	Mh- ja MRh-järvet	PKh- ja Rh-järvet
Erinomainen/Hyvä (EHy)	Vertailumallin arvo + 3 %	Vertailumallin arvo + 3 %
Hyvä/Tyydyttävä (HyT)	$EHy + (80 \% - EHy) * 1/4$	$EHy + (60 \% - EHy) * 1/4$
Tyydyttävä/Välttävä (TVä)	$EHy + (80 \% - EHy) * 2/4$	$EHy + (60 \% - EHy) * 2/4$
Välttävä/Huono (VäHu)	$EHy + (80 \% - EHy) * 3/4$	$EHy + (60 \% - EHy) * 3/4$
Huono alaraja (HuAlar)	80 %	60 %



Malli: $ylapala_turve_pros + ylapala_vesi_pros + Liuskaisuus$

Kuva 9. Järvityypeittäin ryhmitellyt hajontakuviot esittävät peltojen osuuden ja kasvittumisasteen välistä suhdetta. Vaaka-akselilla käytetty muuttuja on peltojen osuus järven valuma-alueesta (prosentteina). Pystyakselilla on kasvittumisasteen perusteella laskettu ekologinen laatusuhde (ELS) skaalattuna arvoina. Järvet ovat luokiteltuja status-luokittain eri värein.



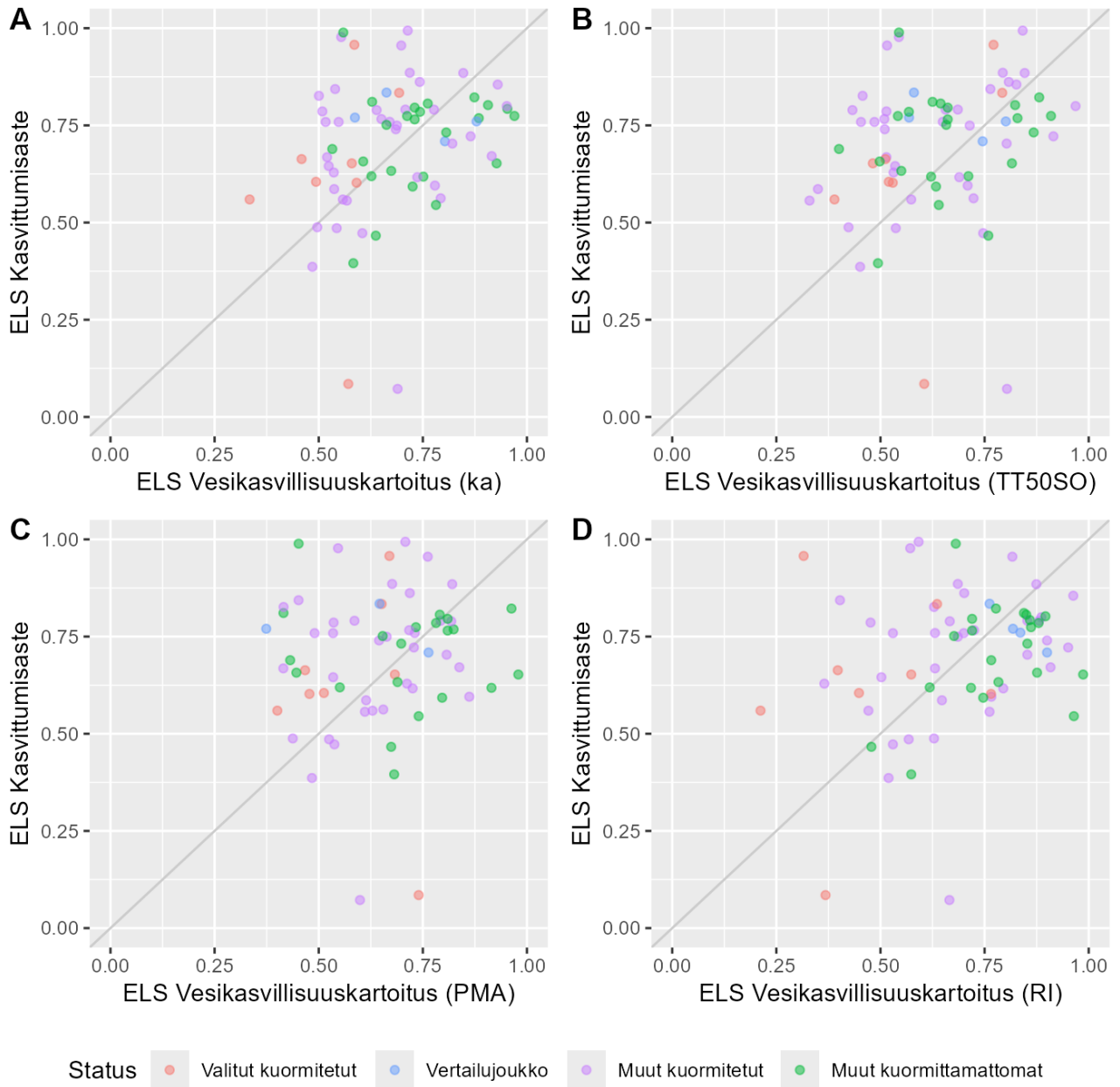
Malli: ylapala_turve_pros + ylapala_vesi_pros + Liuskaisuus

Kuva 10. Järvityypeittäin ryhmitelty hajontakuviot esittävät fosforikuormituksen ja kasvittumisasteen välistä suhdetta. Vaaka-akselilla oleva muuttuja on vesimuodostumaan tulevan kokonaisfosforin kuormitus ihmisperäisistä lähteistä verrattuna luonnonhuuhtoumaan (prosentteina). Pystyakselilla on kasvittumisasteen perusteella laskettu ekologinen laatusuhde (ELS) skaalattuna arvoina. Järvet ovat luokiteltua status-luokittain eri värein.

3.8 KASVITTUMISASTEEN JA VESIENHOIDON TILAMUUTTUJIEN VÄLINEN SUHDE

Tarkasteluun valikoitui 171 järveä, joilla oli ilmakuvatulkinnasta saadun kasvittumisasteen lisäksi maastossa tehty vesikasvillisuuden lajiston kartoitus. Lajiston perusteella lasketut tila-arviot perustuvat vesienhoidon tila-arvioinnissa käytettyihin muuttujiin ja niille luotuihin vertailuoloihin. Lajistoindeksien laskenta toteutettiin SYKE:ssä EKOLAS-projektin (<https://www.syke.fi/hankkeet/ekolas>) R-skripteillä järvivesikoontiaineistolle kattaen vuodet 2007–2023. Monen ilmakuvavuoden tilanteessa järvi pystyi sisällymään tarkasteluun vain kerran. Mukaan valittiin silloin maastossa tehtyä kartoitusta lähin ilmakuvavuosi.

ILMAVERSO II -projektin tuloksien tavoin kasvittumisasteeseen perustuva tilan arviointi ei ollut voimakkaasti yhteydessä maastossa tehtyyn lajistokartoitukseen perustuvaan vesikasvillisuuden tilan arviointiin. Kasvittumisasteen ELS:n ja lajistomuuttujien ELS:n välinen korrelaatio ovat esitettynä taulukossa 6 ja kuvassa 11.



Kuva 11. Lajistoindekseittäin ryhmiteltyt hajontakuviot, jotka esittävät vaak-akselille asetettujen lajistomuuttujien ELS-arvoja ja pystyakselille asetetun kasvittumisasteen ELS-arvojen välistä suhdetta. Vaaka-akselin muuttujat ovat ryhmiteltyssä kuvioissa seuraavat: A) lajistomuuttujien ELS-arvo (ka), B) tyyppilajien suhteellinen osuus TT50SO, C) rehevyysindeksi RI, D) prosenttinen mallinkaltaisuus PMA. Muuttujista käytetään skaalattuja ELS-arvoja. Järvet ovat luokiteltu status-joukoittain eri värein.

Taulukko 5. Kasvittumisasteen ELS:n korrelaatio vesienhoidon tila-arvioinnissa käytettyjen lajistomuuttujien ELS-arvoihin. Korrelaatiolaskenta on tehty skaalattujen ELS-arvojen perusteella.

Indeksi	Korrelaatiokerroin	Korrelaatiokertoimen p-arvo
Lajistoindeksien keskiarvo	0,24	0,02
TT50SO (tyyppilajien osuus)	0,17	0,02
RI (rehevyyssindeksi)	0,21	<0,01
PMA (prosenttinen mallinkaltaisuus)	0,19	0,01

3.9 KASVITTUMISASTEEN KÄYTTÖ NELJÄNNELLÄ VESIENHOITOKAUDELLA

Tässä työssä kehitetty kasvittumisaste toimii neljännen vesienhoitokauden ekologisen tilan luokittelussa apumuuttujana, joka tukee järvien laatutekijän ”Vesikasvillisuus ja päällyksyvät” arvioidun (asetetun) luokan määrittämistä osana järvesikasvillisuuden tilan arviointia. Luokittelua toteuttavan asiantuntijan käyttöön kasvittumisaste-muuttujan valmiit laskentatulokset ja luokittelun luotettavuutta kuvaavat taustamuuttujat vietiin vesien- ja merenhoidon tietojärjestelmä Pisaraan. Lisäksi käytettävissä oli vesikasvivyöhykettä kuvaava paikkatietoaineisto (luku 4).

Tapauksissa, joissa järvestä on luokittelujaksolta sekä kasvittumisastemuuttuja että maastossa toteutettuun lajistokartoitukseen perustuva luokittelu (lajistomuuttujat), on lajistoon perustuva luokitus ensisijainen. Ohjeistuksen mukaan vesikasvillisuuden tilaluokan arvioimisessa lajistoon perustuvaa tilaluokittelua tulee muuttaa kasvittumisaste-muuttujan tilaluokan perusteella vain hyvin harkiten, sillä yhteys näiden välillä ei tarkastelussa havaittu voimakkaaksi (luku 3.8).

4 AINEISTON JULKAISU

Tässä hankkeessa luotu paikkatietoaineisto on julkaistu Maanmittauslaitoksen ylläpitämään Paikkatietoikkuna-karttapalveluun (<https://kartta.paikkatietoikkuna.fi/>). Eri vuosien ilmakuvatulkinnat on julkaistu omiksi karttatasoikseen. Nimeämistapana on esim. *Järvien vesikasvillisuusvyöhykkeet 2023*. Karttatasot ovat katseltavissa toiseksi tarkimmalla mittakaavatasolla ja sitä loitommalla (tilanne 28.1.2025).

Paikkatietoikkunan kautta vesikasvillisuusvyöhykettä voi helposti tarkastella vastaavan vuoden historiallista ilmakuvaa vasten. Ilmakuvista on nähtävillä vain tosivärikuva-versio, mutta se on sopiva esimerkiksi virhetulkintojen havainnointiin. Järvikohtaista moniosaista vektoripolygonia klikkaamalla avautuu ponnahdusikkuna, jossa on esitetty osa hankkeessa määritellyistä ominaisuustiedoista. Kyseisten ominaisuustietojen kuvaus on luettavissa aineiston metatietosivulta SYKE:n metatietopalvelussa: <https://ckan.ymparisto.fi/dataset/jarvien-vesikasvillisuusvyohykkeet-koneoppimismenetelmalla-ilmakuvatulkittu>.

Ympäristöhallinnon henkilöstö voi tarkastella aineistoa myös ympäristöhallinnon Citrix QGIS -ohjelmalla. Vuosittaiset karttatasot ovat haettavissa GEO-lisäosan Lisää aineisto -toiminnallisuudella.

Vesien- ja merenhoidon tietojärjestelmä Pisaraan (järjestelmän metatietokuvaus SYKE:n metatietopalvelussa: [Pisara - Vesien- ja merenhoidon tietojärjestelmä - Pisara - Vesien- ja merenhoidon tietojärjestelmä - Aineistot - Syken metatietopalvelu](#)) taulukkomuotoinen aineisto yksi rivi per järvi - muodossa. Pisarassa järville esitetään vain skaalattu ELS-arvo ja seuranta-aineiston kuvauskenttä. Mikäli järvellä oli useita ilmakuvatulkintoja, laskettiin järvelle skaalattujen ELS-arvojen keskiarvo. Seuranta-aineiston kuvauskentässä on lisäksi esitettyä seuraavat tiedot:

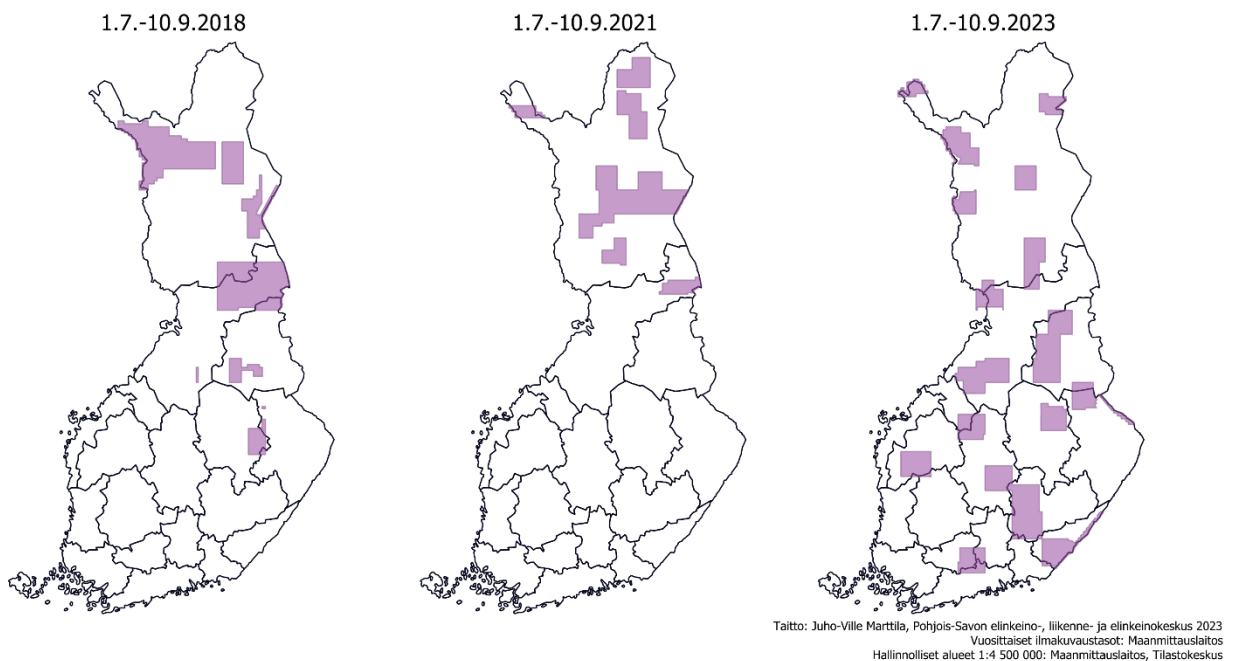
- 0–3 m syvyysvyöhykkeen pinta-ala.
- Syvyysluotausmenetelmä.
- Mallinnettu odotettu kasvittumisaste.
- Ilmakuvatulkintojen lukumäärä.
- Ilmakuvauksittain:
 - Ilmakuvauspäivämäärä.
 - Kasvillisuusvyöhykkeen pinta-ala.
 - Skaalattu ELS.

5 POHDINTA

Vesikasvien runsastuminen ja lajiston muuttuminen ovat yksi näkyvimmistä järvien rehevöitymisen seurauksista. Kansalaisillekin se on yksi silmiinpistävimmistä järvien tilan muutoksista. Runsastumisen käyttämistä tilaluokitteluun laaja-alaisesti haittaa kuitenkin se, ettei kaikkia Suomen tuhansia järviä voi arvioida maastokäynnein. Lisäksi vesikasvillisuuden määrä ja lajisto vaihtelevat eri järvien välillä luontaisista tekijäistä johtuen, eikä kaikkien tilaa voida arvioida samoin kriteerein.

Kansallisen ilmakuvausohjelman ortokuvat ovat hyvä aineistolähde järvien vesikasvillisuuden ilmakuvatulkinnalle, mutta merkittävin rajoittava tekijä on aineiston ajallinen kattavuus. Ohjelmassa tehtäviä kesäkuvauksia hyödynnetään erityisesti metsävaratiedon keruussa, joten jos kuvattava alue on tätä tiedonhankintatarvetta varten soveltuva jo kesäkuussa ja sääolosuhteet ilmakuvaukselle ovat suotuisat, niin kuvaus suoritetaan jo tuolloin. Maanmittauslaitoksen kanssa käytyjen keskusteluiden perusteella ohjelmaa ei pystytä viivästämään vesikasvikartoitusta varten optimaaliseksi, koska loppukesäisistä sopivista sääolosuhteista ei ole takuuta ja riski suunniteltuihin kuvausmääriin pääsemisestä kasvaa.

Opetusaineiston kerääminen perustui digitoijan näyttöpäätteellä tekemiin johtopäätöksiin, eikä esimerkiksi maastossa tehtyihin kuvioiden rajaamisiin. Digitoija pystyi turvautumaan aikaisemmassa hankkeessa tuotettuun tulkinta-avaimeen (Marttila ym. 2020, liite a), mutta senkin esimerkkikuvissa on esitetty vain kahdessa kuvaussessiossa otettuja ilmakuvia. Mahdollisuus opettaa monien kuvaussessioiden erisävyisiä kuvia virheellisesti on siis olemassa. Opetusalueisiin ei sisällytetty opetusjärvillä sellaisia alueita, joiden pikseleiden sisällöstä digitoija oli hyvin epävarma.



Kuva 12. Aikaikkunassa 1.7.–10.9. tehty ilmakuvaukset kolmena vuonna. Vuodelta 2018 saatavuus on keskiarvo (ilmakuvatulkinnan ja tarkistuksen jälkeen aineistossa 258 järveä). Vuodelta 2021 oli saatavilla vain pieni lukumäärä pohjoissuomalaisia järviä heinäkuun alussa. Kyseiseltä vuodelta ei tuotettu ilmakuvatulkintaa. Vuosi 2023 oli saatavuudeltaan toiseksi paras (aineistossa 534 järveä).

NDVI-kynnystämiseen perustuvassa menetelmässä kasvillisuusvyöhyke luokiteltiin kahteen erilliseen luokkaan: avoluhdista, saraikoista ja muista ilmaversoisista kasveista koostuvaan rantakasvillisuusvyöhykkeeseen sekä keskivedenpinnan alapuolella sijaitsevaan ilmaversoiseen ja kelluslehtiseen vesikasvillisuusvyöhykkeeseen. Eroteltuja luokkia ei käytetä kasvittumisasteen laskennassa, mutta karttatarkastelussa ne auttavat esimerkiksi avoluhtavyöhykkeen runsastumisen huomaamiseen.

Tässä tutkimuksessa mallinnettuja luokkia oli vain yksi kattaen kummatkin edellä mainitut. Picterran edustajat ilmoittivat, että edellä esitetyt kaksi luokkaa erottuvat ortokuvissa toisistaan liian heikosti, jotta algoritmi pystyisi onnistuneesti tunnistamaan ne tarpeeksi hyvin.

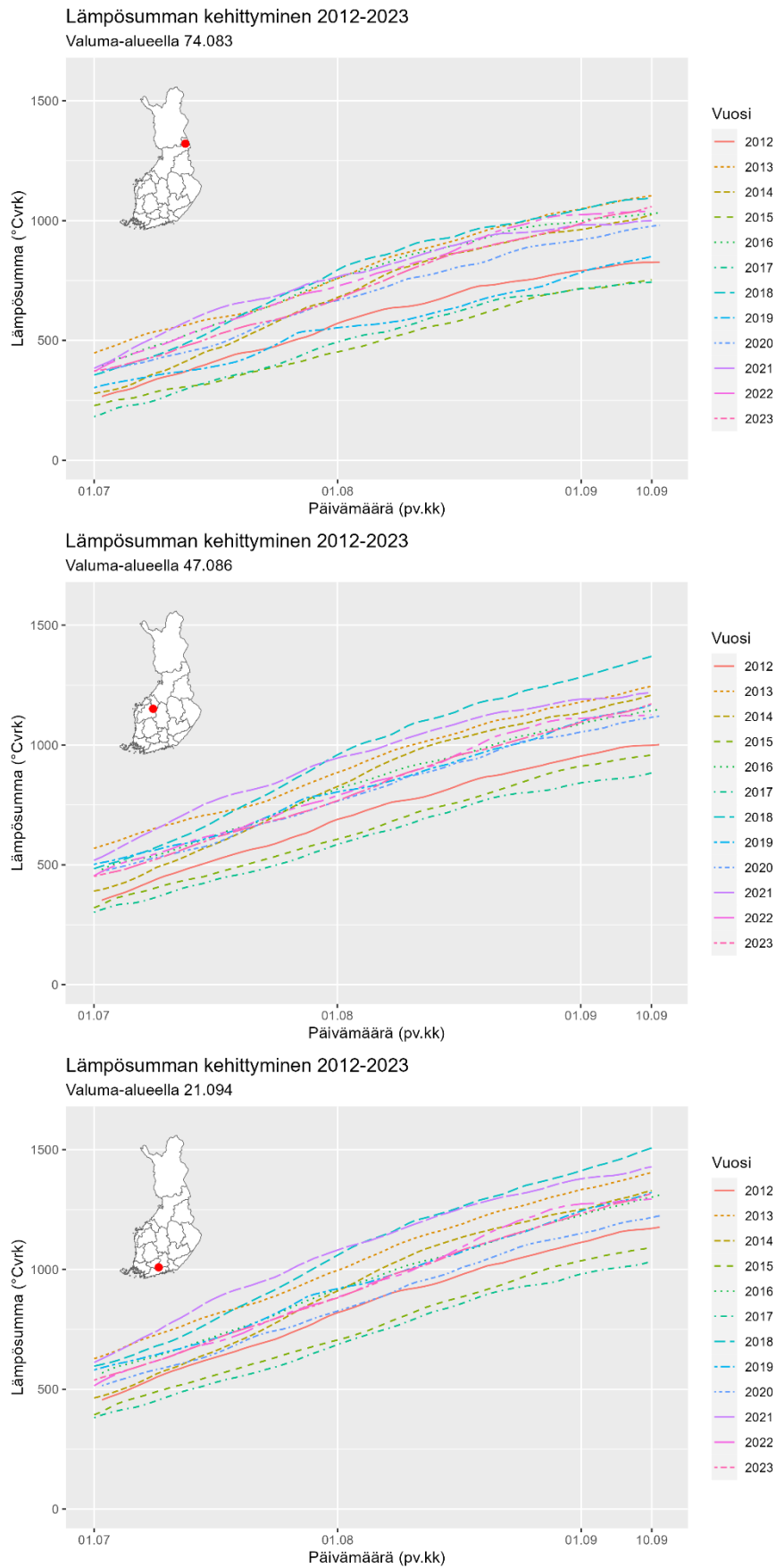
Lähellä rantaviivaa järvipolygonin sisällä oli usein puiden latvustoa esittäviä pikseleitä. Yleisin syy näille pikseleille oli se, että ilmakuva ei ollut pikseleiden kohdalla pystysuora, vaan hieman viistokulmainen kohti järveä. Myös järvipolygonin sijaintitarkkuuden virheet johtivat puunlatvuspikseleihin järvipolygonilla. Puunlatvuspikselit digitoitiin vesikasvillisuusvyöhykkeeseen kuuluvaksi sillä oletuksella, että vesialue latvojen katveessa on todennäköisesti vesikasvillisuuden peitossa. Digitoimalla puunlatvat vyöhykkeeseen mukaan mahdollistettiin myös avoluhtien yksittäisten puiden tunnistamista vyöhykkeeseen kuuluvaksi. Hyvin kapean litoraalivyöhykkeen järvillä puunlatvuspikseleiden osuus tunnistetusta vyöhykkeestä on silmämääräisesti suuri.

Koneoppimismalli asetti systemaattisesti pikselit rantapuuston aiheuttamien vahvojen varjojen alta pikselit kasvillisuusvyöhykkeeseen kuulumattomaksi. Jälkikäteen arvioiden mallista olisi voinut tulla parempi, mikäli vesikasvillisuus-luokan lisäksi opetusalueista olisi tunnistettu muutama muukin luokka, kuten varjoon jäävien pikseleiden, puidenlatvuspikseleiden, leväautojen ja aallokkoheijastusten luokat. Vaikka kahta jälkimmäisenä mainittua luokkaa ei olisi käytetty jatkossa, näiden luokkien opettaminen olisi voinut vähentää vesikasvillisuusluokan virheellisten positiivisten tunnistusten määrää. Puidenlatvus- ja varjoluokkia olisi taas voitu käyttää virhemarginaalin suuruutta kuvaavina tekijöinä odotettuja kasvittumisasteita arvioidessa tai lisäkritereinä vertailujoukon ja valittujen kuormitettujen järvien valinnassa.

Eri päivämäärien ilmakuvia valittaessa ei otettu huomioon vesikasvillisuuden kasvukausissa huomattavia ajallisia ja alueellisia vaihteluja. Kuten kuvasta 13 huomataan, kasvukausi on heinäkuun alussa Etelä-Suomessa huomattavasti pohjoista pidemmällä. Toisaalta jonakin vuotena lämpösumma elokuun alussa voi taas olla vasta samalla tasolla kuin toisen vuoden heinäkuun alussa. Tässä tutkimuksessa ei ollut resursseja määrittää esimerkiksi lämpösumman minimimäärää, jota taas olisi voitu käyttää alueille vuosittain optimoitujen aikaikkunoiden määrittelyyn.

Termisen kasvukauden kehityksen arvioimiseksi tähän raporttiin on lisätty liite, joka esittää Pohjois-, Väli- ja Etelä-Suomessa sijainneiden edustavien sijaintien lämpösummakehitystä. Lämpösumma on esitetty kymmenen vuorokauden välein kahdentoista vuoden ajalta. Taulukoiden ohessa on apukartta, josta voi tarkistaa, että mille lämpösummavyöhykkeelle ilmakuvattu järvi kuuluu ja mitä taulukkoa järvelle kannattaa soveltaa.

Koska kansallista ilmakuvausohjelmaa ei pystytä räätälöimään vesikasvillisuustulkintoja varten suotuisampaan aikaikkunaan, jatkossa kaukokartoitusaineistoina kannattaa harkita satelliittikuvien hyödyntämistä. Tarkkojen satelliittikuvien hintojen tulee kuitenkin laskea, jotta aineistohankintakustannukset eivät kasvaisi liian suureksi. Samoin satelliittikuvien geolokaatiovirhe tulee olla vähäinen. Kehitys koneoppimistekniikoissa on valtavaa ja jatkossa tarjolle voi tulla kustannustehokkaampia tekniikkavaihtoehtoja.



Kuva 13. Lämpösumman kehittyminen kolmella valuma-alueella 1.7.–10.9. välisenä aikana vuosina 2012–2023. Lämpötilat ovat WSFS-Vemala-vesistömallilla simuloituja arvoja 3. jakovaiheen valuma-alueille.

6 SUMMARY IN ENGLISH

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. We developed an interpretation method based on machine learning. This interpretation method is applied especially for macrophyte status assessment based on the percentage of vegetated littoral (PVL).

The lake macrophyte zone was detected from color-infrared aerial orthophotos administered by the National Land Survey of Finland. The orthophotos covered the years 2012 to 2023, and only photos captured between the first of July and the tenth of September were used. The whole lake water body (referred to as *lake* later in this text) needed to be captured in this time frame to make PVL calculation relevant. The detections were limited to humic and humic-rich lakes.

The lake macrophyte zone detections were performed with the help of a custom machine learning model trained using Picterra (<https://picterra.ch>). The orthophotos were captured by multiple photographers using different equipment and post-processing methods. Therefore, the training data included photos representing many aerial photography sessions. Training areas covering an approximate area of one hectare were drawn first, followed by annotation of all the pixels representing macrophytes (emergent vegetation and floating-leaved vegetation) as polygons. The annotation process was mainly based on visual consideration on the computer screen, not on data collected *in situ*. Accuracy areas and macrophyte annotations were drawn, as well. After training the model, the algorithm applied the model to the accuracy areas and compared the modeled polygons to the annotations. The final model, consisting of 777 training areas and 275 accuracy areas, had an accuracy of 89.92%.

The geospatial model was run on over 2,900 lakes (including lakes with images on multiple years; 1,900 unique lakes). The output was exported into QGIS, and visual inspections were made to detect lakes with large misdetections due to factors such as wave reflections and algae blooms. The goal was to delete only misdetections, but sometimes artefacts were so abundant that the whole lake had to be deleted. The modeled polygons were dissolved into multi-part polygons, and information on land use in the catchment areas was joined based on spatial overlapping.

The attributes of the spatial data (1,789 unique lakes with 1 to 5 aerial image interpretations) were exported for statistical analysis. The observed PVL was calculated on 977 lakes that had bathymetric data to identify the 0 to 3 meters deep littoral zone (potential abundance area for macrophytes). The values for expected PVL under reference conditions (55 lakes) were defined using statistical predictive modelling. A linear regression model was able to explain 50 % of the inherent variation in PVL.

For PVL-based status assessment, the ecological quality ratio (EQR) was calculated. The status assessment metric (EQR) correlated with the intensity of catchment area nutrient loading and water quality. However, the PVL-based status assessment had only a moderate correlation with species-related status assessments based on observations *in situ*.

The geospatial data is published in Paikkatietoikkuna geodata portal (<https://kartta.paikkatietoikkuna.fi/?lang=en>). Every interpreted year has its own map layer titled, for example, *Lake Macrophyte Zone 2012*. It is possible to add historical true-color orthophotos (captured simultaneously with color-infrared photos) in the portal's map view. Therefore, the user can view the zone layers while having the orthophoto of the correct year underneath. The map layer attributes include orthophoto capture information, statistics on the macrophyte zone and the 0 to 3 meters deep littoral zone, and the observed PVL. The table data with observed and expected PVL plus status assessment

information will be later published in Water and Marine Management Information System Pisara by the Finnish Environmental Center.

7 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>

Kanninen, A. 2012. Aquatic macrophytes in status assessment and monitoring of boreal lakes. Jyväskylä *Studies in Biological and Environmental Science* 254, 50 s.

Leka, J., Valta-Hulkkonen, K., Kanninen, A., Partanen, S. Hellsten, S. Ustinov, A., Ilvonen, R. & Airaksinen, O. 2003. Vesimakrofyytit järvien ekologisen tilan arvioinnissa ja seurannassa. Maastomenetelmien ja ilmakuvatulkinta käyttökelpoisuuden arviointi Life Vuoksi-projektissa. *Etelä-Savon ympäristökeskus ja Pohjois-Savon ympäristökeskus, Alueelliset ympäristöjulkaisut* nro. 312. 96 s. Gummerus Kirjapaino Oy, Saarijärvi.

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.

Marttila, J.-V., J. Aroviita, M. Kuoppala & A. Kanninen 2020. Eri mittakaavaiset kaukokartoitusmenetelmät järvien rantavyöhykkeen kasvillisuuden seurannassa ja tilanarvioinnissa. *Raportteja* 48/2020. 145 s.

Meriläinen, J. & H. Toivonen, 1979. Lake Keskimmäinen, dynamics of vegetation in a small shallow lake. *Acta Botanica Fennica* 16, 123–139.

Nelson, S. A.C., K. Spence Cheruvilil & P. A. Soranno 2006. Satellite remote sensing of freshwater macrophytes and the influence of water clarity. *Aquatic Botany* 85:4, s. 289-298

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. 90 s

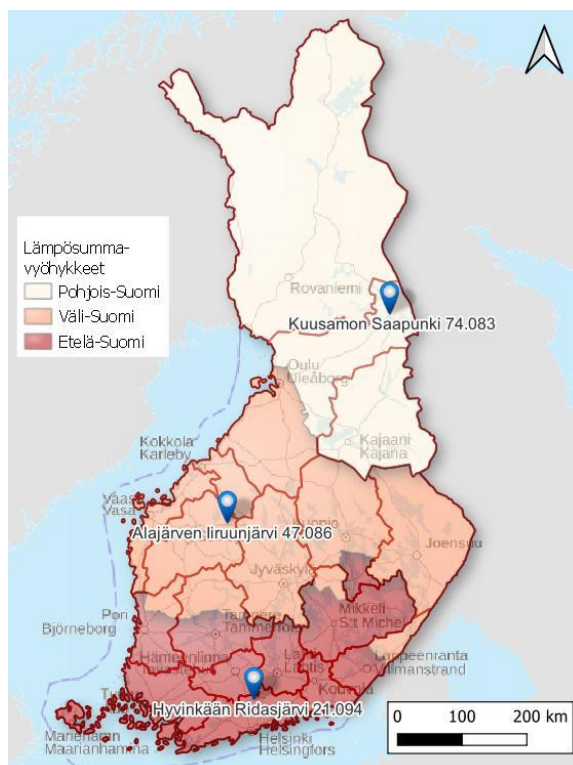
Liite a.

TAULUKOT LÄMPÖSUMMAN KEHITTYMISESTÄ

Tämän liitteen taulukoiden tarkoituksena on auttaa arvioimaan termisen kasvukauden kehittymistä eri ilmakehuvuosina. Termisen kasvukauden seuranta tehdään tehoisan lämpötilan summan avulla, jonka yksikkö on vuorokausiaste °Cvrk. Lämpösummaa kertyy päiviltä, jolloin vuorokauden keskilämpötila on +5°C asteen yläpuolella. Summaan lasketaan kasvukauden aikana vuorokauden keskilämpötilan viiden asteen ylittävä osa. Jos vuorokauden keskilämpötila jää kasvukaudella + 5°C asteen alapuolelle, summaa ei kerry, mutta se ei myöskään vähene. Kasvukausi katsotaan silloin tilapäisesti pysähtyneeksi.

Taulukoituna on lämpösumma kolmelta valuma-alueelta, jotka edustavat Etelä-Suomea (termisen kasvukauden keskimääräinen lämpösumma on keskimäärin yli 1300 °Cvrk vuosina 1991-2020), Väli-Suomea ja Pohjois-Suomea (termisen kasvukauden keskimääräinen lämpösumma on alle 1100 °Cvrk vuosina 1991-2020). Valittujen valuma-alueiden läheisyydessä on säähavaintoasema, joten simuloidut arvot edustavat todellisia mitattuja arvoja, eivätkä niinkään interpoloinnilla arvioituja arvoja.

Seuraava kartta esittää lämpösummalaskentoihin valitut valuma-alueet. Lisäksi kartta esittää lämpösummavyöhykkeitä. **Tehdessä johtopäätöksiä siitä, että onko yksittäinen ilmakehvatulkinta tehty kasvukauden osalta liian aikaiselta ilmakehuvauspäivämäärältä, katso kartalta, että millä lämpösummavyöhykkeellä järvi sijaitsee ja tarkastele lämpösummia kyseisen vyöhykkeen taulukosta.**



©Juho-Ville Marttila, Pohjois-Savon ELY-keskus, 2024
Sisältää Maanmittauslaitoksen Taustakarttarajan
ja Hallinnolliset rajat 1: 4 500 000 aineistoa 10/2024.

Erojen havainnollistamiseksi taulukon solut ovat väritetty taustaltaan erivärisiksi. Värisävyjen kynnyksarvot (250, 500, 750 °Cvrk) ovat asetettu tasavälisesti, eivätkä esimerkiksi perustu tieteelliseen kirjallisuuteen perustuvaan arvioon kelluslehtisten kasvien kehittymisestä lämpösumman suhteen.

Lämpösummalaskennan lähtöaineistona toimii vesistömallijärjestelmä WSFS:n sivulta (<https://wsfs.ymparisto.fi>) ladattavat DAT-tiedostot vuorokauden keskilämpötilojen simuloiduista arvoista kolmannen jakovaiheen alueilla. Tiedostot ovat ladattu 30.10.2024.

Lämpösumman kehittyminen Pohjois-Suomessa: edustavana valuma-alueena Kuusamon Saapungin valuma-alue 74.083

pvm	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	keskiarvo
01.7.	266	447	278	228	394	181	355	302	373	383	369	373	329
11.7.	363	552	388	299	513	278	464	365	446	550	499	455	431
21.7.	459	621	528	367	626	370	624	434	560	664	614	566	536
31.7.	571	746	666	445	759	484	775	548	666	756	716	660	649
10.8.	647	867	808	531	863	563	893	588	763	840	816	793	748
20.8.	732	960	892	618	939	659	973	677	843	934	937	892	838
30.8.	787	1038	955	704	992	705	1032	761	915	973	1021	968	904
09.9.	825	1098	1015	748	1029	741	1090	842	977	998	1038	1049	954

Lämpösumman kehittyminen Väli-Suomessa: edustavana valuma-alueena Alajärven liruunjärven valuma-alue 47.086

pvm	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	keskiarvo
01.7.	352	568	390	320	480	302	483	502	471	518	454	451	441
11.7.	473	671	512	424	572	388	600	580	553	685	568	547	548
21.7.	570	747	653	506	680	470	761	669	667	812	672	658	655
31.7.	689	873	813	598	816	573	940	796	765	935	777	756	778
10.8.	776	995	964	704	917	668	1080	870	875	1030	883	885	887
20.8.	872	1091	1057	796	1002	772	1184	973	972	1124	1018	984	987
30.8.	945	1165	1124	898	1079	828	1266	1076	1047	1182	1109	1073	1066
09.9.	998	1238	1199	953	1142	874	1360	1157	1115	1215	1122	1160	1128

Lämpösumman kehittyminen Etelä-Suomessa: edustavana valuma-alueella Hyvinkään Ridasjärven valuma-alue 21.094

pvm	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	keskiarvo
01.7.	455	627	463	393	567	381	596	580	515	612	514	538	520
11.7.	586	749	588	510	669	475	703	661	606	781	641	640	634
21.7.	689	855	724	604	784	565	867	770	727	933	750	761	752
31.7.	819	985	896	697	917	673	1041	912	826	1069	873	871	882
10.8.	922	1120	1054	812	1027	783	1192	1000	946	1179	989	998	1002
20.8.	1021	1227	1161	916	1119	895	1297	1111	1054	1285	1148	1112	1112
30.8.	1105	1315	1238	1021	1216	961	1392	1221	1143	1364	1265	1211	1204
09.9.	1171	1396	1321	1085	1301	1024	1496	1309	1217	1422	1291	1306	1278