

Veden laadun seuranta Saaristomerellä – tasapainoilua mittasuhteiden välillä

ANNE ERKKILÄ¹ & RISTO KALLIOLA²

Maantieteen laitos, Turun yliopisto

Ravinnekuormituksesta johtuva rannikkoalueiden rehevöityminen on kiihtynyt viime vuosikymmeninä useilla alueilla (McIntyre 1995). Pahimmillaan rehevöityminen on johtanut myrkyllisiin leväkuintoihin rannikkovesillä (Paerl 1995).

Rehevöitymistä havaittiin 1900-luvun loppupuolella myös Saaristomerellä (Jumppanen & Mattila 1994; Kirkkala 1998; Suomela 2001), jossa muutokset ovat haitanneet merialueen hyöty- ja virkistyskäyttöä. Saaristomeren ja Suomenlahden poikkeuksellisen runsaat leväkukinnot nostivat heinäkuussa 1997 (Rantajärvi 1998), keskeillä vilkkainta lomakautta, vesien heikentyneen tilan suuren yleisön tietoisuuteen. Asetelma toistui kesällä 2002.

Saaristomerellä on huomattava virkistyskäyttöarvo ja saariston elinkeinotoiminta on pitkälti riippuvainen alueen luonnonoloista. Saaristomeri on myös ainutlaatuinen sisämerisaaristo, jonka moninaisten luontotyyppien ja eliöyhteisöjen säilyttäminen on sinällään arvokasta. Siksi paineet alueellisesti kattavan veden laadun seurantajärjestelmän kehittämiseen ovat suuret. Laajuutensa ja mosaiikkimaisen rakenteensa vuoksi Saaristomeri on kuitenkin haasteellinen kohde tällaisten menetelmien kehittämiseksi.

Saaristorannikolla luontotyyppien ja eliöyhteisöjen monimuotoisuus sekä virtauksista johtuva veden kemiallisen ja biologisen koostumuksen vaihtelut vaikeuttavat ekosysteemien tilan seuranta. Suojelutoimenpiteistä päätettäessä olisi aiheellista ottaa huomioon pintavesien laatuun, virtauksiin ja eliöyhteisöjen dynamiikkaan liittyvät tekijät. Nykyisin käytössä olevat mittausmenetelmät kuitenkin perustuvat lähinnä havaintopisteistä tapahtuvaan näytteenottoon. Perustuessaan kentällä kerättyjen vesinäytteiden tutkimiseen tällaiset menetelmät ovat hintavia eikä niitä voida toteuttaa kaikilla toivotuilla alueilla. Siksi ne eivät myöskään riitä perustaksi alueellisesti kattaville vesi- ja rannikkoalueiden seurannoille.

Vesien laatua tarkasteltaessa keskeistä on informaation spatiaalinen luonne: tiedon merkitys on ymmärrettävissä vasta kun hahmotetaan sen yhteys ympäröivään alueeseen. Geoinformatiikan menetelmistä kaukokartoitus tarjoaa mahdollisuus-

den tarkastella laajoja vesialueita samanaikaisesti. Paikkatietojärjestelmillä vedenlaatuaineistoja sekä muita tietoja voidaan yhdistellä toisiinsa monipuolisesti. Kuvaamme tässä katsauksessa erilaisia seurantamenetelmiä ja arvioimme erityisesti Landsat-aineistojen soveltuvuutta Saaristomeren pintavirtauksien tutkimukseen. Taulukko 1 sisältää yhteenvedon käsittelemistämme tekniikoista sekä niiden käytettävyydestä operatiivisessa seurannassa.

Saaristomeren rehevöityminen ja seuranta perinteisin menetelmin

Rehevöitymistä ja ympäristömyrkyjä pidetään Itämeren pääongelmina. Rehevöitymisen suurin aiheuttaja on vesimassan kohonnut ravinnetaso, joka lisää biologista tuotantoa (HELCOM 1993). Ravinnekuormituksen lisääntymisen ja rehevöitymisen seurauksista on havaintoja jo 1980-luvulta lähtien Itämeren eri osissa (esim. Larsson ym. 1985; Schulz ym. 1991; Richardson & Heilmann 1995). Sameuden lisääntyminen on yksi rehevöitymisen näkyvimpiä seurauksia, ja sitä on havaittu koko Itämeren alueella (Kautsky ym. 1986; Louniainen ym. 1989; Trzosińska 1992; Sandén & Håkansson 1996). Myös Saaristomerellä veden näkösyvyys on paikallisten asukkaiden mukaan oleellisesti pienentynyt 1950-luvun jälkeen (Jumppanen & Mattila 1994: 45). 1980-luvun jälkeen näkösyvyys on avovesikaudella enää harvoin ylittänyt kuutta metriä väli- ja ulkosaaristossa (Erkkilä & Kirkkala 2000: 13–19; Suomela 2001: 51–82).

Saaristomeren mataluus, veden jyrkkä kerrostuneisuus ja heikko vaihtuvuus sekä tuottavimman rantavyöhykkeen suuri osuus ovat edistäneet rehevöitymistä (Jumppanen & Mattila 1994: 10–11, 175–176). Luonnontilaisenaakin Saaristomeri on avomerialueita rehevämpi, koska valumavesien mukana mantereelta ja saarista tulevat ravinteet sekä kiintoaines pidättyvät vesien ravintoketjuihin (Kirkkala 1994: 30–32).

Saaristomeren seuranta vesialueena on haastavaa, sillä alue on länteen viettävää penepilaania, jossa vuorottelevat kallioperän murros- ja siirtymälinjojen luomat pitkät, syvät selät ja niiden välissä olevat saaret sekä matalat vesialueet. Avomerialta rannikolle edettäessä merelliset olosuhteet heikkenevät ja maa-alueiden sekä rantavyöhyk-

¹ <anne.erkkila@utu.fi>

² <risto.kalliola@utu.fi>

Taulukko 1. Kaukokartoitus- ja kenttänäytteenottomenetelmien soveltuvuus Saaristomeren veden laadun seurantaan ja tutkimukseen. Tarkastelussa on painotettu aineistojen soveltuvuutta koko saaristoalueen kattavaan tutkimukseen.

	Numeeristen aineistojen spatiaalinen resoluutio	Edut	Haitat	Soveltuvuus tutkimustarkoituksiin	Soveltuvuus operatiiviseen seurantaan
Karkea-resoluutioiset satelliittikuvat esim. NOAA-AVHRR	Yli 1 km	Kuvia saatavana lähes päivittäin, edullinen hinta	Alueellinen resoluutio liian karkea pienipiirteisille saaristoalueille (suurelle osalle Saaristomerta)	Ei sovellu pienialaisille vesialueille, laajoilta saarettomilta selkävesialueilta on mahdollista saada mittaustietoa	Ei sovellu pienialaisille vesialueille, laajoilta saarettomilta selkävesialueilta on mahdollista saada mittaustietoa
Keski-resoluutioiset satelliittikuvat esim. MODIS	Satoja metrejä	Kuvia saatavana 1–3 päivän välein, edullinen hinta	Alueellinen resoluutio liian karkea pienipiirteisille saaristoalueille	Soveltuu laajempien yhtenäisten vesialueiden tutkimukseen, ei sovellu pienialaisille vesialueille	Soveltuu laajempien yhtenäisten vesialueiden seurantaan, ei sovellu pienialaisille vesialueille
Korkea-resoluutioiset satelliittikuvat esim. Landsat ETM+, SPOT XS	Kymmeniä metrejä	Hyvä alueellinen erotuskyky	Kuvia vähän saatavilla, pilvisuus vähentää myös kuvien määrää, kallis hinta	Soveltuu – erityisesti yksittäisten kuvien ja tilanteiden tutkimukseen	Ei sovellu – kuvia ei ole saatavilla tarpeeksi
Erittäin korkea-resoluutioiset satelliittikuvat, ilmakuvaus esim. IKONOS, EROS, Quickbird	Kymmeniä senttejä– metrejä	Erittäin hyvä alueellinen erotuskyky, hyper-spektristen aineistojen korkea spektrin erotuskyky	Pieni kuva-ala – mahdollista kuvata vain linjoja tai pieniä vesialueita, suhteellisen korkeat kustannukset kuva-alaan nähden	Soveltuu hyvin pienipiirteisten ranta-alueiden tutkimukseen tai linjojen kuvaamiseen vesi- ja ranta-alueilta, koko saaristoalueen tutkimus edellyttää kuvien yhdistämistä mosaikiksi	Teknisesti soveltuu linjojen tai pienten alueiden seurantaan, mutta ei erityisen kustannustehokasta
Näytteenotto laivalta/ veneestä		Eksaktia aineistoa veden laadusta	Näytteen edustavuus kyseenalaista, kuvaa pientä vesifraktiota, myös alueellinen edustavuus heterogeenisella saaristoalueella kyseenalainen	Kenttänäytteiden otto välttämätöntä kvantitatiivisissa tutkimuksissa, joissa esimerkiksi kaukokartoitusaineistoista määritetään veden laatua, toimii myös <i>ground truth</i> -datana.	Perinteinen seurannan menetelmä, näytteenottopaikat on valittava siten että niiden alueellinen edustavuus on määritetty, toimii myös <i>ground truth</i> -datana.
Automaattiset mittauslaitteet aluksilla	–	Eksaktia tietoa, näytteenottotähtäisyys aluksen kulkuväylällä korkea	Linjamaista tietoa, ei alueellisesti kattavaa	Soveltuu <i>ground truth</i> -dataksi, vähemmän työvoimavaltaista ja kustannuksiltaan edullisempaa kuin pistenäytteenotto	Käytössä Itämerellä ja Saaristomerellä

keen vaikutukset kasvavat. Vuorovaikutuksen asteitaista muutosta ilmentävät myös veden kemia, fysiikka ja biologiset yhteisöt (Häyrén 1948; Granö 1981). Nopeasti syvenevällä saarettomalla rannikolla luontotyyppien ja eliöyhteisöjen asteittaisen muuttumisen synnyttämät rannikkovyöhykkeet ovat kapeita, kun taas Saaristomerellä ne ovat erityisen leveitä.

Vesien virtausolosuhteet luovat perustan Saaristomeren rehevöitymiskemityksen ymmärtämiselle.

Saaristomeren mantereelta tulevan makean veden sekoittumis- ja läpivirtausaluetta (Jumppanen & Mattila 1994: 10–11). Itämeren ja Suomenlahden vedet virtaavat Saaristomeren läpi useita kanavia pitkin. Syvimpiä niistä ovat Kihti ja Teili. Samalla saaristoon jää ravinteita Itämereltä Pohjanlahteen virtaavista vesimassoista (Helminen ym. 1998b: 512–513, 516–517). *Saaristomeren virtaustutkimuksen* (1979: 237) mukaan virtaukset ovat suurimmaksi osaksi useassa eri kerroksessa

tapahtuvaa edestakaista, lyhytaikaista heilahtelua. Pintavesien virtaussuunnan saaristossa määräävät tuulen suunta, coriolis-voima ja rantojen muodot (Helminen ym. 1998a: 22). Virtauksia aiheuttaa myös ominaisheilahtelu eli veden pinnan pyrkimys tasapainotilaan esimerkiksi tuulen aiheuttaman kallistuman jälkeen (englanniksi *seiche*). Itämeren noin 1–2 vuorokautta kestävien ominaisheilahdusten lisäksi Saaristomerellä esiintyy pienempien merialtaiden omia ominaisheilahduksia, jotka kestävät korkeintaan muutamia tunteja (*Saaristomeren...* 1979: 70).

Veden laadun tarkkailututkimukset aloitettiin 1960-luvulla kaupunkien edustojen merialueiden likaantumisen ja rehevöitymisen vuoksi (esim. Jumppanen 1969). Tarkkailututkimusten pisimmät aikasarjat rajoittuvat Lounais-Suomessa Turun ja Naantalin merialueille. Ennen viranomaisseurantojen alkua oli Suomea ympäröivillä merialueilla 1800-luvun lopusta lähtien tehty hydrografisia mittauksia (mm. Olsson 1899; Granqvist 1921) sekä tutkittu kasvi- ja eläinplanktonia (Leegaard 1920). Jo 1950-luvulla tutkimusalue Arandalla tehtiin Itämerellä monia fysikaalisia, kemiallisia, biologisia ja geologisia tutkimuksia (mm. Hela 1956).

Ympäristöhallinto käynnisti useita veden laadun tarkkailuohjelmia 1980- ja 1990-luvuilla myös kuormitettujen alueiden ulkopuolella. Näissä ohjelmissa kerätty tieto vesien tilasta on osaltaan päätöksenteon perustana esimerkiksi ympäristölupia myönnettäessä. Näytteenotossa mitataan tuottavasta pintavesikerroksesta useita veden laatua kuvaavia muuttujia, muun muassa näkösyvyyttä, a-klorofylliä (biologisesta tuotannosta ja levän määrästä kertova muuttuja) ja ravinnepitoisuuksia (Kirkkala 1998: 23–24, 61).

Saaristomerellä otetaan avovesikaudella vesinäytteitä rannikkovesien tilan seurantaohjelman puitteissa noin kymmeneltä ja Lounais-Suomen ympäristökeskuksen seurannassa 15 havaintopaikalta. Lisäksi Suomen ympäristökeskuksen intensiiviseurannassa otetaan vesinäytteitä yhdestä kolmeen kertaa kuukaudessa ympäri vuoden. Nauvossa, Seilin saaren pohjoispuolella, sijaitsee pisimpään toiminut Saaristomeren intensiiviasema, jossa näytteenotto aloitettiin 1983. Lounais-Suomen ympäristökeskus on lisäksi tehnyt koko Varsinais-Suomen saaristoalueen kattavia veden laadun kartoituksia 1980-luvulta lähtien. Niillä on pyritty saamaan kokonaiskuva Saaristomeren veden laadun alueellisista eroista avovesikaudella (Kirkkala 1998: 23–24).

Ympäristöhallinnon ohjelmien lisäksi Saaristomerellä tehdään velvoitetarkkailuohjelmien mittauksia ympäri vuoden. Vesialuetta kuormittava toiminta on luvanvaraista. Luvissa määritellään

sallitut päästömäärät sekä kuormituksen vähentämistavoitteet lupakaudella. Velvoitetarkkailut ovat kuormittajien kustantamia tutkimusohjelmia, jotka suoritetaan viranomaisten valvonnassa. Saaristomerellä toimintaa valvoo Lounais-Suomen ympäristökeskus. Muuttujat valitaan kuormittajien päästöjen mukaan ja aikataulu suunnitellaan ohjelma-kohtaisesti. Kaikkiaan velvoitetarkkailuissa käytettäviä näytteenottoaikoja on Saaristomerellä ollut satoja (Kirkkala 1998: 23–24).

Kaukokartoitusaineistojen käytettävyys Saaristomerellä

Vedestä heijastuvan auringonsäteilyn määrä on hyvin vähäinen verrattuna maaperän tai kasvillisuuden heijastukseen: vain muutamia prosentteja veteen saapuvasta elektromagneettisesta säteilystä heijastuu takaisin näkyvän valon aallonpituuksilla (400–700 nm; esim. Lillesand & Kiefer 1994: 18–19). Ultravioletti- ja infrapuna-alueiden aallonpituuksilla vesi absorboi lähes kaiken auringonsäteilyn. Termisen infrapuna-alueen kuvat kuvaavat veden pintakerroksen lämpötilaa.

Optisesti aktiivisista komponenteista veden ohella merkittävimmät ovat levän ja kasvillisuuden pigmentit, suurimpana ryhmänä klorofyllit sekä liuenneet orgaaniset aineet (humus) ja epäorgaaninen suspensioaine (Kirk 1983: 49–66). Sameissa vesissä näiden komponenttien suhde vaihtelee ajallisesti ja paikallisesti. Veden sameus lisää säteilyn absorptiota suspensioartikkeleihin ja vähentää säteilyn tunkeutumista veteen, mutta samalla se myös lisää säteilyn heijastumista ja siirtää partikkeleita takaisin ilmakehään. Lisääntyneen heijastumisen vuoksi sameat vesimassat näkyvät näkyvän valon aallonpituuksilla vaaleampina kuin vähemmän sameat, säteilyä enemmän absorboivat vesimassat.

Vesialueiden tutkimuksessa satelliittikuvien käyttö houkuttelee, koska niistä näkyy kokonaiskuva vesimassojen hetkellisestä tilanteesta laajalla alueella. Heijastuvan säteilyn vähäisyyden vuoksi tutkittavien vesialueiden tulisi kuitenkin olla niin laajoja, että rasterikuvan pikselit kuvaavat puhtaita vesipintoja. Tämä hankaloittaa vesialueiden tutkimusta erityisesti Saaristomerellä, jossa veden ja maan mosaiikki sekä hyvin matalat vesialueet tuottavat runsaasti veden ja maan *sekapikseleitä*. Niiden informaatioarvo vesitutkimuksessa on vähäinen. Kuvausinstrumentin korkea spatiaalinen resoluutio (pienempi pikselikoko) lisää puhtaiden vesipikselien osuutta parantaen kuvien käyttökelpoisuutta saaristovesien laadun tulkinnassa.

Myös pohjan heijastus voisi rajoittaa satelliittikuvien käyttöä veden laadun tulkintaan rannikoi-

den matalilla vesialueilla. Tämän ongelman merkitys kuitenkin lienee Suomen rannikoilla vähäinen. Esimerkiksi Kaskisten edustalla ei havaittu veden syvyyden ja Landsat-kuvien sävyarvojen välistä korrelaatiota (Kuittinen ym. 1991a).

Itämerellä ja erityisesti sen rannikkoalueilla myös pilvisuus ja sumuisuus rajoittavat käyttökelpoisten kuvien saatavuutta. Lisäksi spatiaalisen erotuskyvyltään parhaiden satelliittikuvausten toistovälit ovat usein pitkiä. Esimerkiksi Landsat-satelliitit kuvaavat samaa aluetta 16 päivän välein. Vaikka Landsat 5- ja Landsat 7 -satelliittien kiertoradat on synkronoitu, kuvia samalta alueelta otetaan vain 8 päivän välein. Kun ilmaston vuodenaikaisvaihtelujen aikaansaama vesiekosysteemien muutos (mm. kasviplanktonin kehitysvaiheet kevät-kukinnasta talven minimiin) aiheuttavat veden laadun jatkuvan muutostilan, ei harvoilla toistoväleillä ole saatavilla tietystä kehitysvaiheesta montakaan kuvaa. Esimerkiksi 1980- ja 1990-luvuilta on saatavilla vain alle 20 melko pilvetöntä, veden laadun tutkimukseen käyttökelpoista Landsat-kuvaa. Pilvettömiä alueita sisältäviä kuvia on olemassa enemmän, mutta niiden hankinnan ongelmana on kalleus suhteessa saatavaan hyötyyn.

Myös pohjoisten leveysasteiden syksyn ja talven heikot valaistusolosuhteet sekä jääpeite haittaavat veden laadun tulkintaan soveltuviin kuvien saamista. Toisaalta leväkukintojen kannalta mielenkiinto kohdistuu nimenomaan keski- ja loppukesän tilanteisiin, jolloin valaistusolosuhteet ovat hyvät.

Lentokoneesta tehtävien kuvausten etuna on, ettei pilvisuus haittaa niiden toteuttamista niin suuressa määrin kuin satelliittikuvausta, jossa valon on kuljettava paksun ilmakerroksen läpi. Lentokuvausten toteuttaminen on myös joustavampaa kuin satelliittikuvausten. Toisaalta kovin laajoilla alueilla lentokuvausten käyttö ei ole taloudellista, joten ilma- ja satelliittikuvia tulisi ehkä käyttää toisiinsa liitettynä. Lentokonehavainnot ovat tärkeitä pienialaisten kohteiden seurannassa ja ne soveltuvat myös pitkiä poikkileikkauksia kuvaavien havaintolinjojen tuottamiseen. Lentokoneisiin voidaan myös asentaa hyvin monen tyyppiä havaintolaitteita kameroista ja spektrometreistä laserlaitteisiin, joilla veden kemiallista ja fysikaalista koostumusta pystytään analysoimaan varsin tarkasti (Babichenko ym. 1998, 1999).

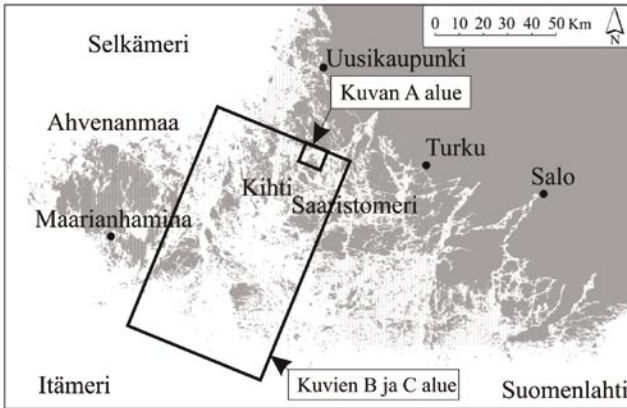
Mitä Landsat-kuvat kertovat Saaristomerestä?

Olemme tutkineet Saaristomeren veden laatua ja sen alueellisia ja ajallisia vaihteluita Landsat-satelliittikuvia käyttäen (Erkkilä & Kirkkala 2000; Erkkilä & Kalliola, painossa). Olemme käyttäneet

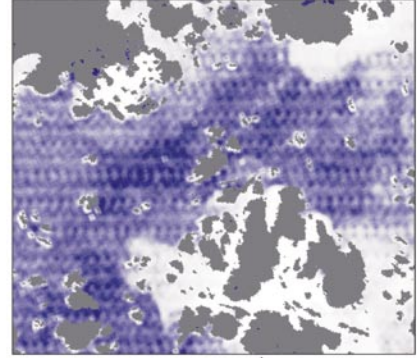
työssä Landsat 5 -satelliitin Thematic Mapper (TM) -keilaimen kuvia ja uudemman Landsat 7 -satelliitin Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) -keilaimen kuvia.

Landsat-kuvat sopivat varsin hyvin pienipiirteiselle Saaristomerelle. Yhdessä satelliittikuvassa (180 x 180 km) näkyy jokseenkin koko merialue, ja kuvien alueellinen erotuskyky (30/120 metrin pikselikoko) on riittävän tarkka kuvaamaan myös sisimmän saariston kapeita lahtia ja salmia. Sekä Landsat TM- että ETM+ -keilainten näkyvän valon kanavien alueellinen resoluutio on 30 metriä. Lämpökanaavan (10,420–12,500 μm) alueellinen resoluutio on TM-keilaimella 120 metriä, mutta ETM+ -keilaimella 60 metriä. Sen sijaan TM- ja ETM+ -kuvien spektrinen erotuskyky on rajallinen. Näkyvän valon alueella on kolme kanavaa: TM/ETM+ -kanava 1 sinisen valon alueella (0,450–0,520 μm), TM/ETM+ -kanava 2 vihreän valon aallonpituuksilla (0,520–0,600 μm) ja TM/ETM+ -kanava 3 punaisen valon alueella (0,630–0,690 μm). Näiden kanavien spektrinen informaatio koostuu toisilleen osin vastakkaisten komponenttien heijastuksista (Dekker & Peters 1993: 780–782; Brivio ym. 2001: 5). Sinisen valon alueella kanavan 1 aallonpituudella auringonsäteily tunkeutuu syvimmälle veteen ja absorboituu humuksen ja a-klorofyllin vaikutuksesta. Kanavan pitemmällä aallonpituuksilla sironta vedestä ilmakehään kuitenkin lisääntyy lisäten heijastusta. Kanavalla 2 sijaitsee klorofyllin näkyvän valon alueen heijastuksen huippu. Vihreän valon aallonpituuksilla myös suspensioaineksen lisääntyvä sironta lisää heijastusta, mutta samalla liuennut orgaaninen aine absorboi säteilyä. Kanavan 3 alueella on a-klorofyllin absorptio voimakasta. Punaisen valon alueella vedestä heijastuvan säteilyn määrä vähenee absorption voimistuessa, vaikka toisaalta sironta veden eri komponenteista, esimerkiksi suspensioartikkeleista, aiheuttaa myös näillä aallonpituuksilla säteilyn heijastumista takaisin ilmakehään.

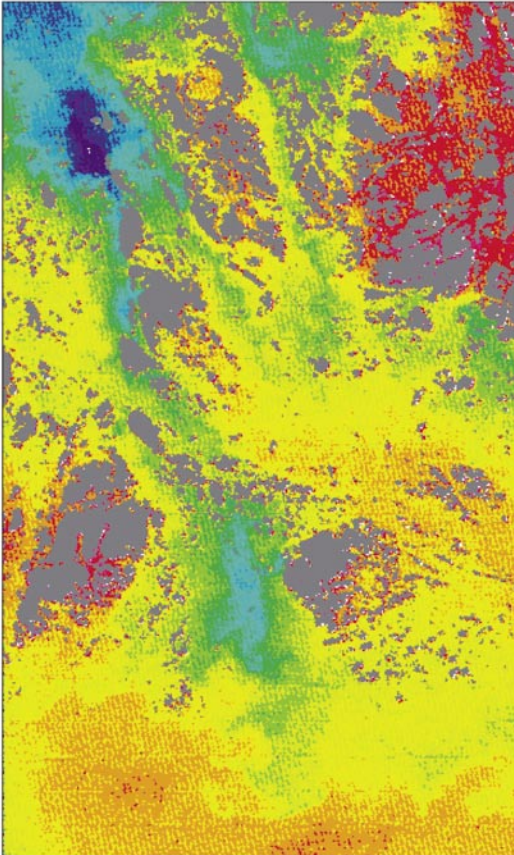
Landsat-kuvia on muilla merialueilla käytetty jonkin verran veden laadun tutkimuksessa niiden hyvän alueellisen erotuskyvyn vuoksi (mm. Bagheri & Dios 1990; Khorram ym. 1991; Pattiaratchi ym. 1994; Baban 1997). Ongelmana Landsat-kuvien käytölle operatiivisessa veden laadun seurannassa on kuitenkin se, että vesinäytteiden ja kuvien informaation välille rakennetut algoritmit ovat ajallisesti ja paikallisesti spesifejä (mm. Forster ym. 1993). Jokainen satelliittikuvasta tehty kvantitatiivinen vedenlaatu muuttujien määrittäminen edellyttää lähes samanaikaisesti otettuja vesinäytteitä, joiden avulla testataan todellisen veden laadun ja kuvien informaation korrelaatio. Niinpä Landsat-kuvat eivät erityisen hyvin sovellu kvan-



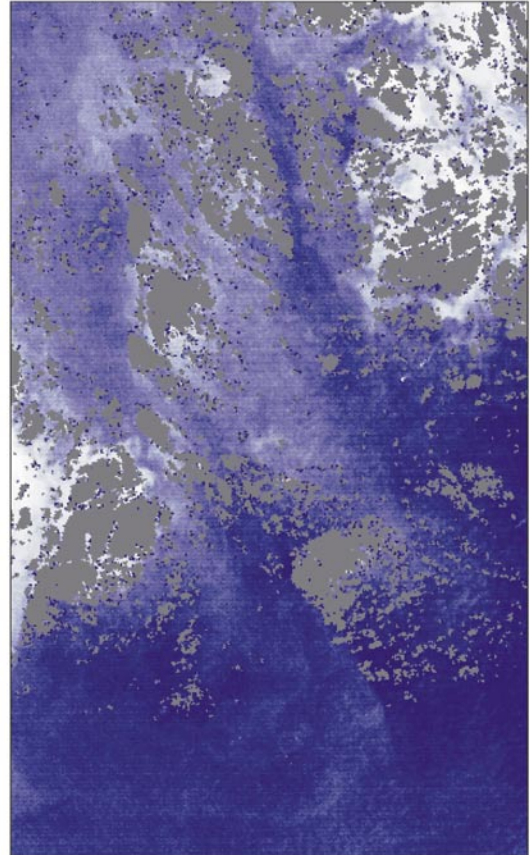
A. Iniönaukko, TM-kanava 1, 16.8.1997



B. Kihti, TM-kanava 6, 16.8.1997



C. Kihti, TM-kanava 1, 16.8.1997



Kuva 1. Landsat 5 -satelliitin TM-keilaimen kuvassa näkyviä Saaristomerren pintavirtauksia. Kuva on otettu 16. elokuuta 1997. Maa-alueet ovat harmaita. (A) Pienialaisia virtauksia Iniönaukossa. Kirkkaan veden alueet ovat kuvassa tummansinisellä, samean veden alueet vaaleansinisellä. Kierremäinen raitaisuus on sensorista johtuva häiriö. (B) Kihdin ja sitä ympäröivien alueiden suhteellisia lämpötilaeroja. Veden lämpötila kasvaa sinisistä värisävyistä punaisiin siirryttäessä. (C) Kihdin ja sitä ympäröivien alueiden pintavirtauksia.

titatiiviseen veden laadun tutkimukseen. Esimerkiksi Saaristomerellä tehtyjen AISA-spektrometrikuvausten ja vesinäytteiden perusteella simu-

loidut TM-kanavien ja *a*-klorofyllin korrelaatiot eivät tuottaneet lupaavia tuloksia, joskin Landsat-kanavat todettiin käyttökelpoisemmiksi veden

sameuden kartoituksessa (Härmä ym. 2001). Toisaalta jo yksittäistenkin satelliittikuvien kvalitatiivisella tulkinnalla on saatu uutta tietoa Saaristomerен veden laadun alueellisesta jakautumisesta (Erkkilä & Kirkkala 2000).

Landsat-kuvista ilmenee selvästi avomeren laajoja ja saaristoalueiden pienimuotoisia virtauskuvioita heijastusominaisuuksiltaan erilaisten pintavesimassojen sekoittuessa toisiinsa (kuva 1). Erityisesti kesäiset tuulien ja pintavirtailujen muotoilemat sinileväkukinnot erottuvat selvästi. Avoimilla merialueilla virtauskuvioita ovat laajalaisia, mutta saaristoalueilla ne ovat pienimuotoisempia ja rikkonaisempia, kuten jo aikaisemmissa virtausmittauksissa on havaittu (*Saaristomerен... 1979*).

Suurten saariryhmien rajaamalla saaristoalueilla on havaittavissa monimuotoisia ja teräväräjäisiä virtauskuvioita Landsat-kuvissa (kuva 1A). Kokonaisvaltaisesti tarkasteltuna sameus vähenee sisäsaaristosta ulkosaaristoa kohden, mikä ilmenee sameuden vyöhykkeisyytenä. Se havaitaan kaikissa tutkituissa satelliittikuvissa ja vahvistaa vedenlaatumittausten mukaan tehtyä määrittystä saaristovesien laadullisesta jakautumisesta sisä-, väli- ja ulkosaaristoalueisiin (Erkkilä & Kirkkala 2000; Erkkilä & Kalliola, painossa). Toisaalta satelliittikuvat paljastavat myös merkkejä huomattavista vedenvaihtoprosesseista erityisesti syvillä salmialueilla kuten Kihdin kanavamaisessa murrosvyöhykkeessä, jossa vedet ovat yleisesti kirkkaampia ja viilempiä kuin viereisillä tiheäsaarisilla alueilla.

Sameuserojen lisäksi Landsat-kuvissa erottuu saariston pintavesien lämpötilajakauma. Vaikka sameat vedet ovat yleensä lämpimämpiä kuin kirkkaat vedet, sameuden ja lämpötilan virtauskuvioiden alueelliset jakaumat eivät ole täysin yhteneviä (kuvat 1B ja 1C). Itämerellä tapahtuu laajamittaista syvän veden kumpuamista rannikko- ja avomerialueiden raja-alueilla. Saaristoalueilla Landsat-kuvissa näkyy myös pienimuotoisempia kumpuamisia, esimerkiksi kun vallitseva tuuli työntää lämmintä pintavettä pois ja sen alta nousee pintaan kylmempää vettä pohjan tuntumasta.

Kohti integroitua seurantajärjestelmää

Leimaa-antavin piirre Saaristomerellä on sen maantieteellisten ominaisuuksien vastakohtaisuus. Saaristomeri on leveä ja pirstaleinen mosaiikki, jossa on paljon pieniä vaihteluita ja yksityiskohtia. Tämä olennaisesti vaikuttaa geoinformatiikan menetelmien käytettävyyteen veden laadun tutkimuksessa ja seurannassa. Saaristomerен eri osat alueet ovat vuorovaikutuksessa sekä keskenään että

niitä ympäröivien avoimien merialueiden kanssa. Vuorovaikutuksen intensiteetti vaihtelee sekä ajankohdan että meteorologisten ja hydrografisten olosuhteiden mukaan. Yhdellä alueella tehdyt havainnot eivät välttämättä kuvaa hyvin koko saaristoalueen, eivätkä aina edes lähialueiden veden tilaa.

Käyttökelpoisten satelliittikuvien vaikeasta saatavuudesta huolimatta niiden tarjoama synoptinen kuva täydentää veden laadun seuranta- ja tutkimusta oleellisesti. Laajoja alueita kattavien satelliittikuvien suurin lisäarvo onkin se, että ne dokumentoivat tietynä hetkenä vallinneen todellisen veden laadun jakauman. Perinteisten seurantaohjelmien pistekohtaisilla tiedoilla tietoa saadaan vain vesimassan hetkellisestä tilasta kussakin paikassa. Näyte ei välttämättä edusta hyvin edes oman alueensa vesimassaa, onhan siinä vain muutama litra vettä tietyiltä syvyyksiltä. Kun vesimassojen käyttäytyminen tunnetaan yleisemmin, tietojen tulkinta helpottuu.

Jotta kaukokartoituskuvia ja veden laatua voitaisiin tarkastella yhdessä, olisi ihanteellista ottaa vesinäytteet ja rekisteröidä satelliittikuvat lähes samanaikaisesti. Näytteiden keruun vaatiman suuren työmäärän vuoksi tämä on mahdollista toteuttaa vain kertaluonteisissa tutkimuskampanjoissa (esim. Härmä ym. 2001). Apua tarjoavat automaattiset havaintovälineet, joita voidaan asentaa kauppalaivoihin Itämerellä (mm. Rantajarvi 1998; Itämeri-tietokanta 2003). Lounais-Suomen ympäristökeskus asennutti merivartiolaiva Telkkään 1990-luvun lopussa automaattisen pintaveden laatua mittaavan laitteiston, joka mittaa a-klorofylliä, sameutta, suolaisuutta ja lämpötilaa laivan kulkiessa kesäaikaan Saaristomerellä (VL Telkän mittaukset 2003). Mittaukset suoritetaan määrävällein aluksen liikkeessä, ja tulokset saadaan linjamaista tietoa pintavesien laadusta. Säännöllinen veden laatua koskevan tiedon keruu vakioreiteillä voi tuottaa yhtenäisiä aikasarjoja, joiden perusteella voidaan ymmärtää merialueen dynamiikkaa paremmin sekä kehittää ja testata veden laatua kuvaavia malleja.

Suomessa on 1990-luvun alkupuolelta alkaen kehitetty menetelmiä rannikkoalueiden seurantaan muun muassa ympäristöhallinnon ja tutkimuslaitosten yhteistyönä (Kuittinen ym. 1991b; Koponen ym. 2001). Vesien dynaamisen luonteen vuoksi seuranta olisi ihannetapauksessa lähes reaaliaikaista. Myös tiedotuksen tulisi vastata tarpeeseen seurata nopeasti muuttuvia ilmiöitä, kuten sinilevien massaesiintymistä. Vaikka tarkkoja seuranta- ja ennustejärjestelmiä tarvitaan, luotettavien mallien luominen vaatii vielä paljon tutkimusta. Erityisesti eri menetelmiä integroiville järjestelmille voi asettaa paljon toiveita. Suomen

ympäristökeskus tuottaa nykyisin NOAA/AVHRR-kuviin perustuvia Suomenlahden lämpötilakarttoja (kuvia on nähtävissä Suomen ympäristökeskuksen Internet-sivuilla osoitteessa <www.ymparisto.fi>). Ne eivät karkean alueellisen resoluutionsa vuoksi kuitenkaan juuri sovellu käytettäviksi Saaristomerellä. Siellä seurantamenetelmät ja -kohteet onkin räätälöitävä erikseen kenttätutkimusten, veden laatua ja virtauksia kuvaavien mallien sekä kaukokartoitusmenetelmien yhteiskäyttöön perustuen. Tämä on nykyään yleinen veden laadun seurannan kehityssuunta kaikkialla maailmassa (mm. Dekker ym. 2001).

Tulevaisuudessa kaukokartoitusinstrumentit kehittyvät siten, että saataville tulee alueellisesti, ajallisesti ja spektrisesti paremmin vesien tutkimukseen soveltuvia aineistoja. Jo nykyään ESAn Envisat-satelliitin Meris-instrumentti on todettu Suomen ympäristökeskuksen koordinoimissa tutkimuksissa lupaavaksi rannikkovesien laadun määrittämisessä (Härmä ym. 2001). Saaristomerellä sen 300 metrin alueellinen resoluutio saattaa sopia osittain laajempien saariston selkävėsialueiden kuvaamiseen. Koko saaristoalueen spatiaalisesti kattavaan veden laadun kuvaamiseen karkearesoluutioiset kuvat eivät kuitenkaan sovellu.

Kehittämällä Saaristomerren ja koko Itämeren vedenlaatu- ja virtausmalleja päästään syvällisempään prosessien ymmärtämiseen (esim. Helminen ym. 1998a, 1998b; Kuusisto ym. 1998). Hyvin onnistuessaan kokonaisvaltainen mallinnus voisi verraten pienellä työvoimapanostuksella tuottaa käytökelpoisia tuloksia koko Saaristomerren alueella. Mallien avulla voitaisiin myös kytkeä Saaristomerren tilanne koko Itämeren alueen hydrografiseen tilanteeseen. Mallien kehitystyössä vaaditaan kuitenkin runsaasti kenttänäytteiden ottoa ja mallien testaamista näytetulosten avulla.

Saaristomerellä veden laadun seurannan järjestäminen vaatii valintoja: mitä ilmiöitä halutaan seurata, millä intensiteetillä ja kuinka paljon seurantaan halutaan panostaa. Tästä syystä kustannustehokkaan ja luotettavan seurantajärjestelmän kehittäminen edellyttää alueellisten erityispiirteiden, kuten virtausten ja veden ominaisuuksien, parempaa ymmärrystä. Tekemämme vesialueiden dynaamisen luonteen dokumentointi satelliittikuvien avulla on ollut osa tätä pohjatyötä. Kun kaukokartoitusaineistoja tulevaisuudessa yhdistetään kenttätutkimuksista ja virtausmalleista saataviin tietoihin, tietojenkäsittelyn haasteet ovat mitattavia ja vaativat tieteenalojen välisen yhteistyön kehittämistä. Menetelmien kehityksessä riittääkin haasteita vielä monille geoinformatiikan parissa työskenteleville tutkijoille.

Kiitokset

Seurantamenetelmien kehittämistä Saaristomerren alueella, erityisesti kaukokartoitusmenetelmien hyödyntämistä on selvitetty Turun yliopiston, Lounais-Suomen ympäristökeskuksen ja Suomen ympäristökeskuksen yhteishankkeessa, joka toteutettiin vuosina 1999–2002 Maj ja Tor Nesslingin säätien, Ympäristöministeriön ja Suomen biodiversiteettitutkimusohjelma Fibren tuella.

KIRJALLISUUS

- Baban, S. M. J. (1997). Environmental monitoring of estuaries. Estimating and mapping various environmental indicators in Breydon Water Estuary, U.K., using Landsat TM Imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 44: 5, 589–598.
- Babichenko, S., L. Poryvkina, Y. Orlov & S. Rebrük (1998). Fluorescent signatures in environmental analysis. *Teoksessa* Meyers, R. A. (toim.): *Encyclopedia of Environmental analysis and remediation*, 1787–1791. Wiley & Sons, New York.
- Babichenko, S., S. Kaitala, A. Leeben, L. Poryvkina & J. Seppälä (1999). Phytoplankton pigments and dissolved organic matter distribution in the gulf of Riga. *Journal of Marine Systems* 23: 1–3, 69–82.
- Bagheri, S. & R. A. Dios (1990). Chlorophyll-a estimation in New Jersey's coastal waters using Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* 11: 2, 289–299.
- Brivio, P. A., C. Giardino & E. Zilioli (2001). Validation of satellite data for quality assurance in lake monitoring applications. *The Science of the Total Environment* 268: 1–3, 3–18.
- Dekker, A. G. & S. W. M. Peters (1993). The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case study in the Netherlands. *International Journal of Remote Sensing* 14: 5, 799–821.
- Dekker, A. G., R. J. Vos & S. W. M. Peters (2001). Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes. *The Science of The Total Environment* 268: 1–3, 197–214.
- Erkkilä, A. & T. Kirkkala (2000). Pintaveden vyöhykeisyys Saaristomerellä. *Lounais-Suomen ympäristökeskus, Alueelliset ympäristöjulkaisut* 149. 34 s.
- Erkkilä, A. & R. Kalliola (*painossa*). Patterns and dynamics of coastal waters in multi-temporal satellite images: support to water quality monitoring in the Archipelago Sea, Southwest Finland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.
- Forster, B. C., S. Xingwei & X. Baide (1993). Remote sensing of sea water quality parameters using Landsat-TM. *International Journal of Remote Sensing* 14: 15, 2759–2771.
- Granqvist, G. (1921). Meritieteelliset retkikunnat Suomea ympäröiviin meriin vuonna 1914. *Merentutkimuslaitoksen julkaisu* 4. 22 s.
- Granö, O. (1981). The zone concept applied to the Finnish coast in the light of scientific traditions. *Fennia* 159: 1, 63–68.

- Hela, I. (1956). *Yhteenveto Arandan retkikunnan vuonna 1956 suorittamasta tutkimusohjelmasta*. 12 s. Merenkulkuhallitus, Helsinki.
- HELCOM. First assessment of the state of the coastal waters of the Baltic Sea (1993). *Baltic Sea Environment Proceedings* 54. 160 s.
- Helminen, H., K. Häkkinen, M. Keränen, J. Koponen, P. Laiho & H. Ylinen (1998a). Turun edustan merialueen virtaus- ja vedenlaatumalli. *Suomen ympäristö* 203. 64 s.
- Helminen, H., E. Juntura, J. Koponen, P. Laiho & H. Ylinen (1998b). Assessing of long distance background nutrient loading to the Archipelago Sea, northern Baltic with a hydrodynamic model. *Environmental Modelling and Software* 13: 5–6, 511–518.
- Härmä, P., J. Vepsäläinen, T. Hannonen, T. Pyhälähti, J. Kämäri, K. Kallio, K. Eloheimo & S. Koponen (2001). Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland. *The Science of the Total Environment* 268: 1–3, 107–121.
- Häyrén, E. (1948). Skärgårdens längszoner. *Teoksessa* Lindberg, H. (toim.): *Skärgårdsboken*, 242–256. Söderström & Co., Helsingfors.
- Itämeri-tietokanta (2003). Merentutkimuslaitos. 29.7.2003. <<http://algaline.fimr.fi>>
- Jumppanen, K. (1969). Selvitys Lounais-Suomen rannikkovesien tilasta. *Lounais-Suomen vesiensuojeluyhdistys r. y.:n Julkaisu* 10. 56 s.
- Jumppanen, K. & J. Mattila (1994). Saaristomeren tilan kehitys ja siihen vaikuttavat tekijät. *Lounais-Suomen vesiensuojeluyhdistys r. y.:n Julkaisu* 82. 206 s.
- Kautsky, N., H. Kautsky, U. Kautsky & M. Waern (1986). Decreased depth penetration of *Fucus vesiculosus* (L.) since the 1940's indicates eutrophication of the Baltic Sea. *Marine Ecology Progress Series* 28, 1–8.
- Khorram, S., H. Cheshire, A. L. Geraci & G. La Rosa (1991). Water quality mapping of Augusta Bay, Italy from Landsat-TM data. *International Journal of Remote Sensing* 12: 4, 803–808.
- Kirk, J. T. O. (1983). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. 401 s. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kirkkala, T. (1994). Skärgårdshavets belastningssituation och miljötillstånd. *Teoksessa* Blomqvist, E. M. (toim.): *Lantbrukets och fiskodlingens belastning i kust- och skärgårdsvatten. Nordiska Ministerrådets Skärgårdssamarbete, Rapport 1994*: 4, 30–35.
- Kirkkala, T. (1998). Miten voit Saaristomeri? *Ympäristön tila Lounais-Suomessa* 1. 70 s. Lounais-Suomen ympäristökeskus & Edita, Turku.
- Koponen, S., J. Pulliainen, H. Servomaa, Y. Zhang, M. Hallikainen, K. Kallio, K. Eloheimo & T. Hannonen (2001). Analysis on the feasibility of multi-source remote sensing observations for chl-a monitoring. *The Science of The Total Environment* 268: 1–3, 95–106.
- Kuittinen, R., P. Sevola & M. Virtanen (1991a). Landsat-satelliitin kuvien käyttö veden ominaisuuksien ja erilaisten vesimassojen levinneisyyden kartoituksessa. *Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita* 1243. 81 s.
- Kuittinen, R., P. Sevola & M. Virtanen (1991b). Monitoring the Baltic Sea by remote sensing. *Aqua Fennica* 21: 2, 95–103.
- Kuusisto, M., J. Koponen & J. Sarkkula (1998). Modelled phytoplankton dynamics in the Gulf of Finland. *Environmental Modelling & Software* 13: 5–6, 461–470.
- Larsson, U., R. Elmgren & F. Wulff (1985). Eutrophication and the Baltic Sea: causes and consequences. *Ambio* 14: 1, 9–14.
- Launiainen, J., J. Pokki, J. Vainio, J. Niemimaa & A. Voipio (1989). Näkösyvyyden vaihteluista ja muuttumisesta pohjoisella Itämerellä. *Teoksessa* Forsius, J. (toim.): *XIV Geofysiikan päivät, Helsinki 3.–4.5. 1989*, 117–121. Geofysiikan seura, Helsinki.
- Leegaard, C. (1920). Microplankton from the Finnish waters during the month of May 1912. *Acta Societatis Scientiarum Fennicae* 48: 5, 1–44.
- Lillesand, T. M. & R. W. Kiefer (1994). *Remote sensing and image interpretation*. 3. p. 750 s. Wiley & Sons, New York.
- McIntyre, A. D. (1995). Human impact on the oceans: the 1990s and beyond. *Marine Pollution Bulletin* 31: 4–12, 147–151.
- Olsson, P. H. (1899). Några iakttagelser öfver hafsvattnets salthalt i Finska Skärgårdshavet. *Geografiska Föreningens Tidskrift* 11: 5, 257–280.
- Paerl, H. W. (1995). Coastal eutrophication in relation to atmospheric nitrogen deposition: current perspectives. *Ophelia* 41, 237–259.
- Pattiaratchi C., P. Lavery, A. Wyllie & P. Hick (1994). Estimates of water quality in coastal waters using multi-date Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* 15: 8, 1571–1584.
- Rantajarvi, E. (1998; toim.). Phytoplankton blooms in the Finnish sea areas and in the Baltic proper during 1997. *Report Series of the Finnish Institute of Marine Research* 36. 32 s.
- Richardson, K. & J. P. Heilmann (1995). Primary production in the Kattegat: past and present. *Ophelia* 41, 317–328.
- Saaristomeren virtaustutkimus* (1979). 265 s. Virtaustutkimuksen neuvottelukunta, Turku.
- Sandén, P. & B. Håkansson (1996). Long-term trends in Secchi depth in the Baltic Sea. *Limnology and Oceanography* 41: 2, 346–351.
- Schulz, S., W. Kaiser & G. Breuel (1991). Trend analysis of biological parameters in the Baltic (1976–1988). *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie* 76: 3, 351–359.
- Suomela, J. (2001). Saaristomeren tila vuosituhaten vaihteessa. *Lounais-Suomen ympäristökeskuksen moniste* 20/2001. 99 s.
- Trzosińska, A. (1992). Water transparency in the Polish zone of the Baltic Sea. *Oceanologia* 33, 203–209.
- VL Telkän mittaukset (2003). Lounais-Suomen ympäristökeskus. 29.7.2003. <www.ymparisto.fi/tutkimus/ohjelma/los/telkka.htm>