

Elisa Lahtinen

Vesistöjen tutkimus ja seuranta kuvantavilla menetelmillä

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

3. toukokuuta 2023

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Elisa Lahtinen

Yhteystiedot: elkahela@student.jyu.fi

Ohjaajat: Pauliina Salmi ja Timo Tiihonen

Työn nimi: Vesistöjen tutkimus ja seuranta kuvantavilla menetelmillä

Title in English: Research and monitoring of water bodies using imaging methods

Työ: Kandidaatintutkielma

Opintosuunta: Information technology

Sivumäärä: 51+0

Tiivistelmä:

Valtaosa Maan pinnasta on veden peitossa. Vesistöihin lukeutuu ainutlaatuisia ekosysteemejä ja toisaalta ne tukevat elämää muissa ekosysteemeissä. Vesistöekosysteemien toiminnan ymmärtäminen ja suojeleminen edellyttävät vesistöjen ja niiden eliöstön toiminnan tutkimusta ja seuranta. Optiset mittausmenetelmät mahdollistavat ominaisuuksien tarkastelun koskettamatta kohteeseen. Niiden toiminta perustuu esimerkiksi spektrikuvantajien kohdalla sähkömagneettisen säteilyn ominaiseen kykyyn heijastua eri tavoin erilaisista kohteista. Lisäksi katsaus esittelee muun muassa biomimiimisiä ratkaisuja, jotka tukevat optisia menetelmiä.

Vesistöjen kuvantaminen on mahdollista jakaa kolmeen pääluokkaan. Ne ovat satelliittipohjainen, ilmasta käsin toteutettava sekä vedenalainen kuvantaminen. Satelliittikuvantamisen avulla on mahdollista kerätä laajaa ja jatkuvaa seurantadataa vesistöjen pintakerroksista. Ilmasta kuvantamalla on mahdollista kuvantaa rajattujen alueiden pintavesiä hetkellisesti. Aiemmistä kahdesta kaukokartoitusmenetelmästä poiketen, on paikallisilla vedenalaisilla menetelmillä mahdollista kuvantaa optisesti syviä alueita sekä tarkkailla yksittäisiä eliöitä. Mahdollisimman kattavan datakokonaisuuden saamiseksi on käytettävä menetelmien yhdistelmää. Esimerkiksi ilmasta ja paikan päältä vedestä kerätyllä kuvamateriaalilla on mahdollista täydentää satelliittikuvien yksityiskohtia. Toisaalta menetelmillä ei ole mahdollista korvata toisiaan niiden ainutlaatuisten ominaisuuksien vuoksi.

Avainsanat: kaukokartoitus, kuvantaminen, spektrikuvantaminen, vesistöt, meri, satelliitti, UAV, robotiikka, biomimiikka, kirjallisuuskatsaus, kandidaatintutkielma

Abstract: The majority of the Earth surface is covered by water. The water bodies include unique ecosystems and on the other hand they support life in other ecosystems. Understanding and protecting the functions of the water ecosystems require research and monitoring of the water bodies. Optical measuring methods enable examining these properties without a need to touch the object. When considering for example spectral imagers, their function is based on the characteristic ability of electromagnetic radiation to reflect in different ways from different objects. In addition the review presents i.a. biomimicry solutions which support optical methods.

Imaging methods of the water bodies are possible to divide into three main classes. The classes are satellite-based, airborne and underwater imaging. With satellite imaging it is possible to collect wide and continuous monitoring data from the surfaces of the water bodies. With airborne imaging it is possible to image limited areas surface waters temporarily. Differing from the previous two remote sensing methods, with local underwater methods it is possible to image optically deep areas and monitor single organisms. In order to get as inclusive data set as possible, a combination of the methods has to be used. It is possible to for example supplement the details of satellite images with more precise airborne and underwater images. On the other hand the methods are irreplaceable due to their unique properties.

Keywords: remote sensing, imaging, spectral imaging, bodies of water, ocean, satellite, UAV, robotics, biomimicry, review, Bachelor's Theses

Termiluettelo

biomimiikka	Luonnon eliön biologisten ominaisuuksien mukaileminen teknologiseksi ratkaisuksi (<i>biomimicry</i>).
CDOM	Värillinen liennut orgaaninen aines (CDOM, <i>colored dissolved organic matter</i>). Merkittävä tekijä hiilen kierrossa.
HSI	Hyperspektrikuvantaminen (<i>engl. hyperspectral imaging</i>).
humus	Maatunutta orgaanista eli eloperäistä ainesta, jota esiintyy sekä kiinteänä että liukoisena orgaanisena aineksena vedessä.
kasviplankton	Vesistöissä keijuvia mikroskooppisen pieniä yhteyttäviä eliöitä. Ne sitovat hiilidioksidia uudeksi biomassaksi eli ravinnoksi muille eliöille. Kasviplanktonin runsaus ilmentää myös vesistön rehevyystasoa ja ekosysteemin toimintaa.
klorofylli-a	Lehtivihreä. Kasveissa, levissä ja syanobakteereissa vihreän värin aiheuttava pigmentti, jonka avulla kasvi myös kerää yhteyttämiseen tarvittavaa valoa.
makrofytti	Vedessä tai veden lähellä kasvava kasvi tai levä, joka on suuri-kokoinen. Esimerkiksi vedessä kasvavat putkilokasvit ja suurlevät.
MSI	Multispektrikuvantaminen (<i>engl. multispectral imaging</i>)
nanometri, nm	SI-järjestelmän perusyksikkö. Käytetään mittayksikkönä aallonpituuksien ilmaisemisessa.
optinen mittalaite	Optinen mittalaite käsittelee optisen sensorin vastaanottamaa säteilyä esimerkiksi erillisinä aallonpituuskaistoina. Mittalaite käsittää myös muut laitteen osat kuten mahdollisen kiinnitetyn valonlähteen.
optinen sensori	Optisella sensorilla tarkoitetaan näkyvän valon -, ultravioletti- tai infrapuna-alueen sähkömagneettista säteilyä vastaanottavaa ja sähköisiksi signaaleiksi muuttavaa laitetta.
rehevöityminen	Runsas perustuotannon eli yhteyttämällä sidotun energiamäärän tai orgaanisen aineksen kasvu, joka liiallisena voi aiheuttaa

	vesistön happikadon ja lopulta ekosysteemin muutoksen. Rehevöityminen johtuu liiallisesta vesistöön kertyneestä ravinnemäärästä.
ROV	Kauko-ohjattava laite (<i>remotely operated vehicle</i>). Tässä työssä veden alla toimiva robotti, jota kauko-ohjataan. Se saattaa olla narun välityksellä kiinni tutkimusaluksessa.
spektrikuvantaminen	Kuvantamismenetelmiä, joissa hyödynnetään kohteesta heijastuvaa sähkömagneettista spektriä (<i>spectral imaging</i>). Siten materiaaleja on mahdollista tunnistaa ja erotella toisistaan. Kaksi menetelmää: HSI, MSI (hyper- ja multispektrikuvantaminen).
sähkömagneettinen säteily	Muun muassa näkyvä valo (VIS, 380-740 nm), infrapuna (IR, 740-15000 nm) ja ultravioletti (UV, 200-400 nm) ovat eri aallonpituusisia sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalueita.
UAV	Miehittämätön ilma-alus (<i>engl. unmanned aerial vehicle</i>).

Sisällys

1	JOHDANTO	1
2	OPTISET MITTALAITTEET JA KUVADATAN MUODOSTAMINEN	3
2.1	Kuvantaminen ja kuvantamista tukevat menetelmät - mallia eliöiltä	3
2.2	Spektrikuvantaminen ja datakuutio	5
2.3	LiDAR ja muut optiset menetelmät	7
2.4	Erottelukyky	8
2.5	Haasteita ja häiriöitä	9
3	KAUKOKARTOITUS	11
3.1	Kaukokartoituksen kohteet	12
3.2	Optinen mittaaminen kaukokartoituksessa	12
3.3	Kaukokartoitusmenetelmät - tekniikat ja alustat	13
3.3.1	Kaukokartoitus avaruudesta	13
3.3.2	Kaukokartoitus ilmasta	16
3.4	Vaihtelunlähteet	17
3.5	Kaukokartoituskeinojen vertailu ja yhteistoiminta	19
3.6	Konkreettinen tutkimusmenetelmä: Merten väriä mittaava tutkimus (OC).....	20
4	VEDENALAINEN KUVANTAMINEN	22
4.1	Optiset sensorit paikallisessa tutkimuksessa	23
4.2	Paikallisen tutkimuksen tekniikat	25
4.2.1	Etäohjattavat laitteet (ROV)	26
4.2.2	Itsenäiset vedenalaiset laitteet (AUV)	26
4.2.3	Sekä etäohjattavat että itsenäiset vaihtoehdot	27
4.2.4	Pehmeä ja biomiiminen robotiikka	28
4.3	Veden pinnalta tietoa keräävät laitteet	30
5	TEKNIKOIDEN VÄLINEN YHTEISTYÖ	32
5.1	Datojen yhdistäminen	32
5.2	Sensordatojen yhdistäminen	33
5.3	Laitealustat datan keräämisessä ja yhdistämisessä	34
6	POHDINTA JA TULEVAISUUDENNÄKYMÄT	36
7	LOPPUPÄÄTELMÄ	38
	LÄHTEET	40

1 Johdanto

Vesi peittää alleen valtaosan Maan pinnasta ja se on yksi elämän perusedellytyksistä. Vesistöjen ominaisuuksien, eliöstön ja tilan seuranta sekä kartoitusta (Giardino ym. 2019) tarvitaan sekä tieteessä että luonnonvarojen suojelussa ja kestävässä kehityksessä (Guanter ym. 2019). Kerättyä tietoa hyödynnetään myös yksityisesti, esimerkiksi vesiviljelyssä ja vapaa-ajan kohderyhmissä (Giardino ym. 2019). Tietojen perusteella on muun muassa mahdollista laatia ja seurata direktiivejä tai suojelusuunnitelmia (Giardino ym. 2019). Esimerkiksi EU:n vesipuitedirektiiviä varten tarvitaan tietoa sekä klorofylli-a:n eli lehtivihreän pitoisuuksista että vedenalaisten kasvillisuusesiintymien laajuudesta (Guanter ym. 2019). Vesistöistä on tyyppillistä kerätä tietoa myös esimerkiksi niihin liuenneesta orgaanisesta aineksesta (*colored dissolved organic matter*, CDOM), kasviplanktonista, vesistön pohjan muodoista tai aaltojen korkeudesta. Näitä ympäristön parametreja on mahdollista mitata, seurata ja mallintaa erilaisilla menetelmillä.

Katsaus käsittelee optisia, valoa hyödyntäviä tutkimusmenetelmiä vesistöjen tutkimuksessa. Valolla on paljon hyödynnettäviä ja mitattavia ominaisuuksia näkemiemme värien lisäksi. Lisäksi valo kykenee esimerkiksi kulkeutumaan ilmakehän läpi vesipatsaan sisälle. Sen vuoksi optisia menetelmiä on mahdollista käyttää sekä kaukokartoituksessa että paikallisessa tutkimuksessa. Valon kyky kulkeutua vedessä on kuitenkin rajallinen, koska vesi, hiukkaset sekä veteen liuenneet aineet aiheuttavat valon intensiteetin vaimenemista.

Katsauksen toisessa luvussa perehdytään optisiin ja erityisesti valon spektrialueita hyödynnäviin mittalaitteisiin. Värikuvakameralla on mahdollista kerätä tärkeää seurantatietoa sekä kuvamateriaalia vesistöjen eliöistä. Värikuvakameran kaltaisella spektrikuvantimella on mahdollista kuvata värien lisäksi myös muita sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalueita. Spektrikuvantaminen perustuu kuvattavan kohteen ominaiseen kykyyn absorboida ja heijastaa valon aallonpituusalueita muodostaen säteilyn spektrin. Spektri mitataan optisella sensorilla ja tulkitaan kohteen ja sen ominaisuuksien tunnistamiseksi (Santos ja Farahi 2014). Katsauksen aikana sivutaan myös muita mittalaitteita ja optisia mahdollisuuksia kuten valotutka eli LiDAR (*Light Detection And Ranging*, valon havainnointi ja etäisyyden määrittäminen).

Katsauksen kolmannessa ja neljännessä luvussa kerrotaan laajemmin optisista menetelmistä ja laitteista, joihin optisia mittalaitteita on mahdollista kiinnittää. Kolmas luku keskittyy avaruudesta ja ilmasta toteutettavaan kaukokartoitukseen, jossa mittalaitteena toimii pääasiassa spektrikuvantaja. Neljäs luku kertoo paikan päällä joko veden pinnan alla tai pinnalta käsin toteutettavasta paikallisesta mittaamisesta. Siinä mittalaitteena käytetään spektrikuvantajan sijaan tyypillisesti värikuvakameraa tai muita mittalaitteita, joiden keräämä data tukee optisesti kerättyä dataa.

Lisäksi katsauksessa käsitellään vesistöjen sekä niiden ympärillä vallitsevien olosuhteiden aiheuttamia haasteita ja vaihtelunlähteitä kuvantamiselle. Valon heijastuminen veden pinnasta, liian vähäinen valaistus sekä humus ja muu veteen sekoittunut aines vaikeuttavat kuvan tulkintaa. Veteen sijoitettuja laitteita puolestaan haastavat esimerkiksi paine ja nosteen säätely. Toisaalta vesistöjen seurannassa keskitytään pääasiassa vain suuriin vesialueisiin, ja pienistä vesialueista on haastavaa kerätä sekä kattavaa että tarkkaa dataa (Giardino ym. 2019).

Katsauksen esittelemien menetelmien myötä tavoitteena on selvittää, millainen olisi kattava ja nykyaikainen tutkimusmenetelmä. Katsauksen lopussa vedetään koottuja havaintoja yhteen ja nostetaan tutkimuksien valossa esille parhaita ratkaisuja vesistöjen tutkimukseen ja seurantaan. Kaukokartoituksen kattavuus ja paikallisten menetelmien tarkkuus sekä toisaalta erilaiset optiset menetelmät tuottavat yhdessä monipuolista, kattavaa ja laadukasta dataa (Amani ym. 2022). Katsauksen viimeisissä kappaleissa vedetään koottuja havaintoja yhteen tutkimuksessa ja seurannassa käytettävistä parhaista ratkaisuista, menetelmien yhdistämisestä sekä toisaalta niiden tulevaisuudesta.

2 Optiset mittalaitteet ja kuvadatan muodostaminen

Maailma on mahdollista nähdä ihmisen silmin väreinä näkyvän valon aallonpituuksien alueella. Eliömaailmassa näkökyky voi sen sijaan tarkoittaa kykyä havaita esimerkiksi infrapuna tai ultraviolettisäteilyä. Samoista nähtävistä kohteista saatava optinen tieto saattaa siis riippua havainnoijasta. Optisten sensorien kannalta on merkittävää, että kohteesta heijastuva spektri ilmentää havainnoitavan kohteen merkityksellisiä ominaisuuksia.

Optisista sensoreista kertominen aloitetaan erilaisista näkökyvyistä kehitetyistä ratkaisuista. Biologinen optinen sensori, silmä, saattaa rakentua esimerkiksi hyönteisten monikertaisten silmien tavoin useista osasilmistä. Valon havaitseminen ei kuitenkaan rajoitu silmiin kuten kasvien valoreseptorisolut osoittavat. Valon spektrejä on siis mahdollista hyödyntää myös näkemättä niitä.

Biologisen näkökulman jälkeen perehdytään erilaisia spektrejä hyödyntävään spektrikuvantamiseen. Se mahdollistaa monipuolisen tiedon keräämisen kohteesta ja esimerkiksi kohteen tunnistamisen spektrin perusteella. Silmän tavoin kuvantimen sensori vastaanottaa sähkömagneettista säteilyä, jota mittalaite voi edelleen käsitellä. Mittalaitteeseen on mahdollista kiinnittää myös muita osia kuten valonlähde. Spektriosion jälkeen kerrotaan muista optisista menetelmistä.

2.1 Kuvantaminen ja kuvantamista tukevat menetelmät - mallia eliöistä

Biologisia eliöitä tutkimalla ja mukailemalla on kehitetty erilaisia ihmisiä hyödyttäviä keksintöjä. Luonnon toimintaa mukailevista ratkaisuista käytetään nimitystä biomimiikka (*biomimicry*). Esimerkiksi vedenalaista näkökykyä on yritetty biomimikoida (Aguzzi ym. 2021). Näön biomimikoinnista on hyötyä kuvaamisen lisäksi vesistöön sijoitetun laitteen paikallisessa ohjaamisessa ja esteiden väistelyssä (Schnaitmann, Pagni ja Reiff 2020). Seuraavaksi tutustutaan erilaisiin biologisiin optisiin sensoreihin sekä niiden pohjalta biomimikoituihin optisiin laitteisiin.

Ihmisen silmät keräävät optista tietoa ympäristöstä. Kohteesta heijastuva valo kulkeutuu mustuaisen eli pupillin läpi, jota iiris laajentaa tai supistaa vastaanotettavan valon voimakkuuden säätelyä varten. Valo kulkeutuu mykiölle eli linssille, joka taittaa valon, jotta verkkokalvolla piirtyvä kuva olisi terävä. Mykiön muotoutuminen ja valon taittaminen riippuu kohteen etäisyydestä. Verkkokalvolla tappi- ja sauvasolut vastaanottavat valoa. Tappisolut havaitsevat värit ja ne ovat herkkiä punaiselle, vihreälle ja siniselle aallonpituudelle. Tämän ansiosta ihmisellä on värinäkö, jonka havainnointialue kuuluu niin kutsuttuihin näkyvän valon aallonpituuksiin (VIS, 380-740 nm; nm, nanometri). Sauvasolut puolestaan keräävät yleisen tiedon valoista ja varjoista. Lopulta viesti kulkee sähköimpulsseina aivoille käsiteltäväksi. (Atchison 2023)

RGB-kameran eli värikuvakameran toiminta vastaa ihmisen silmien ja värinäön toimintaa. Lyhenne RGB (RGB, *Red Green Blue*) tarkoittaa punaista, vihreää ja sinistä, joiden yhdistelmistä myös kaikki muut niin kutsutun näkyvän valon aallonpituuden värit on mahdollista muodostaa. Luonnossa eläimet kuitenkin voivat havainnoida myös muita sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalueita kuten infrapuna (IR, 740-15000 nm), eivätkä välttämättä puolestaan näe niin kutsuttuja näkyvän aallonpituusalueen värejä. Siksi muut eliöt eivät välttämättä näe ihmisen silmää mukailleen tuotettuja valokuvia, sillä muut aallonpituusalueet ovat karsiutuneet pois kuvasta.

Valolla on muitakin havaittavia ominaisuuksia kuin sen spektri. Esimerkiksi katkarapu havainnoi polarisoitunutta valoa (Aguzzi ym. 2021). Valon polarisoituminen ilmaisee valon värähtelysuunnan. Se on värin kaltainen valon ominaisuus, jota ihminen ei kuitenkaan kykene havaitsemaan, mutta sitä on mahdollista käyttää edelleen kohteiden tunnistamisessa. Polarisoitumista on mahdollista käyttää yhtenä optisena menetelmänä esimerkiksi kaukokartoituksessa (Mahdianpari ym. 2019), mutta katsauksessa ei syvennyttä enempää kyseiseen menetelmään.

Valoa havainnoivan sensorin rakenne voi myös olla erityinen. Esimerkiksi hyönteisen silmä vastaa yhdistelmää useasta pienireikäisestä linssistä, joihin kuhunkin on liitetty joukko valoilmaisimia (*photodetector*). Hyönteisten näkö on jaettavissa rinnakkaisiin ja kerrosteisiin yhdistelmiin linseistä (*apposition eye*, *superposition eye*, *neural superposition eye*). Eri-laiset yhdistelmät käsittelevät valoa ja säätelevät näön tarkkuutta eri tavoin (Lakhtakia ja

Martin-Palma 2013). Kuvantajien rakenteet voisivat vastaavasti olla vaihtelevia ja tukea siten kuvantamisen tavoitteita.

Toisaalta silmät ja valo eivät ole ainoa tutkimuksen aihe biomimeettisen näkökyvyn kehittämisessä (Lakhtakia ja Martin-Palma 2013). Aiemmin johdattelussa nostettiin esille kasvien valoreseptorit, jotka kykenevät havainnoimaan valoa ilman silmiä. Vesistöissä puolestaan esimerkiksi sähkökala (*Gnathonemus petersii*) käyttää sähköä ympäristön havainnointiin. Kyvystä on inspiroiduttu sähköisen kameran kehittämiseen. Kamera kykenee kuvaamaan lähetyksiä ja ympäristöstä takaisin heijastuvia sähköimpulsseja. Laitteen etu ilmenee erityisesti tummissa ja sameissa vesissä. (Gottwald, Herzog ja Emde 2019) Toisaalta laitteella voi havainnoida heikkoja sähkökenttiä tai paineen muutoksia kohteiden ympärillä (Aguzzi ym. 2021).

2.2 Spektrikuvantaminen ja datakuutio

Optinen havainnointi ei rajoitu pelkän näkyvän valon alueelle, kuten erilaiset eliöt osoittavat. Tästä yhtenä teknisenä esimerkkinä toimii spektrikuvantaminen. Siinä spektrikamera vastaanottaa kohteesta heijastuvaa valoa ihmisen silmän ja värikuvakameran tavoin. Poikkeuksena on, että spektrikuvantamisessa koko spektristä on mahdollista vastaanottaa ja tallentaa mitä tahansa valikoituja aallonpituusalueita näkyvän valon alueen ohella. Lisäksi laite käsittelee säteilyn spektrin aallonpituusalueiden mukaan. Spektrikuvantamislaitteet on jaettavissa hyperspektrikuvantimiin (HSI, *hyperspectral imager*) sekä multispektrikuvantimiin (MSI, *multispectral imager*) (Raita-Hakola 2022) niiden spektraalisen erottelukyvyn (*resolution*) mukaan. Hyperspektrikuvantimilla on multispektrikuvantimia korkeampi spektraalinen erottelukyky. Spektrikuvantamista on hyödynnetty monipuolisesti kenttätutkimuksessa, esimerkiksi kaukokartoituksessa, tähtitieteessä ja maantieteellisessä kartoituksessa (Ortega ym. 2019) sekä esimerkiksi kasvien stressitason tunnistamisessa (Behmann, Steinrücken ja Plümer 2014).

Kuvantaminen edellyttää säteilyn lähteen. Aktiivinen säteilyn lähde tarkoittaa laitteeseen kiinnitettyä säteilyä tuottavaa lähdettä kuten hehkulamppua, laseria, fluoresoivaa lähdettä, LEDiä tai halogeenia. Aktiivista valonlähdettä käyttäviin laitteisiin lukeutuvat muun muas-

sa valotutkat (LiDAR, *Light Detection And Ranging*). Omaa valonlähdettä käytettäessä on mahdollista mitata aika, joka kuluu lähettämisen ja vastaanottamisen välillä. Sen ansiosta on mahdollista kuvantaa pintojen lisäksi rakenteita ja esimerkiksi veden kerroksia. (Jorgensen ja Fath 2008). Toisaalta säteilyn lähteenä voi olla laitteen ulkopuolinen passiivinen lähde kuten Aurinko, joka on kaukokartoituksessa aktiivista valonlähdettä yleisempi vaihtoehto. (Raita-Hakola 2022) , (Jorgensen ja Fath 2008)

Säteily osoitetaan kohteeseen, jolloin osa säteilystä absorboituu ja osa heijastuu takaisin kohdemateriaalin ominaisuuksien mukaan. Kohteesta takaisin heijastuvat aallonpituusalueet (Giardino ym. 2019) eli kokonaisuudessaan takaisin heijastuva spektri mitataan ja tallennetaan spektrikuvantajalla. Aallonpituusalueista käytetään myös termejä kanava (*channel*) ja (aallonpituus)kaista (*spectral band*). Multispektrikuvantaja on hyperspektrikuvantajan kaltainen, mutta multispektrikuvantajassa on vähemmän kaistoja (Ortega ym. 2019). Multispektrikuvantajalla on yleensä mahdollista kuvantaa 3 - 10 leveää kaistaa spektristä. Hyperspektrikuvantajalla puolestaan on mahdollista kuvantaa spektristä satoja kapeita kaistoja.

Aallonpituuskaistan leveyttä kutsutaan spektraaliseksi erottelukyvyyksi (*spectral resolution*). Hyperspektrikuvantimen spektraalinen erottelukyky on korkeampi kuin multispektrikuvantimen, sillä hyperspektrikuvantaja tallentaa kapeampia spektrikaistoja (Raita-Hakola 2022). Korkeamman spektraalisen erottelukyvyn ansiosta kohde on mahdollista tunnistaa tarkemmin. Spektrivaste (*spectral response*) kertoo aallonpituusvälin, jonka sensori kykenee kuvantamaan (Raita-Hakola 2022). Tyypillisimmät spektrikuvantajat voivat kuvantaa 400-2500 nm välille sijoittuvan spektrin, mutta laajempikin alue on mahdollinen (Ortega ym. 2019). Spektrikuvantamisessa hyödynnetään yleensä näkyvän valon alueelle (VIS, *visible*, 380-740 nm) sekä lähi-infrapuna-alueelle (NIR, *near infrared*, 740-1400 nm) sijoittuvia spektrejä. (Raita-Hakola 2022).

Lopulta kuvannetusta spektridatasta muodostetaan datakuutio. Tavanomaisen kuvan tavoin siinä on spatiaaliset eli avaruudelliset x- ja y- dimensiot mutta lisäksi myös spektraalinen z-dimensio. Datakuutiosta on mahdollista valita kohta, jonka spektri halutaan tietää - jokaisella kuvan pikselillä on oma spektrinsä (Raita-Hakola 2022; Guanter ym. 2019; Ortega ym. 2019).

Saatuspektridataa on mahdollista analysoida sen perusteella, mitä valon aallonpituuksia kohteet absorboivat tai heijastavat. Esimerkiksi vihreät kasvit näyttävät vihreiltä, koska niissä tyypilliset klorofyllipigmentit absorboivat tehokkaasti muita aallonpituusalueita kuten punaista ja vihreät aallonpituudet heijastuvat pigmentistä. Monet aineet ja materiaalit kytetään tunnistamaan niille ominaisen spektrin perusteella (Raita-Hakola 2022; Ortega ym. 2019), jolloin puhutaan sen spektraalisesta sormenjäljestä (*spectral fingerprint*) (Ortega ym. 2019). Tunnistamisen ja aineiden erottelukyvyn ansiosta kohteen, kuten vesimassan tai vesistön pohjan, spektristä on mahdollista poimia haluttuja ominaisuuksia ja tutkia niitä (Giardino ym. 2019).

Spektrikuvantamisen etu on sen kyky avata ihmissilmille maailma värien takana ja siten tunnistaa kohteen ominaisuuksia värejä selkeämmin. Spektrikuvantaminen on merkittävä työkalu muun muassa kaukokartoituksessa ja vesistöjen tutkimuksessa, vaikka se ei olekaan täydellinen siihen sekä yleisesti optiseen mittaamiseen liittyvien haasteiden vuoksi. Haasteita käsitellään tarkemmin myöhemmässä osiossa.

2.3 LiDAR ja muut optiset menetelmät

Värikuvakameroiden ja spektrikuvantimien ohella on laaja skaala muita optisia mittalaitteita, sensoreita ja menetelmiä. Valon polarisoitumisen hyödyntäminen (Yan ym. 2020) sekä magneetto-optinen sensori (Bulgarevich ym. 2020) ovat vain yksittäisiä esimerkkejä kehittyvästä kirjosta. Erilaiset menetelmät tuovat mahdollisuuden monipuolisemman optisen datan keräämiseksi. Seuraavaksi esitellään mahdollisena säteilyn lähteenä käytettävä laser eli valon vahvistaminen säteilyn stimuloitulla säteilyemissiolla (LASER, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Sen jälkeen kerrotaan laseria hyödyntävästä valotutkasta eli LiDARista.

Laser on säteilyä, jota on mahdollista mitata optisilla mittalaitteilla kuten LiDARilla. Laseria hyödyntämällä on mahdollista havainnoida pinnan lisäksi kohteen rakennetta, ja siksi se antaa optisen tutkimuksen sekä esimerkiksi vesistöjen kannalta mielekäästä tietoa. (Guanter ym. 2019)

LiDAR lähettää laserpulssin kohteeseen. Kun pulssi heijastuu takaisin kohteesta, laite laskee

etäisyyden kuluneen ajan perusteella. LiDARin yhdellä lähettämällä pulssilla on mahdollista kerätä tietoa useista kohteen kerroksista kerrallaan. Sekunnissa pulsseja voi olla satoja tuhansia, ja siten pulssien avulla on mahdollista muodostaa 3D-malli. LiDARia on mahdollista käyttää Maasta sekä avaruudesta käsin, tyypillisesti sitä käytetään ilmasta käsin. (Guanter ym. 2019) (Wang ja Menenti 2021) Lisäksi sitä käytetään veden alla (Yang, Xu ja Jia 2022). Laiteyhdistelmänä esimerkiksi hyperspektraalisella LiDAR-laitteella (HSL, *hyperspectral LiDAR*) on mahdollista kerätä kohteesta sekä spektraalinen tieto että säteen matkaimiseen kulunut aika. (Guanter ym. 2019)

LiDARia on mahdollista hyödyntää vesistöjen tutkimuksessa ilmasta esimerkiksi käsin jääpeitteen tutkimuksessa ja meritieteessä eli oseanografiassa (Wang ja Menenti 2021). Kyvystä saada tietoa kokonaisista rakenteista ja pintojen takana sijaitsevista kohteista on etua esimerkiksi puuston peittämällä katvealueilla (Kostadinov ym. 2019). Vedenalaisessa tutkimuksessa siitä on hyötyä esimerkiksi batymetriassa eli vesistön syvyyden mittaamisessa (Szafarczyk ja Toś 2023) ja paikantamisessa (Yang, Xu ja Jia 2022) sekä samanaikaisessa paikantamisessa ja kohdealueen kartoittamisessa (Debeunne ja Vivet 2020).

2.4 Erottelukyky

Spektraalisen erottelukykyyn lisäksi etenkin kaukokartoituksessa on otettava huomioon spatiaalinen (*spatial resolution*) ja ajallinen erottelukyky (*temporal resolution*) sekä kuvattavan alueen kattavuus (*swath*). Tarpeesta riippuen sopivaa erottelukykyä painotetaan enemmän ja siten valitaan tutkimuksen tai seurannan kannalta paras menetelmä.

Aktiivisten pikselien määrää sensorissa kutsutaan spatiaaliseksi erottelukyvyksi (*spatial resolution*). Spatiaalinen erottelukyky kertoo tarkkuuden, jolla kohde pystytään kuvantamaan. Tarkkuus voi olla esimerkiksi muutamasta metristä kymmeneen metriin ja se ilmenee kuvasta erotettavien yksityiskohtien määränä. Sensorin spatiaalinen erottelukyky on selvitetävissä GSD-arvosta (*Ground Sample Distance*) tai pikselin koosta. Suuri GSD-arvo tarkoittaa matalampaa kuvan spatiaalista erottelukykyä ja epätarkempaa kuvaa. Spatiaalinen ja spektraalinen erottelukyky rajoittavat tyypillisesti toisiaan. Siksi multispektrikuvantamalla on mahdollista tuottaa usein korkeamman spatiaalisen erottelukykyyn dataa kuin hyperspekt-

rikuvanatamalla. (Raita-Hakola 2022)

Veden kuvaaminen vaatii tiheän ajallisen toistuvuuden (*high temporal resolution*). Kaukokartoituksen tapauksessa tämä voi tarkoittaa sitä, että satelliitti kiertää Maan nopeammin ympäri tai samanlainen sensori on sijoitettu useaan satelliittiin, jolloin alue käydään ajan myötä useamman kerran läpi (Guanter ym. 2019). Paikallisten menetelmien tapauksessa laite saattaa olla esimerkiksi sijoitettu samaan paikkaan tai se saattaa kiertää toistuvasti pientä aluetta ympäri. Pohjan kartoituksessa ajallinen toistuvuus ei ole niin tärkeä kuin prosessien, kuten rehevöitymisen, seurannassa (Giardino ym. 2019).

Kattavuus puolestaan kertoo, kuinka laajaa aluetta laitteella on mahdollista kuvata (Emilien, Thomas ja Thomas 2021). Kaukokartoituslaitteilla on mahdollista kuvata kattaen koko Maan, kun taas paikallisten menetelmien kattavuus on rajoittunut.

2.5 Haasteita ja häiriöitä

Optisiin sensoreihin kohdistuu erilaisia häiriön lähteitä, jotka voivat johtua joko olosuhteiden haastavuudesta tai sensorin toiminnasta. Häiriöiden myötä sensori esimerkiksi vastaanottaa virheellisesti signaaleja, jotka eivät liity kuvannettavan kohteen spektriin (Raita-Hakola 2022). Häiriöiden vuoksi kuvadataa saatetaan korjata erilaisten algoritmien avulla.

Sensoriin kohdistuneen häiriön myötä sensori tuottaa signaalin ilman valoa. Esimerkiksi pimeän virran häiriö (*dark current noise*) johtuu lämmön vaikutuksesta. Fotonihäiriö (*photon noise*) johtuu puolestaan valosta ja valon fotonien kvanttimekaanisista ominaisuuksista. Lisäksi satunnainen häiriö (*temporal noise*) on monien häiriöiden yhdistelmä. (Raita-Hakola 2022)

Signaali-kohinasuhde (SNR, *signal-to-noise ratio*) riippuu aallonpituudesta, veden ainesosien pitoisuudesta, ilmakehästä ja kaukokartoitussensorien herkkydestä. Liian matala valaistustaso voi aiheuttaa matalan signaali-kohinasuhteen, vähentäen kuvan laatua ja lisäten tarvittavan laskennallisen datan korjaamisen määrää. Liika valo voi puolestaan aiheuttaa ylivallottumista, minkä vuoksi halutut ominaisuudet eivät näy kuvassa. (Raita-Hakola 2022)

Lopulta saadun spektrikuvan tulkinta ei ole välttämättä yksiselitteinen. Saman materiaalin

erilaiset variaatiot saattavat saada ne näyttämään eri materiaaleilta. Toisaalta spektraaliselta sormenjäljeltään samankaltaisten, mutta eri materiaalien erottaminen toisistaan ei ole aina selkeää. Spektraaliseen sormenjälkeen voi aiheutua häiriötä lisäksi esimerkiksi topografian eli Maan pintojen muotojen, varjojen tai ilmakehän muutosten vuoksi (Schowengerdt 2006). Vaihtelua tuovat myös aineiden sekoitukset ja niiden tunnistaminen oikein. (Ortega ym. 2019).

Häiriötä on mahdollista käsitellä erilaisten korjausalgoritmien avulla. Korjausalgoritmien tulee ottaa huomioon tapauskohtainen häiriö. Ilmakehä aiheuttaa erilaisen häiriön kuin veden pinnan välkähdykset tai optisesti matala rannikkoalue, jolloin pohja on nähtävissä pinnan yläpuolelta. Toisaalta myös valon taittuminen veden pinnassa on käsiteltävä taittumisindeksien avulla.

Korjausalgoritmien käyttö kerätyn datan käsittelyssä on tietyn mallin mukainen. Ennalta tiedettyjen parametrien ja kokemuksen perusteella tehdään yhteenveto tarvittavista menetelmistä. Aluksi hyperspektridatalle on mahdollista käyttää ennakkoprosessointialgoritmeja (*pre-processing algorithms*), minkä jälkeen dataa on mahdollista jalostaa edelleen erilaisten algoritmien avulla. Ennakkoprosessointi on kuitenkin merkittävin vaihe datan käsittelyssä (Ortega ym. 2019). Algoritmit käyttävät hyväkseen esimerkiksi ei-toivotun aineksen luontaisia optisia ominaisuuksia (IOP) eli aineesta tyypillisesti muodostuvaa spektriä. (Giardino ym. 2019). Tyypillisiä algoritmeja häiriöiden poistamisessa ovat Fourier-suodatus (*Fourier filtering*) sekä Savitzky-Golay-menetelmä. Ne, sekä monet muut menetelmät pyrkivät poissulkemaan aiemmin lueteltuja häiriöitä. Joitakin vaikutuksista on mahdollista mallintaa, mutta osaa ei. Silloin ne tulee ottaa huomioon tilastollisena vaihtelevuutena. (Schowengerdt 2006)

Ensin tarvitaan algoritmeja, jotka paljastavat saastuneita pikseleitä (pilvien, auringon välkähdyksien, syvyyden ynnä muun suhteen), jotta pikselit voidaan merkitä epäilyttäväksi. Lisäksi epävarmuudesta tulee luoda arvioita. Epävarmuuden arvioinnissa olisi hyvä saada verrokkiaineistoa erilaisista optisista vesityypeistä. Monimutkaisempien vesistöjen tapauksessa, joissa esimerkiksi verrokkinäytteitä vedestä tai saaduista spektreistä ei ole, saatetaan epävarmuutta arvioida simuloitun datan avulla. (Giardino ym. 2019)

3 Kaukokartoitus

Kaukokartoitus tarkoittaa satelliitti- ja ilmakuvien avulla tehtävää havainnointia (itämeri.fi, n.d.). Se kattaa joko rajatun alueen tai koko maapallon. Sen avulla on mahdollista tutkia ja seurata laajoilta alueilta esimerkiksi veden lämpötilaa tai kasviplanktonin määrää. Toisaalta kaukokartoittamalla on mahdollista selvittää alueittain vallitsevia eliöryhmiä. (Guanter ym. 2019)

Optiset kaukosensorijärjestelmät keräävät yleensä dataa spektrikuvantamalla, hyödyntäen joko Auringon tai mittalaitteen tuottamaa valoenergiaa (Estes, Kline ja Collins 2001). Tyypillinen sensori on Auringon valoa hyödyntävä spektrikuvantaja. Kaukokartoituksessa mittalaitteen ja kohteen välille jäävät partikkelit ja muun muassa veden pinnan heijastukset häiritsevät dataa. Siksi dataa tulee käsitellä esimerkiksi erilaisilla prosessointialgoritmeilla ennen sen hyödyntämistä.

Sensoreita on mahdollista sijoittaa Maata kiertävään satelliittiin tai ilmassa lentävään laitteeseen kuten lentokoneeseen tai miehittämättömään ilma-alukseen (UAV, *unmanned aerial vehicle*). Satelliitit toimivat hyvin säännöllisen, pitkäkestoisen ja samoja alueita kattavan kartoituksen tuottamisessa. Ne toimivat usein osana laajempaa ohjelmaa (*mission*), jolla on yhtenäinen päämäärä kuten kasviplanktonin tai jääpeitteen seuranta. Ilma-aluksilla on puolestaan mahdollista kerätä tarkkaa kaukokartoitusdataa kohteen läheltä, mutta alueen kattavuus on rajoittunut.

Seuraavaksi kerrotaan optisista sensoreista ja niiden kohtaamista hasteista kaukokartoituksen näkökulmasta. Sen jälkeen siirrytään avaruudesta ja ilmasta käsin toimiviin kaukokartoitusmenetelmiin. Lopuksi erilaisia kaukokartoitusmenetelmiä verrataan toisiinsa. Ennen siirtymää paikallisia menetelmiä käsittelevään lukuun kerrotaan merten väriä mittaavasta tutkimuksesta, joka hyödyntää pääasiassa kaukokartoitusta tutkimusmenetelmänä.

3.1 Kaukokartoituksen kohteet

Kaukokartoituksella on mahdollista kerätä kattavasti tietoa laajoista maailmanlaajuisista ilmiöistä, mutta toisaalta myös eliöstöstä karkealla tasolla. Ilmiöiden seuraantaa voivat olla jääpeitteen paksuuden seuranta tai aallonkorkeuksien mittaaminen. Eliöitä ei ole mahdollista yksilöidä, mutta niitä on mahdollista luokitella ryhmiin. (Guanter ym. 2019)

Spektrikuvantamisen avulla on mahdollista tunnistaa ja erotella kohdealueella esiintyviä eliöitä ja esimerkiksi pohjatyyppejä toisistaan. Kasviplanktonia on mahdollista tunnistaa ja jakaa toiminnallisiin tyyppisiin (*phytoplankton functional types*, PFT), joita ymmärtämällä on mahdollista lisätä tietoa muun muassa hiilen kierrosta ja haitallisten leväkukintojen esiintymisestä. Toisaalta kaukokartoittamalla on jo pitkään kartoitettu pohjatyyppejä ja pohjan eliöstöä (kuten mutaa, koralliriuttoja, meriheinää ja makrofyyttejä). Koralliriutoilla pohjalla elävät toiminnalliset ryhmät (BFT, *benthic functional types*, vastaavat PFT:tä) voidaan erottaa toisistaan ryhmissä esiintyvien pigmenttien avulla. Taksonien erottelun ja ryhmittelyn ansiosta kyetään esimerkiksi tunnistamaan vieraslajistoa muun eliöstön joukosta. (Giardino ym. 2019)

3.2 Optinen mittaaminen kaukokartoituksessa

Kaukokartoituksessa optisia sensoreita ovat tyypillisesti multi- ja hyperspektrikuvantimet sekä korkean resoluution värikamerat. Lisäksi käytössä voi olla infrapunapuhjaisia laitteita kuten LiDAR, jonka avulla on mahdollista päästä rakenteessa "pintaa syvemmälle". (Jamet ym. 2019)

Optinen kamera, pääasiassa hyperspektrikamera, on mahdollista asettaa kuvaamaan satelliittisekä toisaalta ilmakuvia valitulla skannaustavalla (Yi ym. 2021). Skannaustekniikka vaikuttaa esimerkiksi laitteen ja tuotetun kuvadatan ominaisuuksiin ja sopiva tekniikka valitaan käyttötavan mukaan. Spektrikuvantava laite voi olla joko piste- (*whisk broom*, "luuta") tai viivaskanneri (*push broom*, "harja") tai yhden aallonpituusalueen kerrallaan kuvaava kamera. (Raita-Hakola 2022) (Saari ym. 2009) Seuraavaksi tutustutaan piste- ja viivaskannauksen periaatteisiin.

Pisteskanteri käyttää peiliä heijastaakseen valoa yksittäiselle ilmaisimelle (*detector*). Peili "huiskii" luudan tavoin puolelta toiselle eteenpäin kuljetun matkan aikana keräten mittauksia yhdestä kuvan pikselistä kerrallaan. Viivaskannerissa puolestaan ilmaisimet on aseteltu riviin. Liikuttaessa eteenpäin, kuva otetaan kaistale kerrallaan ja kaikki kaistaleen pikselit mitataan samanaikaisesti. Toisin sanoen harjaskanneri on kuin menosuuntaan työnnettävä harja. Jos linjaan aseteltujen sensorien herkkyydet poikkeavat toisistaan, lopulliseen dataan saattaa muodostua raitoja. (Fowler 2014)

3.3 Kaukokartoitusmenetelmät - tekniikat ja alustat

Kaukokartoituksessa optisten laitteiden alustoina toimivat esimerkiksi avaruudessa operoivat satelliitit ja ilmassa ohjailtavat miehittämättömät ilma-alukset. Molempien osioiden päämäärä on tuoda ilmi laitteiden ominaisuuksien merkitystä kerättävän datan sekä erityisesti erilaisten erottelukykyjen kannalta. Lisäksi satelliitti-osiossa perehdytään erilaisiin satelliitteihin sekä siihen, miten satelliitteja käytetään kaukokartoitustoimintaan. Toisaalta ilmakehän käsittelyssä osiossa käsitellään lähinnä tuotettavaa kaukokartoitusdataa, sillä niitä ohjataan yleensä yksittäisten toimijoiden tarpeiden mukaan ilman laajempaa selitettävää toiminnallista rakennetta.

3.3.1 Kaukokartoitus avaruudesta

Kaukokartoitus avaruudesta ja ilmakehästä toteutetaan käytännössä satelliiteilla. Satelliittien etuna on niiden kattavuus ja mahdollisuus säännöllisen datan keräämiseen. Toisaalta satelliitit kiertävät annettua kiertorataansa ja esimerkiksi pilvipeite ja määrätty katsomiskulma rajoittavat satelliitteja. (Emilien, Thomas ja Thomas 2021) Satelliittien tarkastelu aloitetaan erilaisista satelliittityypeistä ja niiden ominaisuuksista, niihin kiinnitettävistä sensoreista sekä yhden satelliitin ohjelmista (*engl. mission*). Sen jälkeen siirrytään useamman satelliitin yhdistelmän satelliittiohjelmiin. Lopulta kerrotaan satelliittien kohtaamista haasteista kaukokartoituksessa. Käytännön esimerkit rakentavat kerronnan keskeisen osan.

Satelliitit on mahdollista jakaa erilaisiin tyyppeihin: maailmanlaajuisen seurannan (*global monitoring*, GM), ympäristöllisen seurannan (*environmental monitoring*, EM) sekä nano- ja

siviilisatelliitteihin (*civilian-satellites*). Ne eroavat toisistaan esimerkiksi koon, käyttöiän ja kiertoradan korkeuden mukaan. Nämä ominaisuudet puolestaan vaikuttavat kerättävän datan laatuun ja sen saatavuuden ajalliseen tiheyteen. Maailmanlaajuisen seurannan satelliittien (esimerkiksi satelliitti Terra MODIS) kiertorata on kauimpana, ja niiden avulla tehdyssä seurannassa on korkea ajallinen toistuvuus (*temporal frequency*), jolloin dataa on saatavilla päivittäin. Sen sijaan maailmanlaajuisen seurannan satelliittien spatiaalinen erottelukyky eli kuvannettujen alueiden tarkkuus on karkea. Ympäristöllisen seurannan satelliiteilla (esimerkiksi satelliitit Landsat ja Sentinel-2) on tasapainottuneet erottelukyvut: ne tarjoavat ajallisesti tiheästi dataa (muutamana päivän sisällä) korkealla spatiaalisella ja spektraalisella erottelukyvillä. Matalan kiertoradan nanosatelliitit tarjoavat päivittäistä maailmanlaajuista materiaalia korkealla spatiaalisella erottelukyvillä, mutta huonolla datan laadulla, joka ei sovellu kaikkiin käyttökohteisiin. Matalan kiertoradan siviilisatelliitit tarjoavat dataa todella korkealla spatiaalisella erottelukyvillä, mutta matalalla spektraalisella erottelukyvillä, eikä se kata koko maapalloa tai tarjoa dataa nopealla aikavälillä. (Emilien, Thomas ja Thomas 2021)

Satelliitteihin on kiinnitetty erilaisia sensoreita, joilla data kerätään. Satelliiteissa on hyödynnetty sekä hyperspektri- että multispektrisensoreita sekä muita sopivia sensoreita. (Itten ym. 2008), (Guanter ym. 2019). Esimerkiksi Environmental Satellite (Envisat) -satelliittiin kiinnitetty MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*) oli merien kuvantamiseen suunniteltu satelliittipohjainen spektrometri (2002-2012). (ESA 2023). MERIS keräsi tietoja muun muassa kasviplanktonista, liuenneesta orgaanisesta aineksesta (CDOM, *colored dissolved organic matter*) sekä pohjan ominaisuuksista (TSM, *total suspended matter*). MERISin ohjelmoitavuuden ansiosta saatettiin määrittää esimerkiksi klorofylli-a:n kaista, jolloin sen esiintyvyyden määrittäminen oli mahdollista sameistakin vesistä (Giardino ym. 2019). Akvaattisten ekosysteemien tutkimuksessa on hyödynnetty suuren spatiaalisen erottelukyvyn satelliittisensoreita, kuten Rapide-Eye tai WorldView-3. Niitä on mahdollista käyttää spatiaalisesti heterogeenisten, eli vaihtelevien alueiden sovelluksissa. Tällaisia ovat esimerkiksi vesistöjen pohja-alueet ja niiden kartoittaminen (Giardino ym. 2019)

Satelliitit voivat toimia omina yksiköinä. ICESat-2 (*Ice, Cloud and land Elevation Satellite*) on yhden satelliitin ohjelma. ICESat-2-satelliittiin on kiinnitetty ATLAS-laite (*Ad-*

vanced Topographic Laser Altimeter System), joka mittaa LiDARin avulla tarkkoja korkeuden muutoksia jäätiköissä. Korkeuden muutokset puolestaan vaikuttavat merenpinnan nousuun (Guanter ym. 2019). Kiertäessään napajäätiköiden välillä ICESat-2 kykenee myös muun muassa havainnoimaan merenpohjan pinnanmuotoja 30 metrin syvyyteen asti kirkkaissa vesistöissä sekä keräämään dataa aaltojen korkeudesta. Mittaukset lumen ja jokien korkeudesta voivat auttaa paikallisia valtioita varautumaan tulviin ja kuivuuteen. ICESat-2:lla on tehty myös havaintoja mahdollisista kasviplanktonlöydöistä jään alla. (NASA 2018)

Satelliitit kuuluvat kuitenkin yleensä johonkin ohjelmaan, jolla on yhtenäinen päämäärä, kuten vesistön syvyyden tai klorofylli-a:n mittaaminen. Ohjelman tavoitteen saavuttamiseksi käytetään tarvittava määrä satelliitteja, joihin on kohdetta ajatellen sopivalla tavalla aseteltu erilaisia sensoreita. (Emilien, Thomas ja Thomas 2021) Ohjelmat voivat puolestaan muodostaa laajempia ohjelmien sarjoja. Yhdysvaltain avaruusjärjestöllä (NASA) on esimerkiksi Landsat- ja Euroopan avaruusjärjestöllä (ESA) Sentinel-ohjelmien sarjat. Sarjaan kuuluu useita yksittäisiä ohjelmia, kuten Sentinel-sarjaan kuuluva SENTINEL-3. SENTINEL-3 on mereen ja maahan keskittyvä ohjelma, joka koostuu kolmesta satelliitista (SENTINEL-3A, SENTINEL-3B and SENTINEL-3C). SENTINEL-3 käyttää tehtävässään erilaisia sensoreita, kuten viivaskanneri-spektrimetri OLCIa (*Ocean and Land Colour Instrument*) ja SRAL-tutkaa (*SAR Radar Altimeter*) (ESA 2021b) (ESA 2021a).

Satelliittien käytössä on myös rajoitteita ja haasteita. Satelliitit eivät jousta kiertoradoistaan vaan kulkevat yleisesti vain ennalta määrättyä reittiä pitkin. Toisaalta kuvauskulma on myös usein vakio. Esimerkiksi ICESat-2-satelliittiin on kuitenkin poikkeuksellisesti liitetty mekanismi, jolla satelliitin orientaatiota eli kuvauskulmaa avaruudessa on mahdollista muuttaa (NASA 2019). Toisaalta satelliiteilla kuvanneittaessa on välissä jatkuvasti esimerkiksi ilmakehä, joka on otettava huomioon datan korjaamisessa. Jatkuvan korjattavan häiriön ohella satunnaisia häiriöitä ja haasteita aiheuttavat vaihtelevat säätilat, auringon tulokulma, ilma-osaasteet sekä muut ympäristön muuttuvat tekijät. Lopulta eri tyyppisten satelliittien ominaisuuksien vuoksi esimerkiksi spatiaalinen ja spektraalinen erottelukyky voivat vaihdella.

3.3.2 Kaukokartoitus ilmasta

Ilmasta käsin on mahdollista kaukokartoittaa esimerkiksi lentokoneen tai miehittämättömän ilma-aluksen (UAV, *unmanned aerial vehicle*) avulla. Keskityn tässä osiossa erityisesti miehittämättömiin ilma-aluksiin. Satelliitista toteutettavasta kaukokartoituksesta poiketen, ilmasta toteutettava kaukokartoitus kattaa rajoittuneemman alueen. Toisaalta ilmasta kuvattaessa ei tarvitse ottaa huomioon väliin jäävää ilmakehää, laite on helpohkosti ohjailtavissa ja sillä on mahdollista tuottaa tarkemman erottelukyvyn dataa nopealla aikavälillä.

Miehittämättömien ilma-aluksien vahvuuksia ovat niiden ultraspatiaalinen resoluutio (senttimetreistä millimetreihin) sekä joustavuus datan keruun ja liikuteltavuuden suhteen. Pilvien pysytellessä miehittämättömän ilma-aluksen yläpuolella, ne eivät ole enää häiriötekijä. Miehittämättömään ilma-alukseen sijoitettava sensori, kuvauskulmat, kuvaustiheys ja ajankohdat ovat valittavissa. Miehittämättömällä ilma-aluksella on mahdollista rajata haluttu kohde, mahdollisesti kohdetta ympäröiviltä häiritseviltä alueilta. Ajankohdan valinta voi olla tärkeä erinäisissä hydrologisissa ja biologisissa sovelluksissa. Toisaalta miehittämättömät ilma-alukset kattavat pienemmän alueen. Myös maiden lainsäädännöt rajoittavat ilma-alusten käytettävyyttä. (Emilien, Thomas ja Thomas 2021)

Ilmasta kuvattavat spektrikuvat (*Airborne imaging spectrometry*) kykenevät spatiaalisesti ja spektraalisesti satelliitteja tarkempiin tuloksiin ja toisaalta ne ovat työkalu satelliittitoiminnan tukemisessa. Korkean resoluution ilmasta käytettävät hyperspektraaliset sensorit (mm. AVIRIS; AISA; HyMAP; PRISM; APEX) ovat hyviä kartoitustyökaluja. Niillä on kyetty inventoimaan esimerkiksi koralleja, meriheinää ja suuria levä- ja vesikasveja. Ilmasta kuvaamalla on kyetty myös tekemään alustavia testejä satelliittipohjaisten järjestelmien käyttöä varten. APEXillä tuotettua dataa on esimerkiksi käytetty määrittämään ja validoimaan algoritmeja, joilla kyetään kartoittamaan kasviplanktonia eutrofisissa eli rehevöityneissä järvissä tai toisaalta kehitetään ilmakehän huomioon ottavia keinoja pienten eutrofisten järvien yläpuolella. (Giardino ym. 2019)

Hyönteisten optisen vuon havainnoinnista (*optic flow sensing*) on inspiroiduttu miehittämättömien ilma-alusten itsenäisen esteiden väistely- ja navigointijärjestelmän kehittämisessä. Esimerkiksi GPS:n ulottumattomilla, matalan valaistustason alueilla tai rakennusten sisällä

tämä on merkittävä optinen menetelmä esteiden väistelyn kannalta. Se kerää jatkuvaa optista tietoa ympäristöstä ja käyttää sitä ympäristön esteiden havaitsemiseen ja väistelemiseen. (Bogue 2019)

3.4 Vaihtelunlähteet

Satelliitin tai ilma-aluksen ja kuvannettavan kohteen välille jäävä ilmakehä, vedenpinta sekä veden ominaisuudet muun muassa aiheuttavat haasteita kaukokartoituksessa käytettäville optisille sensoreille. Haasteet riippuvat myös käytettävissä olevasta aallonpituusalueesta. Dataa, jossa on häiriöitä, on mahdollista korjata, kuten yleisessä optisia sensoreita käsittelevässä luvussa todettiin.

Ensiksi avaruudesta käsin kuvannettaessa haasteena on valon heijastuminen ilmakehästä. Lisäksi satunnaiset ilmansaasteet tekevät ilmakehän mallintamisesta ja siten sen vaikutusten poislaskemisesta vaikeaa. (Giardino ym. 2019). Toiseksi kaukokartoituksessa yleisesti haasteena on valon heijastuminen veden pinnasta (Giardino ym. 2019). Kolmanneksi vesistöihin itseensä on yleensä sekoittunut paljon erilaista ainesta. Jos vedessä on hallitseva elementti, kuten kasviplankton tai liuennut orgaaninen aines, se voi peittää alleen halutun kohteen vaikutuksen spektrikuvassa, jolloin halutun kohteen määrää voi olla vaikea laskea kuvausta vaaditulla tarkkuustasolla (Giardino ym. 2019). Vedessä vallitsee myös bioluminesenssia eli eliöiden tuottamaa valoa sekä sirontaa aiheuttavaa ainesta (Giardino ym. 2019). Toisinsanoen, vedessä on takaisin heijastuvaan valoon vaikuttavia tekijöitä, jotka voivat häiritä kuvannettavan kohteen spektrin havaitsemista. Lisäksi eri aallonpituusalueiden sähkömagneettinen säteily etenee vesipatsaassa eri syvyyksille. Tällöin datakuutio koostuu eri syvyyksiltä saaduista tuloksista, jolloin saatu kuva ei ole yhtenäinen tai yksiselitteinen. (Giardino ym. 2019). Neljänneksi rannikon ja matalien vesistöjen eli optisesti matalien vesien sedimentin vaikutus vaikeuttaa edelleen haluttujen muuttujien selvittämistä satelliittidatasta (Giardino ym. 2019). Lisäksi käsiteltävä häiriö spektrikuvantamisessa riippuu käytetystä skannaustavasta (Aiazzi ym. 2006).

Näkyvillä ja infrapuna-alueilla toimivat sensorit ovat herkkiä säälle ja pilvipeitteelle. Satelliitin kulkiessa kiinnostuksen kohteena olevan alueen ylitse, saattaa esimerkiksi pilvipeite

verhota aluetta. Synteettisen apertuurin tutka eli suuren laskennallisen läpimitan tutka (SAR, *synthetic aperture radar*) kykenee tuottamaan kuvia vastaavaa materiaalia myös verhon lävitse, mutta ne eivät ole jatkuvasti käytettävissä. (Giardino ym. 2019)

Bio-optisessa mallintamisessa yhdistetään nähtävät eli optiset ominaisuudet vastaaviin biologisiin yhdisteisiin (Giardino ym. 2019). Optiset ominaisuudet, jotka riippuvat ainoastaan materiaalista riippumatta vallitsevasta valaistuksesta, ovat luontaisia optisia ominaisuuksia (*inherent optical property*, IOP). Tällaisiin lukeutuu esimerkiksi absorptiokerroin. (Giardino ym. 2019).

Optiset ominaisuudet, jotka riippuvat luontaisten optisten ominaisuuksien lisäksi valaistuksesta ovat näennäisiä optisia ominaisuuksia (*apparent optical property*, AOP)). Näennäisesti optisiin ominaisuuksiin kuuluvat esimerkiksi valon pystysuuntainen vaimenemiskerroin vesipatsaassa sekä säteilyn heijastumisen voimakkuus.

Pohjan alueita, joista valo heijastuu, kutsutaan optisesti mataliksi. Pohjan alueet, joihin heijastuva valo ei huomattavasti vaikuta, ovat optisesti syviä. Tähän ominaisuuteen vaikuttaa kuitenkin valaistusolosuhteet, joten kyseessä on näennäinen optinen ominaisuus (AOP) (Giardino ym. 2019).

Käytännön esimerkki Auringon välkähdyksen veden pinnassa on yksi huomioon otettava tekijä vesistöjä kuvannettaessa. Välkähdyksen on mahdollista ottaa huomioon kahden eri lähestymistavan kautta. Ensinnäkin tilastoitujen merenpintamallien avulla pyritään ennakoimaan välkähdyksiä, sensorin asentoa ja tuulidataa (Kay, Hedley ja Lavender 2009). Toisekseen tarkemman tuloksen saamiseksi on mahdollista käyttää lähi-infrapuna-aallonpituus (NIR) apuna. Sen avulla on mahdollista arvioida, paljonko saadussa signaalissa on välkähdyksiä (Kay, Hedley ja Lavender 2009). Välkähdyksen virheen tunnistamiseksi tarvitaan vähintään yksi lähi-infrapuna-aallonpituusalue heijastuu vedestä vain vähän, jolloin ilmakehäkorjauksen jälkeen jäävän lähi-infrapunasäteilyn täytyy johtua välkähdyksestä (Kay, Hedley ja Lavender 2009). Tarkempaa metodologia on mahdollista käyttää batymetriassa (*bathymetry*) eli veden syvyyden sekä toisaalta pohjan muotojen mittaamisessa ((NOAA, n.d.)) tai elinympäristön luokittelussa. Oletus siitä, ettei lähi-infrapuna heijastu vedestä, johtaa kuitenkin siihen, ettei menetelmä

toimi matalissa tai sameissa vesissä tai alueilla, joissa veden pinnalle ulottuu kasvillisuutta (Kay, Hedley ja Lavender 2009).

3.5 Kaukokartoituskeinojen vertailu ja yhteistoiminta

Satelliitien ja miehittämättömien ilma-alusten avulla on mahdollista koostaa esimerkiksi spatiaalisen ja spektraalisen erottelukyvyn tai kattavuuden kannalta erilaista dataa. Myös esimerkiksi kaukokartoituksessa käytettävillä optisilla sensoreilla on hyvät ja huonot puolensa.

Miehittämättömät ilma-alukset ovat alueellisesti rajattuja vaihtoehtoja. Sen sijaan satelliitien avulla on mahdollista kerätä maailmanlaajuisesti kattavaa jatkuvaa seurantadataa. Toisaalta miehittämätön ilma-alus kykenee kulkemaan vaikeakulkuisille tai satelliittikuvannuksessa katveeseen jääville alueille. (Giardino ym. 2019) Yleisesti erilaisten häiriötekijöiden määrä vaikuttaa olevan ilmakuvauksessa satelliittikuvantamista vähäisempi.

Hyperspektrikameroita käytetään multispektrikameroita enemmän. Pohjavyöhykettä (esimerkiksi pohjamateriaali, koralliriutat, makrofyytit) kuvannetaan tyypillisesti multispektrikameroilla. Multispektrikamerat eivät tosin kykene erottelemaan toisistaan lajeja, joilla on samankaltaiset spektraaliset ominaisuudet. Lisäksi ne eivät tunnista tarkasti prosesseja. Esimerkiksi multispektrikuvantajien kyky kartoittaa koralliriuttojen terveydentilaa voi olla rajoittuneempi kuin hyperspektrikuvantajilla. Sen sijaan esimerkiksi ilmasta käsin kuvantavilla hyperspektrikameroilla on sekä korkea spatiaalinen että spektrinen resoluutio. Sen vuoksi niitä on käytetty pohjalla elävien yhteyttävien organismien määrittämisessä ja laskemisessa (mm. makrofyytit, korallit) multispektrikameroiden sijaan (Guanter ym. 2019). Lisäksi avaruudesta kuvannettaessa ilmakehän, vedenpinnan sekä veden ominaisuuksien aiheuttaman jatkuvan häiriön vuoksi poisluettavia aallonpituusalueita on useita. Siksi kuvantamismenetelmän kyky kuvantaa mahdollisimman paljon aallonpituusalueita on eduksi - hyperspektrikamera toimii siis multispektrikameraa paremmin tässä tehtävässä.

Menetelmiä on välttämätöntä yhdistellä, jos kaivataan useampia ominaisuuksia. Satelliitit antavat mahdollisuuden seurata spatiaalista ja ajallista yleiskuvaa, miehittämätön ilma-alus puolestaan tarjoaa yksityiskohdat tuotettuun dataan. Spektrikuvien ohella esimerkiksi ilma-alusten värikuvat täydentävät kokonaisuutta. (Emilien, Thomas ja Thomas 2021) Toi-

saalta esimerkiksi LiDAR vaikuttaa lupaavalta menetelmältä tulevaisuuden kaukokartoituksessa, tuoden syvällisempää ja entistä tarkempaa tietoa kuvannettavasta kohteesta (Jamet ym. 2019).

Satelliittidata on toisaalta myös mahdollista kalibroida keräämällä miehittämättömällä ilma-aluksella spektrikuvantamalla arvoja esimerkiksi biofyysisistä parametreista kuten klorofyllimäärästä. Mallin kalibrointia on myös spektraalisen sormenjäljen mallintaminen. Tuolloin tarvitaan referenssidataa lopun datan kalibroimiseen. (Emilien, Thomas ja Thomas 2021)

Aina yhdistäminen ei ole kuitenkaan mutkatonta, muuttuvien olosuhteiden, kuvakulman ja muiden tekijöiden vuoksi. Ne tekevät eri tasoilla otetuista kuvista erilaisia ja siten vaikeammin yhdisteltäviä (Emilien, Thomas ja Thomas 2021), mutta siitä huolimatta yhdistämiseen panostaminen voisi antaa paljon enemmän takaisin. Lisäksi kehittyneet neuroverkko- ja koneoppimismenetelmät antavat mahdollisuuden yhdistää entistä paremmin dataa toisiinsa (Emilien, Thomas ja Thomas 2021).

3.6 Konkreettinen tutkimusmenetelmä: Merten väriä mittaava tutkimus (OC)

Merten väriä mittaava tutkimus (OC, *Ocean Color*) on tutkimuksen muoto, joka kerää tietoa meristä perustuen niistä kerättävään väritietoon. Värien perusteella on mahdollista tulkita vesistön ominaisuuksia, esimerkiksi klorofyllipigmenttien konsentraatiota ja siten muuta vesistön toimintaa. Merten väriä mittaava tutkimus käyttää pääasiassa avaruuteen sijoitettuja optisia sensoreita mutta myös ilma-aluksiin kiinnitettyjä ja paikan päällä toimivia sensoreita datan keräämiseksi.

Tutkimus on määriteltävissä merten väriä mittaavaksi tutkimukseksi kuvannettavan kohteen mukaan. Kaukokartoituksessa kasviplanktonin kuvantaminen on keskeistä, koska sen biomassassa vesistöissä ilmentää vesiekosysteemin tilaa. Kasviplankton on myös merten väriä mittaavassa tutkimuksessa havainnollistettava tärkein parametri.

Merten väriä mittaavassa tutkimuksessa käytettäviä aallonpituusalueita ovat lähi-infrapuna (NIR) ja fotosynteettisesti aktiivinen säteily (PAR, *photosynthetically active radiation*, aal-

lonpituusalue 400-700 nm), joka tarkoittaa kasvien fotosynteesiin eli yhteyttämiseen käyttämää valon spektrialuetta. (Guanter ym. 2019)

Merten väri riippuu siitä, miten valo reagoi veteen sekoittuneen aineksen kanssa. Valo voi esimerkiksi absorboitua tai sirota aineksesta. Veden väriin vaikuttavaan ainekseen lukeutuvat muun muassa liuenneet orgaaniset aineet (DOM), kasviplankton ja sen sisällään pitämä klorofylli-a ja epäorgaaninen aines. Tunnistamalla ja mittaamalla klorofylli-a:n määrää, on mahdollista kerätä tietoa kasviplanktonin esiintyvyydestä ja siten vesistön tilasta. Lisäksi väritietoja on käytetty esimerkiksi haitallisten leväkukintojen havaitsemiseen. (Jamet ym. 2019)

Merten väriä mittaavalla tutkimuksella viitataan myös merten väriä mittaaviin sensoreihin. Niiden toiminta perustuu valon spektrin havainnointiin eli spektroskopiaan. Sensori voi sijaita satelliitissa, lentokoneessa tai miehittämättömässä ilma-aluksessa. Toisaalta sensorit voi sijaita laivassa tai vedessä.

Satelliitteihin sijoitettuja merten väriä mittaavia sensoreita ovat esimerkiksi MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) ja VIIRS (*Visible and Infrared Imager Suite*). Ilmasta meren väriä kuvantavia sensoreita ovat esimerkiksi AVIRIS, AOCI, PRISM. Maan päällä esimerkiksi tutkimusaluksille ja poijuille sijoitetut sensorit tekevät mittauksia satelliittidatan kalibrointia ja todentamista varten. MOBY-poiju (MLML, Moss Landing Marine Laboratories, USA) on esimerkiksi paikan päällä käytettävästä sensorista.

4 Vedenalainen kuvantaminen

Kaukokartoituslaitteista poiketen paikallisesti veden pinnalla ja pinnan alla toimivat laitteet kykenevät tuottamaan suoraan kohteesta kaukokartoitukseen verrattuna tarkkaa ja vähemmän häiriöaltista dataa. Lisäksi pinnan alle vietävät laitteet kykenevät keräämään optista dataa alueilta, jotka ovat pinnalta lähetettävän valon ulottumattomissa. Toisaalta vesi aiheuttaa erilaisia haasteita sekä esimerkiksi näkyvyyden (muun muassa veden epäpuhtaudet) että laitteelle kohdistuvan rasitteen (muun muassa paine) myötä. (Naser, Rashid ja Fortuna 2021)

Paikallisten optisten laitteiden käyttökohteita ovat esimerkiksi erilaiset kartoittamistehtävät, kuten merenpohjan batymetria ja vedenalaisten kuumavesilähteiden paikantaminen sekä eliöiden paikallinen seuraaminen. Lisäksi paikallisia laitteita käytetään kaukokartoitusjärjestelmien käyttöön tarvittavan kalibrointidatan keräämiseen. (Amani ym. 2022)

Vedessä toimivissa laitteissa käytettäviin optisiin sensoreihin lukeutuvat esimerkiksi spektri- ja värikuvakamerat sekä lasermittausjärjestelmät. Optisten sensorien lisäksi laitteeseen on tyypillisesti kiinnitetty suoraan veden ominaisuuksia mittaavia sensoreita sekä esimerkiksi kaikuluotaimia (kuten monisäteinen kaikuluotain tai viistokaikuluotain), joiden avulla on tyypillistä muodostaa 3D-malleja vesistöistä. Lisäksi laitteessa voi olla operoiva käsi tai vesinäytteitä keräävä osa. Veden pinnan alla toimivissa ohjattavissa (ROV) laitteissa voi olla työkaluja eliöiden, vedenalaisten kuumavesilähteiden nesteiden ja kivinäytteiden keräämiseen. (Turchik ym. 2015)

Vedessä toimivat laitteet ovat jaoteltavissa miehitettyihin ja miehittämättömiin laitteisiin. Katsauksessa keskitytään miehittämättömiin laitteisiin, jotka puolestaan ovat jaoteltavissa joko etäohjattaviin laitteisiin (ROV, *Remote Operating Vehicle*) tai itsenäisiin vedenalaisiin laitteisiin (AUV, *Autonomous Underwater Vehicle*). Nimiensä mukaisesti etäohjattavat laitteet tarvitsevat laitteen ohjaajan, kun taas itsenäiset vedenalaiset laitteet kykenevät toimimaan itsenäisesti ilman samanaikaista ohjaamista (Aguzzi ym. 2021). Itsenäisyys ja sukelluksen pituus vaikuttavat esimerkiksi tutkittavan kohteen ajallisesti toistuvan seurannan mahdollisuuksiin (*temporal resolution*). Veden alla toimivat laitteet on edelleen jaoteltavissa esimerkiksi toimintamekanismin tai rakenteen mukaan (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson

2017) kuten tässä katsauksessa esimerkiksi biomiimiset ja toisaalta sylinterin muotoiset robotit on eroteltu toisistaan. Robotit, joita ei ole suunniteltu vesistöjen tutkimiseen tai kartoittamiseen, vaan esimerkiksi arkeologiseen toimintaan, on rajattu katsauksen ulkopuolelle.

Paikan päältä vedestä saatua hyperpektrietoa on käytetty täydentämään kaukokartoituksella koottua spektrietoa. Siten on ollut mahdollista koota esimerkiksi viitetietoja, kalibroida algoritmejä alueelle sopivaksi tai ylipäättään tulkita kaukokartoituksessa saatua materiaalia (Giardino ym. 2019).

Käytännössä erityisesti autonomiset laivoihin perustuvat järjestelmät antavat jatkuvaa paikallista verrokkitietoa kentältä sekä vedestä että myös ilmasta. Monesti lisäksi mukana on lämpötilaa tai turbiditeettia mittaavia sensoreita (Giardino ym. 2019)

4.1 Optiset sensorit paikallisessa tutkimuksessa

Paikallisessa tutkimuksessa saatetaan käyttää esimerkiksi tarkkaa tai matalan valaistuksen värikamerajärjestelmää, spektrikameraa tai lasermittausjärjestelmää (Doya ym. 2017). Paikallisissa järjestelmissä on tyypillisesti mukana myös muita sensoreita, jotka mittaavat esimerkiksi lämpötilaa, klorofyllin fluoresenssiä, nopeutta tai liuennutta happea (Turchik ym. 2015). Toisaalta monissa vedenalaisissa laitteissa pääasiallinen sensori oli optisesta sensorista poiketen kaikuluotain. Lisäksi esimerkiksi optisia sensoreita on mahdollista hyödyntää vedenalaisen laitteen navigoinnissa ja esteiden väistelemisessä, mikä on välttämätöntä automaattisesti veden alla toimivalle laitteelle (Cong ym. 2021). Kvantajan täytyy yleensä sijaita noin 1 - 5 metrin päässä kuvannettavasta kohteesta, mutta myös kymmenen metrin etäisyys on mahdollinen (Liu ym. 2020).

Optiset kaukokartoitusmenetelmät rajoittuvat tyypillisesti auringonvalon tavoittamiin syvyyksiin. Niiden sijaan vedenalaisten laitteiden ansiosta on mahdollista tutkia myös optisesti syviä alueita. Vedenalaiset optiset järjestelmät kykenevät toimimaan matalissa vesissä passiivisesti, auringon valon varassa. Syvemmillä alueilla aktiivinen valonlähde on välttämätön, jolloin veden alla toimivat optiset sensorijärjestelmät käyttävät omaa valonlähdettä eli ne ovat aktiivisia sensorijärjestelmiä. Valonlähteenä toimivat esimerkiksi halogeenilamput, LEDit ja laserit. LEDit voivat esimerkiksi olla säädettäviä, jolloin valaistus koostuu eri aallonpituuk-

sien LEDien yhdistelmästä. Valonlähteellä tulee olla esimerkiksi spektrikuvantamiseen sopiva laaja spektraalinen alue ja riittävä intensiteetti. Etenkin lähi-infrapunan intensiteetti tulee voimistua, sillä vesi absorboi eli imee itseensä voimakkaasti tätä aluetta. Valon tulee olla myös tasaisesti kohdistettu pohjalle, sillä varjot ynnä muut vastaavat eroavaisuudet eivät saa aiheuttaa poikkeamia datassa. Valonlähteen lisäksi laitteissa on usein reflektoreita eli peilejä, jotka ohjaavat valon kuvauskohteeseen. Niiden ansiosta valo esimerkiksi jakautuu tasaisesti näkymässä. (Liu ym. 2020) (Institution 2023a) (Turchik ym. 2015)

Vedenalaisella hyperspektrikuvantajalla (UHI, *Underwater Hyperspectral Imager*) on korkea spatiaalinen ja spektraalinen erottelukyky ja se kykenee tunnistamaan kohteita tarkasti. Käytettyjä multispektrijärjestelmiä on ollut esimerkiksi matalan valaistustason multispektrikuvantaja (LUMIS, *low-light-level underwater multispectral imaging system*), jonka avulla tutkittiin merieliöiden fluoresenssia. Toisaalta on ollut multispektripohjainen kuvantaja, jolla on seurattu ja luokiteltu automaattisesti koralliriuttoja. Esimerkiksi spektrometrillä ja värikuvakameralla kerättyä dataa on myös mahdollista yhdistellä, tuottaen monipuolisempaa dataa. (Liu ym. 2020)

Vedenalaiset hyperspektrikuvantajat laajemman tason kartoitusjärjestelmänä on yleensä suunniteltu skannausjärjestelmäksi. Skannausjärjestelmiin kuuluu esimerkiksi aiemmissa luvuissa esille nostettujen kaltaisia vedenalaisia hyperspektri-viivaskannerijärjestelmiä (*push-broom underwater hyperspectral imagers*) sekä koko alueen kerralla kuvaavia järjestelmiä (*snapshot*). (Liu ym. 2020) Kameroiden sijoittelulla on myös mahdollista esimerkiksi saavuttaa laaja näkyvyys, jolloin ympäristöstä on mahdollista saada kokonainen näkymä ilman tarvetta kääntä.

Optisen sensorin sijoittelulla erilaisiin alustoihin on monipuolisia vaihtoehtoja robottien ohel- la. Koralliriuttojen ja meriheinän seurannassa on käytetty esimerkiksi sukeltajan käyttämää kuvantajaa sekä laivalla hinattavaa järjestelmää. (Liu ym. 2020)

Vesi voi aiheuttaa kuvan vääristymisen. Se esimerkiksi vaimentaa säteilyn aallonpituusalueita aallonpituusalueesta riippuen, vaimentaen esimerkiksi voimakkaammin pitkien aallonpi- tuuksien alueita kuten punaista ja infrapuna. Valo saattaa myös asettua epätasaisesti koh- teeseen ja aiheuttaa esimerkiksi varjoja. Vedessä voi ilmetä muun muassa fluoresenssin ai-

heuttamaaa "valosaastetta". Lisäksi etenkin rannikoiden läheisyydessä tulee ottaa huomioon klorofyllin ja värillinen liuenneen orgaanisen aineksen (CDOM) vaikutus. Myös muut liuenneet yhdisteet ja hiukkaset vaikuttavat optiseen sirontaan. (Liu ym. 2020)

Muiden laitteeseen kiinnitettyjen sensorien tehtävänä on auttaa optisen datan kalibroinnissa ja korjaamisessa. Nämä muut sensorit voivat mitata veden optisia ominaisuuksia kuten valon vaimenemista, sirontaa ja värillisen liuenneen orgaanisen aineksen vaikutusta. Esimerkiksi värillisen liuenneen orgaanisen aineksen vaikutus on mahdollista mitata fluoresenssisensorilla. Lisäksi vedenalaisen kuvaamisen aikana laitteen korkeus, asento ja nopeus on mahdollista mitata. Sensorien keräämän ympäristö- ja laitetiedon avulla on mahdollista muodostaa muun muassa kertoimia, joiden avulla datan sisältämiä virheitä voidaan minimoida. (Liu ym. 2020)

4.2 Paikallisen tutkimuksen tekniikat

Paikalliseen tutkimukseen käytetyt laitteet soveltuvat tarkkailuun ja kartoittamiseen sekä näytteiden keruuseen merten avainominaisuuksista. Laitteiden mukana voi olla paljon sensoreita, joiden keräämä data on mahdollista yhdistää. Paikallisten tutkimuslaitteiden kuvantamisen yleisiä kohteita ovat vesistö sekä sen pohja ja eliöstö. (Naser, Rashid ja Fortuna 2021)

Navigointi ja paikannus on merkittävää paikallisten laitteiden datan keruun kannalta, jotta kerätty paikallinen tieto osataan yhdistää oikeaan pisteeseen. Paikalliset laitteet käyttävät esimerkiksi inertiaalinavigointia ja GPS:sää paikantamiseen. Eliöt käyttävät vastaavasti apunaan visuaalisia merkkejä, magneettikenttiä, hajuaistia, taivaankappaleiden sijaintia ja polarisoitunutta valoa suunnistamisessa (Bogue 2019). Vedenalaisessa paikantamisessa onkin kokeiltu polarisaatioherkkää kuvantajaa. (Bogue 2019) Osoitettiin, että vedenalaisia polarisaatiokulmia voi käyttää maailmanlaajuisen sijainnin määrittämisessä, ja siten menetelmää olisi mahdollista käyttää ympäristön seurannassa ja muun muassa batymetriassa.

Kuvantamisen kattavuuden kannalta on olennaista, että laite kykenee sukeltamaan mahdollisimman syvälle. Suurissa syvyyksissä korkea paine aiheuttaa kuitenkin riskin laitteen rikkoutumiselle. Paineeseen on vastattu esimerkiksi vahvoilla ja jäykillä tai toisaalta pehmeän robotiikan mukaisilla pehmeillä ja joustavilla materiaaleilla. Lisäksi laitteen tulee olla suo-

jattu nesteeltä ja meressä suolaisuudelta. Ohjaamisen kannalta laitteen tulee vastata syvyyden mukaan muuttuvaan nosteeseen esimerkiksi ilmarakkuloilla. (Turchik ym. 2015) (Duriez ym. 2016)

4.2.1 Etäohjattavat laitteet (ROV)

Etäohjattava laite (ROV) on yleensä esimerkiksi kiinnitetty laivaan tai sitä muutoin kauko-ohjataan, eikä se kulje vapaasti vedessä. Etäohjattavan laitteen etu on sen ohjailtavuus kiinnostavan alueen tai eliön tarkempaan seurantaan. Yhtenä etäohjattavana laitteena nostetaan myöhemmin osiossa "Pehmeä ja biomiiminen robotiikka" esille laite SoFi (*Soft Robotic Fish*, Massachusetts Institute of Technology, USA).

4.2.2 Itsenäiset vedenalaiset laitteet (AUV)

Itsenäisten vedenalaisten laitteiden (AUV) avulla kyetään esimerkiksi toteuttamaan laajamittaista vedenpohjan kartoitusta. (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017) Itsenäiset vedenalaiset laitteet ovat ohjelmoitavia robottimaisia laitteita, jotka voivat liikkua ajautuen, ajaen tai liitäen vedessä ilman jatkuvaa ihmisen ohjaamista. Itsenäisten vedenalaisten laitteiden automaattisuuden taso voi vaihdella: se voi suorittaa ennalta määritellyn tehtävän ja palata takaisin tai se voi tehdä "omia päätöksiä" ympäristön tarjoamien muuttujien mukaan (Institution 2023a). Seuraavaksi esitellään muutamia erityyppisiä itsenäisiä robotteja.

Itsenäiset vedenalaiset laitteet käsitetään tyypillisesti sylinterin muotoisina laitteina. Sylinterimäinen muoto tekee laitteesta sekä nopean että kestävä. Toisaalta muoto ei ole ketterästi ohjailtava, minkä vuoksi laite ei sovellu käytettäväksi esimerkiksi koralliriuttojen tai satamien läheisyydessä (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017).

Sylinteriliitäjät kuten Slocum Glider (Teledyne Webb Research, USA) pystyvät liittämään siksakmuotoisia alueita sekä horisontaalisesti että vertikaalisesti. Ne kykenevät keräämään viikkojen verran dataa, ja datan toimittamisen yhteydessä esimerkiksi ohjelmoidun rannan alueelle Slocumiin on mahdollista ladata uudet ohjeet toiminnan jatkamiseksi. Tavanomaisiin pinnalla toimiviin laivoihin verrattuna tällainen toiminta on edullista. Liitäjä soveltuu jatkuvaan seurantaan sekä alueen tarkkaan kartoittamiseen. Siksipä kartoitusmielessä vas-

taavankaltaiset liittäjät ovat kiinnostavia työkaluja. Litäjiä on mahdollista käyttää myös muun muassa merivirtojen tutkimisessa. (Institution 2023d) (Institution 2023c)

4.2.3 Sekä etäohjattavat että itsenäiset vaihtoehdot

Osa laitteista on mahdollista käyttää sekä ohjattuna että itsenäisesti. Tämä antaa kuvaamisen kannalta mahdollisuuden joustavaan ympäristön tutkimiseen, kaavamaisen itsenäisesti tuotetun seurannan ja aktiivista ohjaamista vaativan tutkimuksen ohella.

Esimerkiksi sylinterin muotoinen Icefin (Cornell University, USA) toimii pääasiassa kauko-ohjattuna (ROV) mutta myös automaattisesti (AUV) napa-alueiden jäänalaisissa olosuhteissa (Meister ym. 2020). Jään alle ei ole mahdollista nähdä esimerkiksi satelliitilla ja olosuhteet napa-alueilla ovat haastavat sekä tutkijoille että käytettäville roboteille.

Jäänalaiset alueet ovat melko tuntemattomia, ja ne tarjoaisivat tietoa monille tieteen aloille kuten biologialle ja ilmastotieteille (Meister ym. 2020). Tutkimus tiedon keräämiseksi napa-alueiden vesistöistä edistää myös avaruustutkimusta, sillä esimerkiksi Europa-kuulla on jääpeite, jonka alla on tutkimaton vesialue. Kuun jäänalaisesta ympäristöstä on lähes mahdollonta kerätä tietoa etänä, minkä vuoksi ymmärrys jääpeitteisten alueiden tutkimuksesta on tarpeen (Meister ym. 2020).

Icefin on kartoittanut jäänalaisissa olosuhteissa merenpohjaa, vesipatsasta sekä jään ja veden välistä pintaa videomateriaalin ja kaikuluotaimen avulla, joista pääsensoreina toimivat optisten sensoreiden sijaan kaikuluotaimet. Se on mitannut lämpötilaa, suolapitoisuutta ja liuennutta happea yhdistäen tietoja seismisiin ja jäätä läpäiseviin tutkaprofiileihin. Icefinillä on havainnointisensoreita, jotka sekä auttavat esteiden väistelyssä että toteuttavat kartoittamista. (Meister ym. 2020)

Mereen pudotettava itsenäinen vedenalainen laite Orpheus (Woods Hole Oceanographic Institution) lähtee pudottuaan kartoittamaan ja kuvantamaan pohjaa. Muista laitteista poiketen, se lähettää mielenkiintoiseksi havaitulle alueelle sisältään toisen robotin keräämään näytteitä. Toinen robotti on mahdollisesti ohjailtavissa pinnalta käsin. Orpheukset voivat toimia myös ryhmänä, jolloin tutkiminen, kartoittaminen ja näytteenotto on mahdollinen entistä laajemalta alueelta meren pohjasta. AUV ORPEUS projekti on osa Woods Hole Oceanographic

Instituten (WHOI) HADEX -ohjelmaa, joka toimii yhteistyössä NASAn Jet Propulsion Laboratorion kanssa. Orpheuksista tekee erityisen niiden kyky päästä suuriin syvyyksiin. Kamerrat sijaitsevat lasipallon sisällä, valon lähteenä on neljä LED valoa. Orpheus on Icesfinin ohella edistysaskel kohti Europa- tai Enceladus-kuiden jäisten merien tutkimisessa. (Institution 2023b)

4.2.4 Pehmeä ja biomiiminen robotiikka

Pehmeä robotiikka tuo erityisiä mahdollisuuksia vesistöjen eliöiden tutkimukseen. Pehmeiden robottien rakenteet ovat perinteisiä robotteja joustavampia ja ne mahdollistavat luonnollisemmat ja moniasteisemmat liikeradat. Tämä tarkoittaa esimerkiksi robotin kykyä tehdä joustavia kalan pyrstön sätkimistä muistuttavia liikkeitä tai jyrkkiä matomaisia käännöksiä. Pehmeä ja biomiiminen robotiikka liittyvät toisiinsa, sillä biomiimisissä laitteissa hyödynnetään luonnossa valmiiksi ilmeneviä ja olosuhteisiin sopiviksi kehittyneitä ominaisuuksia. Esimerkiksi uintinopeuteen on kerätty ajatuksia tonnikaloilta (*Thunnini*) ja nopeaa ohjailtavuutta seepioilta (*Sepiida*). (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017) Paremman ohjailtavuuden, ketteryyden ja tehokkuuden ansiosta uivien robottien kehitystä suositaan tavanomaisiin potkurilla toimiviin vedenalaisiin laitteisiin verrattuna (Naser, Rashid ja Fortuna 2021).

Siirryttäessä ahtaampiin ja biologisesti herkempiin tutkimuskohteisiin kuten luoliin ja koralliriutoille, tulee tutkimuslaitteen olla tyypillisten jäykkien laitteiden sijaan pehmeitä ja ympäristöön mukautuvia (Salazar ym. 2022). Toisaalta esimerkiksi ankeriaan tai käärmeen muotoiset robotit ovat kapeita ja joustavia liikkeissään eli niillä on monta vapausastetta. Vapausasteilla tarkoitetaan mahdollisia liikkeen suuntia. Esimerkiksi Eelumen on vedenalainen käärmerrobotti. Se kykenee myös suoristumaan sylinterimäiseksi pitkien matkojen taittamista varten (Bogue 2019)

Vesielioitä mukailemalla on mahdollista kehittää paremmin erilaisiin olosuhteisiin sopivia robotteja, mutta myös vedessä elävien eliöiden kannalta mielekkäämpiä tutkimuslaitteita (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017). Onkin havaittu, että biomiimiset robotit ovat vesien eliöstölle vähemmän stressaavia ja häiriötä aiheuttavia kuin potkurilla toimivat laitteet

(Aguzzi ym. 2021). Toisaalta esimerkiksi tursas kykenee sulautumaan ympäristöönsä säätelämällä ihonalaisia pigmenttiä sisältäviä soluja eli kromatoforeja (*chromatophore*) sekä ihon nystyjä (*papilla*). Näitä ominaisuuksia mukailemalla robotin olisi mahdollista naamioitua ympäristöön ja päästä lähemmäksi kuvattavia eliöitä. (Aryee 2022) Pehmeästä robotiikasta on myös etua herkkien materiaalien käsittelyssä, joten esimerkiksi näytteiden kerääminen herkistä kohteista on mahdollista (Duriez ym. 2016).

Biomimeettiset kalat tarjoavat ketterän ratkaisun vesistöjen seurantaan. (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017). Ne koostuvat yleensä erillisistä koottavista osista, joita ovat pää, vartalo ja pyrstö. Päässä on yleensä laitteen hyötykuorma ja sensorit (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017). Keskivartalo sisältää sähkö- ja ohjauslaitteet (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017). Esimerkiksi SoFi-kalarobotissa laitteet on jaoteltu ruumiissa tasaisesti, jotta suuri kohdistuva paine jakautuisi mahdollisimman kapealle alalle. Kartoittamisen kannalta SoFi ei ole sopiva tehtävään sen pienen koon vuoksi, mutta laite sopii paikalliseesti kuvamateriaalin ja yksityiskohtien keräämiseen myös paikoista, jonne muutoin ei olisi pääsyä. (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017)

Biomiiniseen robottiin on mahdollista kiinnittää optinen sensori. Nämä robotit pyrkivät keveyteen ja helppokäyttöisyyteen, joten niihin ei yleensä ole kuitenkaan mahdollista sijoittaa runsaasti erilaisia sensoreita. Etupuolella on yleensä HD-kamera, jonka keräämää kuvadataa tukemassa on mahdollisten mittaavien sensorien keräämä data. Mahdolliset mittaavat sensorit mittaavat esimerkiksi lämpötilaa, painetta, liuenneen hapen määrää. Lisäksi mukana voi olla fluorometri klorofyllin havainnointiin. (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017)

Biomiininen laite saattaa toimia automaattisesti. Se voi kulkea vaikkapa käyttäjän asettamien pisteiden kautta, joita seurattaessa laite väistelee automaattisesti esteitä. (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017). Toisaalta laite saattaa olla etäohjattava. Esimerkiksi kalarobotti SoFia ohjataan paikallisella etäohjauksella konsolin avulla.

Ohjailtavuuden ja vakauden ansiosta laitteilla on mahdollista saada korkeatasoista kuvadataa (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017). Eri suunnista kerätyistä 2D-kuvista on puolestaan mahdollista muodostaa 3D-malli (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017). Tasokaiden veden alla toimivien kameroiden ansiosta, ovat kuvamittausmenetelmät (*photogram-*

metric methods) alkaneet yleistyä vedenalaisessa tutkimuksessa. (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017)

Aiemmin esitellyt menetelmät kulkevat uiden. Ryömijät (*crawlers*) eivät niiden sijaan ui, mutta ne kulkevat pohjia myöten ja tarjoavat mahdollisuuksia kartoittamiseen. Merenpohjassa kulkevat ryömijät kykenevät kulkemaan uivia laitteita laajempia alueita yksittäisten pisteiden sijaan. Siten on mahdollista kerätä lisätietoa alueista tutkittavien pistemäisten alueiden ympärillä. (Doya ym. 2017)

Biomimiikan yhdistäminen ilmassa toimivan miehittämättömän ilma-aluksen tekniikan kanssa tuottaa uusia monipuolisia ratkaisuja, joissa sekä vedessä että ilmassa kuvaaminen on mahdollista yhdistää. Ajatusta on biomimikoitu linnuilta, jotka kykenevät sekä lentämään että sukeltamaan veteen. (Stewart ym. 2018) Veden pinnan yläpuolella ja alapuolella toimivien laitteiden rajapinnan rikkoo esimerkiksi AquaMAV (*Aquatic Micro Air Vehicle*, Imperial College London, Englanti), joka kykenee sekä lentämään että sukeltamaan veteen, mukaillen suulien (*Sulidae*) heimon lintujen sukellustapaa (Bogue 2019). Toiminnon ansiosta vedessä tutkimuksen tekevän laitteen on mahdollista lentää tutkimaan kohdetta ja palata takasin tukikohtaan.

4.3 Veden pinnalta tietoa keräävät laitteet

Veteen upotettavien laitteiden lisäksi on myös erilaisia veden pinnalta käsin tietoa kerääviä laitteita. Miehittyjen laivojen ohella aallokossa voi kellua esimerkiksi aaltopoijuja mutta myös miehittämättömiä pintalaitteita (USV, *unmanned surface vehicle*). Miehittämättömät pintalaitteet toimivat yleensä ilman ulkoista ohjausta. Veden pinnalla toimiviin laitteisiin on harvemmin kiinnitetty vesistöä kuvantavia optisia sensoreita. Ne ovat kuitenkin olennaisia datan lähteitä, sillä kerättyä dataa on mahdollista käyttää esimerkiksi muun datan täydentämisessä ja kalibroinnissa.

Esimerkiksi Saildrone (Saildrone, USA) seilaa itsenäisesti merillä, keräten tietoa fotosynteesistä aktiivisesta säteilystä, liuenneesta hapestä, klorofyllistä ja aallonkorkeudesta. Saildronessa on esimerkiksi myös etäoptinen tarkkailija (ROW, *Remote Optical Watcher*), jonka avulla on mahdollista tarkkailla vedenpintaa ja siinä havaittavia haitallisia öljymääriä. Tho-

mas (ASV, USA) on Saldronen kaltainen pinnalla kulkeva laite, joka mittaa lämpötiladataa, klorofyllitasoja ja suolapitoisuutta mutta kerää toisaalta lisäksi kuvia, videoita ja ääniä.

5 Tekniikoiden välinen yhteistyö

Aiemmissä kappaleissa on jo tuotu esille, miten erilaisia menetelmiä yhdistämällä on mahdollista tuottaa monipuolisempaa dataa, jossa tyypillisesti eri erottelukykyjen hyödyt yhdistyvät. Seuraavaksi esitellään yleisesti, miten ja millaisiin tarkoituksiin dataa yhdistellään. Sen jälkeen tarkastellaan erilaisten sensorien tuottaman datan yhdistämistä. Sensorien jälkeen siirrytään pohtimaan laitealustoja.

5.1 Datojen yhdistäminen

Datoja on mahdollista yhdistellä tilanteen mukaan eri tavoin. Niitä on mahdollista vertailla, ne voivat tukea toistensa tulkintaa ja antaa lisätietoa toisilleen eri tasoilta käsin vähentäen epävarmuuden määrää. Lisäksi dataa on mahdollista yhdistää yhdeksi kattavammaksi lopputuotteeksi. (Guanter ym. 2019) Yhdistämisen kautta eri erottelukykyjen hyödyt ja visuaaliset tasot on mahdollista saada käyttöön.

Yhdistelyyn on erilaisia lähestymistapoja kuten spatiaalis-spektraalinen. Siinä satelliitin matalampaa spektraalista ja spatiaalista erottelukykyä tehostetaan miehittämättömän ilma-aluksen korkeamman erottelukyvyn avulla. Lisäksi tarkempaa dataa on mahdollista käyttää epätarkemman mallin kalibroinnissa ja tarkistamisessa. Esimerkiksi paikan päällä kerättyä dataa on mahdollista käyttää miehittämättömän ilma-aluksen kalibrointiin ja sitä kautta miehittämättömän ilma-aluksen dataa satelliittidatan kalibrointiin. (Emilien, Thomas ja Thomas 2021)

Datojen varsinainen yhdistäminen ja yhteen sovittaminen saattaa olla haastavaa. Datojen yhdistämisen edellytyksenä on esimerkiksi se, että ne tulee olla kerättynä vastaavien olosuhteiden alaisena samalta alueelta samaan aikaan. Ajallisesti ja alueellisesti poikkeavat datat eivät välttämättä sovi yhdistettäväksi. Alueelta eri ajankohtina kerätystä havaintodatasta on kuitenkin mahdollista koostaa yhtenäinen kokonaisuus käyttämällä fysikaalisuuteen perustuvaa mallinnusta (*physically-based modeling*), jonka avulla erilaisia ominaisuuksia on mahdollista liittää yhteen. Mallinnuksessa tilavektorin avulla on mahdollista yhdistää eri tiloissa tai aikoina oleva sama alue ympäristömuuttujista riippumatta: oli sitten valaistus, ilmake-

hä tai maaperä ehtinyt muuttua, malli liittää hetket yhtenäiseksi kokonaisuudeksi. Pidempi aikaväli kuvien välillä kuitenkin lisää epävarmuutta yhteen sovittamisessa. Toimiva havainnot yhteen sitova dynaaminen malli puolestaan vähentää kokonaisuudessaan epävarmuutta. Erilaisten datojen automaattinen yhdistäminen vaatii myös toisaalta uusien itsenäisten algoritmien kehittämistä. (Guanter ym. 2019)

5.2 Sensoridatojen yhdistäminen

Erilaisilla sensoreilla tuotettujen datojen yhdistäminen voi tehdä datasta mielekkäämpää ja monipuolisempaa. Esimerkiksi yhdistämällä värikuvia ja hyperspektrisellä viivaskannerilla tuotettuja kuvia, on mahdollista tuottaa tarkkoja kuvamalleja hyperspektraalisten tekstuurien kanssa (Ferrera ym. 2021). Värikuva tarjoaa ihmisilmälle ymmärrettävän pinnan, spektrikuvantamisen avulla kohde tai alueet on mahdollista tunnistaa ja erottaa värikuvasta poikkeavalla tavalla ja lisäksi LiDARin avulla on mahdollista hahmottaa kohteen rakenne. (Guanter ym. 2019) Koska katsaus keskittyy spektrikuvantimiin, käsitellään ensimmäiseksi laajemmin multi- ja hyperspektrikuvien välistä suhdetta.

Hyperspektrikameran keräämän datan spektraalisen erottelukuvyn taso on korkea, mutta sillä on matala spatiaalinen erottelukyky. Toisaalta optisen multispektrikameran datan spatiaalinen ja hetkellinen erottelukyky ovat korkeita. Multispektrikuvat kattavat myös laajemman alueen. Siksi yhdistämällä sekä hyper- että multispektridataa, on mahdollista saada kokonaisuudessaan parempaa spatiaalisen, spektraalisen ja ajallisen erottelukuvyn spektridataa. Multispektridatan käyttämisen hyperspektridatan täydentämisen lisäksi voi hyperspektridataa käyttää multispektridatan täydentämiseksi. Hyperpektridatalla on myös mahdollista kalibroida multispektrilaitteita. (Guanter ym. 2019)

Optisen datan ohella on huomattava, että spektrimittausten ja ei-optisilla laitteilla kerätyn datan yhdistelmää voisi paremmin käyttää esimerkiksi ekologisessa tutkimuksessa (Guanter ym. 2019). Hyperspektrin ja LiDARin yhdistelmän tavoin on dataa mahdollista tuottaa esimerkiksi hyperpektrin ja tutkan yhdistelmänä. LiDARin tavoin tutka tarjoaa tietoa kohteen rakenteesta, täydentäen hyperspektrikuva. Yhdistelmällä on potentiaalia muun muassa öljyvuotojen kartoittamisessa. (Guanter ym. 2019) Vesistöjen tutkimuksen ja seurannan kannal-

ta olisikin järkevää yhdistellä erilaisia sensorityyppisiä ja erottelukykyjä toisiinsa (Giardino ym. 2019).

5.3 Laitealustat datan keräämisessä ja yhdistämisessä

Laitealustan mukaan on mahdollista tuottaa joko kattavaa tai tarkkaa dataa. Kerättävän datan säännöllisyys on mahdollista toteuttaa satelliittien ja vedenalaisten laitteiden avulla. Lisäksi optisesti syvä vedenalainen data on kerättävissä vain vedenalaisilla laitteilla. Satelliittien ja vedenalaisten laitteiden välillä operoivat ilma-alukset toimivat kattavan kaukokartoituksen ja täysin paikallisen toiminnan välisenä kompromissina ja välilinkkinä. Lisäksi saman tason laitealustat kykenevät tukemaan toisiaan.

Johdannossa esiteltiin ongelma, jossa pienikokoiset vesialueet jäivät usein kartoittamatta. Satelliittien kohdalla tämä pitää paikkansa, sillä niiden avulla on mahdollista kerätä kattavaa mutta muita menetelmiä epätarkempaa dataa. Tällöin esimerkiksi pieniä vesistöalueita ympäröivät metsät varjoineen ja katvealueineen tuottavat haasteita niiden kuvantamisessa. Miehitämättömät ilma-alukset sen sijaan tarjoavat tietoa hienovaraisistakin yksityiskohdistta, kuten pienistä vesistöalueista sekä jäätiköiden morfologiasta eli muodosta (Emilien, Thomas ja Thomas 2021). Yleisesti miehitämättömiä ilma-aluksia on mahdollista käyttää morfologisen tiedon saamiseksi, kun taas satelliitit tarjoavat tietoa spatiaalisesta jakautumisesta (Emilien, Thomas ja Thomas 2021).

Toisaalta kaukokartoitusdataa on mahdollista yhdistellä kenttätiedon kanssa. Yhdistelmää on mahdollista käyttää esimerkiksi ympäristön tarkempaan analysointiin tai mallintamiseen (Levin 2013). Paikallisten menetelmien haittapuolena on toisaalta niiden alueellinen rajoittuneisuus. Kaiken kaikkiaan satelliitit ovat mainioita työkaluja laajojen alueiden tutkimuksessa ja seurannassa, kun taas aluesidonnoisilla laitteilla on mahdollista tuottaa laajuuden sijaan tarkkaa dataa. Siten miehitämättömän ilma-aluksen ja paikan päällä kerätyllä datalla on mahdollista paikata satelliittidataan jääviä aukkoja (Emilien, Thomas ja Thomas 2021). Vastavuoroisesti satelliittikuvat voivat täyttää paikallisesti kerättyyn dataan jääviä aukkoja kattavuutensa ansiosta (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017).

Vedenalaisten laitteiden etu on niiden kyky päästä veden alle kohteen luokse, optisten kauko-

kartoituslaitteiden tavoittamattomiin. Itsenäiset vedenalaiset laitteet ovat etäohjattavia laitteita tehokkaampia ja kattavampia. Toisaalta etäohjattavilla laitteilla on mahdollista tutkia tarkemmin yksittäisiä kiinnostavia kohteita. Pehmeä ja biomiininen robotiikka on puolestaan potentiaalinen ja kehityskelpoinen tutkimusta tukeva ratkaisu, jonka avulla uusi entistä hienovaraisempi tutkimus on mahdollinen. Toisaalta laitteisiin kiinnitettävien sensorien kannalta pienet biomiiniset laitteet kykenevät vähäisemmän hyötykuorman kantamiseen kuin suuremmat laitteet.

Säännöllisen seurannan kannalta satelliitit ovat paras ratkaisu säännölliseen laaja-alaiseen pintavesien seurantaan. Itsenäiset vedenalaiset laitteet kykenevät itsenäisyytensä ansiosta myös säännölliseen seurantaan. Ilma-aluksilla ja muilla etäohjattavilla laitteilla puolestaan on rajattu tutkijoiden ohjaamiseen käyttämä toiminta-aika.

Miehittämättömät ilma-alukset toimivat linkkinä paikan päältä kerätyn kenttädatan ja satelliittidatan välillä. Oli kyse datan paikkaamisesta tai kalibroinnista, on ilma-alus sopiva välikappale ja toimiva työkalu sekä paikallisemman että laajemman kaukokartoitusdatan tukijana (Pieterkosky, Cavanaugh ja Thompson 2017). Pinnalla ja pinnan alla kulkevia laitteita on myös jo yhdistelty. Esimerkiksi pinnalla käsin operoiva Thomas toimii liitäjän (*glider*) kanssa yhteistyössä. Pinnalla ja pinnan alla toimivien laitteiden välillä on yhteistyötä esimerkiksi navigoinnin suhteen. Kaikkiaan pinnalla toimiva laite voikin olla hyvä lisä ja välilinkki pinnan ylä- ja alapuolella toimivien laitteiden välillä.

Eri tasoilla toimivien laitteiden yhdistelyn ohella myös samalla tasolla toimivien laitelustojen yhdistämisellä on etua datan tuottamisessa. Vedessä toimivat laitteet kykenevät tuottamaan dataa yhdessä kuten esimerkiksi Orpheus-laitteen kohdalla todettiin. Itsenäinen vedenalainen laite kykenee kuvantamaan tai kartoittamaan kattavasti laajoja alueita. Saatujen tietojen perusteella voidaan yksittäiselle kiinnostavalle tai vaikeakulkuiselle alueelle lähettää etäohjattava laite esimerkiksi päälaitteen sisältä. Etäohjattava laite puolestaan voi esimerkiksi kerätä kuvia ja näytteitä tai muita tarkentavia mittaustietoja valitulta alueelta. Myös kokonaiset satelliittiohjelmat voivat tukea toisiaan. Avaruudesta toteutettava EnMAP ja PRISMA-hyperspektrikuvantamisohjelmien on tarkoitus toimia yhteistyössä muiden satelliittiohjelmien kanssa sekä erityisesti optisten multispektriohjelmien kanssa (Guanter ym. 2019).

6 Pohdinta ja tulevaisuudennäkymät

Vesistöjen optiset tutkimusmenetelmät vaikuttavat kehittyvän kaikilla osa-alueilla, niin laitekuin sensoritasolla. Viittaukset tulevaisuuteen perustuvat tutkimusartikkeleihin ja niissä esitelyihin edistysaskeleisiin. Lisäksi arvioin laitteita ja laiteyhdistelmiä, jotka voisivat olla tulevaisuuden kannalta hyödyllisiä tai mielenkiintoisia.

Vesistöissä optisten sensorien valonlähteen tuottama sähkömagneettinen säteilyn aallonpituus vaikuttaa valon kykyyn kulkea vedessä. Siksi olisi mielekästä selvittää, mitkä aallonpituudet olisivat vesistöissä tutkimuksen ja seurannan kannalta tehokkaimpia. Toisaalta valon muiden ominaisuuksien hyödyntäminen kuten sen polarisoituminen ja LiDAR:issa käytettävä laser luovat edelleen mahdollisuuksia optiselle kuvantamiselle.

Vesistöjen eliöiden erilaisia liikkumistapoja ja rakenteita on jo mukailtu robottien tuotannossa (Naser, Rashid ja Fortuna 2021). Tulevaisuudessa vesistöjen paikallisessa tutkimuksessa saatetaan hyödyntää entistä enemmän vesistöihin sijoitettavia biomiimisiä robotteja (Aguzzi ym. 2021). Pehmeää ja biomiimistä robotiikkaa hyödyntämällä olisi mahdollisuus tutkia herkkiä ja vaikeakulkuisia alueita. Aiemmassa luvussa mainittiin ilmassa sekä vedessä toimiva hybridimalli, joka rikkoo vedessä ja ilmassa toimivan laitteen rajapinnan. Se ei korvaa kuitenkaan satelliittia eikä ainakaan toistaiseksi vedenalaisia kattavasti kartoitettavia laitteita. Satelliittien osalta uudet ohjelmat ja satelliittitekniikan sekä sensoreiden kehittyminen kuljettavat satelliiteilla tuotettavaa seuranta ja tutkimusta eteenpäin.

Satelliitin, hybridi-ilma-aluksen ja kattavan vedenalaisen järjestelmän yhdistelmä vaikuttaisi julkaisujen perusteella mielekkäältä yhdistelmältä. Tulevaisuudessa vedenalaisessa tutkimuksessa voitaisiinkin mielestäni hyödyntää enemmän satelliittien ohella esimerkiksi Orpheuksen kaltaisia laitteita, jotka kykenevät kattavaan itsenäiseen vedenlaiseen toimintaan. Niiden sisältä olisi mahdollista päästää tarpeen tullen ulos biomiiminen tarkan paikan ketterä robotti. Tämä tarkan paikan robotti voisi kyetä hybriditoimintaan lentämällä veden ja ilman välillä. Yhteen laitteeseen kaiken sisällyttämisen sijaan on toisaalta järkevää kehittää edelleen erillisiä laitevaihtoehtoja erilaisten vesistöjen vaatimusten mukaan.

Kattavammat datankeruumenetelmät tarkoittavat työläämpää datan käsittelyä. Tulevaisuu-

dessa hyödynnetään todennäköisesti entistä enemmän ihmisten silmien kykyjä ylittävää väsymätöntä konenäköä. Konenäkö kykenee kuvan ottamiseen, prosessointiin ja lopulta sen luokitteluun. (Raita-Hakola 2022) Lisäksi tekoälyn kehittäminen vedenalaisissa laitteissa mahdollistaa niiden kehityksen autonomisiksi ja muun muassa yhteistyökykyisiksi (Aguzzi ym. 2021).

Saavutukset vesistöjen tutkimus- ja seurantamenetelmien kehityksessä edistävät myös muita tutkimuksen aloja. Esimerkiksi avaruuden jääpeitteisten kuiden tutkimus hyötyy vedenalaisen tutkimuksen kehittymisestä. (Aguzzi ym. 2021)

Kaiken kaikkiaan näyttää siltä, että paras kartoitusmenetelmä olisi useamman tason sekä sensorijärjestelmän summa. Kaukokartoittamalla on mahdollista luoda kattava jatkuvan seurannan alainen kokonaiskuva, jota paikalliset menetelmät täydentävät ja tarkentavat.

7 Loppupäätelmä

Parhaaksi vesistöjen optiseksi kuvantavaksi menetelmäksi näyttävät nousevan useamman erilaisen sensorijärjestelien sekä laitealustojen summa. Kullakin menetelmällä ilmeni esimerkiksi erottelukyvyn tai kattavuuden kannalta heikkouksia, joita puolestaan on mahdollista paikata muiden menetelmien avulla. Toisaalta aina datan ei ole välttämätöntä olla täydellistä ja päällekkäistä dataa on myös mahdollista tarkastella erillään omina kerroksinaan yhdistämättä niitä.

Huomattavaa on, että ihmisten näkemiseen hyödyntämä sähkömagneettinen spektri kattaa vain osan valon spektristä. Sen sijaan kuvantamalla kohteesta heijastuvaa laajempaa spektriä on mahdollista saada väriin verrattuna jopa niin yksityiskohtaista tietoa, että kohde on mahdollista tunnistaa ja yksilöidä sormenjäljen tavoin. Valoa on toisaalta mahdollista hyödyntää esimerkiksi LiDARin avulla, jolloin on mahdollista saada lisäksi tietoa kohteen kerroksista. Toisaalta kaikuluotauksen merkitys nousi esille paikallisten menetelmien kohdalla.

Sekä käytettävä sensori että sitä kuljettavan laitealustan etäisyys kohteesta vaikuttavat dataan saavutettavaan erottelukykyyhin ja kattavuuteen. Datan laatuun vaikuttaa myös esimerkiksi spektrikuvantamisessa käytettävä skannaustapa sekä käytettävien aallonpituuskaistojen lukumäärä. Nämä ovat avainsyitä menetelmien yhdistelemisen tarpeelle, sillä ainakaan vielä mikään yksittäinen tekniikka ei kykene täyttämään kaikkia ominaisuuksia yksin. Toisaalta erilaisten menetelmien käyttökohteet myös vaihtelevat laaja-alaisemmasta kartoittamisesta ja jatkuvasta seurannasta aina yksittäisten vesieliöiden tutkimukseen.

Yhteistyö ja menetelmien yhdisteleminen ei toisaalta aina tarkoita useiden erilaisten laitteiden sovittamista yhteen vaan esimerkiksi usean satelliitin toimimista saman satelliittiohjelman sisällä, laajoja alueita kartoittavan robotin sisältä ulos tarpeen tullen työntyvää tarkemman tutkimuksen robottia tai sekä vedessä että ilmassa operoimaan kykenevää laitetta. Lisäksi datojen yhdistäminen voi tarkoittaa yhtenäisen datakokonaisuuden muodostamisen sijaan esimerkiksi karkeamman datan kalibrointia ja validointia.

Häiriöt ja esimerkiksi suuren datamassan sovittaminen yhteen vaativat esimerkiksi ennalta laskettujen algoritmien sekä konenäön apua. Häiriöt tulee vähintään kyetä tunnistamaan ja

merkitsemään dataan epävarmuuden laskemiseksi.

Keskeinen tekijä loppujen lopuksi menetelmää valittaessa tai kehitettäessä on sen päämäärä. Aina ei ole tarkoituksenmukaista saada aikaiseksi mahdollisimman suurta datamassaa, vaan sopivan luotettavia ja kattavia tuloksia tutkimuksen ja seurannan tarpeisiin. Lisäksi kuvannettavan vesistöalueen koko ja tila vaikuttavat mahdolliseen käytettävään menetelmään. Tulevaisuuden kannalta etenkin biomimiset kohteet ovat kehityksen alla, ja niiden on tarkoitus tarjota apua entistä hienovaraisempien kohteiden tutkimuksessa. Yleisesti erilaisten tutkimusmenetelmien yhdistelmät, valon ominaisuuksien monipuolinen hyödyntäminen sekä biomimian käyttökohteet voisivat olla syvemmän tutkimuksen aiheita.

Lähteet

Aguzzi, Jacopo, Corrado Costa, Marcello Calisti, Valerio Funari, Sergio Stefanni, Roberto Danovaro, Helena I Gomes, Fabrizio Vecchi, Lewis R Dartnell, Peter Weiss ym. 2021. “Research trends and future perspectives in marine biomimicking robotics”. *Sensors* 21 (11): 3778.

Aiazzi, Bruno, Luciano Alparone, Alessandro Barducci, Stefano Baronti, Paolo Marcoionni, Ivan Pippi, Massimo Selva ym. 2006. “Noise modelling and estimation of hyperspectral data from airborne imaging spectrometers”.

Amani, Meisam, Armin Moghimi, S Mohammad Mirmazloumi, Babak Ranjgar, Arsalan Ghorbanian, Saeid Ojaghi, Hamid Ebrahimi, Amin Naboureh, Mohsen Eslami Nazari, Sahel Mahdavi ym. 2022. “Ocean Remote Sensing Techniques and Applications: A Review (Part I)”. *Water* 14 (21): 3400.

Aryee, Patrick. 2022. *30 Animals That Made Us Smarter: Stories of the Natural World That Inspired Human Ingenuity*. Island Press.

Atchison, David A. 2023. *Optics of the human eye*. CRC Press.

Behmann, Jan, Jörg Steinrücken ja Lutz Plümer. 2014. “Detection of early plant stress responses in hyperspectral images”. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 93:98–111.

Bogue, Robert. 2019. “Bioinspired designs impart robots with unique capabilities”. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application* 46 (5): 561–567.

Bulgarevich, Dmitry S, Yusuke Akamine, Miezal Talara, Valynn Mag-Usara, Hideaki Kitahara, Hiroyuki Kato, Masaki Shiihara, Masahiko Tani ja Makoto Watanabe. 2020. “Terahertz magneto-optic sensor/imager”. *Scientific Reports* 10 (1): 1158.

Cong, Yang, Changjun Gu, Tao Zhang ja Yajun Gao. 2021. “Underwater robot sensing technology: A survey”. *Fundamental Research* 1 (3): 337–345.

Debeunne, César, ja Damien Vivet. 2020. “A review of visual-LiDAR fusion based simultaneous localization and mapping”. *Sensors* 20 (7): 2068.

Doya, Carolina, Damianos Chatzievangelou, Nixon Bahamon, Autun Purser, Fabio C De Leo, S Kim Juniper, Laurenz Thomsen ja Jacopo Aguzzi. 2017. “Seasonal monitoring of deep-sea megabenthos in Barkley Canyon cold seep by internet operated vehicle (IOV)”. *PLoS One* 12 (5): e0176917.

Duriez, C., E. Coevoet, F. Largilliere, T. Morales-Bieze, Z. Zhang, M. Sanz-Lopez, B. Carrez, D. Marchal, O. Goury ja J. Dequidt. 2016. “Framework for online simulation of soft robots with optimization-based inverse model”. Teoksessa *2016 IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (SIMPAN)*, 111–118. <https://doi.org/10.1109/SIMPAN.2016.7862384>.

Emilien, Alvarez-Vanhard, Corpetti Thomas ja Houet Thomas. 2021. “UAV & satellite synergies for optical remote sensing applications: A literature review”. *Science of remote sensing* 3:100019.

ESA. 2021a. *Instrument Payload*. Last accessed 8 April 2023. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-3/instrument-payload>.

———. 2021b. *Mission Summary*. Last accessed 8 April 2023. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-3/overview/mission-summary>.

———. 2023. *About MERIS*. Last accessed 8 April 2023. <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/meris>.

Estes, J, K Kline ja E Collins. 2001. “Remote sensing”. *International Encyclopedia of Social and Behavioral Sciences* 53 (2): 13144–13150. Elsevier.

Ferrera, Maxime, Aurélien Arnaubec, Klemen Istenič, Nuno Gracias ja Touria Bajjouk. 2021. “Hyperspectral 3D mapping of underwater environments”. Teoksessa *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 3703–3712.

Fowler, James E. 2014. “Compressive pushbroom and whiskbroom sensing for hyperspectral remote-sensing imaging”. Teoksessa *2014 IEEE international conference on image processing (ICIP)*, 684–688. IEEE.

Giardino, Claudia, VE Brando, Peter Gege, Nicole Pinnel, Eric Hochberg, E Knaeps, Ils Reusen, Roland Doerffer, Mariano Bresciani, F Braga ym. 2019. “Imaging spectrometry of inland and coastal waters: state of the art, achievements and perspectives”. *Surveys in Geophysics* 40 (3): 401–429.

Gottwald, Martin, Hendrik Herzog ja Gerhard von der Emde. 2019. “A bio-inspired electric camera for short-range object inspection in murky waters”. *Bioinspiration & Biomimetics* 14 (3): 035002.

Guanter, Luis, Maximilian Brell, Jonathan C-W Chan, Claudia Giardino, Jose Gomez-Dans, Christian Mielke, Felix Morsdorf, Karl Segl ja Naoto Yokoya. 2019. “Synergies of space-borne imaging spectroscopy with other remote sensing approaches”. *Surveys in Geophysics* 40 (3): 657–687.

Institution, Woods Hole Oceanographic. 2023a. *AUVs*. Last accessed 9 April 2023. <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/underwater-vehicles/auvs/>.

———. 2023b. *Sentry*. Last accessed 8 April 2023. <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/underwater-vehicles/auvs/sentry/>.

———. 2023c. *Slocum Glider*. Last accessed 9 April 2023. <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/underwater-vehicles/auvs/slocum-glider/>.

———. 2023d. *Spray Glider*. Last accessed 9 April 2023. <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/underwater-vehicles/auvs/spray-glider/>.

Itten, Klaus I, Francesco Dell’Endice, Andreas Hueni, Mathias Kneubühler, Daniel Schläpfer, Daniel Odermatt, Felix Seidel, Silvia Huber, Jürg Schopfer, Tobias Kellenberger ym. 2008. “APEX-the hyperspectral ESA airborne prism experiment”. *Sensors* 8 (10): 6235–6259.

itämeri.fi. n.d. “Satelliittikuvista tutkitaan vedestä heijastunutta auringonvaloa”. (accessed: 17.02.2023). https://www.ostersjon.fi/fi-FI/Tutkimus_ja_menetelmat/Menetelmat/Kaukokartoitus#:~:text=Kaukokartoitus%20on%20satelliittikuvien%20ja%20ilmakuvien,auringonvaloa%20tai%20tutkittavan%20kohteen%201%3%A4mp%3%B6s%3%A4teily%3%A4..

- Jamet, Cédric, Amir Ibrahim, Ziauddin Ahmad, Federico Angelini, Marcel Babin, Michael J Behrenfeld, Emmanuel Boss, Brian Cairns, James Churnside, Jacek Chowdhary ym. 2019. “Going beyond standard ocean color observations: lidar and polarimetry”. *Frontiers in Marine Science* 6:251.
- Jorgensen, Sven Erik, ja Brian D Fath. 2008. *Encyclopedia of ecology*.
- Kay, Susan, John D Hedley ja Samantha Lavender. 2009. “Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes: a review of methods for visible and near-infrared wavelengths”. *Remote sensing* 1 (4): 697–730.
- Kostadinov, Tihomir S, Rina Schumer, Mark Hausner, Kat J Bormann, Rowan Gaffney, Kenneth McGwire, Thomas H Painter, Scott Tyler ja Adrian A Harpold. 2019. “Watershed-scale mapping of fractional snow cover under conifer forest canopy using lidar”. *Remote Sensing of Environment* 222:34–49.
- Lakhtakia, Akhlesh, ja Raul Jose Martin-Palma. 2013. *Engineered biomimicry*. Newnes.
- Levin, Simon A. 2013. *Encyclopedia of Biodiversity*. Elsevier Science.
- Liu, Bohan, Zhaojun Liu, Shaojie Men, Yongfu Li, Zhongjun Ding, Jiahao He ja Zhigang Zhao. 2020. “Underwater hyperspectral imaging technology and its applications for detecting and mapping the seafloor: A review”. *Sensors* 20 (17): 4962.
- Mahdianpari, Masoud, Fariba Mohammadimanesh, Heather McNairn, Andrew Davidson, Mohammad Rezaee, Bahram Salehi ja Saeid Homayouni. 2019. “Mid-season crop classification using dual-, compact-, and full-polarization in preparation for the RADARSAT constellation mission (RCM)”. *Remote Sensing* 11 (13): 1582.
- Meister, Matthew, Daniel Dichek, Anthony Spears, Ben Hurwitz, Frances Bryson, Andrew Mullen, Justin Lawrence, Peter Washam, Enrica Quartini, Sebastian Lopez ym. 2020. “Antarctic Deep Field Deployments and Design of the Icefin ROV”. Teoksessa *Global Oceans 2020: Singapore–US Gulf Coast*, 1–5. IEEE.
- NASA. 2018. *Nasa’s advanced laser to measure Earth’s changing ice*. Last accessed 8 April 2023. <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/articles/nasas-advanced-laser-measure-earth%E2%80%99s-changing-ice>.

- NASA. 2019. *How it Works*. Last accessed 8 April 2023. <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/how-it-works>.
- Naser, Farah Abbas, Mofeed Turkey Rashid ja Luigi Fortuna. 2021. *Underwater Labriform-swimming Robot*. Nide 1. World Scientific.
- NOAA. n.d. “What is bathymetry?” (accessed: 15.02.2023). <https://oceanservice.noaa.gov/facts/bathymetry.html>.
- Ortega, Samuel, Himar Fabelo, Dimitris K Iakovidis, Anastasios Koulaouzidis ja Gustavo M Callico. 2019. “Use of hyperspectral/multispectral imaging in gastroenterology. Shedding some–different–light into the dark”. *Journal of clinical medicine* 8 (1): 36.
- Pieterkosky, Simeon, Craig Cavanaugh ja Liane Thompson. 2017. “FaaS—Fish as a service biomimetic fish drone for ocean monitoring”. Teoksessa *OCEANS 2017-Anchorage*, 1–4. IEEE.
- Raita-Hakola, Anna-Maria. 2022. “From sensors to machine vision systems: Exploring machine vision, computer vision and machine learning with hyperspectral imaging applications”. *Jyväskylän yliopiston väitöskirjat (University of Jyväskylä dissertations)*, <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-39-9240-8>.
- Saari, Heikki, Ville-Veikko Aallos, Altti Akujärvi, Tapani Antila, Christer Holmlund, Uula Kantojärvi, Jussi Mäkynen ja Jyrki Ollila. 2009. “Novel miniaturized hyperspectral sensor for UAV and space applications”. Teoksessa *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIII*, 7474:517–528. SPIE.
- Salazar, Juan, Levi Cai, Braden Cook ja Daniela Rus. 2022. “Multi-Robot Visual Control of Autonomous Soft Robotic Fish”. Teoksessa *2022 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV)*, 1–6. IEEE.
- Santos, Jose Luis, ja Faramarz Farahi. 2014. *Handbook of optical sensors*. Crc Press.
- Schnaitmann, Christopher, Manuel Pagni ja Dierk F Reiff. 2020. “Color vision in insects: insights from *Drosophila*”. *Journal of Comparative Physiology A* 206 (2): 183–198.
- Schowengerdt, Robert A. 2006. *Remote sensing: models and methods for image processing*. Elsevier.

- Stewart, William, Warren Weisler, Marc MacLeod, Thomas Powers, Aaron Defreitas, Richard Gritter, Mark Anderson, Kara Peters, Ashok Gopalarathnam ja Matthew Bryant. 2018. "Design and demonstration of a seabird-inspired fixed-wing hybrid UAV-UUV system". *Bioinspiration & biomimetics* 13 (5): 056013.
- Szafarczyk, Anna, ja Cezary Toś. 2023. "The Use of Green Laser in LiDAR Bathymetry: State of the Art and Recent Advancements". *Sensors* 23 (1): 292.
- Turchik, Alan J., Eric J. Berkenpas, Bradley S. Henning ja Charles M. Shepard. 2015. "The Deep Ocean Dropcam: A highly deployable benthic survey tool". Teoksessa *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, 1–8. <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2015.7401978>.
- Wang, Zhien, ja Massimo Menenti. 2021. "Challenges and opportunities in Lidar remote sensing". *Frontiers in Remote Sensing* 2:641723.
- Yan, Lei, Yanfei Li, V Chandrasekar, Hugh Mortimer, Jouni Peltoniemi ja Yi Lin. 2020. "General review of optical polarization remote sensing". *International Journal of Remote Sensing* 41 (13): 4853–4864.
- Yang, Hongbo, Zhizun Xu ja Baozhu Jia. 2022. "An Underwater Positioning System for UUVs Based on LiDAR Camera and Inertial Measurement Unit". *Sensors* 22 (14): 5418.
- Yi, Lina, Jing M Chen, Guifeng Zhang, Xiao Xu, Xing Ming ja Wenji Guo. 2021. "Seamless mosaicking of uav-based push-broom hyperspectral images for environment monitoring". *Remote Sensing* 13 (22): 4720.