

Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituut

Optilise kaugseire kasutamine kalade kude- ja turgutusalade kaardistamisel

(Deliverable 2.6.1. Mapping the functioning of fish spawning areas with remote sensing)

Teostatud projekti "Eesti mereala keskkonna ja loodusväärtuste hindamise ja seire innovaatilised lahendused" raames

Versioon 3, 15.04.2020

Leping: RITA1/02-60-01

Vastutav täitja: Georg Martin

Aruande koostajad: Kristjan Herkül, Mehis Rohtla, Roland Svirgsden, Ele Vahtmäe, Tiit Kutser, Jonne Kotta, Markus Vetemaa

Tallinn 2020



RITA

The logo for mereRITA consists of three blue wavy lines above the text "mereRITA" in a serif font.

mereRITA

Aruande versioonide info

Versiooni number	Kuupäev	Info
1	31.03.2020	Esimene tellijale esitatud versioon
2	14.04.2020	Parandatud joonise 3.3.1 allkiri
3	15.04.2020	Vastavalt juhtkomisjoni soovile lisati ingliskeelne kokkuvõte (Executive Summary)

Sisukord

Executive Summary	4
1. Sissejuhatus	5
2. Materjal ja meetodika	9
2.1. Uuringualad	9
2.2. Optilise kaugseire andmed	10
2.3. Veekogude kohtvaatlused	12
2.4. Andmetöötlus ja matemaatiline modelleerimine	12
3. Tulemused	16
3.1. Erinevate kaugseire meetodite visuaalne hinnang	16
3.2. Droonipõhised ortofotod	20
3.3. Hypsax	38
3.4. Erinevate kaugseire meetodite mudelennustuste võrdlus	40
4. Kokkuvõte	47
Kasutatud allikad	49

Executive Summary

The aim of the study was to test the feasibility of using different optical remote sensing methods for mapping the features (vegetation, substrate, water depth) of shallow water (mainly less than 2 m) coastal fish spawning and nursery habitats. Field study was carried out at eight study areas in Western and Southern Saaremaa Island, Estonia, in June and July 2019.

The feasibility of the following optical remote sensing methods was tested:

- Drone orthophoto mosaics produced using consumer-grade aerial drone (pixel size 0.05 m);
- Airborne orthophoto mosaics produced by the Estonian Land Board (pixel size 0.2 m);
- Airborne hyperspectral imagery acquired by hyperspectral imager Hypspec (pixel size 0.8 m);
- Sentinel-2 (S2) satellite imagery (pixel size 10-60 depending on channel).

On-site sampling of habitat features was done using either direct visual observations or by underwater video. The following habitat variables were recorded: total percentage cover of vegetation, percentage coverage of seabed substrate types, percentage cover of macrophyte species, depth of free water column.

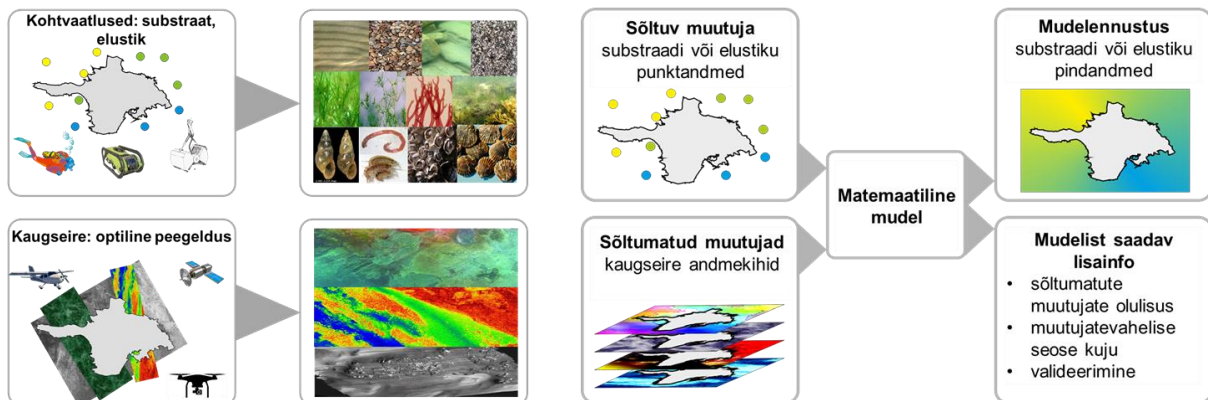
Visual assessment of different remote sensing imagery revealed that the freely available Sentinel-2 satellite imagery is not usable for assessing the features of spawning and nursery areas due to its low spatial resolution (pixel size of 10-60 m). The best suited method for direct visual assessment and interpretation of different features of spawning and nursery habitats, including detection of obstacles on streams, is the drone-based imagery or video.

Random forest machine learning method was used for supervised distribution modeling of habitat variables. Optical remote sensing variables were used as predictors in the models. Models were trained based on habitat data from on-site sampling. Using the trained models, spatial predictions were made in 2 m grid covering the full extent of study areas. The predictive performance of the models was estimated based on mathematical validation and visual expert judgement. Satellite imagery was not used in modeling due to its low resolution. Based on mathematical model validation, drone orthophoto, Land Board orthophoto, and Hypspec imagery enabled to produce highly accurate model predictions but drone-based imagery is also recommended for modeling purposes because of its high spatial resolution and low cost.

This study was financially supported by the European Regional Development Fund within National Programme for Addressing Socio Economic Challenges through R&D (RITA).

1. Sissejuhatus

Madala rannikuvee ja sisevee põhjasubstraadi ja -elustiku kaardistustööde läbiviimine kasutades ainult tavapäraseid kohtvaatluseid on kulukas ja aeganõudev, sest mootorpaatidega proovipunktide külastamine võib olla ohtlik või võimatu liiga madala vee, kivide ja rohke põhja- ja kaldaveetaimestiku tõttu. Sageli on sellistes piirkondades võimalik kohtvaatlusi teostada ainult jalgsi vees liikudes. Kui tugineda ainult kohtvaatlustele, mille arv raskeid liikumisolusid arvestades on madal, jääb proovivõtvõrgustik liiga hõredaks, et sellest saadud andmete abil oleks võimalik luua interpoleerimise või matemaatilise modelleerimise abil rahuldava kvaliteediga kaardikihte. Sellises olukorras on praeguste tehniliste võimaluste juures ainuke mõistlik lahendus kasutada optilist kaugseiret koos kohtvaatlustega. See kombinatsioon võimaldab optiliste andmetega katta kogu uuringuala ning leida matemaatiliste mudelite abil seoseid optiliste (valgusspektrid) ja kohtvaatlustega saadud muutujate (substraat, elustik) vahel. Seejärel saab leitud mudelite abil ennustada substraadi ja elustiku muutujate väärtused kogu uuringu alal. Kohtvaatlustel, optilisel kaugseirel ja matemaatilisel modelleerimisel põhineva kaardistamise tööpõhimõtte skeem on toodud joonisel 1.1.



Joonis 1.1. Põhjasubstraadi ja elustiku andmete kogumise ja ruumilise leviku modelleerimise tööpõhimõtte skeem.

Kaugseire rakendamine madalaveeliste veekogude kaardistamisel

Viimaste aastakümnete tehnoloogiline areng on võimaldanud laiendada optilise kaugseire kasutatavust madalaveeliste elupaikade kaardistamiseks (Kutser et al 2020). Käesoleval ajal on kaugseire aparatuur kasutatav väga erinevatelt platvormidelt - satelliitidelt, lennukitelt, laevadelt, mehitamata õhu- ja veesõidukitelt. Vastavalt on väga erinevad ka kaugseire kasutamise hind ning iga konkreetse probleemi lahendamiseks vajaliku sensori valik. Näiteks on Eesti laiuskraadil iga 2-3 päeva järel võimalik saada Euroopa Kosmoseagentuuri (ESA) Sentinel-2 satelliitide pilte, mis on 10 m ruumilise lahutusega. Need pildid katavad suure osa Eestis korruga ja on tasuta. Vaja on ainult välja töötada Eesti oludesse sobivad kaugseire meetodid (S2 on maismaa, mitte veekogude seireks mõeldud sensor) nende andmete interpreteerimiseks. Satelliitidel paikneb ka kommerts-sensoreid, mille ruumiline lahutus on alla 1 m. Sellistelt sensoritelt saab palju detailsemat informatsiooni madalate veealade kohta. Teisalt ei võimalda andmete hind (suurusjärgus 35 €/km²) ning pildi suurus (100-200 km²) seirata suuri merealasid tiheda ajalise sammuga.

TÜ Eesti Mereinstituudil on olemas hüperspektraalne lennukil paiknev kaugseire seade HySpex, mida kasutatakse Maa-ameti lennukilt. Selle ruumiline lahutus sõltub lennu kõrgusest ning on seega muudetav. Kui lennata väga hea ruumilise lahutusega (alla 1 m), siis saab sama ajaga katta oluliselt väiksema mereala kui lennates näiteks 5 m lahutusega. Kuna üheks suuremaks kuluks on lennutunni maksumus, siis peab hoolega hindama millist ruumilist lahutust vajab iga konkreetne uurimisprobleem. Ka ei ole lennukiga võimalik katta väga suuri merealasid ja/või teostada mõõtmisi suure ajalise sagedusega (kas või juba ilmastiku tõttu).

Maa-ameti lennukil on ortofotokaamera, millega kaardistatakse kogu Eesti iga 2-3 aasta tagant ruumilise lahutusega 10-40 cm. Need andmed on tasuta saadaval. Merealad ei ole Maa-ameti haldusala. Seepärast mere kohal lende ei tehta. Teisalt on madalad rannikualad maismaale piisavalt lähedal ning jäävad paratamatult piltidele. Maa-ameti ortofotode kasutamisega madalate vete uurimiseks ja seireks on küll ka mõningad tehnoloogilised probleemid. Kaardistamiseks lennatakse ida-lääne suunaliselt. Vee kohal ei ole see hea variant, sest suurema osa lennukilt mõõdetud signaalist võib sel juhul moodustada veepinnalt peegeldunud päikesekiirgus ehk me ei saa nendelt piltidelt mingit infot vees või põhjas olevast. Ka teostatakse maapinna kaardistusel nn varakevadel (enne taimestiku tärkamist). See ei ole optimaalne aeg paljude veekogu põhja seisundiga seotud probleemide uurimiseks ja seireks. Mõnel muul ajal ja vee kaugseire jaoks sobivate lennusuundadega lendamine tuleb eraldi tellida ning selle eest ka eraldi maksta.

Ruumiliselt veelgi paremad, tavaliselt paarisentimeetrise lahutusega, on droonidelt kogutavad andmed. Tavalistel odavatel droonidel paiknevad ainult tavapärased digitaalkaamerad, mitte spetsiaalsed kaugseire instrumendid. See tähendab, et kogutav informatsioon koosneb punasest, rohelisest ja sinisest valgusest (RGB) nagu Maa-ameti ortofotodegi puhul. Drooniga uuritavad alad on veel palju väiksemad kui lennukiga uuritavad alad ning sõltuvad veelgi rohkem ilmast, näiteks tuulest.

Lisaks lendavatele droonidele on võimalik kasutada ka ujuvaid "droone". TÜ Eesti Mereinstituut soetas hiljuti firma SurfBee ujuvroboti, millel on paradal nii kaugseire seadmed (Ramses spektromeetrid), vee kvaliteedi sensorid (klorofüll-a, lahustunud orgaanika ning fükotsüaniini fluoromeetrid) ning lisaks sonar sügavuse 3D kaardistamiseks ning video põhjasubstraadi ning taimestiku tuvastamiseks. Põhimõtteliselt saaks seda ujuvrobotit kasutada ka iseseisva (lähi)kaugseire informatsiooni kogumiseks. Käesoleva projekti raames kasutati seda kohtvaatluste videoülesvõtete tegemisel, et saada rohkem andmeid satelliitidelt, lennukilt ja droonilt saadud informatsiooni interpreteerimiseks kui seda võimaldaks jalgsi või paadiga madalas vees üksikutes punktides andmete kogumine.

Viimastel aastakümnetel on oluliselt paranenud ka kaugseire sensorite spektraalne lahutusvõime. Video, ortofotod ning suure ruumilise lahutusega satelliidid mõõdavad veest tulevat kiirgust tavaliselt vaid punases, rohelises ja sinises spektriosas (RGB). See tähendab, et informatsiooni hulk, mille põhjal tuvastada näiteks erinevaid põhjataimestiku rühmi, on väga piiratud. Palju detailsemat informatsiooni on võimalik koguda hüperspektraalsete sensoritega, mis 3-4 spektrikanali asemel mõõdavad vees tulevat kiirgust kümnetel ja sadadel lainepikkustel. Selline andmestik võimaldab palju detailsemalt tuvastada erinevaid veekogu põhja tüüpe. Näiteks Eesti Mereinstituudi HySpex mõõdab nähtavat valgust ligemale sajast spektrikanalis samas kui ortofotod ja videod on sisuliselt kolme spektrikanaliga ning mõnedel satelliitidel on nähtava spektriosa kirjeldamiseks kuni viis spektrikanalit. Hüperspektraalseid sensoreid tehakse juba ka droonidele. Kui veel mõni aasta tagasi kaalusid sellised riistad mitmeid kilosid, maksid üle 100 000€ ning vajasisid väga suurt ja kallist drooni, mis jaksas sellist lasti tõsta, siis käesoleval ajal on välja töötatud hüperspektraalseid sensoreid, mis kaaluvad vaid

paarsada grammi ning maksavad mõnikümmend tuhat. Käesoleva projekti tarbeks, oli meil kasutada Maa-ameti lennukil paiknev HySpex kuid ei olnud droonil paiknevat sensorit.

Ruumilisest ja spektraalsest ning ajalisest vaatevinklist võetuna on seega saadaval väga palju erinevaid kaugseire sensoreid, millede seast optimaalseima (informatsiooni ja hinna suhe) valimine on tihtipeale keeruline protsess. Käesoleva töö üheks eesmärgiks oligi katsetada erinevate sensorite ja platvormide võimekust ja sobivust madalate merealade kaardistamisel.

Haugi kude- ja turgutusalade iseloomustus

Läänemeri on madala soolsusega sisemeri, mistõttu on selle kalastikus esindatud ka paljud mageveeliigid. Tüüpilistest mageveekaladest on Läänemere rannikualadel iseloomulikud ahven, haug, koha, luts, vimb, särg ja säinas. Kuigi osad neist vajavad kudemiseks eranditult magevett (luts, vimb), siis teised on võimelised kudema suuremal või vähemal määral ka riimvees (Ojaveer et al 2003, Rohtla 2015). Rannikumere kaladele olulised merealad, mis toimivad nii kude- kui ka noorjärkude kasvualadena, on üldjuhul mere madalamad ja produktiivsemad piirkonnad nagu varjatud lahed, rannajärved ja neid ümbritsevad märgalad (Kraufvelin et al 2018). Tihti suubub sellistele aladele ka erinevaid vooluveekogusid (jõed, ojad, kraavid), mille tõttu alaneb vee soolsus magevee sissevoolu mõjualas. Selliste sissevoolude mõju on suurim kevadiste üleujutuste ajal, mille tulemusel magevee mõjuala laieneb ning ulatuslikud merealad magedustuvad ning muutuvad kaladele sobilikeks kudealadeks. Erinevatel liikidel on aga erinevad eelistused kudeala suhtes.

Haug on tüüpiline mageveekala, kes Läänemeres koeb nii riimvees kui ka merega ühenduses olevates rannikuäärsetes mageveekogudes. Osadel merealadel on riimvees ja magevees kudevate haugide vahetõttu ligikaudu võrdne (Enstedt et al 2010), teistes jällegi domineerivad kas riimvees (Möller et al. 2019) või magevees kudevad haugid (Rohtla 2015). Eesti rannikumeres domineerivad tänapäeval magevees kudevad haugid (Rohtla 2015), kuid mõned aastakümned tagasi oli meres kudeva haugi osakaal tõenäoliselt palju suurem (Erm et al 1970). Tõenäoliselt sõltub riimvees ja magevees kudevate haugide vahetõttu konkreetsetel merealadel järgnevatest tingimustest: 1) kas piirkonnas on kudemiseks ja noorjärkude kasvualaks sobivaid mageveekogusid ja kas need on ka haugidele ligipääsetavad, 2) kas merekudealadel valitsevad abiootilised ja biootilised tegurid võimaldavad edukat sigimist. Arvatakse, et Läänemere eutrofeerumine on vallandanud nõ kaskaad-efekti, mille tulemusel on halvenenud merekudealade kvaliteet ning suurenenud ogaliklaste kisklus haugi marjateradele (Nilsson 2006, Eriksson et al 2009). Sellele viitavad ka eespool esitatud tulemused – riimvees kudevate haugide osakaal on suurim Läänemere lääneosas, kus eutrofeerumise negatiivsed mõjud ei avaldu rannikumeres nii selgelt kui Läänemere idaosas.

Haugi kude- ja turgutusalade eelistused riim- ja magevees on mõnevõrra erinevad. Magevees on haugide kude- ja turgutusalade eelistused suhteliselt hästi teada. Kuna haug on tüüpiline luhalkudeja, siis parimad kudealad on üleujutatud rohumaad/märgalad järvede ja vooluveekogude kaldavööndis või ümbruses (Craig 1996). Kudemine toimub varakevadel üldjuhul madalas vees (0,1-0,7 m) eelmise aasta surnud taimestikule, kusjuures põhjataimestiku tihedus ei tohi olla ülemäärane suur (nt 2-4 tarnamatat ühe m² kohta) (Casselman & Lewis 1996). Veepinnani ulatuv tihe taimestik on pigem ebasoodne, kuna see võib takistada kalade liikumist ja soodustada hapnikuvaeste tingimuste teket, mis võib omakorda saada saatuslikuks marjateradele ja vastsetele. Taimerühmadest eelistatakse üldjuhul lõikheinalisi ja kõrrelisi, kuid sobivad ka vesisammal, vesikuusk, mändvetikas ja pilliroog (Casselman & Lewis 1996). Turgutusaladena toimivad kõige paremini tihedad veetaimestiku rikkad

alad, kus taimeestiku katvus on 40-90% ning mille üldpindala on üle 10 korra suurem võrreldes kasutusel olnud kudealaga (Casselman & Lewis 1996).

Riimvees kudevate haugide kude- ja turgutusosalade eelistused ei ole väga hästi teada, kuna seda pole nii põhjalikult jõutud veel uurida. Kuid üldjuhul ka riimveekudealad paiknevad taimeestikurikastes piirkondades sügavustel 0,2-1,0 m (Kallasvuo et al 2011), avavees isegi kuni mitme meetri sügavusel (Möller et al 2019). Eelistatud taimerühmadest on kirjanduses väljatoodud pilliroog ja vesisammal (Kallasvuo et al 2011) ning mändvetikas (Möller et al 2019).

Töö eesmärk ja uurimisrühm

Käesoleva töö eesmärgiks oli testida erinevate kaugseire meetodite rakendatavust mererannikuga seotud kalade kude- ja turgutusosalade omaduste (veekogu põhjasubstraat, põhjataimeestik, kaldaveetaimeestik) kaardistamisel.

Töö teostasid Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituudi töötajad Kristjan Herkül, Mehis Rohtla, Roland Svirgtsden, Ele Vahtmäe, Tiit Kutser, Jonne Kotta, Markus Vetemaa. Välitöödel osalesid täiendavalt Lagle Matetski, Jürgen Karvak, Laura Lõugas ja Külli Kutser.

Uuringu tellis ja uuringut rahastab Eesti Teadusagentuur Euroopa Regionaalarengu Fondist toetatava programmi „Valdkondliku teadus- ja arendustegevuse tugevdamine“ (RITA) tegevuse 1 „Strateegilise TA tegevuse toetamine“ kaudu. Uuring valmis Keskkonnaministeeriumi eesmärkide elluviimiseks.

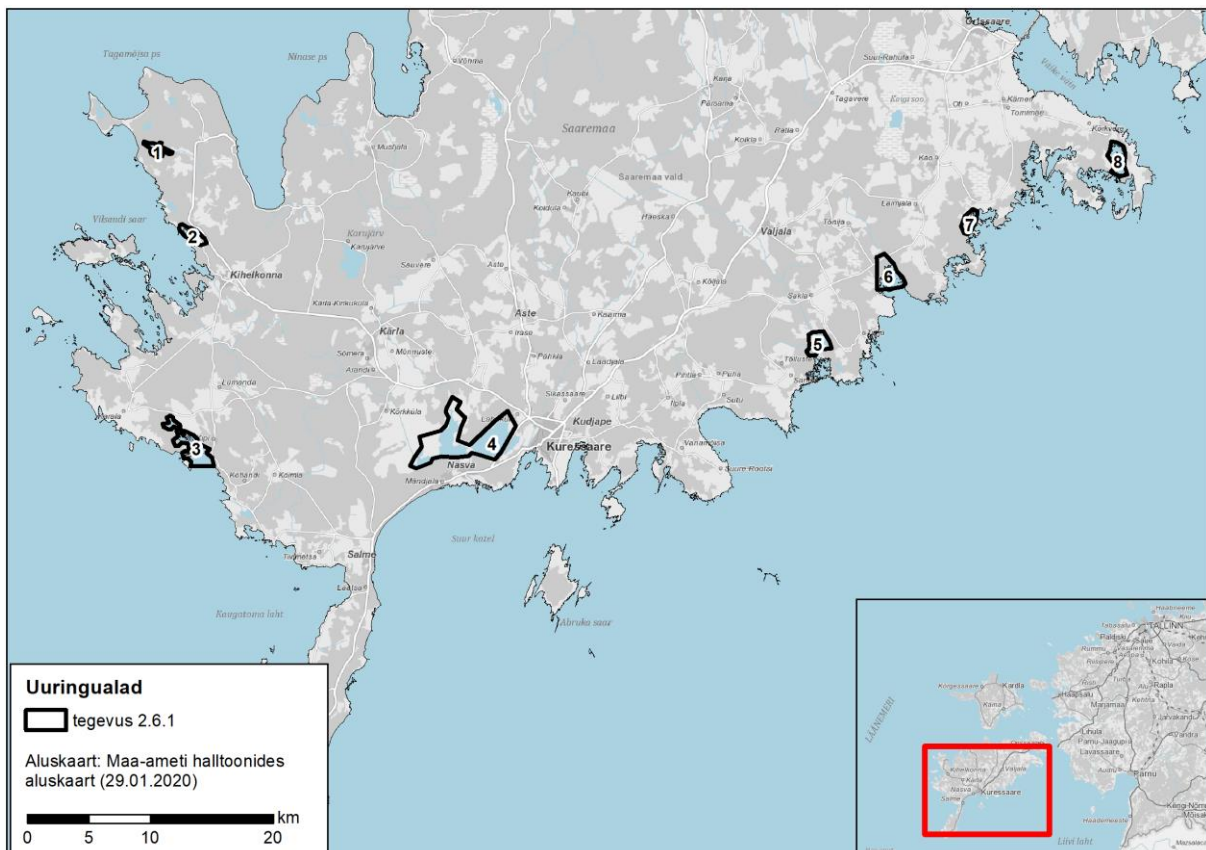
2. Materjal ja metoodika

2.1. Uuringualad

Uuringud teostati kaheksal alal Saaremaa lõuna- ja lääneosas, mille numeratsioon ja nimetused on järgnevad (joonis 2.1.1):

- Ala 1 – Killatu järv;
- Ala 2 – Pautsaare laht ja Lehmalahet;
- Ala 3 – Pilguse laht;
- Ala 4 – Mullutu-Suurlahet;
- Ala 5 – Oessaare laht;
- Ala 6 – Kõiguste laht;
- Ala 7 – Saastna laht;
- Ala 8 – Arjulahet.

Konkreetsed uuringualad valiti välja selle järgi, et need hõlmaksid erineva hüdrooloogilise režiimi ja suurusega mageveekaladele potentsiaalselt sobivaid kude- ja turgutusalasid.



Joonis 2.1.1. Uuringualad.

2.2. Optilise kaugseire andmed

Kasutati kolme erinevat liiki optilise kaugseire andmeid:

- Droonipõhised ortofotod (edaspidi lühendina „droon“);
- Maa-ameti ortofotod (edaspidi lühendina „Maa-ameti OF“);
- Hüperspektraalse spektromeetriga Hypsax lennukilt kogutud andmed (edaspidi lühendina „Hypsax“);
- Sentinel-2 satelliidipildid (edaspidi lühendina „satelliit“).

Droonipõhiste ortofotode loomiseks vajalik aerofoto materjal koguti välitöödel drooniga DJI Phantom 4 Pro V2.0 17.06–20.06.2019 ja 8.07–16.07.2019. Droonil on 20 megapiksline RGB-sensoriga digifotokaamera kolmes suunas stabiliseerival alusel. Lennud uuringualadel toimusid automatiseeritult DroneDeploy rakenduse abil, mis võimaldab määratleda kaardistatava ala polügooni, lennu kõrguse, fotode ülekatte, lennujoonte suunad jm kaardistamise jaoks vajalikud parameetrid. Kaamera oli pildistamise ajal suunatud otse alla. Aerofotode omavaheliseks ülekatteks piki lennu suunda oli 80% ja külgsuunaliseks ülekatteks oli 60% (tegemist on DroneDeploy rakenduse vaikeväärtustega). Lendude suunaks valiti põhja-lõuna suund, et minimeerida veepinnalt peegelduva kiirguse segavat mõju. Aerofotode arv sõltus uuringuala suuruselt ja jäi vahemikku 421 (Killatu) kuni 920 (Mullutu-Suurlaht). Lennu kõrgus oli 115 m, mis tagas ortofotomosaiigi piksli suuruse ligikaudu 4 cm. Aerofotodest loodi ortofotomosaiik fotogramm-meetrilisel meetodil DroneDeploy tarkvaras. Valminud ortofotomosaiikide täiendav geokorreksioon ja georefereerimine teostati ArcMap tarkvaras kasutades võrdluskihina Maa-ameti georefereeritud ortofotomosaiiki. Georefereerimispunktide valikukriteeriumiks oli nende selge visuaalne eristatavus nii droonipõhiselt ortofotomosaiigilt kui ka Maa-ameti ortofotomosaiigilt.

Maa-ameti ortofotod laeti kaardiruutude kaupa alla Maa-ameti kodulehelt¹. Maa-ameti ortofotosid kasutati viiendal alal (Oessaare laht), et võrrelda selle kasutatavust droonipõhise ortofotoga ja satelliidiandmetega. Iga kaardilehe ortofotodest laeti alla kõige uuema saadaoleva kaardistusaasta (2019) tavalised RGB (*Red, Green, Blue* – punane, roheline, sinine) värvikanalitega fotod ja valemvärvi CIR (*color infrared*) fotod GeoTIFF formaadis. CIR fotodest kasutati ainult lähisinfrapuna kanalit. Ortofotode piksli suurus oli 0,2 m.

Päikese peegelduse (*sun glint*) mõju eemaldamiseks rakendati Hedley et al (2005) meetodit kasutades lähisinfrapuna kanalit.

Modelleerimise sisendandmetena kasutamiseks arvutati täiendavalt kõigi kolme värvikanali omavahelised suhted ja seeläbi saadi sisendiks kokku kuus muutujat: R, G, B, R/G, G/B, R/B.

Hüperspektraalne spektromeeter Hypsax VNIR-1024 (tootja Norsk Elektro Optikk, NEO) kuulub Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituudile ja see on paigaldatud Maa-ameti lennukile Cessna 208 Grand Caravan.

¹ https://geoportaal.maaamet.ee/index.php?lang_id=1&page_id=610

Hypex võimaldab koguda kaugseire andmeid nähtava valguse ja infrapuna valguse spektrivahemikus (409-988 nanomeetri) 2,7 nanomeetrise spektraalse lahutusega kokku 216-l spektrikanalil.

Hypex andmed saadi kaugseire RITA (Kaugseireandmete kasutuselevõtt avalike teenuste väljatöötamisel ja arendamisel) projekti raames. Lendamise uurimisaladel toimus 19.07.2019.a. kella 09:00 ja 12:00 vahel.

Piltide täpne ruumiline lahutus sõltub lennukõrgusest. Antud juhul lennati 1700 m kõrgusel, mis tagas 0,8 m piksli suurusega alusandmete kogumise. Kaugseire andmed koguti eraldi lennujoontena, mis mosaiigiti hiljem pilditöötlusprotsessis kokku tervikpildiks. Hypex andmete eeltötlus hõlmab kõigepealt kaugseirepiltide radiomeetrilist korrektsiooni kasutades NEO poolt välja arendatud tarkvara. Järgneb geomeetriline korrektsioon, mis teostati PARGE (PARAmetric Geocoding, ReSe Applications Schöpfler, University of Zurich) geokorrektsiooni tarkvaraga kasutades lennu vältel kogutud GPS ja INS logiandmeid. Atmosfääri korrektsioon teostati ENVI pilditöötlusprogrammis kasutades FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) tarkvara. Päikeseglinde eemaldamiseks kasutati Hedley et al (2005) välja töötatud glindikorrektsiooni meetodit. Maismaa alad eemaldati edasisest pilditöötlustest kasutades lähisinfapuna spektripiirkonda, kus kontrast veest ja maismaalt tuleva optilise signaali tugevuse vahel on väga suur. Hypex andmete eeltötlus teostati kaugseire RITA projekti raames ning edasine analüüs käesoleva projekti raames.

Modelleerimise sisendandmeteks valmistati ette kaks komplekti muutujaid:

- 12 valitud kanali (470, 500, 520, 575, 600, 610, 625, 635, 650, 675, 705, 720 nm) peegeldustegurid (edaspidi „Hypex-kanalid“). Kanalite valikul on arvestatud sellega, et need kajastaksid erinevatele taimerühmadele omaste pigmentide (klorofüll-a, peridiniin jt) neeldumise maksimume (lohk peegelduse spektris) võis siis erinevatel põhjustel (tagasihajumine, kahe pigmendist tingitud lohu vahe, kus neeldumist peaaegu ei ole) tekkivaid haripunkte spektris (Vahtmäe et al 2006, Kotta et al 2014, Kutser et al 2020).
- 12 esimest peakomponendi arväärtust, mis saadi kõikide 490-700 nm vahemiku kanalite peakomponentanalüüsi tulemusel (edaspidi „Hypex-PCA“). Peakomponentide analüüs võimaldab vähendada sõltumatute muutujate arvu mudelis ning selle lihtsustuse kaudu parandada ka mudelite võimet üldistavalt kirjeldada elupaikade erinevaid näitajaid.

Sentinel-2 satelliidipildid saadi Copernicuse andmebaasist (<https://scihub.copernicus.eu/>). Materjal valiti välja sellisest ajavahemikust, mis kattuks võimalikult hästi välitööde läbiviimise ajaga (juuni - juuli 2019). Pildimaterjali valikul oli oluline ka pilvkatte puudumine uuringualadel ja hea vee läbipaistvus. Töös kasutamiseks valiti satelliidipilt 7. juunist 2019.

Modelleerimise sisendandmeteks valiti järgmised kuus kanalit: 443, 490, 560, 665, 705, 740 nm. 443 nm kanal oli 60 m suuruse piksliga, kanalid 490–665 nm 10 m suuruse piksliga ja kanalid 705–740 nm suuruse 20 m piksliga. Selleks, et mudeli sisendandmed oleks sama resolutsiooniga, suurendati arvutuslikult 60 m ja 20 m suuruse piksliga kanalite resolutsioon 10 m peale. Sentinel-2 puhul kaaluti nii atmosfäärikorrektsiooniga kui ilma korrektsioonita materjali kasutamist. Visuaalsel hinnangul osutus ilma korrektsioonita materjal informatiivsemaks, sest veekogude põhja mustrid olid oluliselt paremini nähtavad ja piltides esines vähem müra. Seetõttu kasutati edasistes analüüsidest ilma korrektsioonita pilte. Atmosfäärikorrektsioon on oluline siis, kui kasutatakse palju pilte ja/või kasutatakse analüütilisi (objektide füüsikalistel omadustel põhinevaid) meetodeid, näiteks

modelleeritud spektri kujusid (*spectral library*). Kuna antud töös mahtusid uuringualad kõik ühele pildile ja rakendati masinõppel põhinevaid arvutusalgortime, siis ei olnud atmosfäärikorrektsiooni kasutamine ka sisuliselt vajalik.

Kõik ettevalmistatud kaugseire andmed viidi rasterkihtidena ESRI ArcGIS failipõhisesse geoandmebaasi (*file geodatabase*).

2.3. Veekogude kohtvaatlused

Veekogude põhjasubstraadi ja elustiku katvuste kohtvaatlused proovipunktides toimusid vahemikus 17.06.2019 kuni 17.07.2019. Kokku teostati kohtvaatlused 176 proovipunktis. Substraadi ja elustiku kirjeldused teostati kohapealsete otsete visuaalsete vaatlustena, mille tulemused kanti kohapeal protokollis. Osadel juhtudel teostati videoülevõtted kasutades veekindlat kaamerat GoPro ja ujuvdrooni SurfBee ning hiljem hinnati videosalvestustelt substraadi ja liikide katvusi. Hinnatavateks muutujateks olid põhjataimestiku üldkatvus, põhjataimestiku ja -loomastiku liikide/rühmade katvused ja põhjasubstraadi tüüpide katvused protsentuaalselt.

Kuna piiratud ressursside tõttu oli vajalik teostada drooniandmete kogumine ja kohtvaatlused valdavalt samaaegselt, siis kohtvaatluste proovipunktide geograafiline paiknemine otsustati kohapeal püüdes maksimeerida kohtvaatluste paiknemise ruumilist ulatust ja visuaalselt eristatavate veekogu põhja piirkondade (nt taimestikuta muda, kivised alad, erineva dominantliigiga taimekooslused) katmist.

Proovipunktid georefereeriti kasutades diferentsiaal-GNSS-seadet Trimble GeoExplorer 6000 või tavalisi GNSS seadmeid Garmin Montana 680.

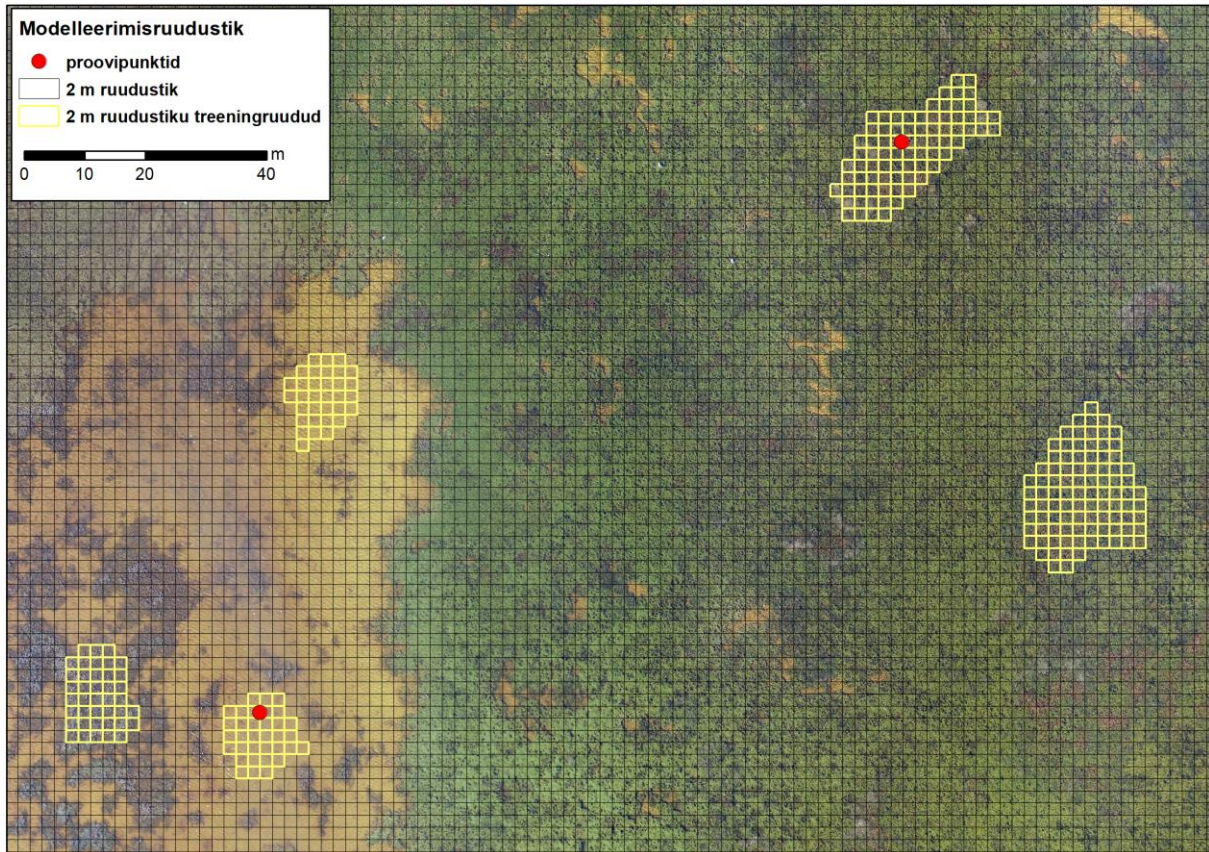
Kohtvaatluste andmed sisestati Tartu Ülikooli Eesti mereinstituudi põhjaelustiku andmebaasi (Microsoft Access).

2.4. Andmetöötlus ja matemaatiline modelleerimine

Modelleerimisruudustik

Uuringualadele loodi 2 m küljepikkusega ruudustik ja loodud 2 × 2 m segmendid moodustasid järgnevates modelleerimistöodes vähima modelleeritava ühiku. Antud valik oli optimaalseim arvestades kohtvaatluste ruumilise ulatusega, optilise kaugseire piltidel eristuvate veekogu põhja laikude suurusega ja modelleerimiseks moodustuvate andmeridade hulgaga, millest sõltub matemaatiliste arvutuste ajakulu. Katsetati ka 2 m suurema ja väiksema ruudu kasutamist. 2 m suurema ruudu kasutamine ei olnud antud aladel otstarbekas, kuna see skaala oleks jäänud liiga suureks, et arvestada looduslikku põhja laigulisust, mis oli tuvastatav kaugseire piltidel ja kohtvaatlustega. 2 m oluliselt väiksema ruudu (alla 1 m) kasutamine ei oleks olnud otstarbekas arvutusmahu olulise kasvu tõttu ja ka põhjusel, et veekogu põhja videovaatluste ruumiline ulatus jääb tavaliselt vahemikku 1–4 m.

Mudelite treeningandmete koostamiseks valiti iga proovipunkti ümbruses käsitsi välja visuaalselt sarnane ja ühtlane regioon, mille piires olevatele ruutudele omistati proovipunkti andmed. Lisaks sellele määratleti käsitsi täiendavaid treeningpiirkondi ka sellistes kohtades, kus proovipunkte ei olnud, aga mis olid visuaalselt samasugused nagu külastatud piirkonnad. Selliste täiendavate treeningalade lisamine oli vajalik, sest mitmed uuringualad olid raskesti ligipääsetavad ja proovipunktide külastamise võimalused väga piiratud.



Joonis 2.4.1. Näide 2×2 m modelleerimisruudustikust ja treeningruutude paiknemisest proovipunktide juures alal number 5. Taustaks on droonipõhine ortofoto. Treeningruutude plokid, mille juures ei ole proovipunkte, on omistatud visuaalse sarnasuse alusel eksperthinnanguna.

Kaugseire andmed

Igas 2 m modelleerimisruudustiku ruudus arvatuti:

- Droonipõhiste ortofotode muutujate R, G, B, R/G, G/B, R/B keskmised ja standardhälbed;
- Maa-ameti ortofotode muutujate R, G, B, R/G, G/B, R/B keskmised ja standardhälbed;
- Hypsax muutujate (12 kanalit ja 12 esimest peakomponenti) keskmised väärtused ja standardhälbed.

Optilise signaali keskmine intensiivsus ja selle varieeruvus 2 m ruudus iseloomustavad elupaikade erinevaid aspekte. Optilise signaali keskmine intensiivsus annab infot substraadi tüübi ja taimestiku ohtruse kohta. Optilise signaali varieeruvus ruudus aga iseloomustab pigem taimestiku leviku väiksemastaapseid mustreid ning kuna erinevatele liikidele on iseloomulikud erinevad kasvustrid,

siis potentsiaalselt võimaldab sellise statistiku kasutamine edukamalt eristada erinevaid taimerühmi/liike.

Kogu uurimisala katvat 2 m ruudustiku andmestikku kasutati ennustusandmestikuna ja proovipunktidega seotud ruutude andmeid treeningandmetena.

Kuna satelliidiandmed olid 10 m piksliga, siis 2 m ruudustikuga andmeid nende põhjal ei loodud. Satelliidiandmete kasutatavust hinnati ainult visuaalse eksperthinnanguna.

Veekogude kohtvaatlused

Kohtvaatluste andmed sisestati Tartu Ülikooli Eesti mereinstituudi põhjaelustiku andmebaasi (Microsoft Access) ja modelleerimise jaoks andmete saamiseks tehti andmepäring sellest andmebaasist. Modelleerimiseks valiti ja loodi sellised põhjasubstraadi ja -elustiku muutujad, mida oli võimalik kohtvaatlustel tuvastada ja mis on relevantset kalade kude- ja turgutuselupaikade seisukohalt. Kuna kohtvaatluste hulk oli madal ja uuritud alad enamasti suhteliselt homogeense substraadi ja taimekooslustega, siis oli vajalik konkreetse ala jaoks luua substraadi ja taimestiku nominaaltunnuseid ja neile vastavaid klasse. Peamiseks nominaaltunnuseks oli elupaiga üldine klass, mis klassifitseeris kohtvaatlustel selgesti eristatavad elupaigad, nt taimestikuta muda, määndvetikate domineerimisega taimestik, penikeele domineerimisega taimestik vmt. Ka oma olemuselt pidevaid muutujaid võis olla vajalik klassifitseerida, sest konkreetset uuringualal võis muutuja numbriline varieeruvus olla liiga vähene, et seda pideva tunnuseks modelleerida. Vajalik võis näiteks olla taimestiku üldkatvuse klassifitseerimine, kui erinevaid numbrilisi väärtusi esines alla viie (nt 0%, 5%, 100%). Modelleeritavad muutujad olid järgmised:

- Põhjataimestiku üldkatvus – põhjataimestiku koosluste üldine kirjeldav tunnus, mis kvantifitseerib põhjataimestiku ohtrust. Olenevalt uuringualast võis olla modelleeritud kas pidevtunnusena või nominaaltunnuse klassidena.
- Põhjaelupaiga või põhjasubstraadi klass – kohapealsete vaatluste alusel eristatav veekogu põhja elupaiga klass domineeriva taimerühma, teatud taimerühma esinemise või substraaditüübi alusel.
- Vaba vee sügavus – vaba veesamba sügavus põhjataimestiku ülemisest piirist veepinnani või substraadi pinnast veepinnani põhjataimestiku puudumisel. Olenevalt uuringualast võis olla modelleeritud kas pidevtunnusena või nominaaltunnuse klassidena.
- Määndvetikate katvus (%) – määndvetikad oli kõige sagedasem põhjataimestiku rühm uuringualadel.
- Muda katvus (%).
- Kõva põhjasubstraadi katvus (%) – kõvade substraaditüüpide (väiksed kivid, suured kivid, kalju) summaarne katvus.
- Pehme põhjasubstraadi katvus (%) – pehmete substraaditüüpide (savi, muda, liiv, kruus) summaarne katvus.
- Pilliroog – pilliroo esinemine ja tihedus (hõre, tihe) nominaaltunnusena. Pilliroo esinemise ja tiheduse treeningandmete regioonid valiti droonipõhiselt ortofotomosaiigilt visuaalse eksperthinnanguna.

Modelleeritavate muutujate valik ja nominaaltunnuste klassid valiti igal alal eraldi vastavalt konkreetse ala looduslikele oludele.

Treeningandmete loomisel seoti proovipunktide põhjaelustiku ja -substraadi andmed modelleerimisruudustikuga (vt seksioon Modelleerimisruudustik) ja läbi selle kaugseire andmetega.

Modelleerimisalgoritm

Matemaatilise modelleerimise algoritmina kasutati juhumetsa (RF, *random forest*) meetodit, sest mitmetes varasemates töodes on leitud, et masinõppel põhinevate meetodite täpsus on parem võrreldes teiste meetoditega (nt Herkül et al 2017, Peterson & Herkül 2019,). Lisaks heale ennustusvõimele on RF eeliseks ka see, et algoritmi abil saab modelleerida nii pidevtunnuseid kui nominaaltunnuseid. RF on ansamblimeetod, mille puhul luuakse suur hulk otsuste puud kasutades iga puu loomisel tagasipanekuga juhuvalimit (*bootstrap*) tunnustest ja vaatlustest (Remm et al 2012). Seejärel kombineeritakse lõpptulemuseks parima ennustusvõimega otsuste puud. Ennustamisel saadakse lõplik ennustatava muutuja väärtus üksikute puude tulemuste keskmistamisel, kui tegemist on pideva tunnusega või hääletamise teel, kui tegemist on nominaalse tunnusega. Kirjanduse andmeil saavutatakse stabiilseid tulemusi vähemalt 500 puuga (Liaw & Wiener 2002). Antud töös oli puude arv 500-1000.

Kõik mudelarvutused viidi läbi vabavaralises statistikatarkvaras R 3.6.1 (R Core Team 2019). RF meetodi jaoks kasutati R-i paketti *randomForest* (Liaw & Wiener 2002, Breiman et al 2018).

Mudelite valideerimine

Mudelnustuste valideerimiseks kasutati nii sisemist valideerimist, välimist valideerimist kui visuaalset eksperthinnangut. Sisemisel valideerimisel teostati ennustused samadele andmepunktidele, mida kasutati mudeli treenimiseks. Välimisel valideerimisel treniiti spetsiaalselt eraldi mudelid, milles kasutati 75% juhuslikult valitud sisendandmeid ja ülejäänud 25% andmete abil valideeriti mudelite ennustusvõimet. Juhuvaim loodi modelleerimisruudu põhiselt, kus treeninguks ja valideerimiseks valiti andmepunktid kõigi treeningruutude seast. Siinjuures tuleb silmas pidada, et objektiivsem oleks olnud välised valideerimisandmed valida proovipunkti tasandil ehk kõik ruudud, mis on seotud valideerimiseks juhuslikult valitud proovipunktiga, oleksid läinud valideerimisandmete hulka. Paraku ei olnud kohtvaatluste vähesuse tõttu võimalik 25% kohtvaatlusi välja jätta, sest sealäbi oleks mõnel juhul suure tõenäosusega välja jäänud mõne nominaalse muutuja madalama esinemissagedusega väärtused. Väline valideerimine viidi läbi ainult 5. alal (Oessaare laht), kus oli võimalik rakendada modelleerimist nii droonipõhise ortofoto, Maa-ameti ortofoto kui ka Hypex andmete alusel.

Pidevtunnuseliste muutujate mudelite headust mõõdeti lineaarse korrelatsioonikordaja (r) ja keskmise absoluutvea (MEA, *mean absolute error*) abil. Nominaaltunnuste juures kasutati Coheni vastavuskordajat ehk kappa kordajat (K) ja klassifitseerimise edukust (E ; õigesti klassifitseeritud vaatluste osa kõigist vaatlustest). r , K ja E varieeruvad 0 ja 1 vahel ja kõrgem väärtus näitab paremat ennustusvõimet. MEA on samades mõõtühikutes, mis mõõdetav parameeter ja kõrgem väärtus näitab suuremat viga ehk halvemat ennustusvõimet. Lisaks matemaatilisele valideerimisele anti mudelnustustele ka visuaalne eksperthinnang. Visuaalne eksperthinnang on mudelite valideerimisel oluline komponent, sest matemaatiline valideerimine ei kajasta adekvaatselt nende piirkondade ruumimustreid, kust puuduvad proovipunktid. Mitmesugused modelleerimisega seotud vead, näiteks mudelite ülesobitamisest tingitud väga järsud üleminekud või muud looduses mitte-esinevad muustrid on tuvastatavad ainult mudelnustuse visuaalse ülevaate käigus.

3. Tulemused

3.1. Erinevate kaugseire meetodite visuaalne hinnang

Erinevate meetoditega kogutud kaugseire materjali visuaalne hinnang näitas, et tasuta kättesaadava satelliidi Sentinel-2 pildimaterjal ei sobi oma madala ruumilise lahutuse tõttu (piksel 10–60 m) väikesemõõtmeliste kude- ja turgutusvalade ja nendega seotud elupaikade omaduste hindamiseks. Joonisel 3.1.1 on näited erinevate kaugseiremeetoditega saadud materjalist samast piirkonnast mõõtkavas 1:10 000. Sellises mõõtkavas on kõigi meetodite puhul looduses esinevad üldised mustrid visuaalselt tuvastatavad. Väga madalas vees (hinnanguliselt vähem kui 10 cm) osutus probleemiks HySpex radiomeetriline lahutusvõime. Kuna vesi on suurusjärgu võrra tumedam objekt kui maismaa ning antud projekti fookus on veealad, siis oli HySpex reguleeritud võimalikult tundlikuks (hästi tumedate objektide mõõtmiseks). Teisalt tähendas see seda, et mõne sentimeetri sügavune vesi oli HySpexi jaoks juba liiga hele ning sensor läks küllastusse. Seetõttu ei saa ka nende väga madalate vete andmeid kasutada.

Joonisel 3.1.2 on mõõtkavas ligikaudu 1:300 näidatud kividest laotud võimalik takistus kalade liikumiseks oleval Oju jõel, mis on tuvastatav Maa-ameti ja droonipõhisel ortofotol, aga objekti mõõtmete tõttu ei ole seda võimalik näha Sentinel-2 pildil.

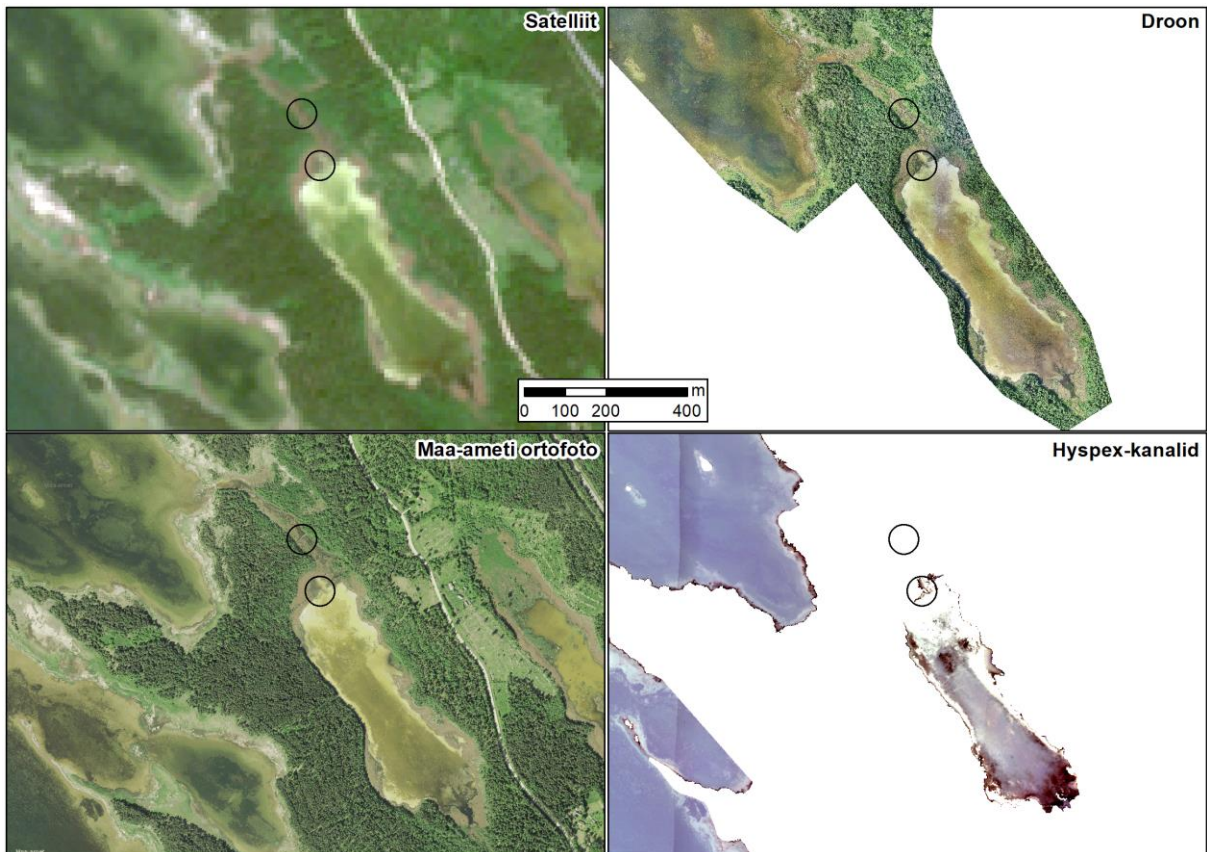
Joonisel 3.1.3 on mõõtkavas ligikaudu 1:300 näidatud 2. uuringuala Pautsaare lahe põhjaosa rannaäärse roostiku serv. Visuaalselt on roostiku tihedam osa ära tuntav ka ilma kohtvaatlusteta Maa-ameti ja droonipõhisel ortofotodel. Droonipõhisel pildil on võimalik visuaalselt eristada ka hõredamat roostikku. Hypex pildil ei ole roostik ilma kohtvaatlusteta visuaalselt äratuntav ja lisaks sellele on tiheda roostiku signaal sarnane maismaale ja seetõttu nendelt aladelt informatiivset signaali pole. Satelliidipildil ei ole võimalik madala ruumilise lahutuse tõttu antud piirkonnas roostikku eristada.

Visuaalse hinnangu tulemustest võib järeldada:

- Tasuta kättesaadav satelliidi Sentinel-2 materjal ei ole oma madala ruumilise lahutusvõime (piksel 10 m või suurem) tõttu sobilik kude- ja turgutusvalade ja nendega seotud elupaikade omaduste visuaalseks kirjeldamiseks kui uuritavad veekogud ja tuvastatavad objektid on mõõtmelalt väikesed (< 100 m). See ei tähenda, et Sentinel-2 ei võiks olla sobilik suuremates ruumiskaalades kasutamiseks.
- Käesolevas projektis kogutud Hypex'i pildid ei ole samuti kasutatavad uuritud elupaikade visuaalseks kirjeldamiseks kuna valitud ruumiline lahutus ei osutunud sobivaks. Madalamal lennukõrgusel oleks võimalik saavutada suurem detailsus kuid see suurendaks oluliselt sama suurte uuringualade katmiseks vajalikku lennuaega (ehk andmete hinda). Uuringus kasutatud lennukõrguse ja sellest tuleneva ruumilise lahutusvõime tõttu ei ole väikesemõõtmelised takistused kalade liikumiseks või üldised elupaigaklassid (tihe roostik, hõre roostik, taimedeta põhi) visuaalselt äratuntavad. Hypex kasutamine on rahaliselt ja organisatoorselt kulukas kuna eeldab mehitatud lennuki tellimist ja seetõttu võib olla mõni muu kaugseire lahendus otstarbekam.

- Maa-ameti ortofotod on piisavalt kõrge ruumilise lahutusvõimega (hajaasustusaladel piksli suurus ≥ 20 cm, tiheasustusaladel 10 cm), et nendelt visuaalselt tuvastada koelmu- ja turgutusosalade kaardistamiseks vajalikke objekte (nt väikesemõõtmelised takistused kalade liikumisteedel) või väga üldiseid elupaigaklasse (nt roostik). Selle materjali puudusena tuleb arvestada, et Maa-amet ei uuenda ortofotomosaiki igal aastal ja samuti ei ole võimalik valida lendude toimumise aega (enamasti aprill kuni juuni), sest maismaad kaardistatakse enne puude lehteminekut. Lisaks ei ole Maa-ameti materjali kogumine optimeeritud veealadele ja seetõttu võib esineda palju päikesepeegeldust, lainetust, lainevahtu, mis oluliselt raskendab piltide interpreteerimist või muudab selle võimatuks. Loomulikult on võimalik Maa-ametilt tellida lennud sobival ajavahemikul ning vee kaugseire jaoks sobivate lennuuundadega. Sellisel juhul tuleb aga iga lennutunni eest eraldi maksta. Spetsiaalsete lendude tellimisel on ilmselt mõistlikum kasutada juba hüperspektraalset sensorit HySpex, millega saab lisaks heale ruumilisele lahutusele ka palju detailsema spektraalse lahutusvõime. Teisalt on ortofotokaamera enamasti lennuki pardal ning Hypsaxiga lendamisel saab alati ortofotod lisaks.
- Parim meetod kude- ja turgutusosalade ja nendega seotud elupaikade omaduste visuaalseks interpreteerimiseks on drooniga kogutud materjal, sest:
 - Võimalik on ise operatiivselt valida drooni lennutamise aeg ja koht
 - Võimalik on saavutada väga kõrge ruumiline lahutusvõime (nt piksel 1 – 5 cm), mis annab võimaluse objekte ja mõningaid elupaikaid (tihe roostik, hõre roostik, taimedeta põhi, 100% põhjataimestiku katvus jmt) ka visuaalselt ära tunda ilma kohtvaatlusteta
 - Lisaks automatiseeritud lennule ortofotomosaigi koostamiseks vajalike aerofotode kogumiseks, on võimalik teostada käsitsi lennu juhtimist ja reaajas videopildi jälgimist ja salvestamist huvipakkuvates kohtades (nt rändeteedeks olevad vooluveekogud ja nendel olevate takistuste tuvastamine)
 - Meetod on rahaliselt soodne ja organisatoorselt lihtne kui uuritav ala on väike (mõned ruutkilomeetrid) ning mõõdistusi ei ole vaja koguda tiheda ajalise sammuga (näiteks sobib mõned korrad aastas). Suuremate alade ja/või tihedat (näiteks kord kuus) mõõtmist nõudvate protsesside korral ei pruugi droonimõõtmised enam optimaalsed olla.

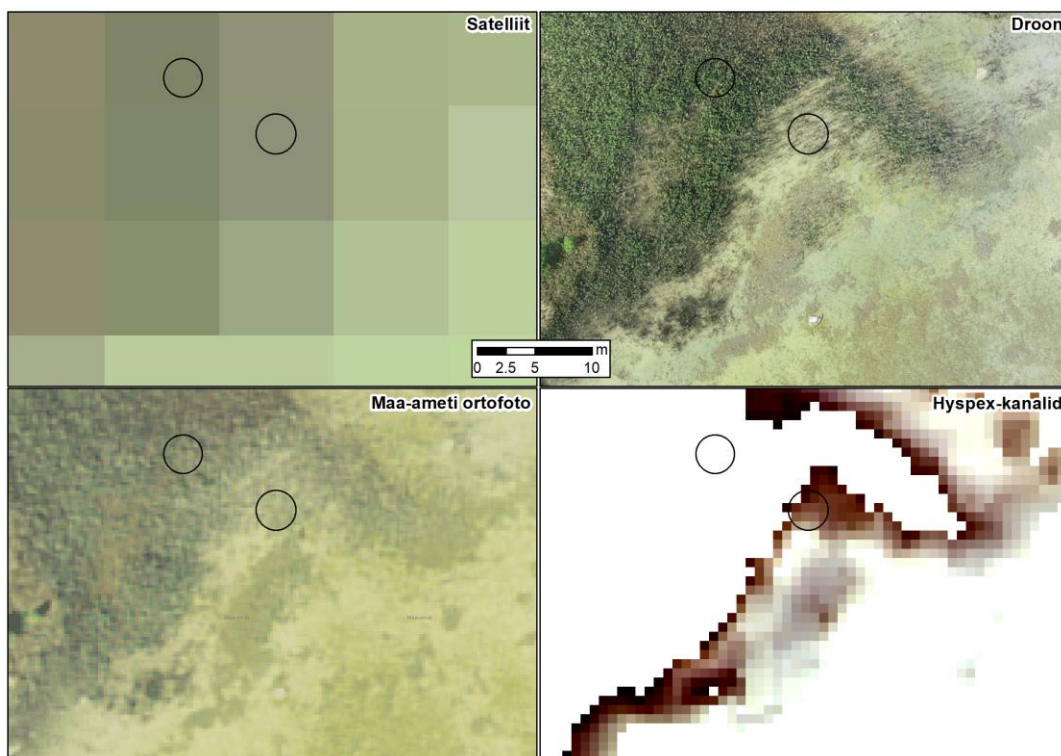
Visuaalsest hinnangust lähtuvalt ei ole satelliidipildipõhist põhjaelupaikade modelleerimist läbi viidud. Satelliidipõhise kaugseire kasutamise võrdlus ortofo ja Hypsax andmetega on teostatud mere RITA tegevuses 2.3.1, kus uuringualad olid mõõtmelst suuremad.



Joonis 3.1.1. Erinevate optilise kaugseire meetoditega saadud pildid 2. uuringualalt. Hypsrex-kanalid puhul on tegemist valevärvi pildiga, kus RGB kanaliteks on valitud lähimad sobiva lainepikkusega kanalid. Ringiga on näidatud alad, millest on suurendused järgmistel joonistel (3.1.2 ja 3.1.3).



Joonis 3.1.2. Erinevate optilise kaugseire meetoditega saadud pildid 2. uuringualalt: kividest laotud võimalik takistus kalade liikumisteks oleval Oju jõel.

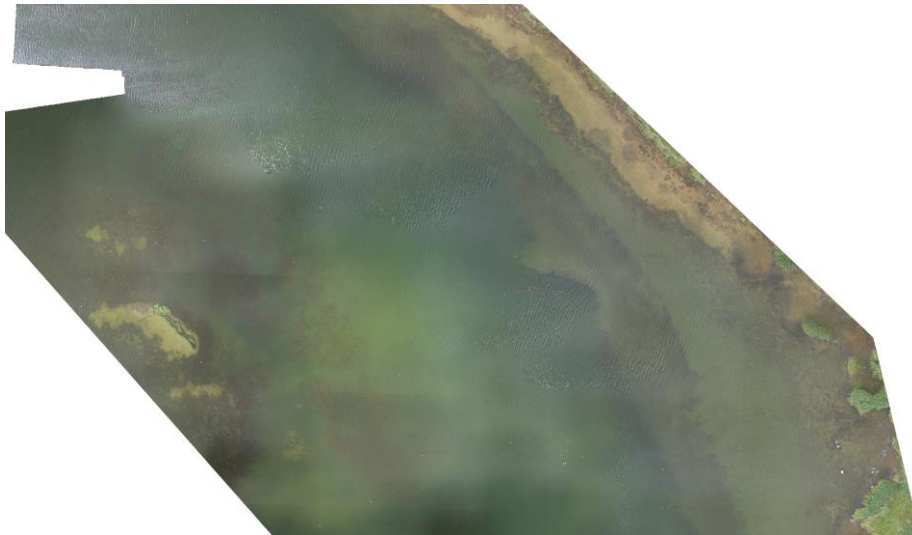


Joonis 3.1.3. Erinevate optilise kaugseire meetoditega saadud pildid 2. uuringualalt: Pautsaare lahe põhjaosa rannaäärse roostiku serv. Ringidega on näidatud tihe (vasakpoolne) ja hõre roostik (parempoolne).

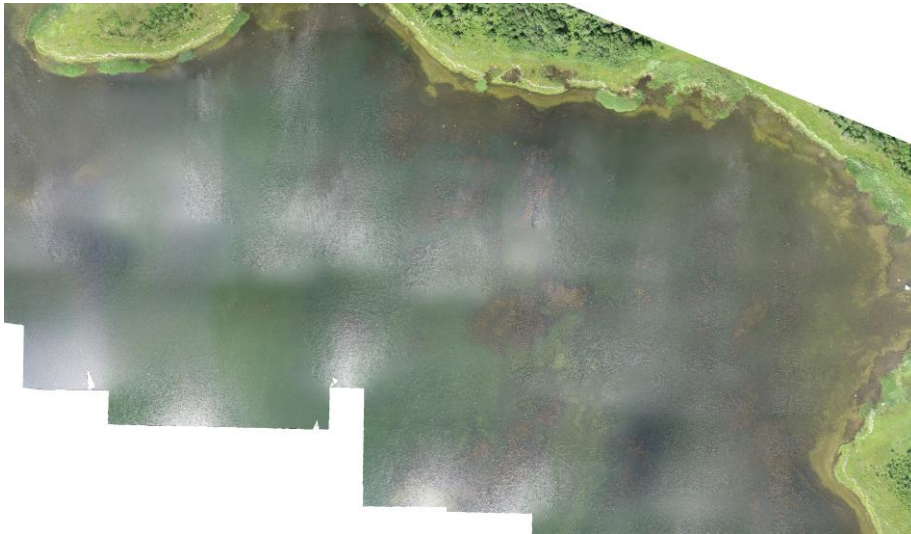
3.2. Droonipõhised ortofotod

Drooniga koguti aerofotod, loodi ortofotomosaigid ja teostati kohtvaatlused kõigil 8 uuringualal, kuid modelleerimiseks sobilik materjal saadi viielt alalt. Modelleerimiseks sobimatu oli materjal järgmistel aladel ja põhjustel:

- Ala 3 – Pilguse laht. Vee hägususe tõttu ei olnud võimalik enamikus proovipunktides teostada kohtvaatlusi ja suuremal osal alast ei olnud ortofotomosaigis mere põhi nähtav. Lisaks sellele halvendasid ortofoto kvaliteeti lainetus, päikesepeegeldus ja vahelduvast pilvisusest tingitud suured erinevused erinevate fotode vahel, millest mosaiik moodustati (joonis 3.2.1).
- Ala 6 – Kõiguste laht. Väga tugev päikesepeegeldus (joonis 3.2.2).
- Ala 7 – Saastna laht. Väga tugev vee hägusus (joonis 3.2.3).



Joonis 3.2.1. Näide 3. uuringuala (Pilguse laht) ortofotomosaigist, kus vee hägusus, mere lainetus, päikesepeegeldus ja vahelduvast pilvisusest tingitud suured erinevused erinevate fotode vahel ei võimaldanud materjali modelleerimiseks kasutada.



Joonis 3.2.2. Näide 6. uuringuala (Kõiguste laht) ortofotomosaigist, kus väga tugev päikesepeegeldus ei võimaldanud materjali modelleerimiseks kasutada.



Joonis 3.2.3. Näide 7. uuringuala (Saasta laht) ortofotomosaigist, kus vee väga tugev hägusus ei võimaldanud materjali modelleerimiseks kasutada.

Droonipõhise aerofoto materjali kogumise ja ortofotomosaigi loomise kogemustest lähtuvalt tuleks tulevikus võimalikult kõrge kvaliteediga materjali kogumiseks arvestada järgmiste asjaoludega:

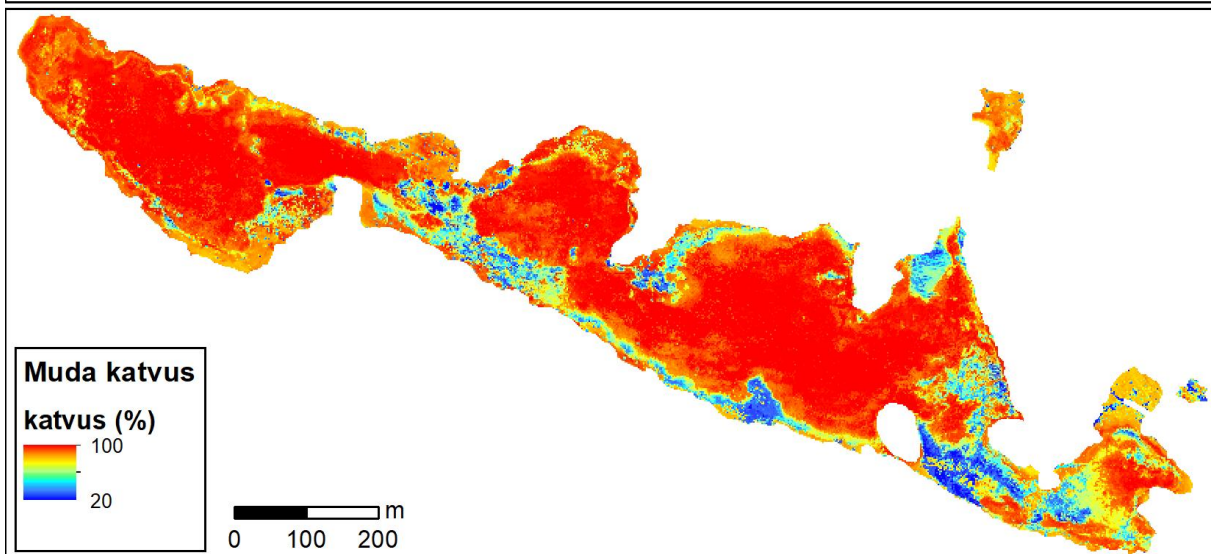
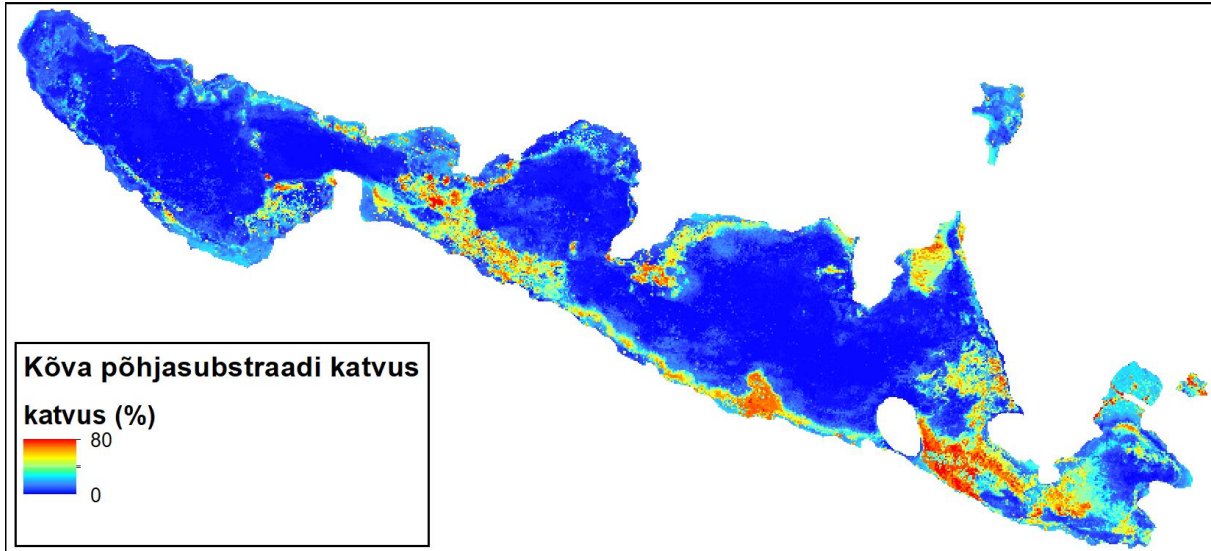
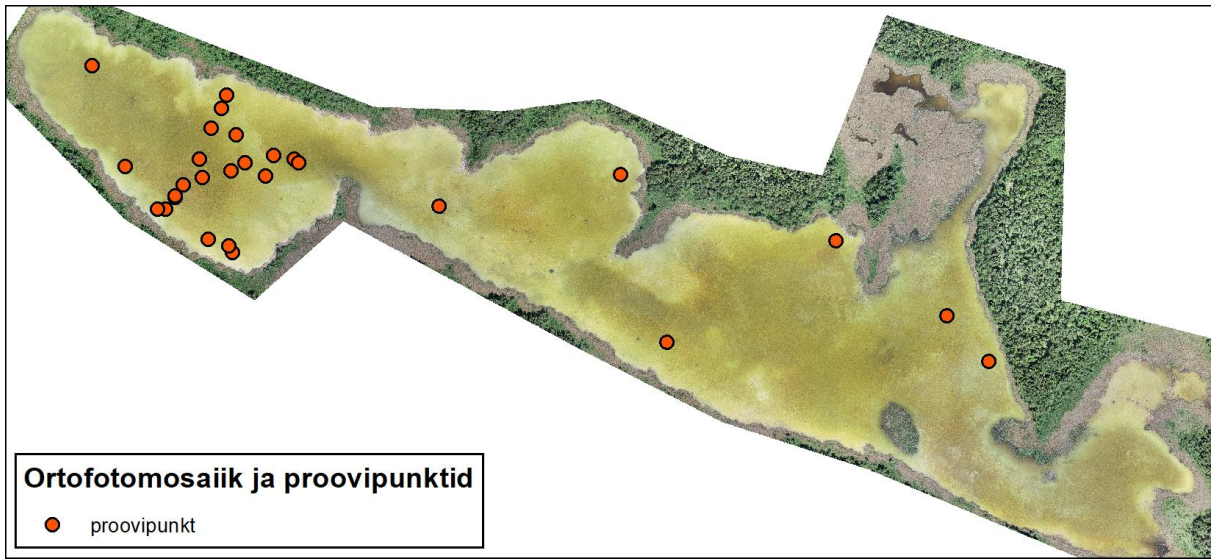
- Töö teostamiseks valida võimalikult vähese tuule ja lainetusega ja võimalikult hea vee läbipaistvusega aeg;
- Päikesepeegelduse vähendamiseks teostada töö keskpäeval ja põhja-lõuna-suunaliste lennujoontega. Keskpäevane aeg on parem ka seetõttu, et maismaaobjektide, eelkõige metsa varjud rannaäärsel alal, on siis kõige lühemad.
- Individuaalsete aerofotode ja lennujoontevaheliste erinevuste vähendamiseks vältida töö teostamist vahelduva pilvisusega ilmaga. Tulevikus tuleks katsetada kaamera valgetasakaalu fikseerimist ühe uuringuala lennu ajaks.

Ala 1 – Killatu järv

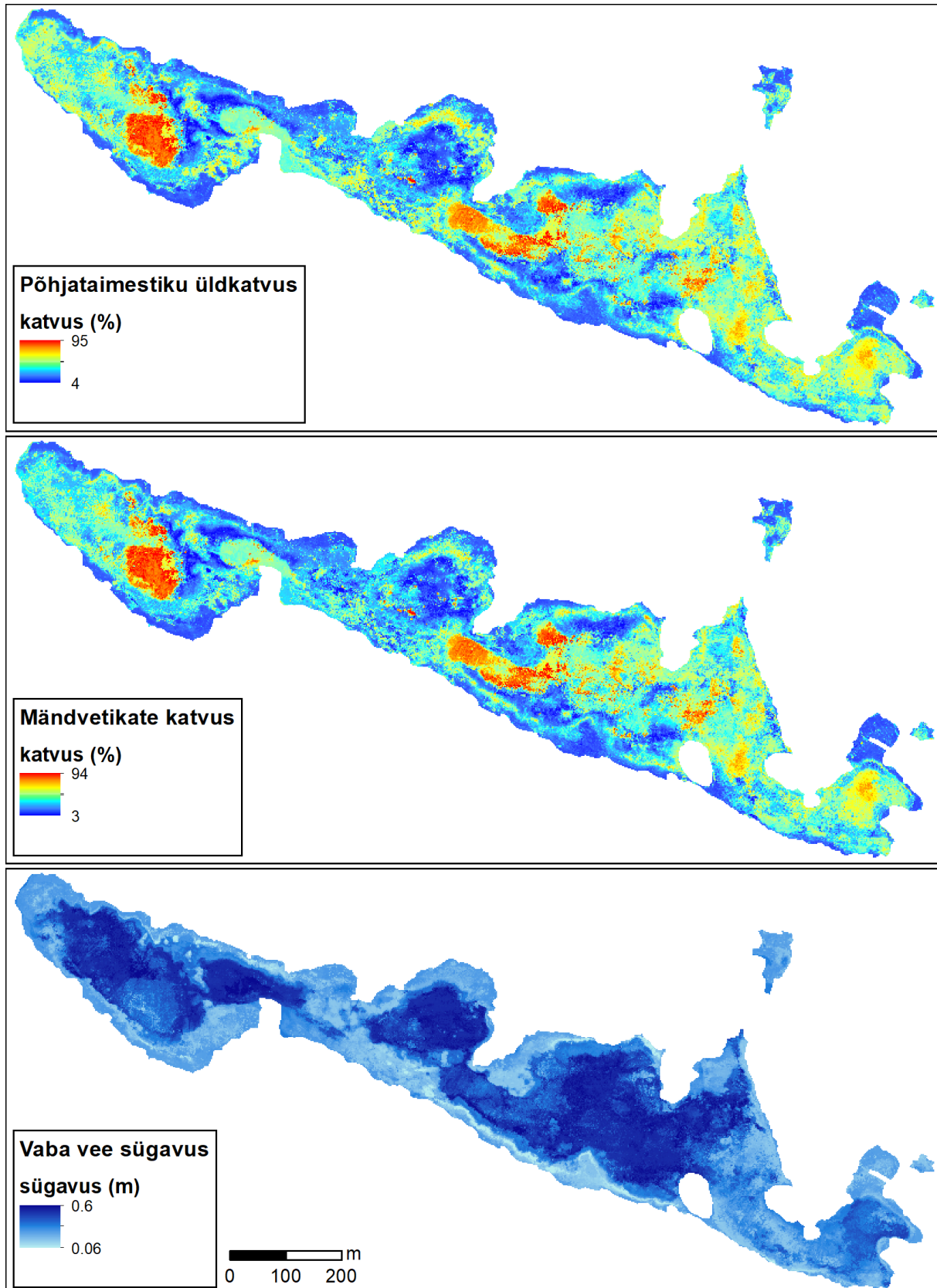
Killatu järve droonipõhine ortofotomosaik tuli valdavalt kvaliteetne, sest vesi oli madal ja läbipaistev ja veekogu põhi kogu ulatuses täielikult nähtav (joonis 3.2.4). Mõningates kohtades, eelkõige järve idaosas, esines vee pinnal lainetuse ja päikesepeegelduse probleeme. Modelleeriti järgnevate muutujate levikut (sulgudes sisemise valideerimise korrelatsioonikordaja; mida lähemal on r absoluutväärtus ühele, seda tugevamalt on tunnused omavahel seotud):

- kõva põhjasubstraadi katvus ($r = 0,89$, joonis 3.2.4),
- pehme põhjasubstraadi katvus ($r = 0,89$),
- muda katvus ($r = 0,89$, joonis 3.2.4),
- taimestiku üldkatvus ($r = 0,89$, joonis 3.2.5),
- mändvetikate katvus ($r = 0,90$, joonis 3.2.5),
- vaba vee sügavus ($r = 0,93$, joonis 3.2.5).

Mudelennustuste visuaalsel hindamisel võib välja tuua, et taimestiku ja vaba vee sügavuse ennustused võib lugeda õnnestunuks kuid põhjasubstraadi juures (joonis 3.2.4) oli probleemiks kõva põhjasubstraadi liiga kõrged väärtused järve idaosas ja ka teistes piirkondades, mis olid rohkem mõjutatud päikesehelgist. Lisaks sellele oli kõva põhjasubstraadi katvus mudelennustuses ebaadekvaatselt kõrge kohtades, kus esines kuivale jäänud heledat mändvetikat või lamandunud pilliroogu – sellised kohad olid heledamad ja värvuselt sarnased kiviste kohtadega.



Joonis 3.2.4. 1. uuringuala (Killatu järv) ortofotomosaiik, proovipunktid ning kõva põhjasubstraadi ja muda katvuse mudelennustused.



Joonis 3.2.5. 1. uuringuala (Killatu järv) põhjataimestiku üldkatvuse, mändvetikate katvuse ja vaba vee sügavuse mudelennustused.

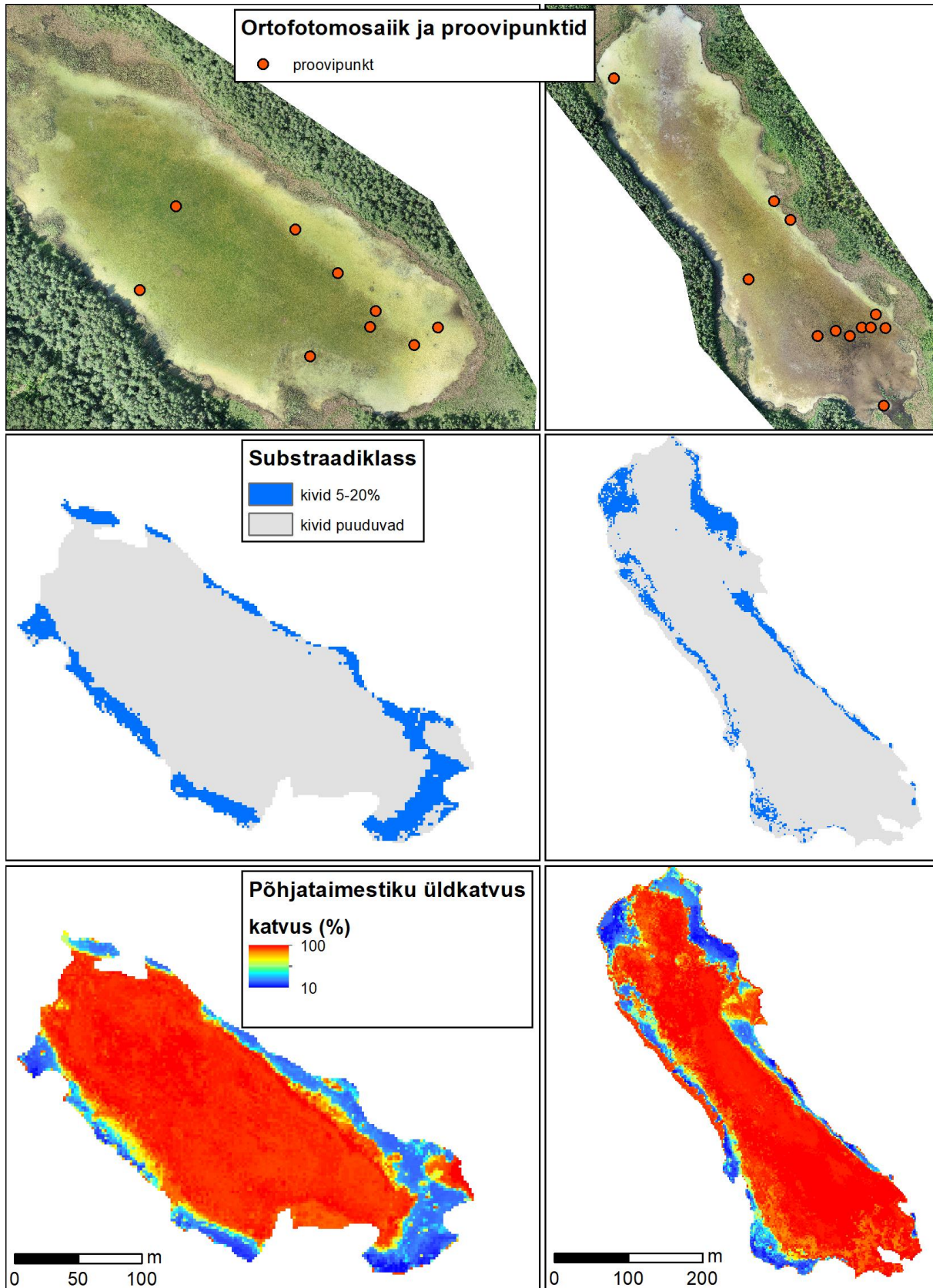
Ala 2 – Pautsaare laht ja Lehmalaht

Droonipõhine ortofotomosaiik tuli kvaliteetne, sest päikesepeegeldus praktiliselt puudus ja kuna vesi oli madal ja läbipaistev, siis oli veekogude põhi kogu ulatuses täielikult nähtav (joonis 3.2.6). Modelleeriti järgnevate muutujate levikut (sulgudes sisemise valideerimise statistik):

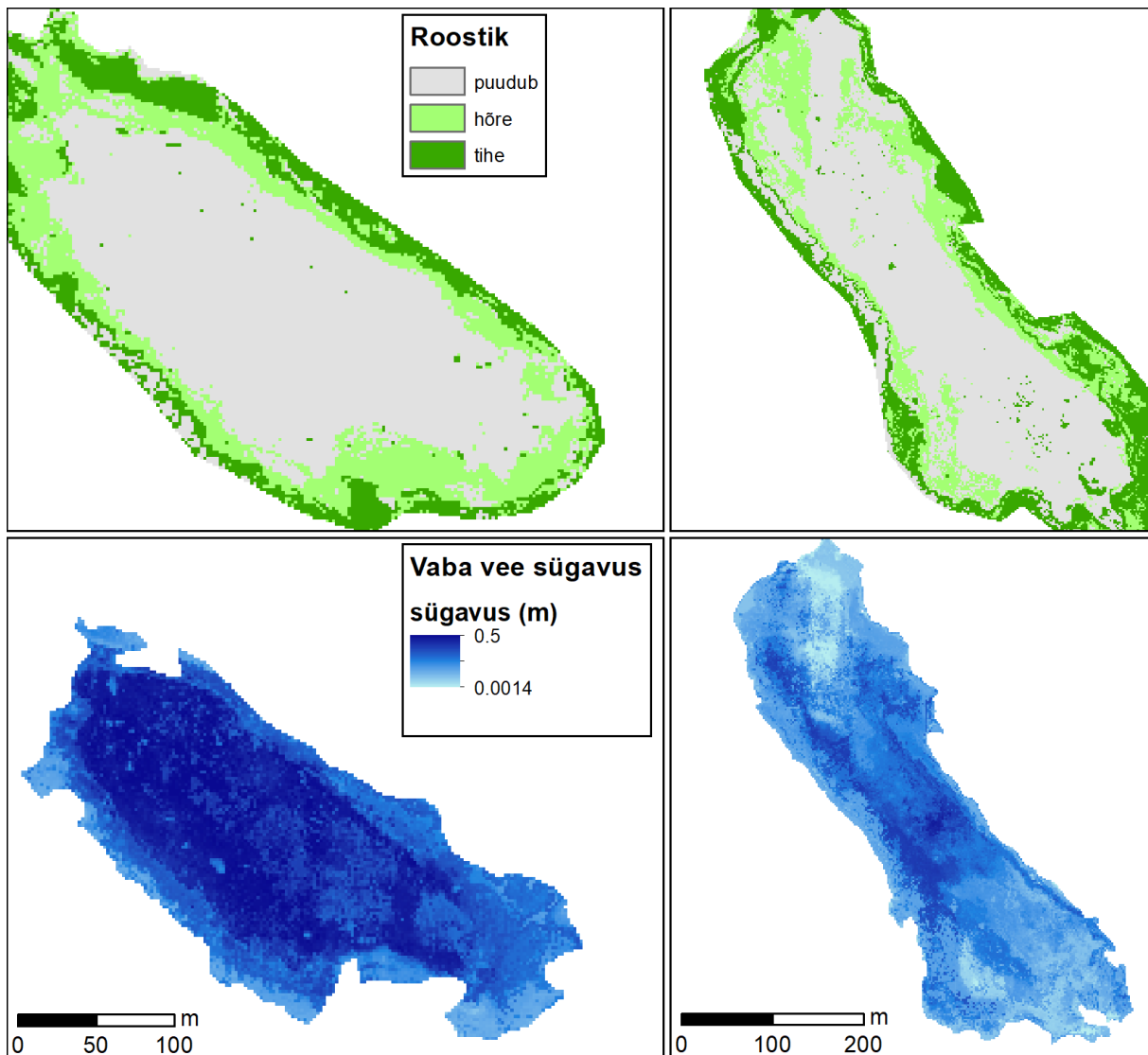
- põhjasubstraadiklass ($E = 0,99$, joonis 3.2.6),
- taimestiku üldkatvus ($r = 0,99$, joonis 3.2.6),
- vaba vee sügavus ($r = 0,92$, joonis 3.2.7),
- roostik ($E = 0,98$, joonis 3.2.7).

Kõik mudelennustused olid lisaks matemaatilisele valideerimisele hästi õnnestunud ka visuaalse eksperthinnangu põhjal. Eduka modelleerimise üheks peamiseks põhjuseks oli selle uuringuala väga madal (vaba vee sügavus proovipunktides kuni 0,4 m) ja hea läbipaistvusega vesi, mistõttu oli kogu veekogu põhi ortofotomosaiigis ideaalselt nähtav.

Pautsaare lahe puhul oli täheldatav, et metsa tõttu otsese päikesevalguse eest varju jäänud läänepoolne rannaäärne põhi sai mudelennustustes teistsugused väärtused kui samas kõrval olev otsese päikese käes olev põhi (vt joonis 3.2.6 parempoolne tulp).



Joonis 3.2.6. 2. uuringuala (Lehmalait vasakul, Pautsaare laht paremal) ortofotomosaiik, proovipunktid ning substraadiklassi ja põhjataimestiku üldkatvuse mudelennustused.



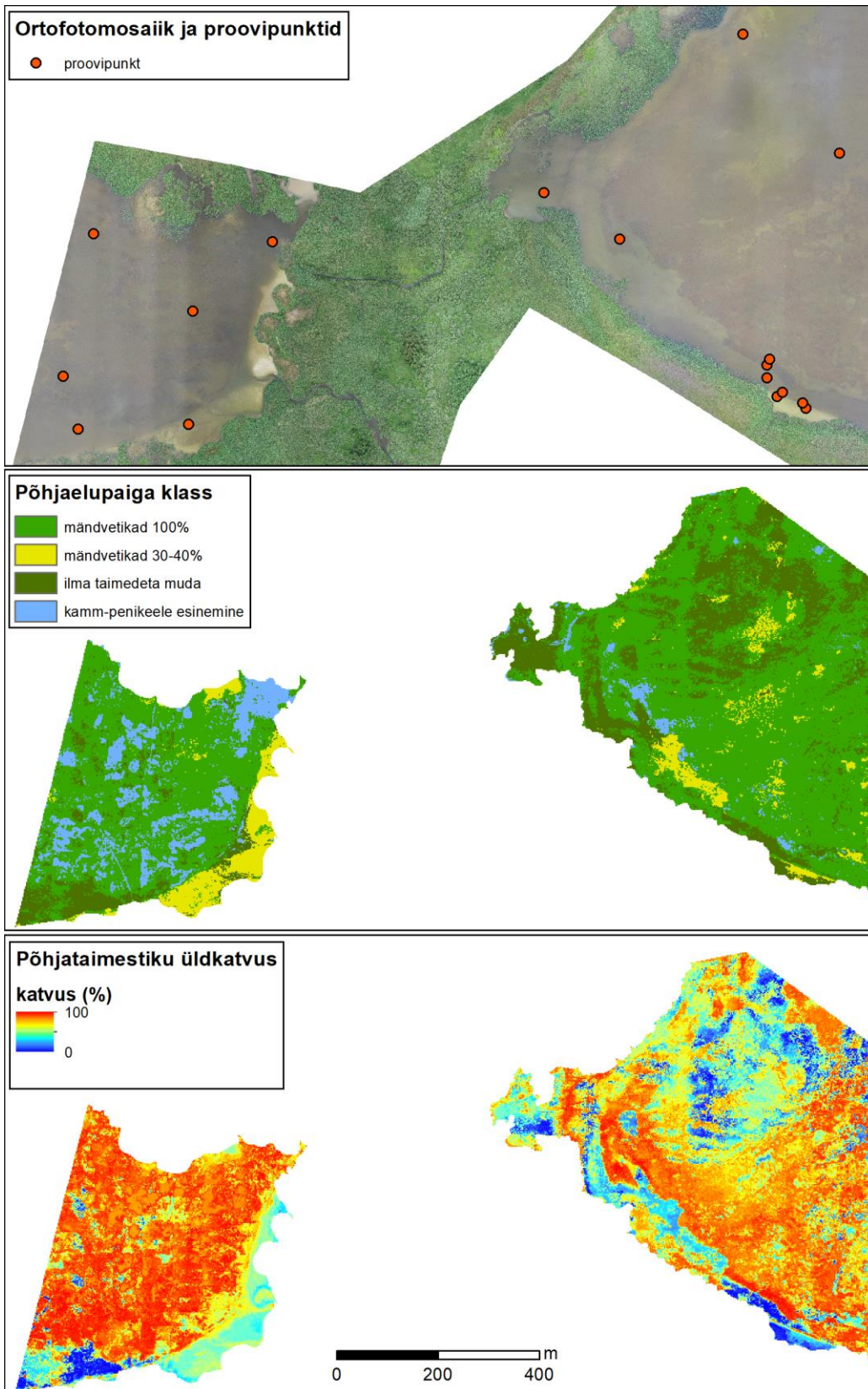
Joonis 3.2.7. 2. uuringuala (Lehmalait vasakul, Pautsaare laht paremal) roostiku ja vaba vee sügavuse mudelennustused.

Ala 4 – Mullutu-Suurlaht

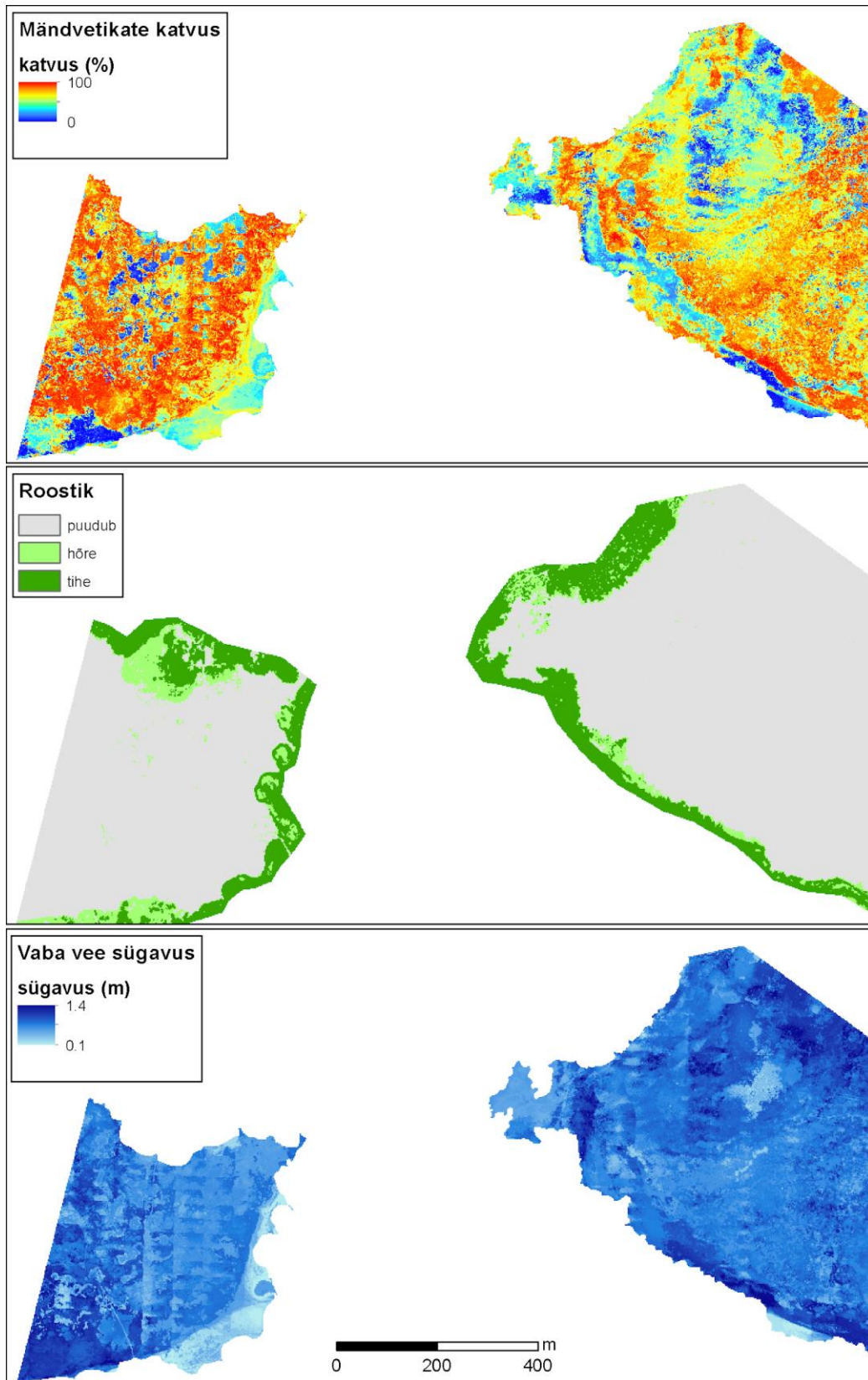
Droonipõhises ortofotomosaiigis põhjustasid kvaliteedi langust mõningane vee hägusus ja ilmselt vahelduvast pilvisusest tingitud valgustatuse erinevused drooni lennujoonte vahel. Lennujoonte vahelised erinevused on paremini nähtavad uuringuala lääneosas (vt joonis 3.2.8). Modelleeriti järgnevate muutujate levikut (sulgudes sisemise valideerimise statistik):

- põhjaelupaigaklass ($E = 0,97$, joonis 3.2.8),
- põhjataimestiku üldkatvus ($r = 0,95$, joonis 3.2.8),
- mändvetikate katvus ($r = 0,93$, joonis 3.2.9),
- roostik ($E = 0,99$, joonis 3.2.9),
- vaba vee sügavus ($r = 0,98$, joonis 3.2.9).

Lennujoonte vahelised erinevused ortofotomosaiigis kandusid osaliselt edasi ka mudelennustustesse; see on hästi jälgitav vaba vee sügavuse mudelis joonisel 3.2.9. Lennujoontevahelised ja nende sisesed erinevused valgustatuses ja värvigammas on enamasti tingitud vahelduvast pilvisusest. Seda efekti võib võimendada droonikaamera automaatne valge tasakaalu valik. Tulevikus tuleb katsetada ka fikseeritud valge tasakaalu kasutamist, et välja selgitada, kas selle abil on võimalik üksikfotode erinevusi vähendada.



Joonis 3.2.8. 4. uuringuala (Mullutu-Suurlaht) ortofotomosaiik, proovipunktid ning põhjaelupaiga klassi ja põhjataimestiku üldkatvuse mudelennustused.



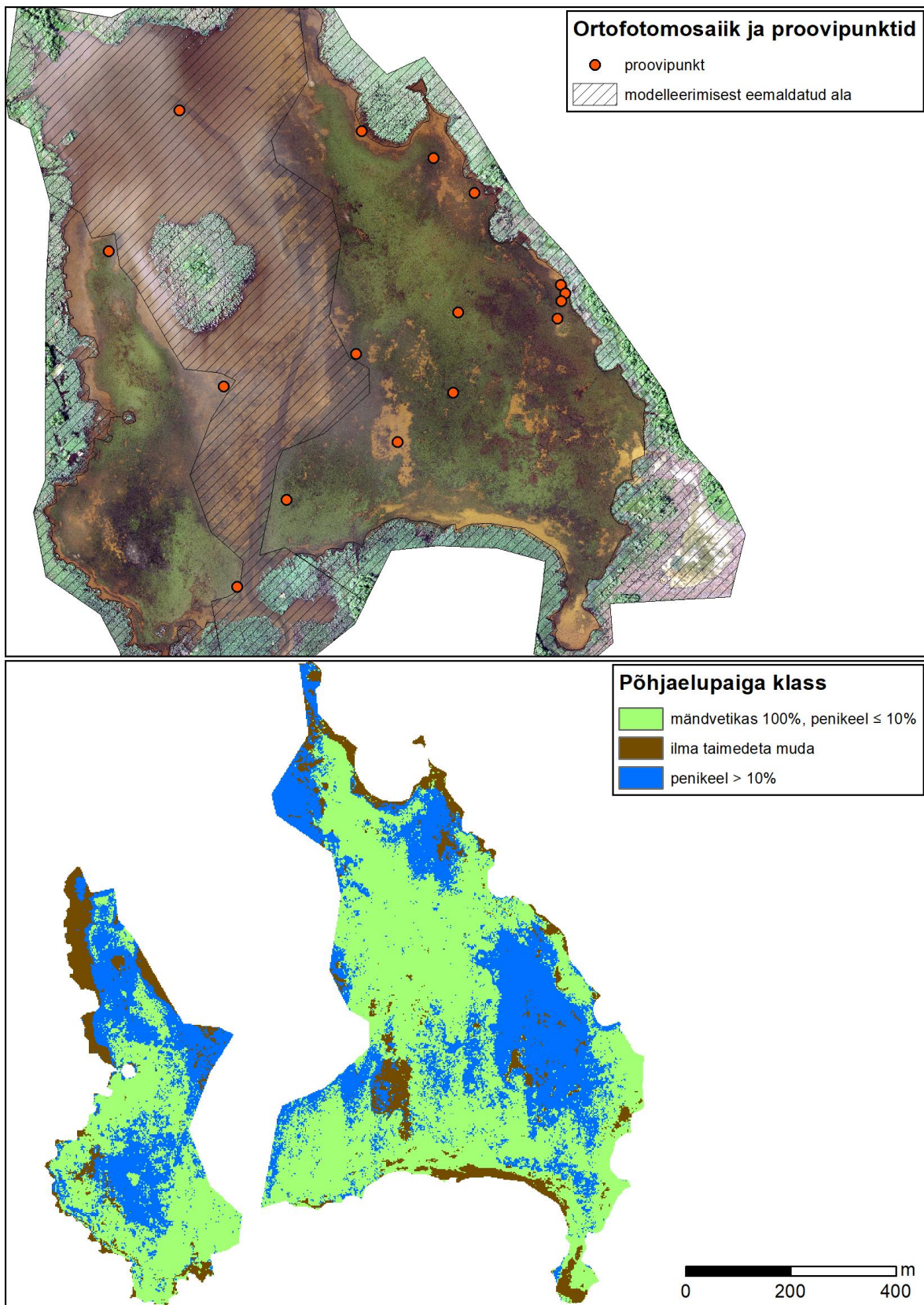
Joonis 3.2.9. 4. uuringuala (Mullutu-Suurlaht) mändvetikate katvuse, roostiku ja vaba vee sügavuse mudelennustused.

Ala 5 – Oessaare laht

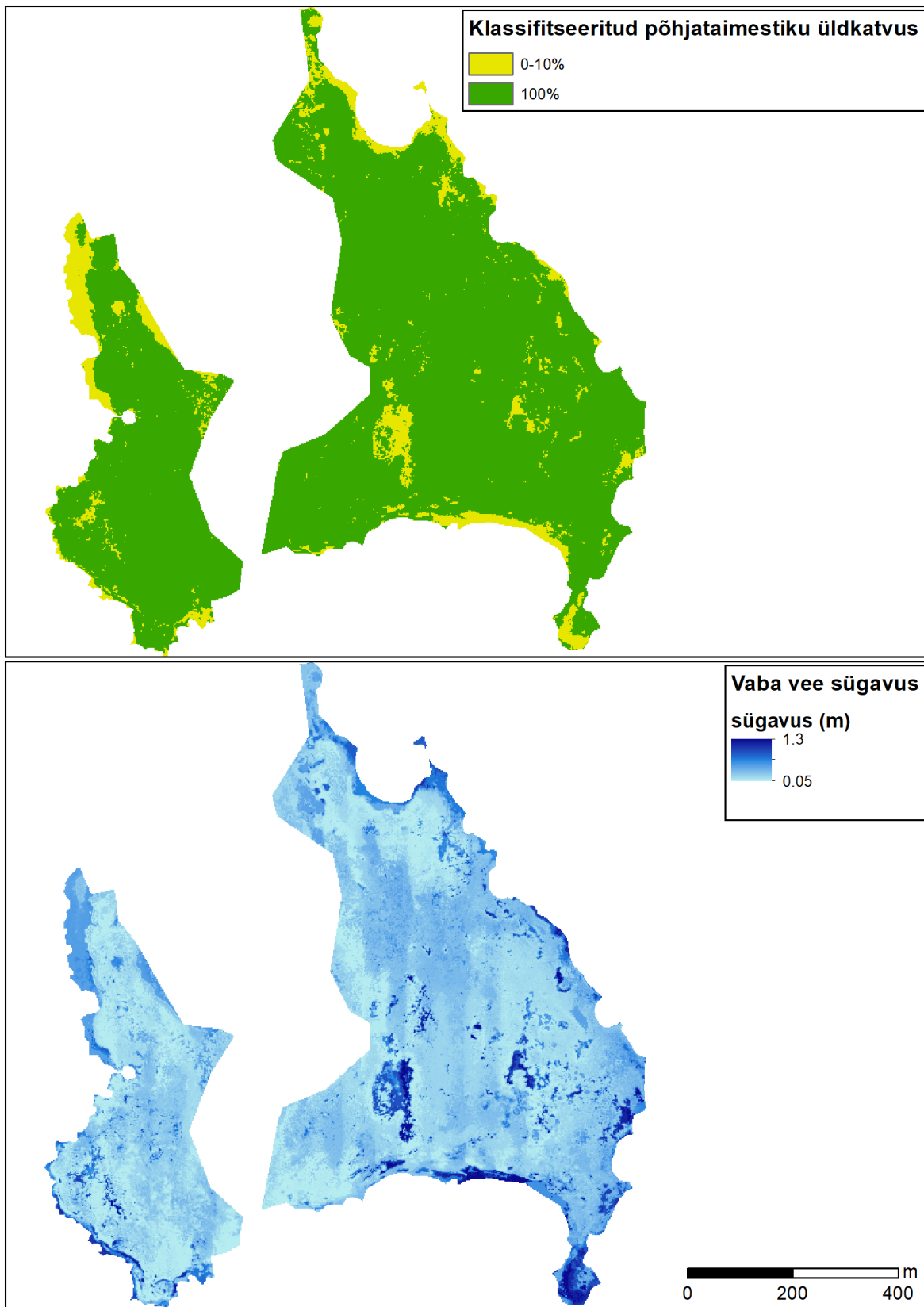
Uuringuala põhjaosas ja keskosa läbiva süvendatud kanali ümbruses oli vesi hägune ja see osa eemaldati modelleeritavast alast (vt joonis 3.2.10). Ülejäänud uuringualal oli ortofotomosaiigi kvaliteet väga hea ja kogu mere põhi oli täielikult nähtav. Modelleeriti järgnevate muutujate levikut (sulgudes sisemise valideerimise statistik):

- põhjaelupaigaklass ($E = 0,99$, joonis 3.2.10),
- klassifitseeritud põhjataimestiku üldkatvus ($E = 1,00$, joonis 3.2.11),
- vaba vee sügavus ($r = 0,96$, joonis 3.2.11),
- klassifitseeritud vaba vee sügavus ($E = 0,98$).

Vaatamata RGB ortofotomosaiigi heale kvaliteedile oli mudelennustustes siiski vähesel määral nähtav põhja-lõuna suunaliste lennujoonte muster (vt vaba vee sügavuse mudel joonisel 3.2.11).



Joonis 3.2.10. 5. uuringuala (Oessaare laht) ortofotomosaik, proovipunktid ja põhjaelupaiga klassi mudelennustus.



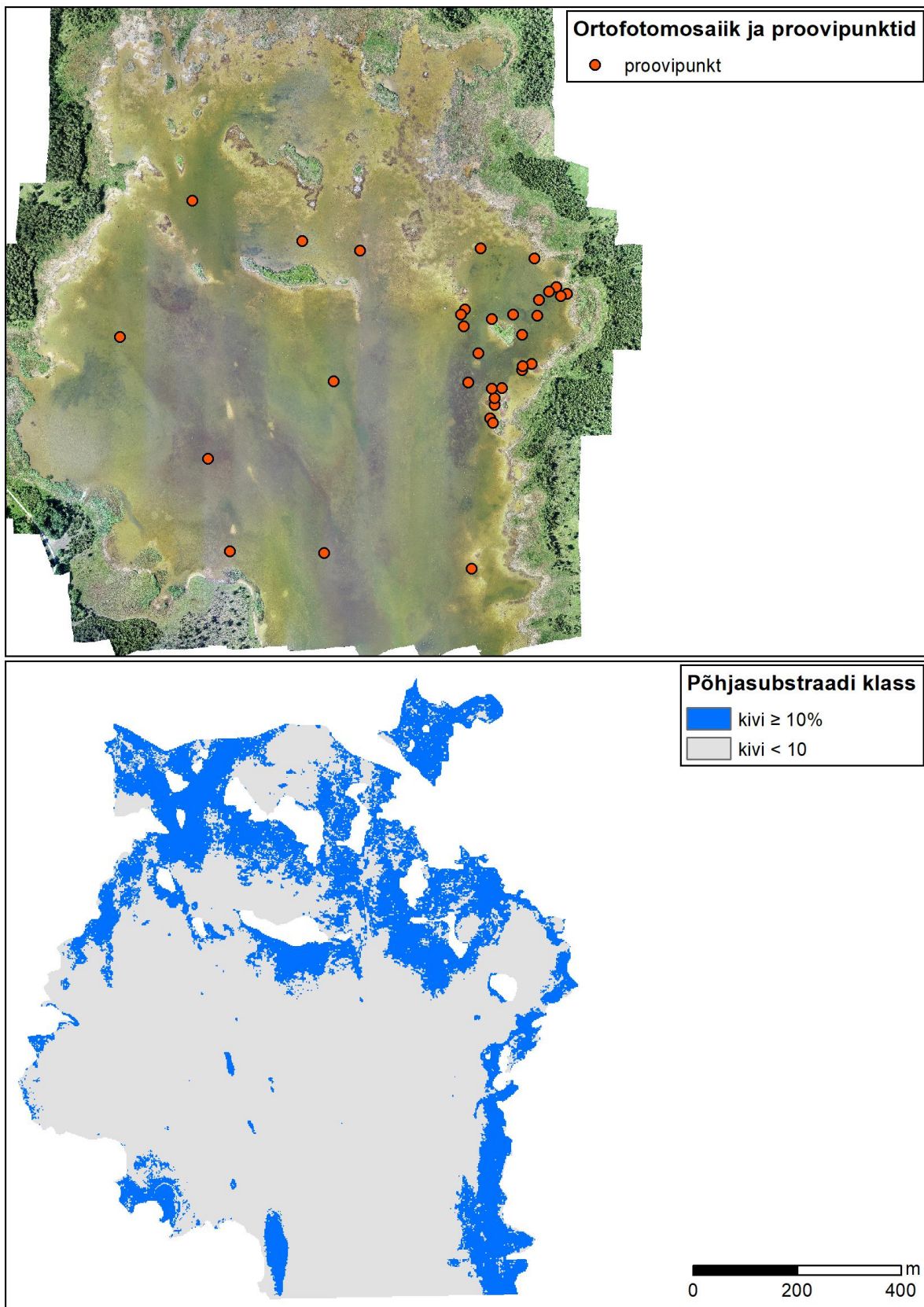
Joonis 3.2.11. 5. uuringuala (Ossaare laht) klassifitseeritud põhjataimestiku üldkatvuse ja vaba vee sügavuse mudelennustused.

Ala 8 – Arjulaht

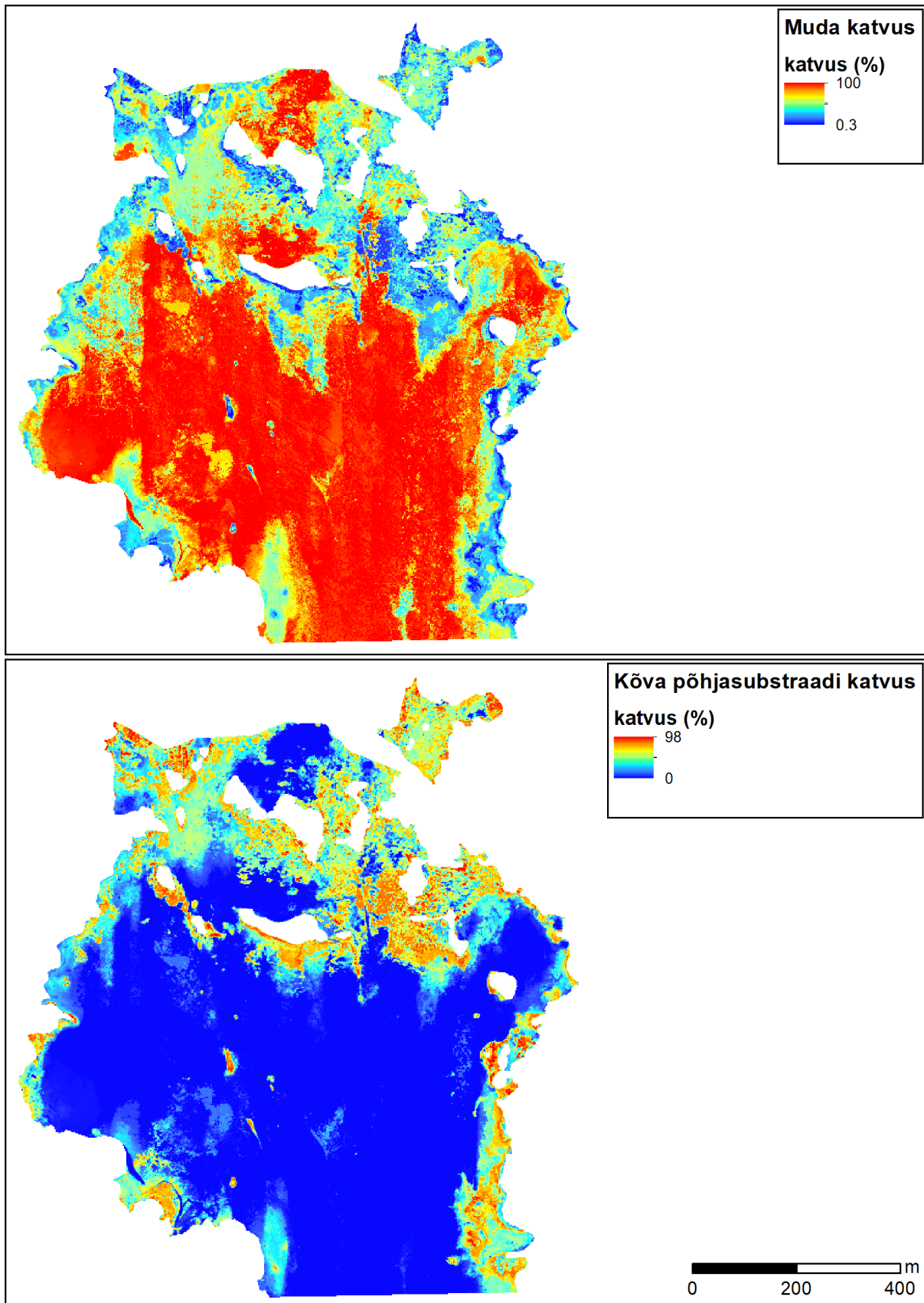
Arjulahe ortofotomosaiigis oli üsna tugevalt nähtav lennujoonte muster, mis ilmselt oli tingitud vahelduvast pilvisusest (joonis 3.2.12). Muude aspektide poolest oli mosaiik hea, sest madala ja suhteliselt selge vee tõttu oli veekogu põhi hästi nähtav. Modelleeriti järgnevate muutujate levikut (sulgudes sisemise valideerimise statistik):

- põhjasubstraadiklass ($E = 0,98$, joonis 3.2.12),
- muda katvus ($r = 0,95$, joonis 3.2.13),
- kõva põhjasubstraadi katvus ($r = 0,97$, joonis 3.2.13),
- põhjataimestiku üldkatvus ($r = 0,94$, joonis 3.2.14),
- klassifitseeritud põhjataimestiku üldkatvus ($E = 0,96$),
- määndvetikate katvus ($r = 0,94$),
- vaba vee sügavus ($r = 0,93$, joonis 3.2.14).

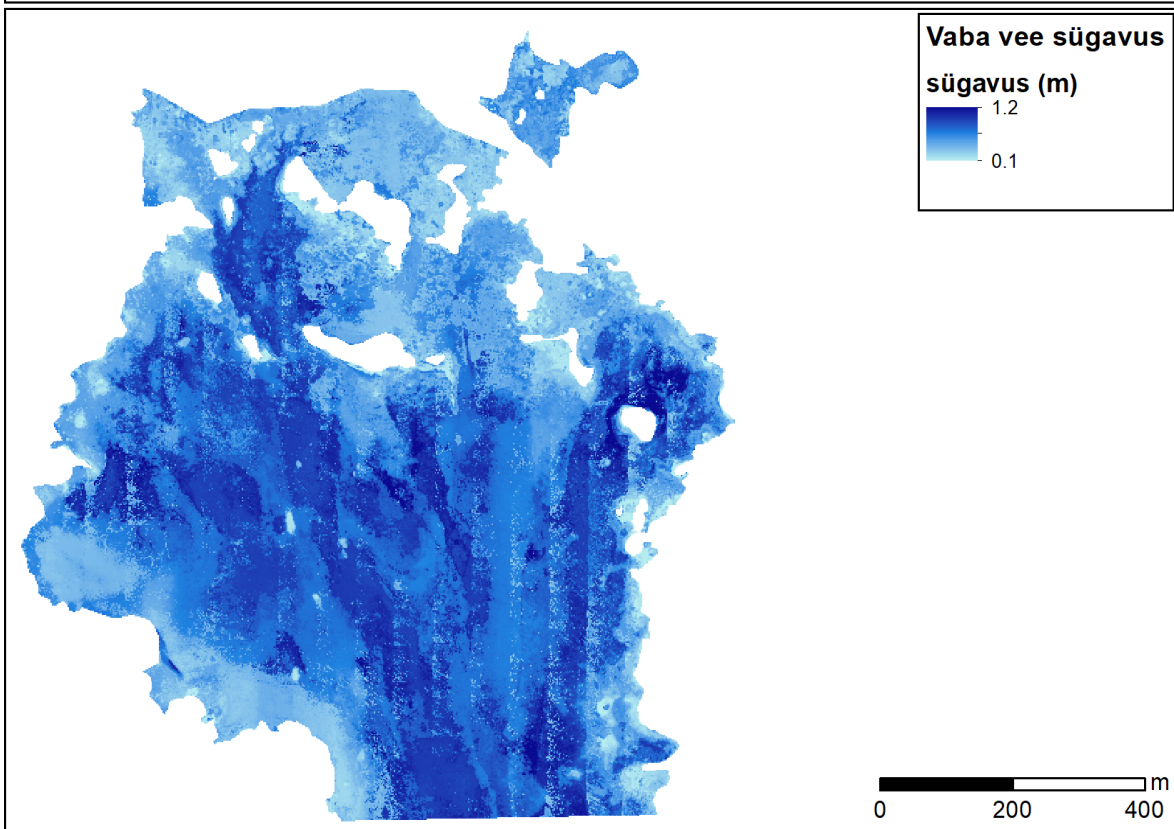
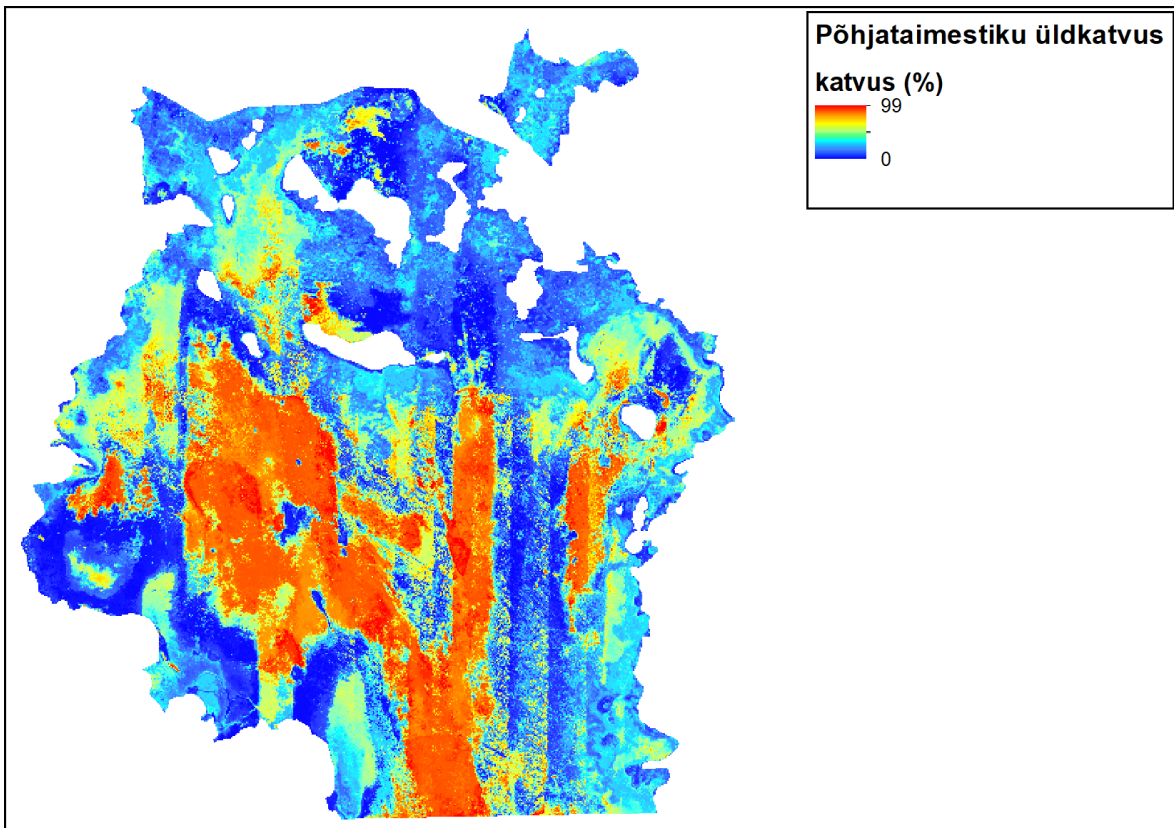
Lennujoonte vahelised erinevused ortofotomosaiigis kandusid osaliselt edasi ka mudelennustustesse; see on hästi nähtav põhjataimestiku üldkatvuse ja vaba vee sügavuse mudelites (joonis 3.2.14).



Joonis 3.2.12. 8. uuringuala (Arjulaht) ortofotomosaiik, proovipunktid ja põhjasubstraadi klassi mudelennustus.



Joonis 3.2.13. 8. uuringuala (Arjulaht) muda ja kõva põhjasubstraadi mudelennustused.



Joonis 3.2.14. 8. uuringuala (Arjulaht) põhjataimestiku üldkatvuse ja vaba vee sügavuse mudelennustused.

3.3. Hypsrex

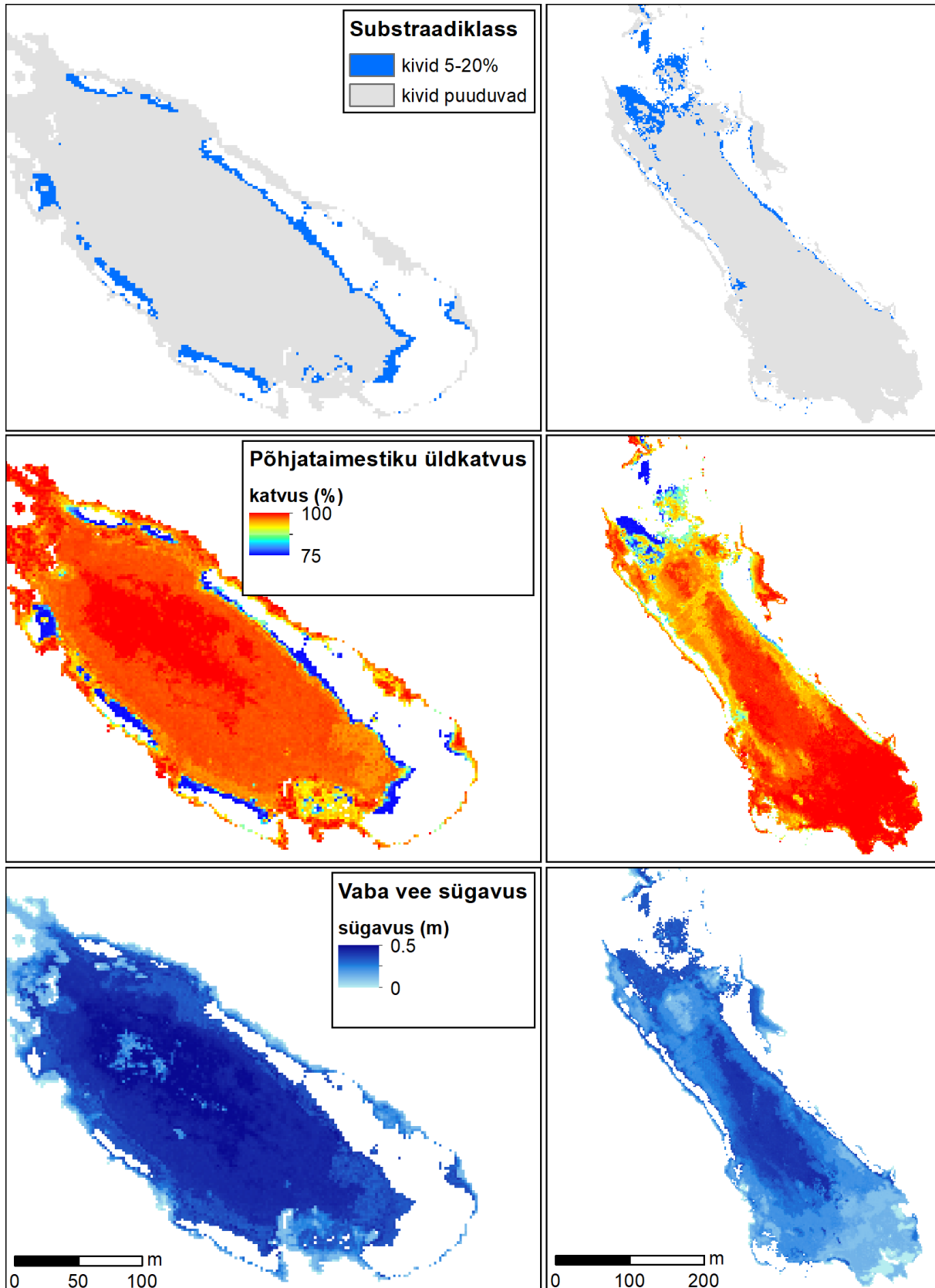
Hypsrex andmetel põhinev modelleerimine viidi läbi kahel alal – 2. alal (Pautsaare laht ja Lehmalahet) ja 5. alal (Oessaare laht). Järgnevalt on toodud 2. ala tulemuste kirjeldus. 5. ala tulemused on tulemuste kordamise vältimiseks toodud peatükis 3.4.

2. alal oli Hypsrex materjali probleemiks asjaolu, et väga madal vesi (hinnanguliselt alla 10 cm) ja väga hele põhi veekogu rannaäärse alal andis väga kõrge intensiivsusega peegelduse, mille tõttu ei olnud võimalik nendelt aladelt informatiivse signaali kogumine. Seade läks küllastusse kuna selle tundlikkus oli seadistatud veest saadava väga madala signaali salvestamiseks. Mitmed proovipunktid jäid seetõttu sellistele aladele, kust Hypsrex andmed puudusid. Seetõttu ei ole selle uuringuala Hypsrex andmetel põhinevate mudelite tulemused otseselt võrreldavad droonipõhiste mudelitega.

Mudelite sisemine valideerimine näitas, et Hypsrex-kanalid ja Hypsrex-PCA andsid väga sarnaseid tulemusi. Ka visuaalse eksperthinnangu põhjal ei saa üht eelistada teisele. Seetõttu on joonistel (joonis 3.3.1) näidatud ainult Hypsrex-kanalid mudelid. Modelleeriti järgnevate muutujate levikut (sulgudes sisemise valideerimise statistik):

- põhjasubstraadiklass ($E = 0,99$, joonis 3.3.1),
- põhjataimestiku üldkatvus ($r = 0,91$, joonis 3.3.1),
- vaba vee sügavus ($r = 0,93$, joonis 3.3.1).

Hypsrex võrdlus teiste kaguseirepõhiste mudelennustustega, sh matemaatiline valideerimine, on teostatud 5. ala (Oessaare laht) materjaliga ja on esitatud peatükis 3.4.



Joonis 3.3.1. 2. uuringuala (Lehmalait vasakul, Pautsaare laht paremal) substraadiklassi, põhjataimestiku üldkatvuse ja vaba vee sügavuse mudelennustused.

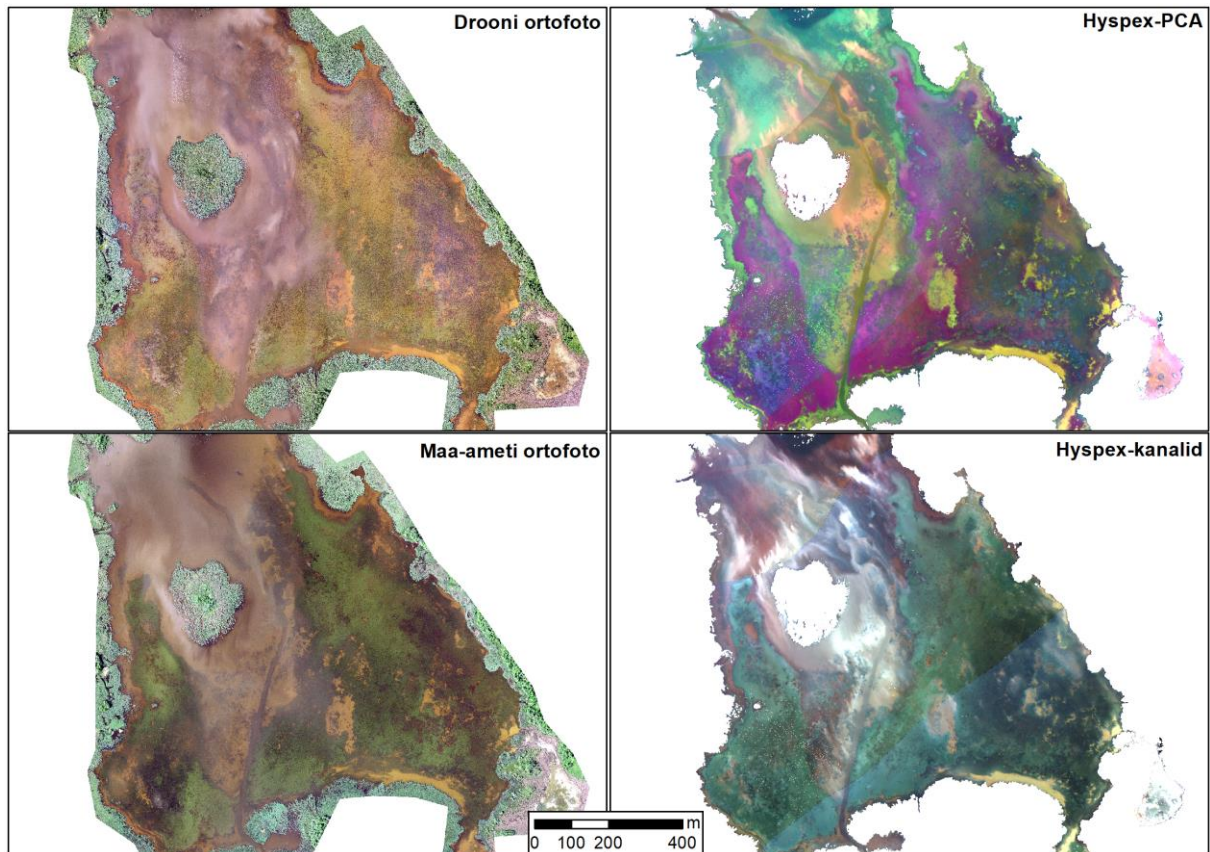
3.4. Erinevate kaugseire meetodite mudelennustuste võrdlus

Erinevate kaugseire meetodite mudelennustuste võrdlus oli võimalik läbi viia 5. alal (Oessaare laht), sest ainult selle ala kohta oli olemas kvaliteetne kaugseire materjal nii ortofotode kui Hypspex näol. Võrreldi järgnevaid kaugseire meetodeid:

- Droonipõhine ortofoto,
- Maa-ameti ortofoto,
- Hypspex, sh Hypspex andmete versioonid Hypspex-kanalid ja Hypspex-PCA.

Joonisel 3.4.1 on toodud nende meetoditega saadud kaugseire pildid. Erinevalt ortofotodest, mis moodustuvad pildi tavapäraest punasest, rohelisest ja sinisest signaalist (RGB, enamasti valitud sarnaselt inimsilma retseptorite), saab hüperspektraalsete sensorite puhul kasutada RGB pildi moodustamiseks kolme kanalit saadaolevate kümnete ja sadade hulgast. See võimaldab võimendada teatud efekte, mis jäävad inimsilmaga ja kolme laia spektrikanaliga instrumentidega tajumatuks. Lisaks on hüperspektraalsetel sensoritel enamasti ka lähiinfrapunaseid spektrikanaleid, mida inimsilm ei näe, kuid mis annavad olulist informatsiooni taimestiku ja selle tüübi kohta. Seega oli nii algsete spektrikanalite (Hypspex-kanalid) kui neist arvutatud PCA kanalite (Hypspex-PCA) puhul võimalik kanalite käsitsi valik RGB väärtuste omistamiseks. Selline omistamine on teostatud ainult selleks, et aruandesse Hypspex materjalist ka visuaalne pilt luua. Modelleerimine toimus originaalandmeid kasutades. Hypspex-PCA puhul omistati kolm esimest PCA komponenti vastavalt R, G ja B kanalile. Hypspex-kanalid puhul valiti R, G, ja B vastavalt 675 nm, 520 nm ja 470 nm, et tagada võimalikult sarnane tulemus tavapärasele värvifotole. Hypspex materjal on nähtavad kirde-kagu suunaliste lennujoonte vahelised erinevused (joonis 3.4.1).

Kuna nii ortofotode kui ka Hypspex puhul oli osa uuringualast mõjutatud vee hägususest, siis jäeti modelleerimisest see ala välja (vt joonis 3.2.10).



Joonis 3.4.1. Droonipõhise ortofoto, Maa-ameti ortofoto ja Hypex kaugseire pildid 5. alal (Oessaare laht). Hypex piltide puhul on tegemist valevärvi piltidega.

Põhjaelupaigaklassi mudelennustused on matemaatilise valideerimise põhjal kõik väga kõrge ennustusvõimega (tabel 3.4.1); teistega võrreldes on mõnevõrra madalama ennustusvõimega Hypex-kanalid mudel. Vaatamata kõrgele ja sarnasele ennustusvõimele, on elupaigaklassi ruumiennustustes siiski märgatavaid erinevusi (joonis 3.4.2). Neid erinevusi näitab ka tabel 3.4.2, millest nähtub, et ka pindalalises hinnangus erineb teistest kõige enam Hypex-kanalid. Samas on mõne klassi ja meetodi puhul pindalade sarnasus väga suur või lausa identne, nt mändvetikate klass mõlema ortofoto puhul ja ilma taimedeta muda drooni ortofoto ja Hypex-PCA puhul (tabel 3.4.2).

Tabel 3.4.1. Erinevate kaugseire meetodite abil saadud andmetel põhinevate mudelennustuste matemaatilise valideerimise tulemused. Statistikud: r – lineaarne korrelatsioonikordaja (pidevtunnused), MAE – keskmine absoluutviga (pidevtunnused), E – klassifitseerimise edukus ehk õigesti klassifitseeritud vaatluste osa kõigist vaatlustest (nominaaltunnused), K – Coheni vastavuskordaja (nominaaltunnused).

muutuja	statistik	drooni ortofoto	Maa-ameti ortofoto	Hypex-PCA	Hypex-kanalid
põhjaelupaiga klass	E	1.00	0.99	0.99	0.97
	K	1.00	0.98	0.99	0.96
klassifitseeritud põhjataimestiku üldkatvus	E	1.00	0.99	1.00	0.99
	K	1.00	0.99	0.99	0.97
klassifitseeritud vaba vee sügavus	E	0.98	0.96	0.98	0.97
	K	0.95	0.90	0.95	0.93
vaba vee sügavus	r	0.96	0.96	0.99	0.98
	MAE	0.04	0.04	0.02	0.03

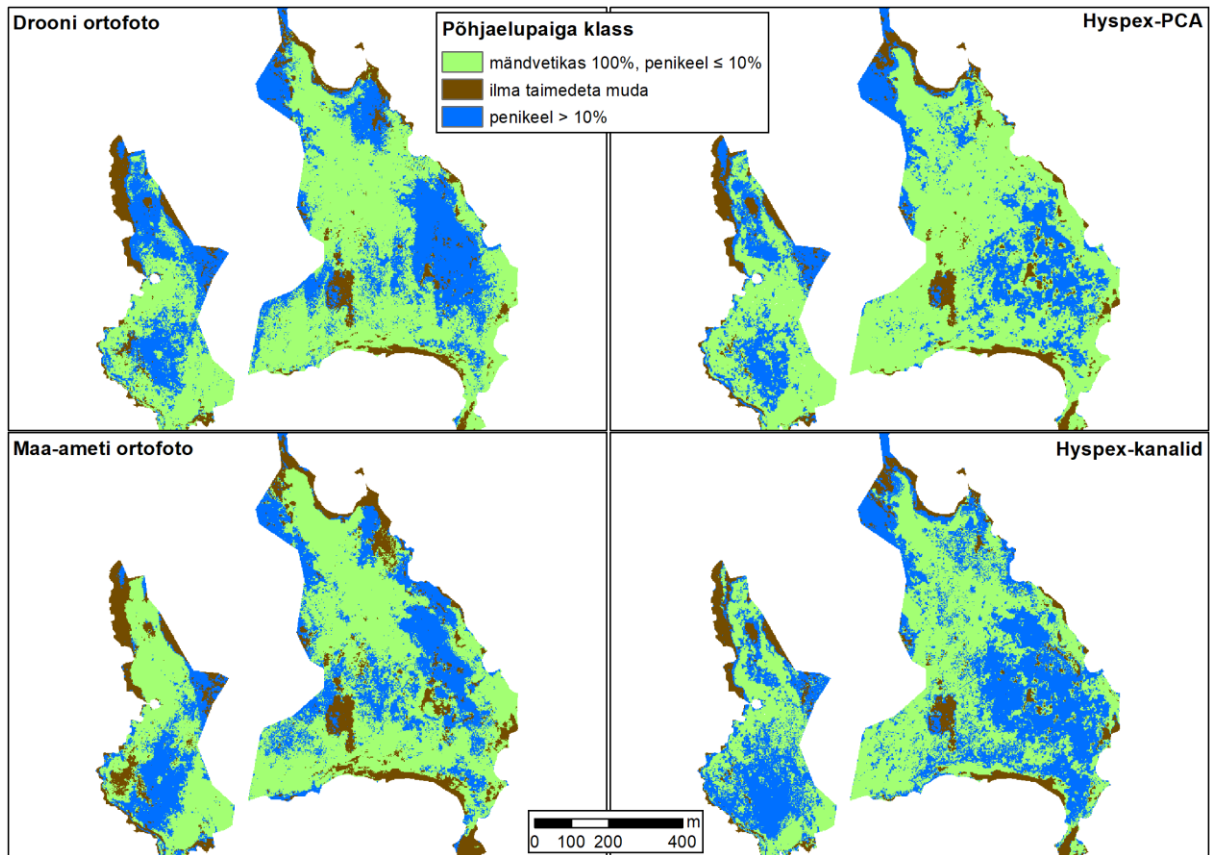
Tabel 3.4.2. Erinevate kaugseire meetodite abil saadud andmetel põhinevate klassifitseeritud muutujate mudelennustuste klasside osakaalud (%).

muutuja	klass	drooni ortofoto	Maa-ameti ortofoto	Hypex-PCA	Hypex-kanalid
põhjaelupaiga klass	mändvetikas 100%, penikeel $\leq 10\%$	57.1	57.1	64.0	49.1
	ilma taimedeta muda	10.0	15.1	10.0	9.4
	penikeel $\geq 10\%$	32.9	27.8	26.0	41.5
klassifitseeritud põhjataimestiku üldkatvus	0 - 10%	10.0	13.7	9.8	8.6
	100%	90.0	86.3	90.2	91.4
klassifitseeritud vaba vee sügavus	> 0.1 m	63.2	68.8	75.2	61.3
	0 - 0.1 m	36.8	31.2	24.8	38.7

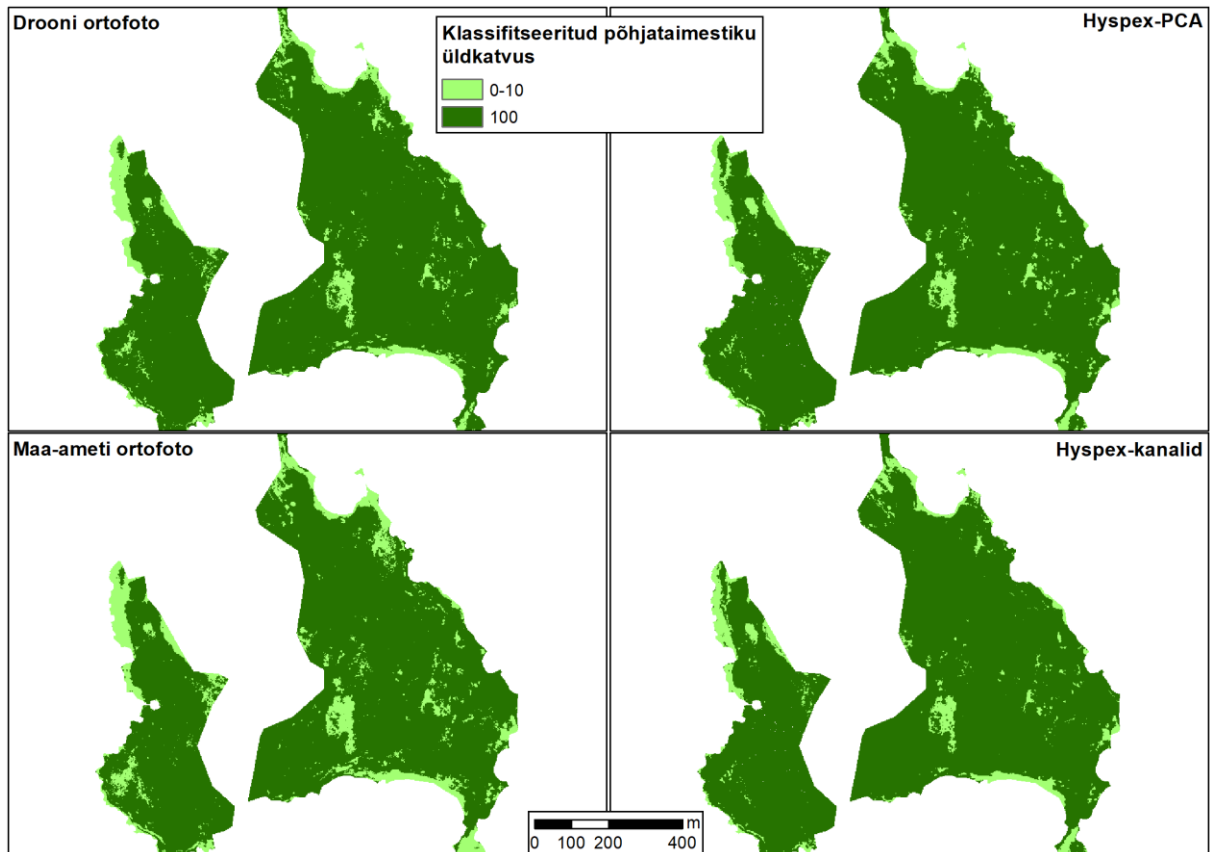
Klassifitseeritud põhjataimestiku üldkatvuse mudelid näitasid kõik ideaalset või sellele lähedast ennustusvõimet (tabel 3.4.1). Erinevalt põhjaelupaigaklassi ennustustest, olid üldkatvuse mudelid omavahel tunduvalt sarnasemad ka visuaalselt (joonis 3.4.3) ja klasside pindalade võrdluses (tabel 3.4.2).

Klassifitseeritud vaba vee sügavuse mudelennustused olid teiste nominaalsete tunnustega võrreldes kõige madalama ennustusvõimega (tabel 3.4.1). Marginaalselt nõrgema ennustusvõimega olid Hypex-kanalid ja Maa-ameti ortofoto. Klasside pindalade poolest eristus enim Hypex-PCA, mis ennustas kõige suuremat sügavama vee osakaalu (tabel 3.4.2).

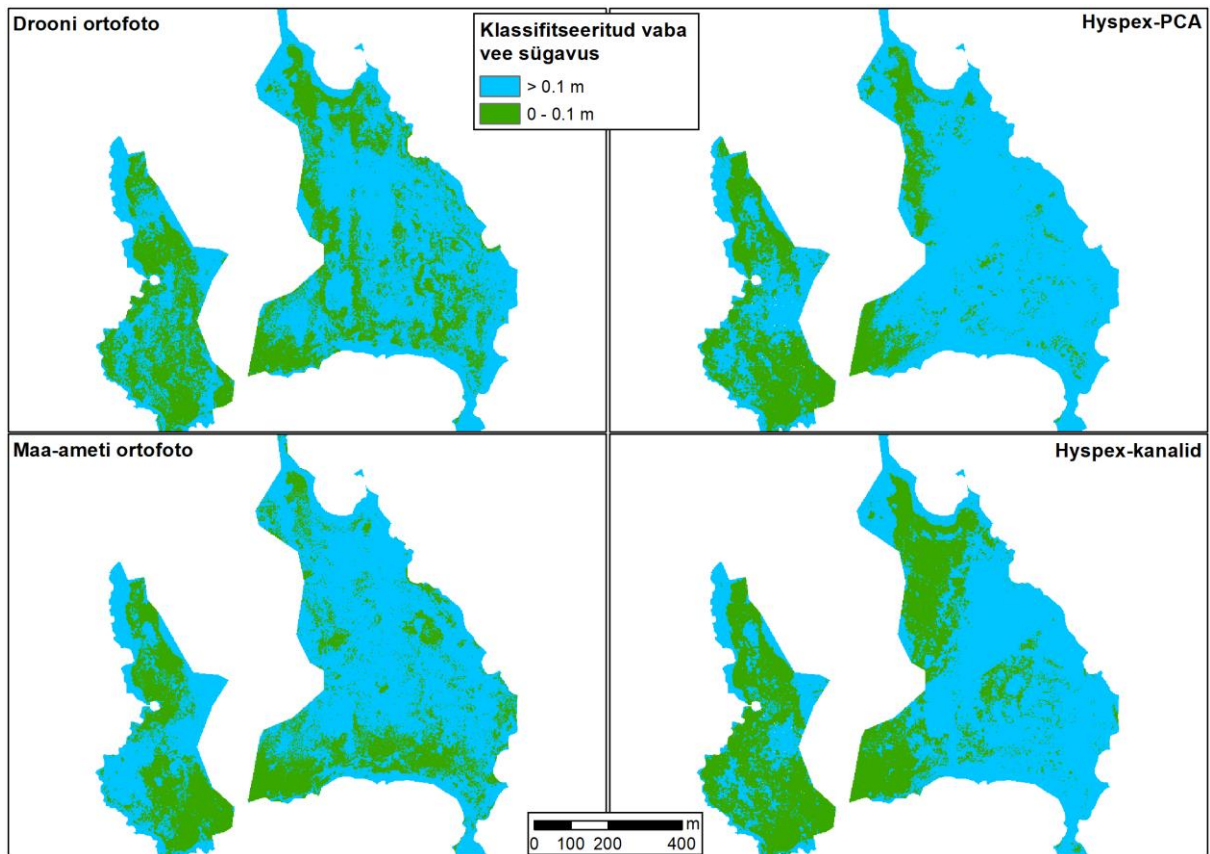
Vaba vee sügavuse pidevtunnuselise ennustuse juures saab välja tuua, et Hypex versioonid andsid marginaalselt kõrgema korrelatsiooni ja madalama keskmise absoluutvea kui ortofotopõhised mudelid (tabel 3.4.1). Mudelennustuse kaartidel oli vaba vee sügavuse puhul jälgitav teatav lennujoonte muster drooni ja Hypex puhul (joonis 3.4.5).



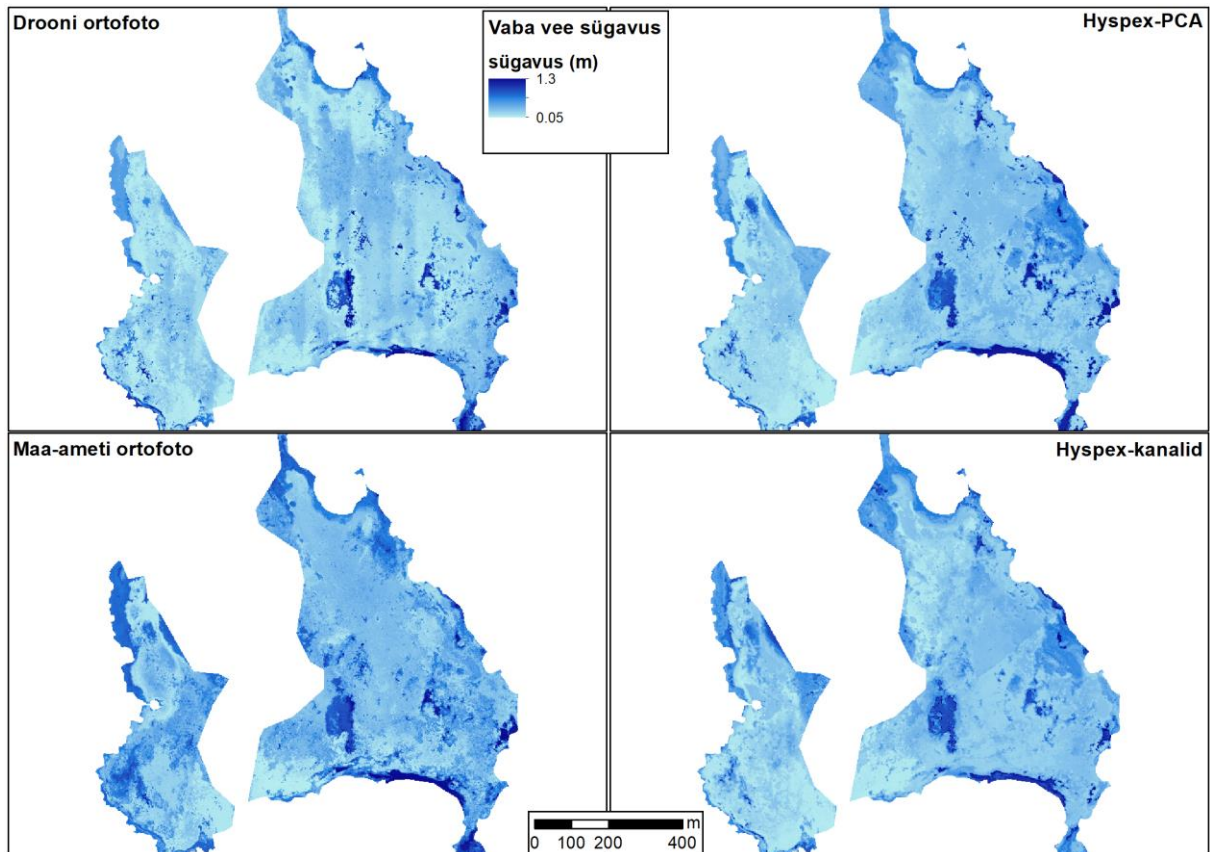
Joonis 3.4.2. Põhjaelupaiga klassi mudelennustused 5. alal (Oessaare laht), mis on teostatud kasutades erinevatel meetoditel saadud kaugseire andmeid.



Joonis 3.4.3. Klassifitseeritud põhjataimestiku üldkatvuse mudelennustused 5. alal (Ossaare laht), mis on teostatud kasutades erinevatel meetoditel saadud kaugseire andmeid.



Joonis 3.4.4. Klassifitseeritud vaba vee sügavuse mudelennustused 5. alal (Oessaare laht), mis on teostatud kasutades erinevatel meetoditel saadud kaugseire andmeid.



Joonis 3.4.5. Vaba vee sügavuse mudelennustused 5. alal (Ossaare laht), mis on teostatud kasutades erinevatel meetoditel saadud kaugseire andmeid.

4. Kokkuvõte

Uuringu eesmärgiks oli testida erinevate kaugseire meetodite rakendatavust mererannikuga seotud kalade kude- ja turgutusosalade omaduste (veekogu põhjasubstraat, põhjataimestik, kaldaveetaimestik, vaba vee sügavus) kaardistamisel. Uuring viidi läbi kaheksal uuringualal Saaremaa lääne- ja lõunaosas 2019. aasta juunis ja juulis.

Kaugseire meetoditeks olid droonipõhised ortofotod, Maa-ameti ortofotod, hüperspektraalse spektromeetriga HySpex lennukilt kogutud andmed, Sentinel-2 satelliidipildid.

Elupaikade kohtvaatlused teostati otseste visuaalsete vaatlustena või allveevideo abil. Kude- ja turgutusosalade iseloomustamiseks kasutatavad elupaigamuutujad olid põhjataimestiku üldkatvus, põhjaelupaiga või põhjasubstraadi klass, vaba vee sügavus, mändvetikate katvus, muda katvus, kõva põhjasubstraadi katvus.

Erinevate meetoditega kogutud kaugseire materjali visuaalne hinnang näitas, et tasuta kättesaadava satelliidi Sentinel-2 pildimaterjal ei sobi oma madala ruumilise lahutuse tõttu (piksel 10–60 m) väikesemõõtmeliste kude- ja turgutusosalade ja nendega seotud omaduste hindamiseks. Parim kulutõhus meetod elupaikade karakteristikute otseseks visuaalseks interpreteerimiseks, nt kalade rändeteede ja nendel olevate takistuste hindamiseks, on droonipõhine ortofotomosaiik või ka tavapärased ortokorreksioonita drooniga teostatud aerofotod ja videod.

Matemaatiliste seoste loomiseks kohtvaatlustel tuvastatud elupaigamuutujate ja kaugseirest saadud andmete vahel kasutati juhumetsa (*random forest*) modelleerimismeetodit. Loodud mudelite abil teostati mudelennustused 2 m ruudustikus kogu uuringuala piires. Mudelennustuste headuse hindamiseks kasutati matemaatilist valideerimist ja visuaalset eksperthinnangut. Modelleerimisel ei kasutatud satelliidipilte nende madala ruumilise lahutuse tõttu. Mudelennustuste matemaatiline valideerimine näitas, et Maa-ameti ortofoto, droonipõhine ortofoto ja Hypsax andmete kaks erinevat versiooni (12 valitud kanalit ja 12 esimest peakomponentanalüüsi komponenti) võimaldasid kõik kõrge ennustusvõimega mudelite loomist. Erinevatel kaugseire andmetel põhinevate mudelite ennustusvõimed olid sarnased ja ühe parima väljatoomine ei olnud võimalik. Hypsax andmete versioonide võrdluses oli kanalipõhine marginaalselt madalama ennustusvõimega kui peakomponentipõhine versioon. Tabelis 4.1 on toodud analüüside tulemuste ja nende interpretatsiooni kokkuvõte.

Tabel 4.1. Erinevate kaugseire meetodite rakendatavuse kokkuvõte. Värvitaust näitab meetodi rakendatavuse hinnangut: roheline – parim, valge – neutraalne või ebarelevantne, kollane – ebaotstarbekas või probleemne, punane – halvim või sobimatu.

Omadus	Drooni ortofoto	Maa-ameti ortofoto	Hypex lennukilt	Satelliit Sentinel-2
Kasutatavus kude- ja turgutusalade ja rändeteede omaduste visuaalseks hindamiseks	Parim meetod, sest võimaldab väga kõrget ruumilahutust. Võimalik teostada ka käsitsi lennu juhtimist ja reaajas videopildi jälgimist ja salvestamist huvipakkuvates kohtades	Sobilik, kui materjal on saadaval sobivast aastast ja hooajast	Ebaotstarbekas, sest mehitatud lennuki tellimine väga kulukas	Sobimatu, sest piksli suurus ≥ 10 m ja seetõttu visuaalne interpreteerimine enamasti võimatu
Kasutatavus kude- ja turgutusalade omaduste modelleerimiseks	Sobilik	Võib olla sobilik, kui materjal on saadaval sobivast aastast, hooajast ja piisava kvaliteediga (materjali kogumine ei ole optimeeritud veealadele ja võib esineda palju päikesepeegeldust, lainetust, lainevahtu)	Sobilik, Hypex-PCA andis marginaalselt paremad tulemused kui Hypex-kanalid	Sobimatu väikesemõõtmeliste uuringualade puhul, sest piksli suurus ≥ 10 m
Rahaline kulukus	Väga madal	Tasuta	Väga kulukas	Tasuta
Operatiivsus, organisatoorne keerukus	Võimalik on ise operatiivselt valida drooni lennutamise aeg ja koht. Organisatoorselt võib olla keerukam ainult lennujaamade läheduses või muude lennupiirangute korral	Materjali kogumine toimub vastavalt Maa-ameti tööde plaanile	Mehitatud lennuki tellimine ei ole operatiivne ega organisatoorselt lihtne	Ajas ja ruumis fikseeritud ülelennud
Arendusvõimalused ja -vajadused	1. Lennujoonte heleduse ja värvigamma ühtlustamiseks proovida valgetasakaalu fikseerimist automaatrežiimi asemel. 2. Täiendavate spektrikanalite (nt lähisinfrapuna) lisamine drooni kaamerasüsteemile võimaldaks parandada pildi kvaliteeti (nt päikesepeegelduse vähendamine) ja signaali informatiivsust.		Vajalik vähendada lennujoonte vahelisi erinevusi, aga selle eelduseks on homogeensete sügavaveeliste alade olemasolu pildil	
Täiendavad kommentaarid				Satelliidipiltide eelis on töödes, kus hinnanguid on vaja suurte alade kohta ja vajalik on aastevaheliste muutuste hindamine, sest satelliidipildid katavad väga suure ala ja materjal uueneb regulaarsete intervallidega

Kasutatud allikad

- Breiman L, Cutler A, Liaw A, Wiener M (2018) randomForest: Breiman and Cutler's random forests for classification and regression. R package version 4.6-14. <http://cran.r-project.org/web/packages/randomForest/>
- Casselman JM, Lewis CA (1996) Habitat requirements of northern pike (*Esox lucius*). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 53: 161-174.
- Craig J F (1996) Pike: Biology and Exploitation. London: Chapman & Hall. 298 pp.
- Eriksson BK, Ljunggren L, Sandström A, Johansson G, Mattila J, Rubach A, Råberg S, Snickars M (2009) Declines in predatory fish promote bloom-forming macroalgae. Ecological Applications 19: 1975-1988.
- Erm V, Rannak L, Sõrmus I, Štšukina I (1970) Väinamere kalastik. In: Kumari, E. (ed.) Lääne-Eesti rannikualade loodus. Tallinn: Valgus, pp. 61–80.
- Hedley JD, Harborne AR, Mumby PJ (2005) Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. International Journal of Remote Sensing 26, 2107-2112
- HELCOM (2013) HELCOM HUB – Technical Report on the HELCOM Underwater Biotope and habitat classification. Balt. Sea Environ. Proc. No. 139.
- Herkül K, Torn K, Suursaar U, Alari V, Peterson A (2016) Variability of benthic communities in relation to hydrodynamic conditions in the North-Eastern Baltic Sea. Journal of Coastal Research: Special Issue 75 - Proceedings of the 14th International Coastal Symposium, Sydney, 6-11 March 2016: pp. 867 – 871.
- Herkül K, Peterson, Paekivi S (2017) Applying multibeam sonar and mathematical modeling for mapping seabed substrate and biota of offshore shallows. Estuarine Coastal and Shelf Science 192, 57-71, DOI:10.1016/j.ecss.2017.04.026
- Kallasvuo M, Lappalainen A, Urho L (2011) Coastal reed belts as fish reproduction habitats. Boreal Environment Research 16: 1-14.
- Kraufvelin P, Pekcan-Hekim Z, Bergström U, Florin A-B, Lehtikoinen A, Mattila J, Arula T, Briekmane L, Brown EJ, Celmer Z, Dainys J, Jokinen H, Kääriä P, Kallasvuo M, Lappalainen A, Lozys L, Möller P, Orio A, Rohtla M, Saks L, Snickars M, Støttrup J, Sundblad G, Taal I, Ustups D, Verliin A, Vetemaa M, Winkler H, Wozniczka A, Olsson J (2018) Essential coastal habitats for fish in the Baltic Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science 204: 14-30.
- Kotta J, Remm K, Vahtmäe E, Kutser T, Orav-Kotta H (2014) In-air spectral signatures of the Baltic Sea macrophytes and their statistical separability. Journal of Applied Remote Sensing, 8.
- Kutser T, Hedley J, Giardino C, Roelfsema C, Brando VE (2020) Remote sensing of shallow waters – A 50 year retrospective and future directions. Remote Sensing of Environment, 240.

- Liaw A, Wiener M (2002) Classification and Regression by randomForest. R News 2(3):18–22.
- Möller S, Winkler HM, Klügel A, Richter S (2019) Using otolith microchemical analysis to investigate the importance of brackish bays for pike (*Esox lucius* Linnaeus, 1758) reproduction in the southern Baltic Sea. Ecology of Freshwater Fish 28: 602-610.
- Nilsson J (2006) Predation of northern pike (*Esox lucius* L.) eggs: a possible cause of regionally poor recruitment in the Baltic Sea. Hydrobiologia 553: 161-169.
- Ojaveer, E.; Pihu, E.; Saat, T. (Toim.) (2003). Fishes of Estonia. Tallinn: Estonian Academy Publishers.
- Peterson A, Herkül K (2019) Mapping benthic biodiversity using georeferenced environmental data and predictive modeling. Marine Biodiversity 49 (131), 131-146.
- R Core Team (2019) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Remm K, Remm J, Kaasik A (2012) Ruumiliste loodusandmete statistiline analüüs. Õpik-käsiraamat. Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut. Tartu.
- Rohtla M (2015) Otolith sclerochronological studies on migrations, spawning habitat preferences and age of freshwater fishes inhabiting the Baltic Sea. PhD Thesis, University of Tartu.
- TÜ Eesti Mereinstituut (2014) Eesti territoriaalmere merepõhja elupaikade ja liikide leviku modelleerimine. Teostatud projekti „Eesti merealade planeerimiseks looduskaitse teabe koondamine, sh. territoriaalmere mereelupaikade modelleerimine“ raames. Leping J/6/2013.
- TÜ Eesti Mereinstituut (2016) Loodusdirektiivi mereliste elupaikade inventuur valitud aladel Eesti majandusvööndis. Teostatud projekti „Eesti merealade loodusväärtuste inventeerimine ja seiremetoodika väljatöötamine“ raames Leping 10-4.5.5/14/21.
- TÜ Eesti Mereinstituut (2018) Eesti mereala elupaikade kaardiandmete kaasajastamine. Leping 4-1/17/82.
- Vahtmäe E, Kutser T, Martin G, Kotta J (2006) Feasibility of hyperspectral remote sensing for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters — a Baltic Sea case study. Remote Sensing of Environment, 101, 342-351.