

Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Erkka Laitinen

Siuntionjoen ravinne- ja kiintoaine- kuorman estimointi jatkuvatoimisesti mitattujen sameusarvojen avulla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

28.9.2020

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Erkka Laitinen Siuntionjoen ravinne- ja kiintoainekuorman estimointi jatkuvatoimisesti mitattujen sameusarvojen avulla 49 sivua + 1 liite 28.9.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine	ympäristötekniikka
Ohjaajat	lehtori Kaj Lindedahl vesistöasiantuntija Katja Pellikka
<p>Aiemmissä tutkimuksissa on osoitettu, että jatkuvatoimisella vedenlaadun mittaamisella on mahdollista saavuttaa merkittäviä hyötyjä, sillä menetelmän avulla on mahdollista saada tietoa vedenlaadun vaihteluista lyhyen aikavälin puitteissa, mikä ei muilla keinoin olisi mahdollista. Tässä insinööriyössä käytetään tapaustutkimuksena Siuntionjoen vesistöä, jonka alueella jokiin kulkeutuu huomattavia määriä maataloudesta peräisin olevaa hajakuormitusta. Myös rehevöityminen on ongelmana useissa alueen järvissä. Työn toimeksiantajana on Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry (LUVY).</p> <p>Tämän työn tarkoituksena oli selvittää, kuinka täsmällisesti Siuntionjoen vesistön alueelta Itämeren suuntautuvaa ravinnekuormaa on mahdollista määrittää jatkuvatoimisen mittauslaitteiston avulla. Koska etenkin fosforin mittaaminen jatkuvatoimisesti ei nykytekniikalla ole mahdollista, yleisesti sijaismuuttujana ravinnekuormitusta määritettäessä käytetään veden sameusarvoja, joiden on tyypillisesti havaittu korreloivan ravinnepitoisuuksien kanssa savimaasta koostuvilla valuma-alueilla.</p> <p>Tämän työn tarkastelujakso alkoi 26.4.2019 jatkuvatoimisen mittauslaitteiston asennuksella ja se päättyi saman vuoden lopussa. Tutkimuksessa mittauslaitteisto asennettiin Siuntionjoen valuma-alueen alaosaan, mikä mahdollisti tarkastelun mahdollisimman laajalta osalta valuma-aluetta.</p> <p>Tarkastelujakson päätyttyä ravinne- ja kiintoainekuormien suuruudet määritettiin jatkuvatoimisen mittarin mittaaman sameusanturin ja LUVYn kalibrointimittauksista saadun datan perusteella regressioanalyysia hyödyntäen sekä Suomen ympäristökeskuksesta (SYKE) saatujen virtaamatietojen avulla. Saatuja tuloksia verrattiin SYKEN operatiivisen VEMALA-vesistömallin kuormituslaskennan antamiin arvoihin.</p> <p>Tulosten perusteella jatkuvatoimisesti mitattujen sameusarvojen sekä kalibrointimittausten avulla Siuntionjoen vesistön alueella on mahdollista estimoida mereen suuntautuvien fosfori-, typpi- ja kiintoainekuormien määriä riittävällä tarkkuudella, mikä puoltaa jatkuvatoimisen vedenlaadun seurannan jatkamista kyseisessä uomassa, jolloin myös vesiensuojelutoimenpiteiden vaikutuksista alueella voidaan tulevaisuudessa esittää arvioita.</p>	
Avainsanat	mittaustekniikka, ravinnekuormitus, vedenlaatu, virtavedet

Author Title Number of Pages Date	Erkka Laitinen Continuously Measured Turbidity as Surrogate in Estimation of Nutrient and Suspended Solids Loads in the River Siuntionjoki 49 pages + 1 appendix 28 September 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and Environmental Engineering
Professional Major	Environmental Engineering
Instructors	Kaj Lindedahl, Senior Lecturer Katja Pellikka, Specialist
<p>Previous research shows that continuous water quality measurement has several advantages in water quality monitoring, as it provides an opportunity to see rapid fluctuation of water quality that cannot be observed by other methods. This thesis is a case study concentrating on the Siuntionjoki water basin in southern Finland, of which a significant part consists of agricultural land, causing diffuse nutrient loading into the system. In addition, eutrophication in the lakes in the area has become a major problem. This thesis was commissioned by Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry (LUVY), a regional association specialized in water research.</p> <p>The aim of this thesis was to find whether the nutrient loads from the Siuntionjoki water basin towards the Baltic Sea can be estimated through constant water quality monitoring. As phosphorus, in particular, can only be analyzed through laboratory analysis, turbidity is typically used as a surrogate measure due to having a positive correlation with nutrient concentrations in loamy catchments.</p> <p>The monitoring period in this thesis project began on 26 April, 2019 with the installation of a monitoring station, and it lasted until the end of the calendar year. The monitoring station was installed in the lower part of the catchment, in order to be able to analyze the data from the entire area.</p> <p>After the monitoring period, nutrient and suspended solids loads towards the Baltic Sea were calculated by regression analysis, by using data from calibration samples made by LUVY as well as the flow rate data, provided by the Finnish Environment Institute (SYKE). The results were compared with the ones of the operative load calculation model VEMALA, developed by SYKE.</p> <p>On the basis of the results, it can be justifiably assumed that in the Siuntionjoki water system the turbidity data allows the loads of nutrients (i.e. phosphorus and nitrogen) and suspended solids to be estimated at a reasonable level of accuracy. This, in turn, supports the argument for ongoing, continuous water quality measurement in the basin, which will also help clarify the impact of future conservation measures in the area.</p>	
Keywords	instrumentation, nutrient loading, lotic systems, water quality

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Vedenlaadun jatkuvatoiminen mittaaminen	2
2.1	Jatkuvatoimiset vedenlaadun mittauslaitteistot vesistöjen ravinnekuormituksen arviointityökaluna	2
2.2	Jatkuvatoimisten vedenlaatumittareiden tekniikasta	7
2.3	EXO2-vedenlaatumittari	8
2.4	Mittausten käytännön toteutukseen liittyviä ohjeita ja käytäntöjä	10
2.4.1	Mittauspaikan valinta	10
2.4.2	Mittarin asennustavan valinta	12
2.4.3	Mittarin huollot ja kalibroinnit	13
2.5	Ravinnekuormituksen estimointi jatkuvatoimisilla vedenlaatumittareilla	14
2.5.1	Vertailunäytteet ja datan käsittely	14
2.5.2	Lineaarisen regression hyödyntäminen	15
2.6	Virtaaman määrittäminen ja kuormituslaskenta virtaamatietojen avulla	16
2.6.1	Siivikkomittaukset	18
2.6.2	Akustiset mittaukset	18
2.6.3	Vesivoimalaitosten hyödyntäminen	19
2.6.4	Purkautumiskäyrä ja veden korkeus	19
3	Aiempi tutkimus, tutkimuksen tavoitteet ja opinnäytetyön toimeksiantaja	22
3.1	Aiemmat ravinnekuormitustutkimushankkeet Etelä-Suomen alueella	22
3.2	Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry	22
3.3	Tutkimuskysymykset	24
4	Tutkimuksen toteutus	25
4.1	Siuntionjoen vesistö ja Elinvoimainen ja esteetön Siuntionjoki -hanke	25
4.2	Mittarin asentaminen	27
4.3	Vertailunäytteiden ottaminen	30
4.4	Mittarin huolto ja kalibrointi	30
4.5	Virtaamamittaukset	30

5	Tulokset	32
6	Tulosten tarkastelu	36
7	Loppupäätelmät	42
8	Jatkotoimenpiteet	43
	Lähteet	44

Liitteet

Liite 1.	Tyypillisiä EXO-vedenlaatumittareissa käytettäviä antureita, antureiden toimintaperiaatteet sekä mitattavien suureiden kuvaukset	
----------	--	--

Lyhenteet

LUVY Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry

SYKE Suomen ympäristökeskus

1 Johdanto

Järvien ja Suomenlahden rehevöityminen on yleinen ongelma Etelä-Suomessa. Merkittävä osa rehevöitymisen aiheuttamasta kuormituksesta on peräisin maataloudesta, mutta myös metsätalouden toimenpiteiden aiheuttama kuormitus korostuu erityisesti vesistöjen latvajärvissä, joissa maatalouden kuormitusta on vähemmän. Ravinteet kulkeutuvat valuma-alueelta jokiin, mistä ne jatkavat matkaansa järviin ja aiheuttavat niissä rehevöitymistä. Etelä-Suomen rannikkoalueiden kuormituksesta merkittävä osa kulkeutuu myös Itämereen.

Jatkuvatoiminen vedenlaadun mittaaminen on osoittautunut hyödylliseksi keinoksi ravinnekuormituksia määritettäessä, sillä menetelmän avulla on mahdollista havaita vedenlaadussa tapahtuvia nopeita muutoksia, joiden havaitseminen pelkin laboratorioanalyysin ei olisi mahdollista. Tässä insinööriyössä tutkitaan jatkuvatoimisen vedenlaadun mittalaitteiston soveltuvuutta ravinnekuormituslaskennan tekemisessä maatalousvaltaisen valuma-alueen lasku-uomassa. Tässä työssä jatkuvatoimista mittauslaitteistoa on hyödynnetty etenkin kiintoaine-, fosfori- ja typpikuorman laskennallisessa määrittämisessä.

Tämä insinööriyö toteutetaan osana Elinvoimainen ja esteetön Siuntionjoki -tutkimushanketta, jonka toimeenpanijana on Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry (LUVY). Hanke on alkanut vuonna 2018, ja se jatkuu vuoteen 2024. (Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry 2018.) Jatkuvatoiminen mittari asennettiin nykyiseen paikkaansa Siuntionjokeen huhtikuussa 2019. Tässä työssä esitellään ensimmäisen seurantavuoden (2019) tulokset. Lisäksi käydään lävitse jatkuvatoimisen vedenlaadun mittaamisen tekniikan peruspiirteet, sijaismuuttujan käytön pääperiaatteet sekä ensimmäisen kahdeksan kuukauden tietojen perusteella saadut tulokset fosforin, typen ja kiintoaineen ainevirtaamista. Tuloksia verrataan Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) VEMALA-mallinnuksen antamiin simulointituloksiin. Tulosten tarkastelun yhteydessä pohditaan, mitkä tekijät puoltavat jatkuvatoimisten mittareiden käyttöä vedenlaadun seurannassa, ja esitetään mahdollisia syitä, jotka voivat johtaa tulosten virheelliseen tulkintaan.

2 Vedenlaadun jatkuvatoiminen mittaaminen

2.1 Jatkuvatoimiset vedenlaadun mittauslaitteistot vesistöjen ravinnekuormituksen arviointityökaluna

Vedenlaadun jatkuvatoimisen mittaamisen hyödyt on tiedostettu jo vuosikymmeniä sitten. Ensimmäiset automatisoidut vedenlaadun mittausasemat otettiin käyttöön Saksan liittotasavallassa ja Yhdysvalloissa 1950-luvun puolivälissä. Suomessa ensimmäinen automaattinen mittausasema otettiin puolestaan käyttöön vuonna 1974. Vanhoissa laitteissa haasteiksi osoittautuivat kuitenkin niiden rajallinen tallennus- ja tiedonsiirtokapasiteetti sekä muut tekniset ongelmat, mutta 1990-luvulta alkanut tietotekniikan nopea kehitys on vähentänyt näitä ongelmia huomattavasti. (Juusela 2012: 10.)

Vedenlaadun jatkuvatoimista mittaamista voidaan käyttää vesistön ekologisen tai kemiallisen tilan määrittämisessä. Tässä työssä keskitytään ekologiseen tilaan liittyviin parametreihin, joista yksi keskeisimpiä on ravinnekuormitus. Ravinnekuormituksen mittaaminen on tärkeää, sillä sen vaikutus vesistön ekologiseen tilaan on suuri. Merkittävä osa vesistöön virtaavista ravinteista on peräisin maatalouden hajakuormituksesta (Valkama & Ruth 2017), minkä vuoksi se on usein keskeisellä sijalla kuormitustarkasteluissa. Kuitenkin myös metsätalouden osuus voi olla huomattava etenkin vesistöjen latvajärvissä, joissa muita kuormituslähteitä on vähemmän (Salmi 2020). Muita merkittäviä ihmisen toiminnasta peräisin olevia kuormituslähteitä ovat esimerkiksi vedenpuhdistus- ja teollisuuslaitokset. Suomessa myös haja-asutusalueiden jätevedet voivat aiheuttaa huomattavaa kuormitusta vesistöissä (ks. esim. Pellikka ym. 2020a: 9–11).

Vaikka tässä työssä keskitytäänkin sellaiseen uomaan, jonka valuma-alueen pääasiallinen kuormituslähde on maatalous, myös metsätalouden osuuteen perehdytään yleisellä tasolla jonkin verran, sillä sitä pidetään Suomen olosuhteissa viimeaikaisten tutkimusten (ks. esim. Finér ym. 2020) perusteella entistäkin merkittävämpänä ja myös metsätalouden vesistökuormituksessa on mahdollista hyödyntää jatkuvatoimisia mittauslaitteistoja.

Jos vesistöön virtaa sen sietokykyyn nähden liikaa ravinteita, sen ekologinen tila heikenee. Ekologisen tilan heikkeneminen johtaa rehevöitymiseen, mikä puolestaan aiheuttaa muutoksia vesistön ravintoverkon rakenteessa. Vesistöjen rehevöitymistä säätelee minimiravinteen määrä, joka rajoittaa levien ja kasvien kasvua. Suomen järvissä yleisin minimiravinne on fosfori (Liljendahl 2018a: 8). Vollenweider (1975) on esittänyt laskennallisen tavan arvioida sallitun ja kriittisen fosforikuormituksen määrää. Malli on edelleen yleisesti käytössä, ja esimerkiksi Suomen ympäristökeskuksessa (SYKE) kehitetyn ja Lake Load Response -mallinnustyökalun laskenta pohjautuu Vollenweiderin kehittämään malliin (Suomen ympäristökeskus 2020a).

Toisin kuin järvissä, merialueilla minimiravinteena on fosforin sijaan yleensä typpi (Howarth & Marino 2006). Tämän takia myös typpikuormitukseen on kiinnitettävä kokonaisuutena huomiota, sillä esimerkiksi Itämeressä 85 % kokonaistyppikuormasta on peräisin joista (Ympäristöministeriö 2020a). Kriittisen typpikuorman määrittäminen ei ole yhtä suoraviivaista kuin kriittisen fosforikuorman, mutta vähennystarvetta on mahdollista haurukoida pitoisuuksista vertaamalla niitä hyvään ekologiseen tilaan (Pellikka 2020a).

Kiintoaineella kuvataan veden hiukasmaista ainesta. Sen määrää lisäävät jätevesikuormitus, levät ja niiden biomassa sekä eroosion kuljettama maa-aines. (Oravainen 1999: 9.) Etenkin uomissa kiintoainekuormitus aiheuttaa pohjan liettymistä, mikä usein heikentää kalojen elinympäristöjä. Samalla uoma mataloituu ja se alkaa vähitellen kasvaa umpeen. (Ympäristöministeriö 2020b.) Kiintoaineeseen on lisäksi sitoutuneina ravinteita ja haitta-aineita (Kuntaliitto 2012, Villa ym. 2019).

Tässä työssä hyödynnetään tulosten vertailemisessa SYKEN kehittämää operatiivista vesistöjen ravinnekuormitusmallia (VEMALA). VEMALAssa on useita osamalleja, jotka simuloivat ravinteiden prosesseja, kulkeutumista ja huuhtoutumista maa-alueilla, virtavesissä sekä järvissä. VEMALA simuloi vesistöihin kulkeutuvaa kokonaisravinnekuormitusta sekä ravinteiden pidättymistä (sedimentaatio), minkä lisäksi sen perusteella on mahdollista arvioida Suomen vesistöistä Itämereen päätyvää ravinnekuormaa. Mallia kehitetään ja päivitetään jatkuvasti (Suomen ympäristökeskus 2020b).

Jatkuvatoimista vedenlaadun mittaamista on hyödynnetty etenkin silloin, jos halutaan joko selvittää yksittäisen uoman tuottamaa kuormitusta vakaveteen (vrt. esim. Wade ym.

2012, Glasgow ym. 2004, Valkama & Ruth 2017) tai vesiensuojelutoimenpiteiden vaikutusta valuma-alueella (ks. esim. Linjama ym. 2009: 424; Koskiahho ym. 2015: 1; Wahlroos 2019). Jatkuvatoimista mittauslaitteistoa voidaan myös hyödyntää, kun pyritään tutkimaan mahdollisia pidemmän aikavälin trendejä. Suomesta Itämereen kulkeutuvien ravinteiden määrä on laskenut vuodesta 1997, mutta jokien ainevirtaamien osalta tilanne ei ole yhtä selvä, sillä sadannalla on huomattava merkitys ainevirtaamien määrään. Ilmastomuutoksen ennustetaan lisäävän ravinnekuormitusta pelloilta lähitulevaisuudessa, ja esimerkiksi Suomen Ympäristökeskuksen VEMALA-mallinnuksen ilmastomuutoskenaariossa Suomesta pelloilta tulevan fosforikuormituksen määrän ennustetaan 2020-luvun aikana lisääntyvän viisi prosenttia vuoden 2020 tasoon verrattuna (Ympäristöministeriö n.d.: 13.)

Nykyään jatkuvatoimisia mittauslaitteistoja on mahdollista valjastaa myös erilaisten kemikaalien ja haitallisten aineiden pitoisuuksien mittaamiseen (vrt. Palmroth ym. 2014) mutta tämän aiheen käsittely on jätetty tässä työssä tarkastelun ulkopuolelle.

Jatkuvatoimisista vedenlaatumittareista on erityisen suuri hyöty tilanteissa, joissa veden laatu saattaa vaihdella merkittävästi lyhyellä aikavälillä, mitä ei ole mahdollista havaita perinteisellä näytteenotolla. Etenkin pienten valuma-alueiden uomissa muutokset voivat tapahtua hyvin nopeasti (Kukkonen 2012: 15), mikä on tyypillistä yleisestikin viileälle ilmastovyöhykkeelle (Valkama & Ruth 2017). Ainevirtaamat kulkeutuvat uomissa usein pulsseina, joiden ajankohtaa ei voi tarkasti ennustaa (Lepistö ym. 2010: 12–13, 32–33). Pulssien tiheyteen ja ajankohtaan vaikuttavat muun muassa valuma-alueen vedenväestökapasiteetti sekä lämpötila mutta myös biologiset prosessit (Kukkonen 2012: 15). Edellä esitettyjen syiden vuoksi jatkuvatoimisia mittauslaitteistoja käytetäänkin yleisesti juuri virtavesissä, mutta niitä on hyödynnetty hyvin tuloksin myös vakavesissä esimerkiksi levätilanteen tai hapetuksen vaikutuksen seuraamisessa (ks. esim. Espinola 2017, Ketola ym. 2019).

Jatkuvatoimisilla mittauslaitteistoilla voidaan myös havaita erilaisten yhdisteiden toisistaan poikkeavaa käyttäytymistä eri tilanteissa. Säkylän Pyhäjärvässä tehtyjen mittausten perusteella havaittiin, että järveen suuntautuva fosforikuorma nousi virtaaman kasvaessa, mutta nitraattitypen kohdalla näin ei aina tapahtunut (Kallio ym. 2010: 13). Lisäksi

Varsinais-Suomessa sijaitsevalla Yläneenjoella on jatkuvatoimisia mittareita käytettäessä havaittu, että sameuden ja virtaamien huippukohdat poikkeavat ajoittain hieman toisistaan siten, että pienemmällä osavaluma-alueella sameusarvot saavuttivat huippukohtansa ennen virtaaman huippukohtaa ja suuremmalla osavaluma-alueella puolestaan tapahtui päinvastoin (Koskiaho ym. 2010: 117–120).

Jatkuvatoiminen vedenlaadun mittaaminen vaatii tuekseen laboratoriomittauksia. Esimerkiksi fosforipitoisuuden mittaaminen ei ole toistaiseksi jatkuvatoimisilla antureilla mahdollista, vaan määrittämisessä on käytettävä sijaismuuttujia kuten sameutta (Arola ym. 2012: 33), jonka mittaaminen nykytekniikalla sen sijaan on varsin suoraviivaista ja yksinkertaista. Sameutta voidaan hyödyntää sijaismuuttujana, sillä on havaittu, että sameus- ja kiintoainepitoisuuksilla ja sameus- ja kokonaisfosforipitoisuuksilla on useissa tutkimuksissa osoitettu tilastollisesti merkitsevä positiivinen korrelaatio, jos valuma-alueen maaperä on savinen (Koskiaho & Puustinen 2008: 46; Koskiaho ym. 2015; Määttä 2016). Korrelaatio on kuitenkin määritettävä kunkin näytteenotto paikan kohdalla erikseen, mikä vaatii myös säännöllistä näytteenottoa sekä vertailunäytteiden analysointia akkreditoitussa laboratoriossa. Yhteys ei kuitenkaan aina ole ilmeinen, sillä esimerkiksi kaupunkipuroissa on osoittautunut, että korrelaatio voi olla joillakin valuma-alueilla heikko. (Pellikka 2020b.)

Useissa edellä esitetyissä tutkimuksissa on tutkittu maatalouden aiheuttamaa hajakuormitusta sen merkittävyyden vuoksi, ja myös tässä työssä käsiteltävä uoma on valuma-alueeltaan maatalousvaltainen. Siuntionjoen vesistön valuma-alueella on kuitenkin jonkin verran myös metsätaloutta, jonka aiheuttamasta absoluuttisen ravinnekuormituksen määrästä sen sijaan on pelkästään Suomen olosuhteissa saatu tuloksiksi keskenään ristiriitaisia tietoja. Yksi merkittävä syy tähän on, että laskentatapoja on ollut käytössä useita. (Finér ym. 2019: 31.) Yleisesti kivennäismaavaltaisella alueella metsätalouden aiheuttama kuormitus on kuitenkin huomattavasti turvemaata pienempi (Finér ym. 2010: 14) ja vastaavasti fosforikuormitus on suhteelliselta osuudeltaan typpikuormaan verrattuna selvästi suurempi (emt.: 21–23). Viimeisimmän tutkimuksen (Finér ym. 2020, valtakunnallisen MetsäVesi-hankkeen loppuraportti) mukaan metsätalouden aiheuttaman ravinnekuormituksen osuus kaikesta ihmisen aiheuttamasta ravinnekuormituksesta on yleisesti arvioitu aiempaa suuremmaksi: kokonaistyppikuormituksen on arvioitu olevan 12 prosenttia ja fosforikuormituksen osuus vastaavasti 14 prosenttia, mikä vastaa noin

neljäosaa maatalouden aiheuttamasta ravinnekuormituksesta (Finér ym. 2020: 38). Runsaskuormitteisia turvesuoalueita on kuitenkin pääasiassa Perämereen laskevilla valuma-alueilla, joten toisin kuin maatalouden aiheuttama ravinnekuormitus, metsätaloudessa kuormitus on selvästi alueellisesti jakautunut (emt.: 38–40).

Vaikka metsätalouksuomissa kuormitusluvut ovat kuitenkin yleisesti keskimääräistä pienempiä verrattuna maatalousvaltaisten valuma-alueiden kuormituslukuihin, myös näiden kuormitusten mittaaminen jatkuvatoimisesti on paitsi mahdollista, myös perusteltua. Tällöin, kuten muissakin tapauksissa ennen seurannan aloittamista on perehdyttävä tarkasti eri antureiden mittausalueisiin sekä -tarkkuuksiin, jotta voidaan varmistua siitä, että mittarilla pystytään havaitsemaan tutkitussa kohteessa esiintyviä pitoisuuksia (Kukkonen 2012: 16–17). Metsätalouden toimenpiteiden aiheuttamaa ravinnekuormitusta tutkittaessa on tarkoituksenmukaista tarkastella typpi- ja fosforikuormituksen ohella myös liuennutta orgaanista hiiltä. Liuennut orgaaninen hiili aiheuttaa etenkin latvavesissä tummumista, liettymistä ja rehevöitymistä. (Finér ym. 2020: 12.) Ongelma on kuitenkin vielä tätäkin monisyisempi, sillä osa maaekosysteemeistä sisävesiin päätyneestä orgaanisesta hiilestä muuttuu mikrobiologisen toiminnan seurauksena metaaniksi, mikä puolestaan kiihdyttää ilmastonmuutosta. (Miettinen ym. 2015.) Metsätalouden osuudeksi metsistä ja soilta peräisin olevasta orgaanisen hiilen kuormituksesta on Suomessa arvioitu olevan 4 %, mutta orgaanisen hiilen kokonaiskuormituksesta ei Suomessa ole toistaiseksi olemassa virallisia tilastoja (Finér ym. 2020: 36, 38).

Viimeisimpien tutkimusten mukaan orgaanisen hiilen ja typen pitoisuudet vaikuttavat myös toisiinsa, jolloin orgaaninen hiili vaikuttaa myös typen kiertoon. MetsäVesi-hankkeen loppuraportissa todetaan, että orgaanisen typen ja orgaanisen hiilen pitoisuudet korreloivat selvästi keskenään, mikä viittaisi siihen, että etenkin metsätalousvaltaisilla alueilla kokonaistyyppi koostuisi pääasiallisesti orgaanisesta tyypestä. Keskimäärin orgaanisen hiilen pitoisuudet ovat uomissa nousseet (Finér ym. 2020: 44–45). Tämä puolestaan johtunee maaperän orgaanista ainetta hajottavien mikrobien aktiivisuuden merkittävästä lisääntymisestä, mikä puolestaan lienee saanut alkunsa ilmastonmuutoksen aiheuttamasta lämpötilan kohoamisesta. Aktiivisuuden lisääntyminen voi lisätä maa-ainekseen varastoituneen typen ja hiilen vapautumista vesistöihin jopa kymmeniä prosentteja. (Karhu ym. 2010.)

2.2 Jatkuvatoimisten vedenlaatumittareiden tekniikasta

Jatkuvatoimisesti vedenlaatua mittaavat anturit jaetaan toimintaperiaatteeltaan kolmeen pääluokkaan: ioniselektiivisiin elektrodeihin, märkäkemiallisiin analysaattoreihin ja optisiin sensoreihin. Ioniselektiiviset elektrodit ovat hankintahinnaltaan edullisimpia, mutta kahteen viimeksi mainittuun verrattuna niiden mittaustarkkuus on yleisesti osoittautunut selvästi heikommaksi, mikä niiden kohdalla tarkoittaa käytännössä muun muassa muita antureita tiheämpää huolto- ja kalibroitiväliä. Märkäkemialliset analysaattorit ja optiset sensorit ovat hinnaltaan selvästi korkeampia, mutta niiden mittaustarkkuus on yleisesti ollut varsin hyvä. (Pellerin ym. 2016; Castrillo & López García 2020.) Anturin toimintaperiaate riippuu kuitenkin paljon myös mitattavasta suureesta, esimerkiksi pH:n mittaamisessa ioniselektiiviset elektronit ovat heikkouksistaan huolimatta yleisesti käytössä.

Optisilla antureilla mitattavia muuttujia voivat olla muun muassa sameus, happi, liuennut orgaaninen hiili (DOC) ja kemiallinen hapenkulutus. Näistä viimeksi mainittu soveltuu toistaiseksi kuitenkin käyttöön lähinnä vain maatalousvaltaisten valuma-alueiden uoimissa, joissa pitoisuudet ovat riittävän korkeita mittaamisen mahdollistamiseksi (Kallio ym. 2010: 14). Joihinkin mittaustaitteistoihin on mahdollista kytkeä myös muita antureita, jollaisia voivat olla esimerkiksi *a*-klorofylliä tai sinileväpigmenttien määrää mittaavat anturit, mutta muihin antureihin verrattuna ne ovat hyvin kalliita (Espinola 2017: 10). Mittarissa käytetyistä antureista sekä niiden tekniikasta kerrotaan tarkemmin liitteessä 1. Tässä työssä käytettävä mittari on ollut aiemmin käytössä Raaseporin Gennarbyträsketin järvessä, jossa se on vastannut toisen tutkimushankkeen tarpeita (Espinola 2017), minkä vuoksi se myös sisältää enemmän antureita kuin tässä työssä tehtävässä kuormituslaskennassa on otettu tarkasteluun.

Myös optisia antureita on erityyppisiä. Esimerkiksi sameusantureiden toiminta perustuu joko valon sirontaan tai sen läpäisyn heikkenemiseen. Sirontaan perustuvissa sameusantureissa on joko laser- tai infrapunadiodi, joka lähettää veteen valoa ja mittaa veden hiukkasista takaisin sironnutta valoa ja muuttaa saadun datan sameusarvoiksi (FNU, ks. liite 1). Valon vaimenemista mittaavat anturit muuntavat tiedot sameusarvoiksi vastaavalla tavalla. Nitraattitypen mittaaminen puolestaan perustuu spektrometriaan

(Tattari ym. 2015, 4.) Mittarit myös itsessään muuntavat tuloksia eri suureiksi, esimerkiksi sähkönjohtavuusarvot muodostetaan suolaisuusarvojen perusteella. Edellytyksenä kuitenkin on, että suureilla on todistettu voimakas keskinäinen korrelaatio.

2.3 EXO2-vedenlaatumittari

Tämän työn yhteydessä käytettävä jatkuvatoiminen mittauslaitteisto on yhdysvaltalaisen Xylem Groupiin kuuluvan YSI Inc:n kehittämä, ja sen kaupp nimi on EXO2. Mittari koostuu sondista ja siihen kiinnitettävistä antureista (ks. kuva 1). Sondien valmistamisessa on käytetty materiaaleina titaania, ruostumatonta terästä sekä erilaisia muovisekoitteita (Xylem Inc. n.d.: 7).



Kuva 1. EXO2 -sondi kokonaisuudessaan (vasemmalla) ja suojuksen alla sondiin kiinnitetyt anturit (oikealla).

EXO2-vedenlaatumittariin on mahdollista kytkeä kuusi erilaista anturia, jotka mittaavat haluttuja muuttujia. Sondiin on lisäksi mahdollista em. antureiden lisäksi asentaa keskitetty puhdistusjärjestelmä (pyyhin) tai vaihtoehtoisesti yksi lisäanturi, jolloin anturimäärä kasvaa kokonaisuudessaan seitsemään. Pyyhin on esitetty kuvassa 2. Kaikkia anturipaikkoja ei kuitenkaan ole välttämätöntä käyttää. Kaikkien EXO-sondien toimintaperiaate on mallista riippumatta samanlainen. Tärkeimmät erot ovat asennettavien antureiden maksimimäärässä. Sondit on ohjelmoitu siten, että ne tunnistavat asennetun anturin automaattisesti. (Xylem Inc. n.d.: 7.) Järjestelmään on mahdollista liittää myös ulkoinen ilmanpainekompensoitu syvyysanturi, jonka perusteella on mahdollista arvioida veden korkeutta, jos valmista referenssipistettä ei ole käytettävissä.



Kuva 2. EXO2 -mittarin puhdistuspyyhin (keskellä) ja anturit (reunoilla). Puhdistuspyyhin on mahdollista korvata lisäanturilla, mutta tämä yleensä lyhentää huoltoväliä.

Yksityiskohtaiset kuvaukset kaikista EXO-mallisista sondeista ja antureista toimintaperiaatteineen on nähtävissä ohjekirjasta, johon on linkki tämän työn lähdeluettelossa.

EXO-mittarit voi valita käytettäväksi joko ulkoisella virtalähteellä tai paristoilla. Mittareissa on sisäänrakennettu muisti, minkä ansiosta dataa ei tarvitse lähettää eteenpäin reaaliajassa. Tässä tutkimuksessa mittari sai virtansa akusta, jonka sähkövaraus on 33 ampeerituntia. Akun toiminta-aika on muutamia viikkoja ja käytössä on 12 voltin tasavirta. Mittaustiheys on mahdollista valita itse, lyhin mahdollinen aika on 10 minuuttia. Mittaushetkellä mittari mittaa noin minuutin ajan, minkä jälkeen mittaustuloksista muodostetaan keskiarvo.

Antureilta tuleva minuutin aikana mitattu ja keskiarvoistettu mittaustulosdata kulkeutuu datankeräimeen eli dataloggeriin. Datankeräin vastaanottaa datan, tallentaa ja prosessoi sen. Data voidaan siirtää automaattisesti matkapuhelinverkon välityksellä Internetiin. Jos täl-

laista ominaisuutta ei ole kytketty, data voidaan kerätä myös erillisellä päätelaitteella mittarin huollon yhteydessä, minkä jälkeen se on mahdollista kopioida tietokoneelle tarkastelua ja prosessointia varten.

2.4 Mittausten käytännön toteutukseen liittyviä ohjeita ja käytäntöjä

Suomessa on laadittu useita oppaita jatkuvatoimisten mittareiden asennukseen. Seuraavassa keskeisten asioiden listauksessa lähteinä on käytetty Tattarin ym. (2015) sekä Arolan (2012, toim.) julkaisuja soveltuvien osin ja näiden sisältöä on jonkin verran täydennetty.

2.4.1 Mittauspaikan valinta

Ennen mittarin asentamista on selvitettävä valuma-alueen maankäyttö, mittauspaikan veden pitoisuustaso, mahdollisilla vesiensuojelutoimenpiteillä tavoiteltava taso sekä pitoisuuksien vaihteluväli. Kaikki nämä vaikuttavat anturin valintaan. Jos havaintoaineistoa on olemassa, on suositeltavaa selvittää korrelaatiot mitattavien sekä niistä johdettavien parametrien kuten sameuden sekä kiintoaineen, fosforin, nitraattitypen ja kokonaistypen välillä.

Itse mittauspaikan valinta on puolestaan kaksivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa tutkitaan, mikä kohta jokiuomasta vastaisi ympäristöä, josta saataisiin parhaiten käyttötarkoitukseen soveltuvaa dataa. Jos esimerkiksi halutaan tutkia valuma-alueen pelloilta tulevaa ravinnekuormitusta, mittari kannattaa asentaa alajuoksulle peltojen laskuojista katsottuna.

Toisessa vaiheessa puolestaan valitaan tarkka asennuspaikka, jonka olisi täytettävä seuraavat kriteerit:

1. Sijainti mahdollisimman kaukana rannasta rantapenkereen pyörteiden vaikutuspiirin ulkopuolella

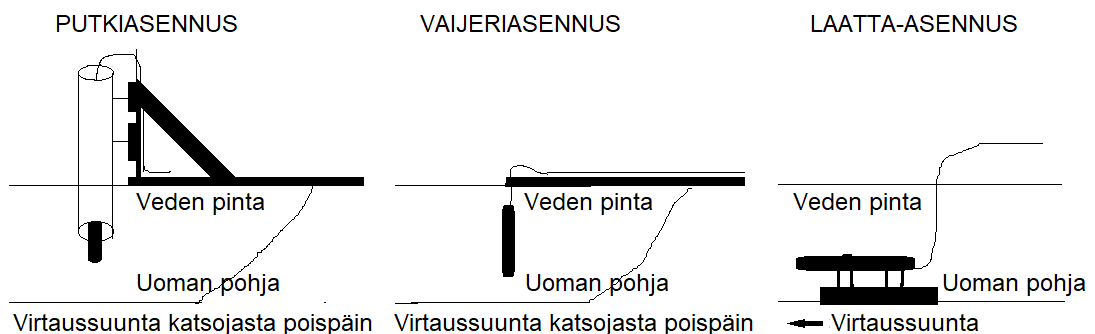
2. Uoman pohjan on asennuspaikassa oltava mahdollisimman tasainen. Jos uoman pohjassa on epätasaisuuksia, pyörteet tai mahdolliset esteet linssin mittauskentässä saattavat vaikuttaa tuloksiin.
3. Uoman virtauksen on oltava tasainen eikä siinä saa olla pyörteitä tai akanvirtoja. Lisäksi virtausnopeus ei saisi olla kohtuuttoman suuri, sillä suuret virtausnopeudet häiritsevät mittaustuloksia, vaikkei niihin syntyisikään ilmakuplia.
4. Anturin läheisyydessä ei saa olla sivu-uomia tai kuohuvia virtapaikkoja kuten koskia. Syntyvät ilmakuplat vaikuttavat mittaustuloksiin. Tästä syystä mittaria ei pidä myöskään asentaa välittömästi esimerkiksi kosken alapuolelle.
5. Anturin on oltava tarpeeksi kaukana pohjasta. Jos anturi on liian lähellä pohjaa, pohjasta mahdollisesti vapautuva sedimentti vääristää tuloksia. Myös vedenkorkeuden vaihtelut on huomioitava.
6. Anturia ei pidä asentaa siten, että se osoittaa virtaussuuntaa vastaan, sillä mittarin eteen saattaa kulkeutua mittausta häiritsevää materiaalia.
7. Anturi on asetettava paikkaan, jossa ei ole lähistöllä suurta määrää kasvillisuutta, sillä vesikasvien heilunta virtauksen mukana häiritsee mittaamista.
8. Jos mittari on ympärivuotisessa käytössä, mittarin mahdollisten kaapelien suojauksesta on huolehdittava riittävän hyvin, etteivät ne jäädy jäähän kiinni. Mittauspaikan avanto pitää peittää eristävällä levyllä.
9. Jos mittari asennetaan kiinteään rakenteeseen, on huolehdittava, että anturit pysyvät vedessä kaikilla vedenkorkeuksilla.
10. Anturin huollon on oltava helppoa ja turvallista vedenkorkeudesta riippumatta.
11. Mittarin on sijaittava paikassa, jossa se on turvassa ilkvallalta.

Usein kaikki em. kriteerit eivät kuitenkaan täysin toteudu ja antureiden asennuspaikka onkin tavallisesti monen tekijän kompromissi (vrt. Kotilainen ym. 2012: 27).

Myös lupakysymykset on huomioitava. Jos mittari asennetaan yksityiselle maalle, tähän tarvitaan maanomistajan suostumus. Siltaan tai tierumpuun tehtävissä kiinnityksissä lupa on puolestaan haettava kunnalta. (emt.: 27–28.)

2.4.2 Mittarin asennustavan valinta

Mittarin asennuspaikan määrittämisen yhteydessä on myös valittava mittarin asennustapa. Jatkuvatoimiset mittarit asennetaan yleisimmin joko kiinteään rakenteeseen kiinnitettävään putkeen tai yksinkertaisemmin vaijerikiinnityksellä suoraan laituriiin tai muuhun kiinteään rakenteeseen. Kolmas mahdollisuus on kiinnittää mittari laattaan ja asettaa laatta uoman pohjalle siten, että anturit osoittavat alavirtaan päin. Tyypillisimmät asennustavat on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Tavallisimmat jatkuvatoimisen vedenlaadun mittaustaitteiston asennustavat sähkökaapeleihin.

Putkiasennusten hyvänä puolena on, että mittarin huoltaminen on helppoa ja turvallista. Lisäksi mahdolliset pyörteet ja akanvirrat häiritsevät mittausta vähemmän pelkkään vaijerikiinnitykseen verrattuna ja putkessa ollessaan mittari ei pääse rikkoutumaan helposti esim. virran mukana kulkevien esineiden vaikutuksesta tai osuessaan laituriiin. Mittariin kiinnitysvaijeriin kohdistuva rasitus on yksinkertaiseen vaijerikiinnitykseen verrattuna pienempi, mikä vähentää vaijerin pettämisen riskiä. Heikkoutena putkiasennuksessa on

puolestaan se, ettei mittaria ole Suomen sääolosuhteissa mahdollista pitää käytössä ympäri vuoden, sillä virtavesissä erityisesti liikkuvat jäät rikkovat helposti asennusputken.

Edellä esitetyt ongelmat on mahdollista ratkaista käyttämällä laattakiinnitystä. Laatta-asennuksen hyvänä puolena on, ettei kiinteitä rakenteita vaadita, ja mittaria on mahdollista pitää uoman pohjalla vuoden ympäri sääolosuhteista riippumatta. Laattakiinnityksessä huoltaminen vaatii kuitenkin huomattavasti suurempaa tarkkuutta, sillä mittaria huollettaessa on varottava vahingoittamasta sondia esimerkiksi astumalla sen päälle. Lisäksi henkilökohtaiseen turvallisuuteen sekä varustukseen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Laattakiinnitys ei myöskään sovellu käytettäväksi syvissä uomissa.

2.4.3 Mittarin huollot ja kalibroinnit

Jatkuvatoimisia vedenlaatumittareita on huollettava säännöllisesti. Tämä on otettava huomioon tutkimuksen kokonaiskustannuksia suunniteltaessa, sillä mittareiden hankkimisen ohella huolloista syntyvät kuluerät ovat kokonaisuutena huomattavat. Huoltotoimenpiteisiin kuuluvat muun muassa puhdistaminen sekä varmistus siitä, että mittari saa riittävästi virtaa. Myös vertailunäytteitä on otettava säännöllisesti, mitä käsitellään myöhemmin.

Monissa jatkuvatoimisissa mittareissa vakiovarusteena on jonkinlainen puhdistusjärjestelmä. Anturin puhdistusjärjestelmä voi toimia paineilmalla tai vaihtoehtoisesti käytössä on mekaaninen harja tai pyyhin, kuten EXO-mallisissa mittareissa (vrt. kuva 2). Mittarin automaattisen puhdistusjärjestelmän tarkoituksena on pidentää huoltoväliä, mutta etenkin kesäaikaan antureihin alkaa kertyä savea, biologista kasvustoa kuten levää tai virran mukana kulkevaa kasvillisuutta kohtuullisen nopeasti, mikä vääristää mittaustuloksia. Kasvuston kertymiseen vaikuttavat useat olosuhteet mittausta paikalla. Määrätyissä olosuhteissa mittariin saattaa kertyä myös joidenkin pohjaeläinlajien toukkia. Kylminä vuodenaikoina huoltoväli on tavallisesti pidempi kuin lämpiminä sillä biologista kasvustoa kertyy vähemmän.

Useissa tapauksissa mittarin valmistaja tai maahantuoja antaa huoltovälistä suuntaa antavan suosituksen. Käytäntö kuitenkin usein osoittaa parhaiten, millainen huoltoväli on

optimaalisin. Tärkeää on seurata, näkykö puhdistus mittausdatassa. Jos datassa mitaustaso muuttuu välittömästi puhdistuksen jälkeen, tämä merkitsee, että mittariin kertynyt lika on haitannut mittaamista ennen puhdistusta, jolloin väliä pitää lyhentää.

Huoltojen lisäksi mittareita on ajoittain kalibroitava. Kalibroititiheys riippuu käytetystä mittarimallista sekä anturista. EXO-mittareissa pH-anturin suositeltu kalibroitiväli on 3 kuukautta, muiden antureiden kuten sameusanturin ohjeellinen kalibroitiväli on puolestaan 6 kuukautta. Joissain tilanteissa kalibroitiväli voi olla myös huomattavasti tätä lyhyempi. Antureille on myös määritelty tietty kestoikä, ja elinkaarensa loppupuolella olevat anturit tuottavat suuremmalla todennäköisyydellä uusia antureita epätarkempaa dataa.

Sekä huolloista että kalibroinneista on tehtävä tarkat muistiinpanot (ajankohta, tehdyt toimenpiteet, muut havainnot), jotta huolto- ja kalibroitiväliä on mahdollista seurata ja samalla mahdollisten vikatilanteiden jäljittäminen on yksinkertaisempaa.

2.5 Ravinnekuormituksen estimointi jatkuvatoimisilla vedenlaatumittareilla

2.5.1 Vertailunäytteet ja datan käsittely

Ennen asennusta anturit on tavallisesti kalibroitu joko tehtaalla tai kalibroinnista on vastannut maahantuojat. Tämä tarkoittaa sitä, että nollakohta on kalibroitu niin sanotulla nollaliuksella ja vastaavasti kalibroitisuoran pitoisuudet niitä vastaavilla standardiliuksilla. Kuitenkin tämän lisäksi on aina tehtävä myös mittauspaikkakohtainen kalibrointi, jonka tarkoituksena on varmistaa jatkuvatoimisen mittarin tuottaman datan luotettavuus juuri siinä paikassa, jonne laitteisto on sijoitettu. Jokaisella mittauspaikalla on määrättyjä ominaisuuksia, jotka puolestaan riippuvat uoman sekä sitä ympäröivän alueen hydro-morfologiasta. Ominaispiirteistä johtuen tutkitulla uomalla on juuri sille tyypillisiä ominaisuuksia. Tällaisia voivat olla esimerkiksi veteen suspendoituneiden partikkeleiden koko ja muoto tai veden väriluku, jonka suurin yksittäinen vaikuttava muuttuja on vedessä olevan orgaanisen aineksen määrä (vrt. Tattari ym. 2015: 14).

Vesinäytteiden ottamisessa, kuljettamisessa ja säilyttämisessä on lisäksi noudatettava standardia SFS-EN ISO 5667-3:2018 (ks. Suomen standardisoimisliitto 2018). Standardin sisältöä ei käsitellä tämän työn yhteydessä yksityiskohtaisesti. Vertailunäytteiden ottamisesta vastasivat tässä tutkimuksessa sertifioidut näytteenottajat. Vertailunäytteitä otettaessa on syytä kirjoittaa ylös tarkka kellonaika, jolloin mittaus tehtiin, jotta laboratoriossa mitattua tulosta on mahdollista verrata mahdollisimman samanaikaiseen jatkuva-toimisesta mittalaitteistosta saatuun tulokseen.

2.5.2 Lineaarisen regression hyödyntäminen

Mittauspaikkakohtaisessa kalibroinnissa on tärkeää saada vertailunäytteitä mahdollisimman laajalta vaihteluväliltä sekä virtaaman että mitattavan muuttujan (esimerkiksi sameuden) osalta. Suomessa syysateiden sekä keväisin lumien sulamisen aikana virtaamat ovat usein muita vuodenaikoja suuremmat, mikä etenkin maatalousvaltaisilla valuma-alueilla kiihdyttää eroosiota ja siten lisää veden sameutta. Jos tutkimus puolestaan toteutetaan vain kesäaikana, vertailunäytteet olisi tärkeää saada kesäminimijankohdan lisäksi rankkasateiden jälkeen.

Kalibrintimittausten tarkoituksena on saada selville, millainen yhteisvaihtelu laboratoriossa analysoitujen vertailunäytteiden sekä jatkuvatoimisen mittauslaitteiston anturien antamien tulosten välillä on. Yhteisvaihtelut määritetään yleisimmin siten, että ensin verrataan anturin sameustuloksia laboratoriossa saatuihin, minkä jälkeen tarkastellaan anturin mittaamien sameusarvojen sekä muiden parametrien kuten esimerkiksi kiintoaineen, kokonaisfosforin ja kokonaistypen välistä yhteisvaihtelua.

Mittarin antamien sekä laboratoriossa mitattujen sameusarvojen yhteisvaihteluiden pitäisi olla samanlaiset. Jos näin ei ole, asialle on pyrittävä löytämään selitys. Laboratoriotulokset oletetaan tavallisesti (ja myös tässä työssä) tarkoiksi mittaustuloksiksi ja niiden arvot asetetaan x-akselille. Mittarin antamat arvot puolestaan sijoitetaan y-akselille, jolloin saatujen tietojen perusteella on mahdollista laskea kalibrintisuoran lineaarisen regression yhtälö, joka on muotoa:

$$y = kx + b \quad (1)$$

y = anturin antama tulos
 k = kalibroitisuoran kulmakerroin
 x = laboratorioissa analysoidusta näytteestä saatu tulos
 b = vakiotermin, jossa suora leikkaa y -akselin.

On huomattava, että vakiotermin b olisi periaatteessa oltava nollan suuruinen, eli jos laboratorionäytteessä ei ole havaittu etsittävää pitoisuutta, myöskään anturin antamassa tuloksessa sitä ei pitäisi olla. Käytännössä kuitenkin anturin antamissa tuloksissa on ainakin satunnaista vaihtelua, mihin ei ole mahdollista vaikuttaa. Tämän vuoksi vakiotermin pitäminen mukana yhtälössä on perusteltua (Kotilainen ym. 2012: 27).

Lopuksi lineaarisessa regressioanalyysissä muodostetulle yhtälölle lasketaan selityksaste, minkä jälkeen anturista saadut raakadatatulokset muunnetaan vastaamaan laboratoriotuloksia. Lopullinen kalibroiintiyhtälö on siten muotoa

$$x = \frac{y-b}{k} \quad (2)$$

Tattarin ym. mukaan vertailunäytteitä olisi luotettavien tulosten saamiseksi oltava noin 10 kappaletta (Tattari ym. 2015: 14). Tämän insinööriyön osalta on todettava, että työn toteutuksessa rajallisen aikataulun vuoksi tuo määrä ei täyttynyt. Tutkimusta ja seuranta jatketaan kuitenkin myös vuoden 2020 aikana, jolloin vuodenaikaisvaihtelut saadaan otettua edellisvuotta paremmin huomioon kalibroitinäytteissä. Tätä vaihtelua ei kuitenkaan ole käytännön aikataulutuksen vuoksi mahdollista tässä työssä käsitellä.

2.6 Virtaaman määrittäminen ja kuormituslaskenta virtaamatietojen avulla

On tilanteita, joissa riittää keskittyä pelkästään pitoisuustulosten tulkintaan, jolloin kuormituslaskentaa ei tarvitse tehdä. Pitoisuustiedot riittävät, jos halutaan tutkia, onko tutkittu vesistö vedenlaadultaan riittävä määrätyille eläinlajeille kuten esimerkiksi simpukoille tai joillekin kalalajeille. Ravinnekuormituksia laskettaessa regressioanalyysin avulla määritettyjen pitoisuustietojen lisäksi on kuitenkin määritettävä myös absoluuttiset ainevirrat. Aiemmin tässä luvussa viitattiin Vollenweiderin (1975) kehittämään malliin, jonka

perusteella on mahdollista selvittää vakaveteen kohdistuva suurin sallittu fosforikuorma sekä kriittinen kuorma. Sallitulla kuormalla tarkoitetaan kuormaa, jonka järvi kestää ilman, että se alkaa rehevöityä nykyistä enempää. Kriittinen kuorma on puolestaan kynnyssarvo, jonka ylittyessä järvi alkaa rehevöityä nopeasti. (Liljendahl 2018b: 12.)

Kuormitusmäärän laskentaa varten tarvitaan veden virtaamatiedot. Virtaamatietojen olisi oltava vähintään yhtä tarkkoja kuin kuormitustietojen. Tämä ei kuitenkaan ole aina mahdollista, minkä vuoksi on tavallista käyttää molemmista vuorokausikohtaisia keskiarvoja, jolloin absoluuttisia kuormituslukuja voidaan estimoida. Jos virtaamamittauspiste on riittävän lähellä mittauspistettä eikä arvojen otaksuta muuttuvan tällä välillä merkittävästi (esim. uomaan ei yhdy uusia uomia), näitä arvoja on mahdollista käyttää suoraan laskennassa. Jos etäisyys on suurempi, käytetään erillisiä mallinnuksen perusteella määritettyjä virtaamakertoimia.

Virtaama on uomapoikkileikkauksen kautta uoman virtaussuuntaan kulkeutuva vesimäärä aikayksikössä (Korhonen 2007: 11). Usein mittayksikkönä käytetään kuutiometriä sekunnissa (m^3/s), mutta pienempien uomien kohdalla voidaan käyttää yksikkönä myös litraa sekunnissa (l/s) (vrt. Vesihallitus 1984: 38).

Virtaama (Q) voidaan siten määritellä seuraavasti:

$$Q = \int v(A) dA, \quad (3)$$

$v(A)$ on keskimääräinen virtausnopeus uomassa, jonka poikkileikkauksen pinta-ala on A (Korhonen 2007: 11).

Virtaama voidaan määrittää usealla eri tavalla. Seuraavissa käsitellään yksityiskohtaisemmin erilaisia menetelmiä tähän tarkoitukseen. Tässä työssä virtaama on määritelty SYKEstä saatujen tietojen avulla, mutta koska yleisesti kaikissa paikoissa tämä ei ole mahdollista, on syytä käsitellä lyhyesti myös tärkeimmät virtaamien mittaustavat sekä niiden pääperiaatteet.

2.6.1 Siivikkomittaukset

Siivikkomittaus on virtaaman mittausmenetelmistä vanhin ja sitä on käytetty 1800-luvulta alkaen (Korhonen 2012: 12). Siivikkoanturissa on siipiratas, jonka pyörimisnopeus on verrannollinen uoman virtausnopeuteen. Siivikkomittauksessa määritellään uoman poikkileikkauksen profiili tekemällä uomasta sekä leveys- että syvyysmittauksia, ja lisäksi veden virtausnopeus mitataan siivikon avulla useasta kohdasta eri syvyyksiltä. Tarvittavien mittauspaikkojen määrä vaihtelee riippuen uoman leveydestä ja syvyydestä, mutta pienissäkin uomissa virtausnopeuden mittauskohтия on hyvä olla vähintään 2–3 kappaletta. Virtaama määritetään tästä virtausnopeuden ja uoman poikkileikkauksen tulona. (Vesihallitus 1984: 38–39, 42–45.) Siivikkomittauksia on tehtävä eri vuodenaikoina, jotta tulokset olisivat riittävän luotettavia, jolloin myös vuosittaiset virtaaman vaihtelut näkyvät niissä. Etenkin pienissä uomissa virtaamamittauksia on tehtävä paljon, sillä virtaaman vaihtelun luotettava mittaaminen vaatii lukuisia mittauksia. Pienissä uomissa virtaaman määrä voi vaihdella hyvin voimakkaasti saman vuorokaudenkin aikana.

2.6.2 Akustiset mittaukset

Virtaamaa on mahdollista mitata myös akustisesti. Menetelmä perustuu äänen Dopplersiirtymään. Mittari lähettää äänipulsseja veteen, minkä jälkeen se mittaa kaikuja veden mukana kulkevista partikkeleista sekä pohjasta ja laskee virtausnopeuden ääniaaltojen kulkuaikojen perusteella. Jotta tulokset olisivat luotettavia, uoman poikkileikkauksen ja syvyysuhteiden on oltava tiedossa. Virtauksen olisi myös oltava laminaarista. Kaikkiaan menetelmä on osoittautunut luotettavaksi, ja sitä voidaan myös käyttää tilanteissa, joissa purkautumiskäyrää (ks. luku 2.6.4) ei voida määrittää. Suomessa pienissä uomissa mittaukset tehdään usein edelleen kuitenkin perinteisellä siivikkomenetelmällä, mutta myös pieniin uomiin kehitettyjä akustisia mittareita on olemassa (Korhonen 2007: 13). Kuten siivikkomittauksissakin, myös akustisissa mittauksissa virtaamatietoja olisi saatava eri vuodenaajoilta. Akustinen mittauslaitteisto on mahdollista kiinnittää uomaan siten, että virtaamaa voidaan mitata jatkuvatoimisesti.

2.6.3 Vesivoimalaitosten hyödyntäminen

Kolmas tapa virtaaman määrittämiseen on hyödyntää vesivoimalaitoksia, jos sellainen on vesistöön rakennettu. Virtaama (Q) voidaan määrittää seuraavan kaavan avulla, jos vesivoimalaitoksen teho ja hyötysuhde ovat tiedossa:

$$Q = \frac{P}{\eta \rho g h} \quad (4)$$

P = voimalaitoksen teho
 η = voimalaitoksen hyötysuhde
 ρ = veden tiheys
 h = putouskorkeus.

Näiden arvojen käyttäminen on kuitenkin vain mahdollista pitkällä aikavälillä, minkä lisäksi virtaama on hieman todellista suurempi johtuen teoreettista suuremmasta todellisesta hyötysuhteesta (Korhonen 2007: 13).

2.6.4 Purkautumiskäyrä ja veden korkeus

Neljäs käytössä oleva yleinen virtaaman määrittystapa on purkautumiskäyrän ja veden korkeuden käyttäminen. Vuonna 2006 SYKEN virtaama-asetusta yli puolella virtaama määritettiin purkautumiskäyrää käyttäen (Korhonen 2007: 14). Tämän työn yhteydessä virtaamia ei määritetty purkautumiskäyrien avulla itse, sillä virtaamatiedot mittapadoilta oli saatavilla valmiiksi SYKEN kautta. Seuraavassa kuvataan kuitenkin lyhyesti purkautumiskäyrän määrittelyn teoreettinen tausta, jota on hyödynnetty SYKEstä saaduissa virtaamatiedoissa.

Purkautumiskäyrällä kuvataan virtaaman ja veden korkeuden välistä suhdetta. Useaan vesistöön on rakennettu mittapato, jonka perusteella tämä suhde on mahdollista määrittää. Jotta purkautumiskäyrä on mahdollista määrittää, jokiuoman on täytettävä seuraavat ehdot:

- 1) Uoman on pysyttävä ajan suhteen muuttumattomana.
- 2) Uomassa on oltava vedenkorkeushavaintopisteen alapuolella kuristuskohta, jossa vallitsee kiitovirtaus kaikissa olosuhteissa, jolloin veden virtausnopeuteen pätee yhtälö

$$v > \sqrt{gy} \quad , \quad (5)$$

v = veden virtausnopeus

g = maan vetovoiman kiihtyvyys

y = vesisyvyys. (Hyvärinen & Forsius 1982: 29.)

Hyvärisen ja Forsiuksen (1982: 30) mukaan virtaamaa (Q) voidaan purkautumiskäyrän avulla kohtuullisen luotettavasti kuvata yhtälöllä

$$Q = a(W - c)^b \quad , \quad (6)$$

W = veden korkeus ja a , b ja c puolestaan uoman dimensioista riippuvia muuttuja, jotka on optimoitava käyttämällä apuna havaintopisteitä (Hyvärinen & Forsius 1982: 30).

Purkautumiskäyrän muoto riippuu uoman ominaisuudesta, joihin kuuluvat muun muassa pohjan muoto ja kaltevuus, minkä vuoksi käyriä on paljon erimuotoisia. Jokaisella uomalla on oma, kyseiselle uomalle ominainen purkautumiskäyränsä (Korhonen 2007: 45). On lisäksi huomattava, etteivät purkautumiskäyrät pysy välttämättä vakioina. Muun muassa luonnolliset muutokset jokiuomassa tai ihmisen vaikutus muuttavat purkautumiskäyrän muotoa. Lisäksi jokien jäätyminen talviaikana aiheuttaa usein sen, ettei laskennallinen virtaaman määrittäminen purkautumiskäyrän avulla tuota paikkaansa pitävää tietoa (Hyvärinen & Forsius 1982: 32). Tällöin voidaan hyödyntää virtaaman jääredukointimenetelmää, jota voidaan hyödyntää tietyin rajoituksin jäiseen aikaan (Korhonen 2012: 15). Menetelmää ei kuitenkaan esitellä tässä työssä tarkemmin.

Kuten edellä todettiin, kaikissa olosuhteissa virtaaman ja veden korkeuden välistä suhdetta ei ole mahdollista määrittää, jolloin myöskään purkautumiskäyrän muodostaminen ei ole mahdollista. Tällöin on turvauduttava muihin menetelmiin kuten esimerkiksi akustisiin mittauksiin.

3 Aiempi tutkimus, tutkimuksen tavoitteet ja opinnäytetyön toimeksiantaja

3.1 Aiemmat ravinnekuormitustutkimushankkeet Etelä-Suomen alueella

Rehevöityminen on yleinen ongelma eteläsuomalaisilla järvillä ja Suomenlahden rannikkoalueilla. Siksi erityisesti maa- ja metsätalouden vesiensuojeluun keskittyneitä hankkeita on alueella ollut käynnissä useita. Esimerkkeinä aikaisemmista valtion viranomaisten ohjaamista hankkeista mainittakoon Keski-Uudellamaalla huhtikuussa 2020 päättynyt maanviljelijöille suunnattu VILKKU Plus -hanke, jossa jaettiin maanviljelijöille tietoa maanviljelyn vesistövaikutuksista sekä mahdollisista toimenpiteistä, joilla pelloilta vesistöihin suuntautuvaa ravinnekuormitusta voitaisiin vähentää. (Keski-Uudenmaan ympäristökeskus 2020.) Lisäksi Saaristomeren alueella on toteutettu SYKE:n ja Helsingin yliopiston yhteinen SAVE-hanke, jonka tavoitteena on ollut Saaristomeren vedenlaadun parantaminen peltojen kipsikäsittelyllä (SAVE-hanke: 2020). Lisäksi Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen (MTT), Ilmatieteen laitoksen ja SYKE:n koordinoima vuosina 2007–2009 toteutettu Maasää-hanke keskittyi automatisoituihin ympäristömittauksiin Karjaanjoen valuma-alueella. Hankkeeseen kuului myös jatkuvatoimista vedenlaadun mittaamista (ks. esim. Kotamäki ym. 2009; Koskiaho & Puustinen 2008: 44–52).

Myös metsätalouden aiheuttamaa vesistökuormitusta on tutkittu useassa hankkeessa. Kymijoen alueella merkittävä hanke oli vuonna 2020 päättynyt Maltti metsänhoidossa – valtti vesienhoidossa -hanke, jossa keskityttiin metsätalouden vesistövaikutuksiin erityisesti herkillä alueilla Kaakkois-Suomessa (Metsäkeskus 2020). Lisäksi vuonna 2020 päättyneessä, jo aiemmin viitatussa hankkeessa (MetsäVesi) tarkasteltiin metsätaloudesta sekä soilta aiheutuvaa vesistökuormitusta.

3.2 Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana on Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry (LUVY). LUVY on vuonna 1975 perustettu alueellinen ja aatteellinen vesiensuojeluyhdistys ja Suomen Vesiensuojeluyhdistysten Liiton jäsenyhdistys. LUVY:n toiminta-aluee-

seen kuuluvat vesiekosysteemien tutkiminen ja niihin liittyvän kuormituksen vähentämisen edistäminen sekä pohja- ja jätevesiin liittyvät tutkimukset. Yhdistys tarjoaa myös ympäristönäytteenottoon liittyviä tutkimuspalveluita. Yhdistyksen jäsenistö koostuu kunnista, merkittävistä teollisuuslaitoksista sekä pienemmistä yrityksistä ja paikallisista vesiensuojeluyhdistyksistä. LUVYn toimipaikka on Lohjalla, ja sen toiminta-alue on Uudenmaan maakunnan läntinen osa, joka käsittää kahdeksan kuntaa. LUVYn toiminta-alue on esitetty kuvassa 4. (Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry 2020.)



Kuva 4. LUVYn toiminta-alue on Uudenmaan maakunnan läntinen osa (kuvassa raidoitetun sinisen viivan sisäpuolelle jäävä alue) (Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry 2020).

LUVYn tiloissa toimii FINAS-akkreditoitu laboratorio LUVYLab Oy Ab, jonka omistavat LUVY sekä Lounais-Suomen vesi ja ympäristötutkimus Oy (emt.).

3.3 Tutkimuskysymykset

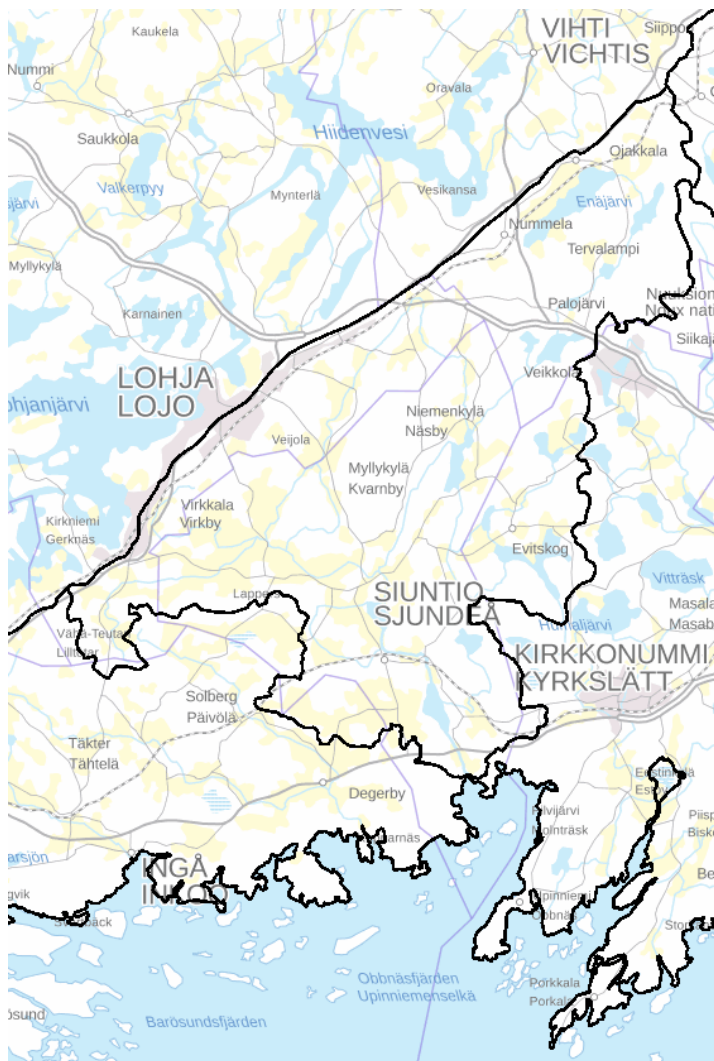
Aiempien, vastaavanlaisilla savisilla valuma-alueilla tehtyjen tutkimusten tulosten valossa on perusteltua olettaa, että Siuntionjoen ravinnekuormitusta on mahdollista arvioida veden sameustietojen perusteella. Tämän työn tutkimuskysymyksiksi muodostuvat siten seuraavat:

1. Voidaanko Siuntionjoen vesistön alueelta Itämereen suuntautuvia ravinne- ja kiintoainekuormia määrittää sameusarvojen perusteella jatkuvatoimisen mittauslaitteiston avulla?
2. Minkä suuruisia sameusarvojen perusteella estimoidut kuormat ovat ja millä tavoin ne vertautuvat SYKEN VEMALA-mallilla mallinnettuihin arvoihin?

4 Tutkimuksen toteutus

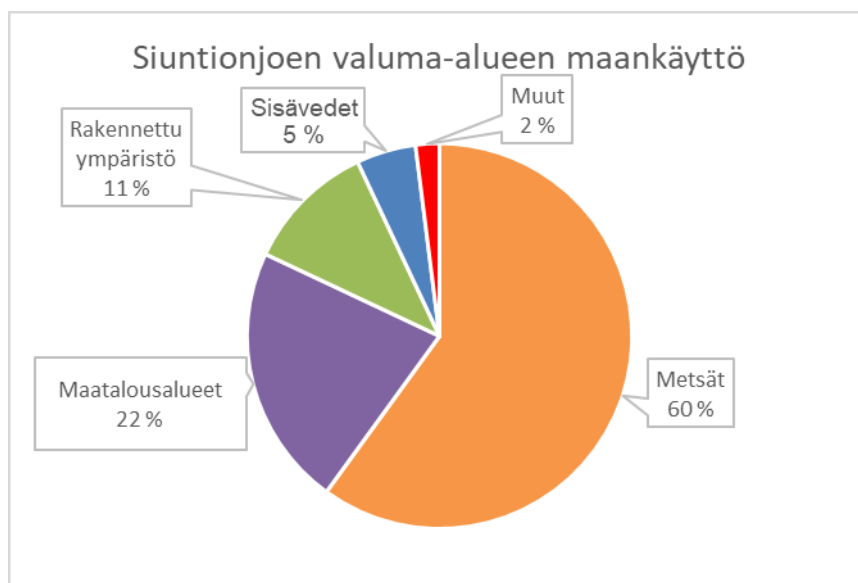
4.1 Siuntionjoen vesistö ja Elinvoimainen ja esteetön Siuntionjoki -hanke

Siuntionjoen vesistö sijaitsee Uudenmaan maakunnassa Lohjan kaupungin sekä Vihdin, Siuntion, Inkoon ja Kirkkonummen kuntien alueella (ks. kuva 5). Vesistön pinta-ala on noin 487 km². Siuntionjoen päähaara saa alkunsa Vihdissä Nummelan taajaman tuntumassa sijaitsevasta Enäjärvestä ja laskee Suomenlahden Pikkalanlahteen. (Suomen ympäristökeskus 2020c.)



Kuva 5. Kartta Siuntionjoen vesistöstä. (SYKE, taustakartta Maanmittauslaitos)

Alueen maankäyttöä tarkasteltiin SYKE:n VALUE-työkalulla, josta on mahdollista saada valuma-aluearajauksen ohella Corine maanpeite 2012 -aineiston tiedot. Aineiston mukaan Siuntionjoen vesistön kokonaispinta-alasta metsien osuus 60 % ja maatalousalueiden 22 %. Rakennettua ympäristöä on puolestaan 11 % ja sisävesiä 5 % (Suomen ympäristökeskus 2020c). Alueen maankäyttö on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Siuntionjoen valuma-alueen maankäyttö Corine maanpeite 2012 -aineiston mukaan (SYKE 2020c).

Siuntionjoki on luontoarvoiltaan arvokas jokivesistö. Alueella on geneettisesti omaleimainen meritaimenkanta, ja lisäksi muun muassa kuningaskalastaja ja saukko kuuluvat vesistöalueen lajistoon. Suuri osa Siuntionjoen vesistöalueesta kuuluu Natura 2000 -verkkoon. (Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry 2018.)

Siuntionjoen ekologinen tila on luokiteltu tyydyttäväksi, ja siihen kohdistuva ravinnekuormitus on huomattava. Suurin osa Siuntionjoen vesistön kuormituksesta syntyy hajakuormituksesta. Suurin yksittäinen pistekuormittaja on Nummelan jätevedenpuhdistamo, jonka vaikutus on nähtävissä etenkin vesistön pohjoisosissa. Fosforin osalta puhdistusteho Nummelan puhdistamolla on varsin korkea, minkä vuoksi sen vaikutukset eivät mer-

kittävästi näy vesistössä, mutta typpikuormituksen osalta jätevesien vaikutus on huomattava. Alueen järvien ekologinen tila vaihtelee tyydyttävästä huonoon. (Suomen ympäristökeskus 2020d.)

LUVYn koordinoima ja toimeenpanema Elinvoimainen ja esteetön Siuntionjoki -hanke alkoi vuonna 2018, ja se jatkuu vuoteen 2024. Euroopan unionin vesipuitedirektiivin tavoitteen mukaisesti edellytetään, että vesistöt saataisiin vuoteen 2027 mennessä sekä hyvään ekologiseen että kemialliseen tilaan (Ympäristöministeriö 2018). Tähän pyritään myös Siuntionjoen vesistöalueella. Tarkoituksena on selvittää Suomenlahteen päätyvän ravinne- ja kiintoainekuorman ajallista vaihtelua, kuorman dynamiikkaa paljon savikkoja sisältävällä peltovaltaisilla valuma-alueilla sekä kunnostustoimien vaikutusta Siuntionjoen ravinne- ja kiintoainekuormiin. Vesistön tilan parantamiseksi alueella on tehty ja suunniteltu useita kunnostustoimia järville, valuma-alueelle ja virtavesiin. Näitä ovat muun muassa kosteikkojen rakentaminen, latvajärvien kunnostussuunnitelmat sekä rakennekalkin testaaminen pellolla. Hankkeen rahoittajina toimivat valuma-alueen kunnat (Siuntio, Vihti, Kirkkonummi, Lohja ja Inkoo), Rosk'n Roll Oy Ab, Uudenmaan virkistysalueyhdistys, Ympäristöministeriö sekä LUVY.

Siuntionjoen vesistöalueella on tehty yhteistarkkailuraporteissa vedenlaadun mittauksia perinteisin menetelmin ennen jatkuvatoimisen mittarin asentamista, ja tuloksia on verrattu VEMALA-mallin vastaaviin. Tarkastelun kohteena olivat muutamat Siuntionjoen vesistön osavaluma-alueet sekä Siuntionjoen suu, joista viimeksi mainittu on kohtuullisen lähellä tässä tutkimuksessa käytettävän jatkuvatoimisen mittarin asennuspaikkaa. VEMALA-mallilla simuloituissa laskelmissa sekä fosfori- että typpikuormitus olivat noin 30 prosenttia suuremmat kuin perinteisillä menetelmillä laskettu kuormitus. (Lehmijoki ym. 2020: 17.)

4.2 Mittarin asentaminen

Jatkuvatoiminen EXO2 -vedenlaatumittari asennettiin Siuntionjoen vesistön eteläosaan Tjusträskin ja Vikträskin väliselle osuudelle 26.4.2019. Mittari on asennettu valuma-alueen alaosaan, jotta valuma-alueen kokonaiskuormituksesta saataisiin mahdollisimman tarkkaa tietoa. Mittari ei ole aivan alajuoksulla, sillä merenpinnan vaihtelu vaikuttaa Siuntionjoen alaosassa Vikträskiin saakka.

Asennusmenetelmänä käytettiin putkiasennusta. Paikka sekä asennusmenetelmä on valittu yhteistyössä mittarin maahantuojan Luode Consulting oy:n kanssa. Tarkkaa sijaintia ei tämän työn yhteydessä kuitenkaan paljasteta, sillä mittari sijaitsee yksityisen maanomistajan alueella. Paikka pidetään salassa myös mahdollisen ilkivaltariskin vuoksi.

Luvussa 2.4.1 mainittiin, että mittarin asennuspaikka on usein kompromissi, ja niin on myös tässä tapauksessa. Mittarin asennuspaikassa oli havaittavissa ajoittaisia pyörteitä eikä mittaria myöskään asennettu suoraan alavirtaa kohden, sillä tämä olisi vaatinut kohtuullisen mittavia rakennustöitä. Asennuksessa hyödynnettiin jo olemassa olevia rakenteita, tässä tapauksessa portaita. Portaisiin asennettiin sisähalkaisijaltaan 103 mm:n kokoinen putki, jonka sisälle mittari oli helppo kiinnittää. Toisin kuin sivulla 12 esitetystä kaavakuvasta, tässä putki oli noin 45 asteen kulmassa vedenpintaan nähden. Anturipää oli kuitenkin kohtisuorassa virtaussuuntaa vastaan. Valokuva asennuksesta on esitettyä kuvassa 7.



Kuva 7. EXO2-mittarin asennus Siuntionjoessa. Mittari on pääosin putken sisällä, mutta antureiden päät ovat putken ulkopuolella vedenpinnan alapuolella.

Koska talvi 2019–2020 oli leuto ja vähäluminen, mittaria oli mahdollista pitää asennettuna joulukuun loppuun saakka ja vielä tämänkin jälkeen. Seurantajakso päättyi kuitenkin vuoden loppuun, sillä vuoden 2020 virtaamatiedot eivät tätä tekstiä kirjoitettaessa ole tiedossa, vaan ne toimitetaan vasta myöhemmin. Aivan seurantajakson alussa, 1.5.–2.5.2019 mittari oli poissa käytöstä tilapäisen häiriön vuoksi, joten tuolta ajalta dataa ei kertynyt.

Datankeräin ja akku asennettiin erilliseen sähkökaappiin, joka asetettiin tukevalle alustalle hieman irti maanpinnasta mittarin läheisyyteen. Mittausfrekvenssiksi määritettiin 30 minuuttia. Kaapin asennusta ei ollut tehty talviolosuhteisiin sopivaksi, ja jo 10 senttimetrin suuruinen lumen syvyys olisi edellyttänyt asennustavan muuttamista. Näin toimittiin, koska mittaria ei alun perin ollut tarkoitettu pitää asennettuna talven yli, mutta leuto talvi mahdollisti mittarin pitämisen aiottua kauemmin. Mittauspaikan sähkökaappi, jonka sisälle akku ja datankeräin on asennettu, on kuvassa 8.



Kuva 8. EXO2 -mittarin datankeräin (ylhällä) sekä virtalähteenä toimiva 12 V:n akku (alhaalla).

4.3 Vertailunäytteiden ottaminen

Vertailunäytteiden ottamisesta tehtiin näytteenottosuunnitelma LUVYssa, ja kaikista tutkituista parametreista (kiintoaine, kokonaisfosfori, kokonaistyppi) otettiin vertailunäytteet seuranta-aikana 26.4.–31.12.2019 yhteensä viisi kertaa. Näytteet otettiin 9.5., 16.7., 15.8., 14.10. ja 12.12.2019. Vertailunäytteitä otettaessa on tärkeää, että ne edustavat mahdollisimman paljon erilaisia pitoisuuksia. Vertailunäytteitä otettaessa tarkka kellon-aika kirjoitettiin muistiin. Näytteenottosuunnitelmasta vastasivat LUVYn vesistöasiantuntijat ja näytteenotosta puolestaan sertifioidut näytteenottajat.

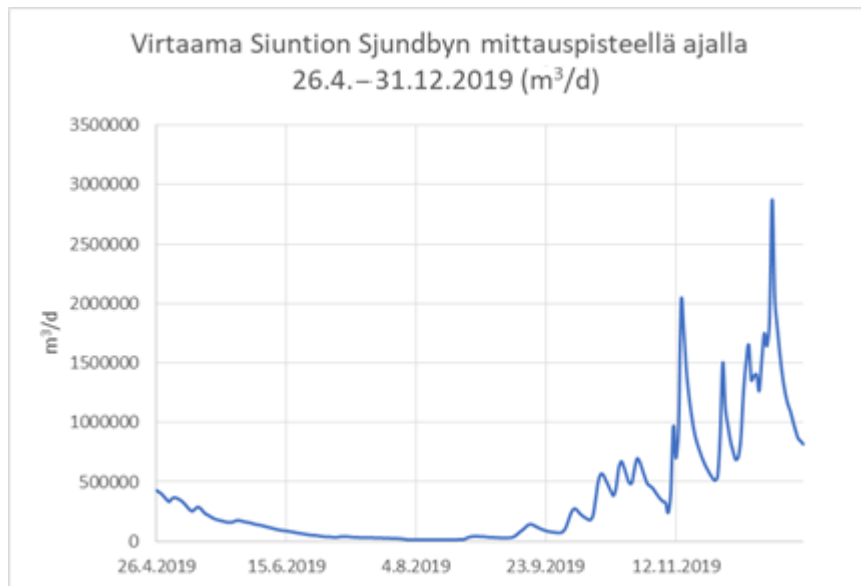
4.4 Mittarin huolto ja kalibrointi

Mittarin säännöllinen huolto oli tämän insinööriyön tekijän vastuulla. Kesäaikana mittaria huollettiin keskimäärin noin kerran viikossa siihen kertyneen biologisen kasvuston sekä pohjaeläinten toukkien kertymisen vuoksi. Huollon yhteydessä akku vaihdettiin tarvittaessa, keskimäärin 2–3 viikon välein. Antureiden kalibroinneista vastasi Luode Consulting Oy. Mittari oli kalibroitu kokonaisuudessaan ennen sen asentamista, minkä lisäksi pH-anturi kalibroitiin seuranta-aikana kahdesti. Ohjeellinen kalibrointi-aika muille antureille olisi ollut loka-marraskuussa 2019. Kalibrointia ei kuitenkaan tehty, sillä yhteistyössä laitteen maahantuojan (Luode Consulting Oy) kanssa päädyttiin ratkaisuun, jossa mittari kalibroidaan kokonaisuudessaan silloin kun se nostetaan talveksi pois käytöstä, joskin leudon talven vuoksi mittaria pidettiin käytössä aina helmikuulle 2020.

4.5 Virtaamamittaukset

Siuntionjoen virtaamatiedot saatiin SYKEstä Sjundbyn mittapadolta. Sjundbyltä saatuja arvoja käytettiin sellaisinaan, sillä mittauspaikan nähtiin olevan riittävän lähellä varsinaista mittauspistettä. Tietoja pidettiin riittävän tarkkoina tässä työssä toteutetun laskennan onnistumiseksi. SYKE hyödyntää virtaamatiedoissaan sekä simuloituja tuloksia että havaintoja. Havaitut arvot perustuvat purkautumiskäyrään (ks. luku 2.6) ja simuloituvat arvot puolestaan hydrologiseen mallinnukseen.

Virtaamamääriä arvioitaessa noudatettiin SYKEstä saatua ohjeistusta, jossa huippuarvot otettiin havainnoista, mutta muilta osin käytettiin simuloituja arvoja. Hydrologinen malli on kuitenkin huippuarvojen havaintojen osalta epätarkka, eivätkä todelliset huippuarvot näy siinä. Kuitenkaan myöskään purkautumiskäyrän antamat tiedot Sjunbyn mittausasemalla eivät ole täysin luotettavia, sillä pato on säännöstelty. (Myllyniemi 2020.) Siuntionjoen virtaaman vaihtelu (m^3/d) Sjunbyn mittauspisteellä tässä työssä käytetyllä tarkasteluajanjaksolla on esitetty kuvassa 9.

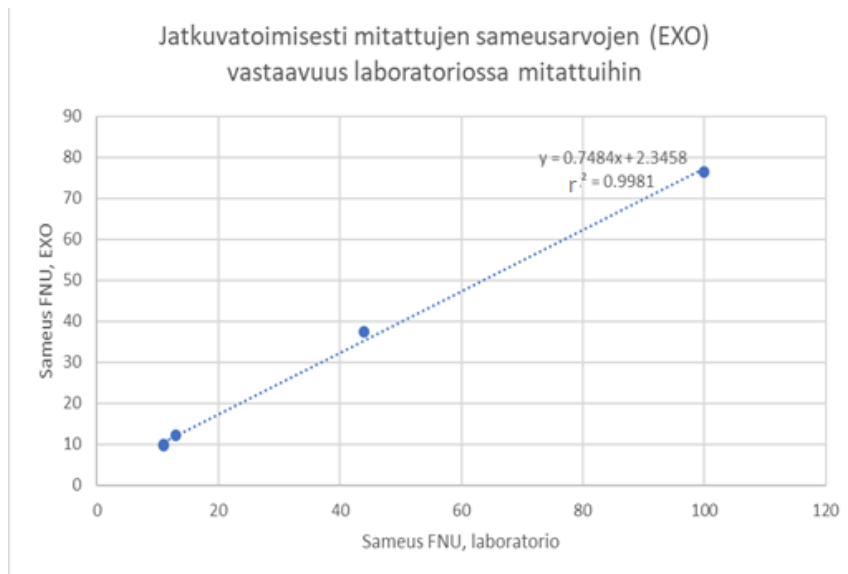


Kuva 9. Virtaama Siuntion Sjunbyn mittauspisteellä ajalla 26.4.–31.12.2019 (m^3/d) (SYKE).

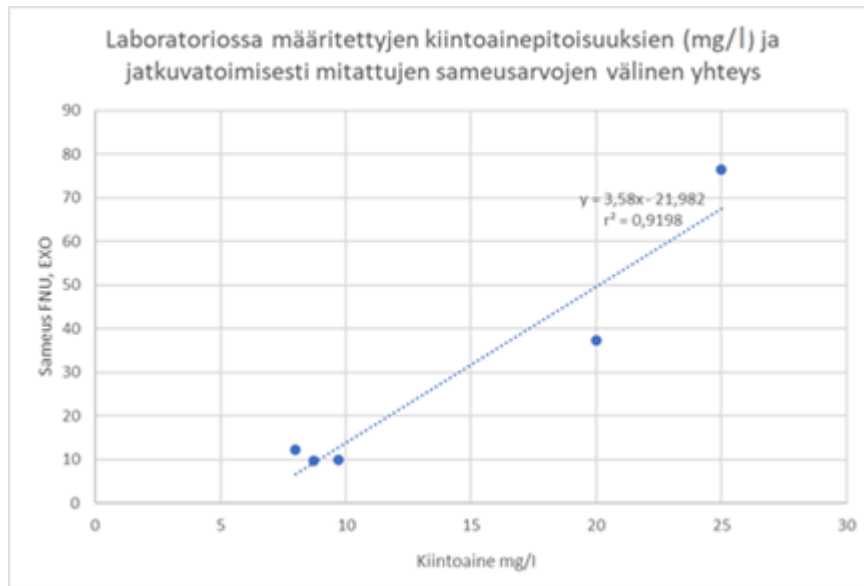
Kuvasta 9 on nähtävissä, että virtaamassa oli seurantajakson aikana huomattavaa vaihtelua. Pienimmillään virtaama oli kesäkuukausina (kesä-elokuu), minkä jälkeen se alkoi vähitellen kasvaa. Suurimmat virtaamat mitattiin marras- ja joulukuussa.

5 Tulokset

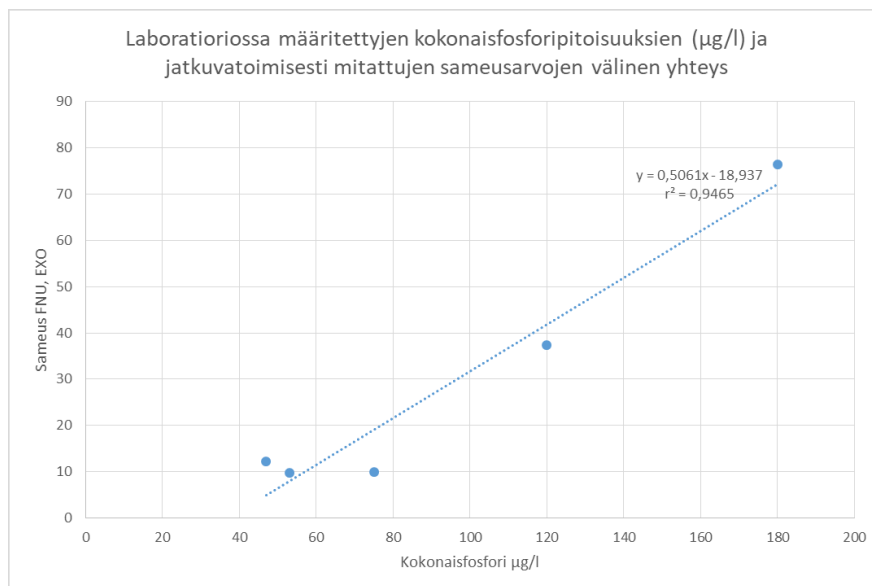
Seuranta-ajan päätyttyä jatkuvatoimisesti mitattu data koottiin yhteen ja laboratoriossa määritettyjä mittaustuloksia verrattiin jatkuvatoimisesti mitattuihin. Kuvassa 10 verrataan jatkuvatoimisesti mitattujen sameusarvojen yhteisvaihtelua laboratoriossa määritettyihin ja kuvissa 11–13 puolestaan verrataan sameusarvojen sekä kiintoaineen, kokonaistypen ja kokonaisfosforin välistä yhteisvaihtelua.



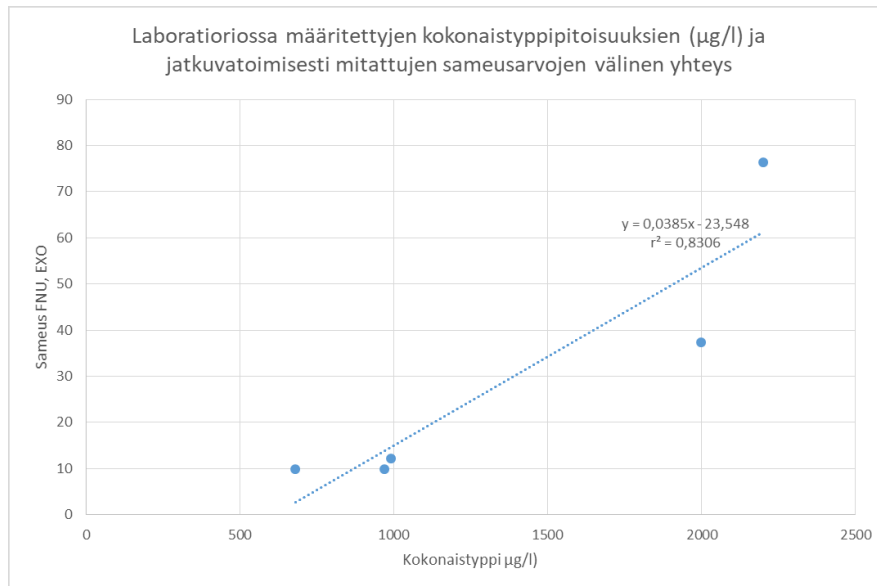
Kuva 10. EXO2-mittarin mittaamat sameusarvot laboratoriossa määritettyjen sameusarvojen funktiona sekä lineaarisen regression yhtälö ja sen selitysaste.



Kuva 11. EXO2-mittarin mittaamat sameusarvot laboratoriossa määritettyjen kiintoainepitoisuuksien funktiona sekä lineaarisen regression yhtälö ja sen selitysaste.



Kuva 12. EXO2-mittarin mittaamat sameusarvot laboratoriossa määritettyjen kokonaisfosforipitoisuuksien funktiona sekä lineaarisen regression yhtälö ja sen selitysaste.



Kuva 13. EXO2-mittarin mitaamat sameusarvot laboratoriossa määritettyjen kokonaistyyppipitoisuuksien funktiona sekä lineaarisen regression yhtälö ja sen selitysaste.

Saatujen arvojen perusteella määritettiin seuraavaksi ainevirtaamat eli tässä tapauksessa kokonaiskuormitusarvot. Tämä tehtiin vuorokautisten virtaamatietokeskiarvojen perusteella siten, että huippuarvot on otettu havainnoista, kun taas muuten on pääasiassa käytetty simuloituja arvoja (ks. edellä). On huomioitava, että SYKE:n tiedot ovat vuorokausikeskiarvoja, kun taas jatkuvatoimisesti mitatut arvot edustavat hetkellistä mitaustulosta. Tästä johtuen kunkin vuorokauden aikana mitatuille sameusarvoille määritettiin keskiarvo, minkä perusteella määritettiin keskiarvo kullekin pitoisuudelle (kiintoaine, kokonaisfosfori, kokonaistyyppi) kalibrointiyhtälöiden avulla. Kalibrointiyhtälöt ja niiden selitysasteet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Sameusarvojen perusteella määritetyt kalibrointiyhtälöt kiintoaineelle, kokonaisfosforille ja kokonaistypelle.

Suure	Sameusarvojen perusteella määritelty selitysaste	Sameusarvojen perusteella laskettu kalibrointiyhtälö pitoisuudelle
Kiintoaine (mg/l)	0,9198	$x = (y + 21,982)/3,58$
Kokonaisfosfori ($\mu\text{g/l}$)	0,9465	$x = (y + 18,937)/0,5061$
Kokonaistyyppi ($\mu\text{g/l}$)	0,8306	$x = (y + 23,548)/0,0385$

Vuorokausikohtainen kuorma puolestaan voidaan laskea kaavalla

$$L = Q * c \quad (7)$$

L = vuorokausikohtainen kuorma

Q = virtaama

c = pitoisuus.

Kuormat koko ajanjaksolle kullekin tutkitulle suurelle (kiintoaine, kokonaisfosfori ja kokonaistyyppi) laskettiin summaamalla vuorokausikohtaiset kuormat. Kun tämä oli tehty, tuloksia verrattiin SYKEN VEMALA-mallin simuloimiin tuloksiin samalta ajalta. VEMALA-mallin tietoja verrattiin mittauspaikasta yläjuoksulle päin olevan Tjusträskin lähtevän kuorman tietoihin. Jatkuvatoimisen mittauslaitteiston havaintojen perusteella laskennalliset sekä VEMALAn simuloimat kuormat (kg) seurantajaksolle 26.4.–31.12.2019 on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Kalibrointiyhtälöillä määritetyt sekä SYKEN VEMALA-mallinnusohjelmalla simuloitut kiintoaine-, kokonaisfosfori- ja kokonaistyyppikuormat (kg) kokonaisuudessaan seurantajakson 26.4.–31.12.2019 aikana. Tiedot VEMALASTA on haettu 26.5.2020.

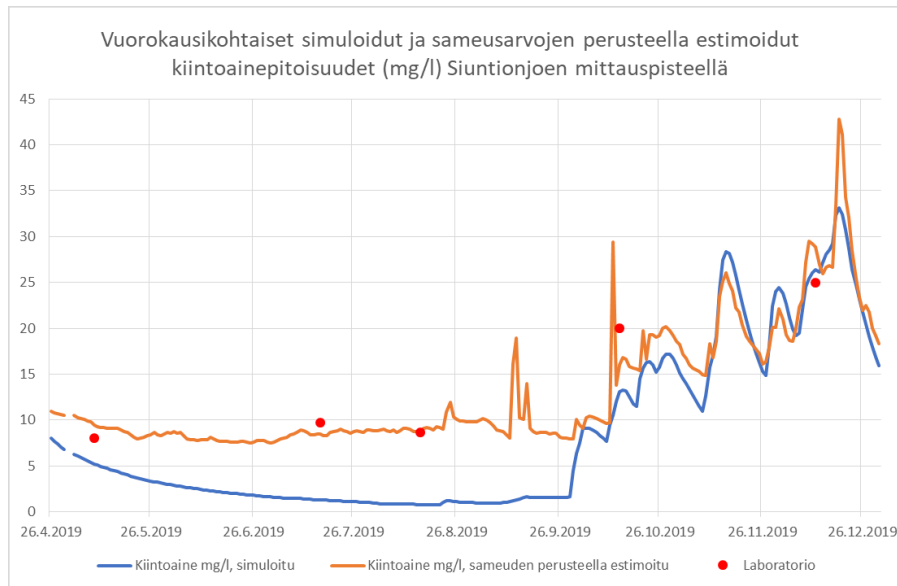
	Kiintoaine	Kok. P	Kok. N
VEMALA:lla simuloitu	1726851	13407	209543
Sameusarvojen perusteella estimoitu	1950384	13246	185083

Koska Tjusträskin etäisyys Siuntionjoen mittausasemasta ei ole kovin suuri eikä Siuntionjokeen yhdisty tässä välissä muita jokiuomia, lukuarvojen vertaamista Siuntionjoen mittauspisteen vastaaviin pidettiin mielekkäinä.

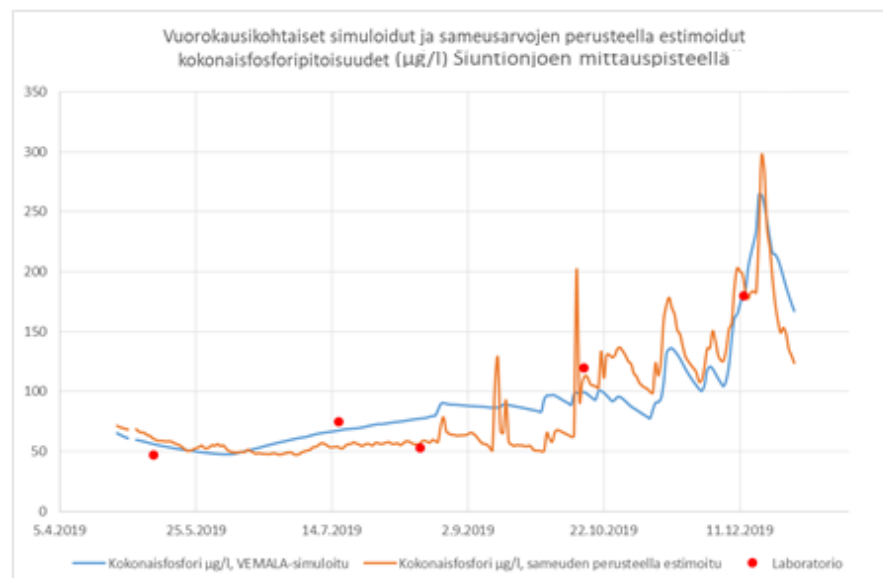
6 Tulosten tarkastelu

Taulukosta 2 on nähtävissä, että kaikkien tutkittujen suureiden simuloitujen ja laskennallisesti sameusarvojen perusteella estimoitujen tulosten väliset erot ovat kohtuullisen pienet. Kokonaisfosforin osalta VEMALA-malli on varsin tarkka, sillä se simuloi kuorman määrän vain noin 1 % korkeammaksi kuin sameusarvojen perusteella laskettu. Typen kohdalla ero on suurempi, noin 13 prosenttia. Kiintoainekuorman osalta puolestaan laskennallinen arvo on noin 13 prosenttia simuloitua korkeampi.

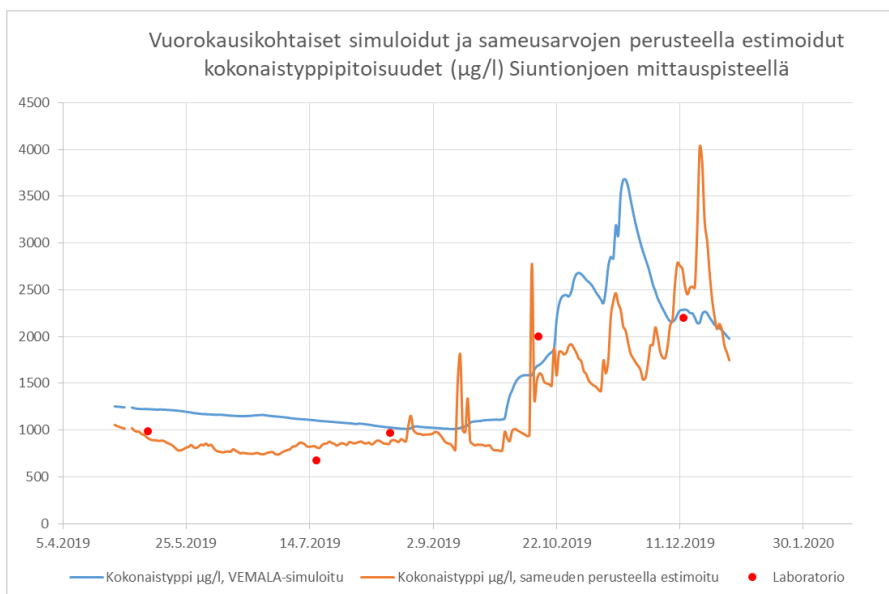
VEMALA-mallissa on mahdollista tarkastella myös vuorokausikohtaisia pitoisuustietoja, jolloin sameusarvojen perusteella laskettujen ja simuloitujen lukuarvojen eroavaisuuksia voitiin tarkastella lähemmin. Tiedot haettiin sen uoman perusteella, jossa mittari sijaitsee. Edellä esitettyjä kokonaiskuormia ei ole haettu uomakohtaisten tietojen perusteella, sillä uomakohtaiset tiedot ovat VEMALA-mallinnuksessa järvestä lähtevän kuorman tietoja suppeammat eikä uomakohtaisten kuormien määriä ole saatavissa suoraan, vaan ne on määritettävä virtaama- ja pitoisuustietojen perusteella. VEMALA laskee kuitenkin virtaaman erisuuruiseksi kuin tässä työssä lähteenä käytetty SYKEN hydrologinen malli. Pitoisuustietojen tarkastelun perusteella voidaan kuitenkin nähdä, millaisia eroja VEMALAssa on niiden osalta verrattuna sameusarvojen perusteella saatuihin laskennallisiin arvoihin. Vertailu on esitetty kuvissa 14–16. Kuviin on otettu mukaan myös laboratoriotulokset vertailun tueksi.



Kuva 14. VEMALA-mallilla simuloidut, sameusarvojen perusteella estimoidut sekä laboratoriossa mitatut kiintoainepitoisuudet vuorokausittain Siuntionjoen mittauspisteellä ajalla 26.4.–31.12.2019. Tiedot VEMALASTA on haettu 26.5.2020. (LUVY, SYKE)



Kuva 15. VEMALA-mallilla simuloidut, sameusarvojen perusteella estimoidut sekä laboratoriossa mitatut kokonaisfosforipitoisuudet vuorokausittain Siuntionjoen mittauspisteellä ajalla 26.4.–31.12.2019. Tiedot VEMALASTA on haettu 26.5.2020. (LUVY, SYKE)



Kuva 16. VEMALA-mallilla simuloitut, sameusarvojen perusteella estimoidut sekä laboratoriossa mitatut kokonaistyyppipitoisuudet vuorokausittain Siuntionjoen mittauspisteellä ajalla 26.4.–31.12.2019. Tiedot VEMALASTA on haettu 26.5.2020. (LUVY, SYKE)

Kuvasta 15 on nähtävissä, että kokonaisfosforikuormituksen osalta VEMALAN esittämä malli täsmää kohtuullisen hyvin sameusarvojen perusteella laskettuihin arvoihin, joskin osa alkusyksyn huippuarvoista jää mallissa ottamatta huomioon. Loppuvuoden huippuarvojen kohdalla simulointi näyttää sen sijaan toimivan varsin hyvin. Kokonaistyyppien kohdalla malli sen sijaan näyttäisi kokonaisuutena yliarvioivan kuormituksen ja loppuvuoden kuormitushuipun se ennustaa noin kuukautta aikaisemmaksi kuin sameuden perusteella estimoitu tulos (kuva 16). Kokonaisuutena tyyppikuormituksen yliarviointia on havaittu myös useiden muiden Siuntionjoen alueen järvien (mm. Hepari, Petäjärvi, Karhujärvi) kohdalla, joista on olemassa sekä simuloituja että havaittuja kuormitustietoja (ks. Pellikka ym. 2020a, Pellikka ym. 2020b, Pellikka ym. 2020c). Päinvastoin kuin typen kohdalla, kiintoaineen osalta malli puolestaan näyttäisi selvästi aliarvioivan kuormitusta, mikä näkyy myös vertailunäytteiden tuloksissa (kuva 14).

Tuloksista on nähtävissä, että kalibrointinäytteiden perusteella jatkuvatoimisesti mitatut sameusarvot ovat varsin lähellä laboratoriossa mitattuja sameusarvoja, mikä tarkoittaa sitä, että EXO2 -mittari antaa luotettavia tuloksia. Selitysaste 0,9981 on hyvin korkea.

Myös kokonaisfosfori- ja kokonaistyyppikuormitusta näyttäisi olevan mahdollista estimoida jatkuvatoimisesti mitattujen arvojen perusteella Siuntionjoen vesistössä kohtuullisen luotettavasti. Kokonaisfosforin perusteella laskennalliset arvot ovat varsin lähellä VEMALA-mallin perusteella saatuja lukuarvoja, eikä myöskään kokonaistypen kohdalla ero ole erityisen suuri. Myös kiintoaineen ja kokonaisfosforin kuormaa on niitä vastaavien selitysasteiden (0,9198 ja 0,9465) perusteella mahdollista arvioida luotettavasti. Kokonaistypen ja sameuden välinen selitysasteen lukuarvo näyttäisi tässä tilanteessa olevan matalin (0,8306), mutta myös tämä on huomattavan korkea, sillä typpi ei ole välttämättä kiinni savihiukkasissa. Näinkin korkeaa selitysastetta selittänee se, että typpi esiintyy vesistössä samanaikaisesti fosforin kanssa.

Kiintoainekuormituksessa on huomattava ero VEMALA-mallinnuksen ja sameusarvojen perusteella estimoitujen arvojen välillä. Tälle ei löydetty yksiselitteistä syytä. Yhteyttä verrattiin sademäärädataan, mutta keväällä ja kesällä 2019 sademäärät olivat pitkän ajan keskiarvoja alhaisemmat, minkä vuoksi suurempaa virtaamaa ja sitä kautta syntyvää kiintoainekuormitusta ei ole mahdollista selittää suurempien sademäärien avulla. Yksi mahdollinen selitys on, että mittauspaikan yläpuolella oleva järvi Tjusträsk on erittäin rehevä ja kärsii sinileväkukinnoista. Järvessä oleva orgaaninen aines voi siten jatkaa valumista Siuntionjokeen, mitä VEMALA-mallinnus ei näytä oikein. VEMALA-mallilla ei tällä hetkellä ole kuitenkaan mahdollista näyttää tuloksia Siuntionjoen mittauspaikalta tuloksia *a*-klorofyllipitoisuuksista, joten vertailu ei ole siten täysin mahdollista.

Tuloksia tarkasteltaessa on kiinnitettävä huomiota mahdollisiin virheisiin sekä puutteisiin, joita tutkimusta toteutettaessa ja datan käsittelyssä on voinut esiintyä. Ensimmäiseksi on mainittava mittarin asennustapa. Asennuspaikalla havaittiin ajoittain jonkin verran pyörteitä, joskin kuten edellä kirjoitettiin, putkiasennus vähentää niistä aiheutuvaa mittaustulosten epätarkkuutta. Toiseksi on huomioitava, etteivät virtaamatiedot ole välttämättä täysin paikkansapitäviä. EXO2 -mittarin antamat tulokset on mitattu puolen tunnin välein ja vaihtelu voi ajoittain olla lyhyelläkin aikavälillä suurta. Tätä ei kuitenkaan ole pystytty ottamaan huomioon ainevirtaamatarkastelussa, sillä virtaamatietoja ei ollut mahdollista saada näin tarkalla aikajaksolla.

Se, mitkä arvot virtaamatiedoissa on valittu simuloitujen ja mitkä havaintoarvojen perusteella, perustuu osittain tämän työn kirjoittajan valintaan. Tässä työssä huippuarvot ja

niitä lähellä olevat arvot otettiin SYKE:n ohjeistuksen perusteella havainnoista kun taas muulloin käytettiin simuloituja arvoja. Kuitenkin ns. matalammat huippukohdat havaintosarjassa otettiin tässä yhteydessä simuloituista arvoista, vaikka nämä olisi ollut mahdollista ottaa yhtä lailla myös havaituista.

Lisäksi aiemmin on mainittu, että vertailunäytteitä pitäisi olla vähintään noin 10 kappaletta, jotta tulosten laskeminen muodostuisi riittävän luotettavaksi. Kuitenkin koska tässä työssä käsiteltävä aikasarja kattaa ajanjakson 26.4.–31.12.2019, vertailunäytteitä on otettu huomattavasti tätä vähemmän, viisi kappaletta kustakin tutkitusta suureesta. On siten mahdollista, että analyysitarkkuus on tässä yhteydessä jonkin verran kärsinyt. Etenkin suurten tai melko suurten pitoisuuksien kohdalla olisi hyvä, jos näytteitä olisi useampia. Vertailunäytteet onnistuttiin kuitenkin ottamaan optimaalisilta ajankohdilta eri vuodenaajoilta, minkä seurauksena pitoisuseroja oli mahdollista havaita. Lisäksi saameusanturi olisi pitänyt ohjeiden mukaan kalibroida noin kaksi kuukautta ennen seuranta-ajan päättymistä. Tätä ei kuitenkaan tehty, mikä on saattanut vaikuttaa tuloksiin jonkin verran. Huoltovälin arvioitiin koko seurantajakson ajan olleen riittävä. Kesäaikana huoltovälin pituus kasvoi yhden kerran sairaustapauksen vuoksi 18 vuorokauden mittaiseksi, mutta tätä ei kuitenkaan ollut mahdollista havaita merkittävänä poikkeamana mittaustasossa välittömästi mittarin huoltamisen jälkeen.

Aikaisemmin on lisäksi esitetty, että ainevirtaamat kulkeutuvat uomissa osin pulsseina ja että näiden muutokset eivät ole välttämättä täysin suoraan verrannollisia virtaaman määrään. Myös tämä saattaa aiheuttaa jonkin verran virheitä mittaustuloksiin mutta jotta näitä pulsseja olisi mahdollista paikantaa, kalibrointimittaustiheyden olisi oltava huomattavasti suurempi. Tällöin mittauksissa voitaisiin havaita, miten virtaaman muutos suhteutettuna ainevirtojen muutoksiin olisi nähtävissä. Vertailumittauksissa on huomioitu eri vuodenaajat, mutta tästä huolimatta päiväkohtaisilla tuloksilla voi olla huomattava merkitys kokonaiskuormituksen arvioinnissa. Lisäksi tässä työssä seuranta-aika saatiin käytännön syistä aloitettua vasta loppukeväästä, eikä siten kevättulvan aikaisia kalibrointinäytteitä tai vedenlaadun seurantaa ollut. Myös tällä on ollut vaikutusta tulosten luotettavuuteen kokonaisuudessaan.

Kuvista 13–15 on nähtävissä, että joulukuussa 2019 kaikkien tutkittujen aineiden pitoisuudet olivat erittäin suuret. VEMALA-mallinnusta käytettiin työssä myös vertailtaessa

vuoden 2019 tuloksia edellisen kahdeksan vuoden (2012–2019) aikajakson keskiarvoihin, jolloin ilmeni, että joulukuussa uoman fosforipitoisuus oli noin kaksinkertainen pitkän aikavälin keskiarvoihin nähden ja myös typpipitoisuus oli noin 70 prosenttia pitkän aikavälin keskiarvojen yläpuolella. Myös kuormat olivat tuolloin erittäin suuret, sillä virtaama kasvoi loppuvuotta kohden merkittävästi (vrt. kuva 9). Yksin joulukuun aikana uomassa kulkeneiden kiintoaine-, fosfori- ja typpikuormien suuruudet olivat lähes 60 prosenttia koko seurantajakson aikana kulkeneiden kuormien määrästä. Tällaisten kuormitushuipujen paikantaminen yksin laboratoriomittauksin tuskin olisi onnistunut, sillä näytteenottoajankohdat olisi pitänyt valita hyvin tarkasti.

Ilmastonmuutoksen myötä maataloudesta aiheutuvan ravinnekuormituksen määrä todennäköisesti kasvaa tulevaisuudessa lisääntyvien sateiden myötä, mutta vastaavasti valuma-alueen vesiensuojelutoimenpiteillä kuormituksen määrää on mahdollista vähentää.

7 Loppupäätelmät

Jatkuvatoimisten vedenlaadun mittauslaitteistojen käytöllä ravinnekuormituslaskennassa on monia etuja, minkä vuoksi niiden käyttöä voidaan monin perustein puoltaa. Edellä on käsitelty jatkuvatoimisen vedenlaadun mittaamisen pääpiirteet. On huomiotava, että anturin sijainnilla sekä vertailunäytteiden määrällä ja ajoituksella on suuri merkitys luotettavien tulosten saamisessa.

Saatujen tulosten perusteella on nähtävissä, että Siuntionjoen valuma-alueella sameusarvojen perusteella on mahdollista ennustaa Itämereen suuntautuvien kiintoaine- ja ravinnekuormien suuruutta riittävällä tarkkuudella. Saadut tulokset tukevat tässä työssä esiteltyjen aiempien vastaavien tutkimusten (esim. Koskiaho 2015, Linjama ym. 2009, Valkama & Ruth 2017) tuloksia siitä, että vedenlaadun jatkuvatoimisella mittaamisella on mahdollista nähdä nopeita vedenlaadussa tapahtuvia vaihteluita, mikä ei yksin laboratorioanalyysin olisi mahdollista. Tuloksista käy myös ilmi, että kuormitushuippu keskittyi seurantajakson loppuun eli joulukuulle 2019. Tuona aikana syntyi lähes 60 prosenttia koko seurantajakson kiintoaine-, typpi- ja fosforikuormista. Kuorman huippukohdilla on havaittu olevan suuri vaikutus kokonaiskuormaan myös muissa tutkimuksissa (vrt. Linjama ym. 2009, Koskiaho ym. 2015).

On kuitenkin korostettava, että tämän tai muidenkaan tutkimusten tuloksia ei ole mahdollista yleistää suoraan muihin kohteisiin. Kuten aiemmin kirjoitettiin, jokaisella uomalla on omat erityispiirteensä, jotka ovat riippuvia muun muassa uoman valuma-alueen maankäytöstä ja topografiasta sekä valuma-alueen vesistön hydromorfologiasta. Mahdolliset korrelaatiot sameusarvon sekä kiintoaine- ja ravinnepitoisuuksien välillä on määriteltävä kunkin uoman kohdalla erikseen.

8 Jatkoimenpiteet

Tulokset puoltavat seurannan jatkamista Siuntionjoen valuma-alueella nykyisellä mitauspisteellä. Mitä pidempään seurantaa jatketaan, sitä paremmin ravinnekuormituksen ja ainevirtojen määrää on mahdollista laskennallisesti ennustaa. Tämän työn yhteydessä aloitettua seurantaa onkin tarkoitus jatkaa ainakin vuoden 2024 loppuun, mikä mahdollistaa pitkän aikavälin trendien tarkastelun. Tietojen perusteella on mahdollista selvittää, mitkä tekijät nopeuttavat erityisesti ravinteiden kulkeutumista vesistöihin Siuntionjoen valuma-alueella ja samalla on mahdollista nähdä, millaisia vaikutuksia vesiensuojelutoimilla voi olla vedenlaatuun ja kuormituksen määrään.

Seurannan jatkamisen ohella on tärkeää kiinnittää huomiota myös kalibroitinäytteenottoon sekä sen suunnitteluun sekä itse mittarin huoltoihin ja kalibrointeihin. Vuonna 2020 kalibroitinäytteitä otetaan edellisvuotta enemmän, jolloin regressiomallista voidaan saada aiempaa tarkempi.

Talvi 2019–2020 oli poikkeuksellisen lämmin ja sateinen, minkä lisäksi sateet tulivat Siuntionjoen valuma-alueella pääasiassa vetenä. Ilmastonmuutoksen myötä kuormitushuiput saattavatkin tulevaisuudessa yhä enemmän sijoittua keväisen lumien sulamisajan sijaan myöhäissyksyyn tai keskitalveen. Tässä työssä ja myös muissa tutkimuksissa on esitetty, että perinteisellä näytteenotolla optimaalisten olosuhteiden valitseminen mitausajankohdaksi on vaikeaa. Tämä johtuu muun muassa siitä, että sademäärillä on suuri vaikutus uoman virtaamaan sekä yleisesti myös siinä virtaavan ravinnekuorman määrään, eikä näytteenottoa ole käytännössä mahdollista suunnitella etukäteen niin, että se toteutettaisiin kaikista suurimman kuormitushuipun hetkellä (vrt. kuvat 14–16). Jatkuvat toimien mittarin avulla on kuitenkin mahdollista tarkastella myös ilmastonmuutoksen myötä yleistyvien rankkasateiden kuormitusvaikutuksia eri vuosina ja eri vuodenaikoina.

Lähteet

Arola, Hanna (toim.) 2012. Jatkuvatoiminen sameusmittaus – hyvät mittauskäytännöt ja aineistonkäsittely. Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2012.

Arola, Hanna; Arvola, Lauri; Kotamäki, Niina; Kotilainen, Helmi; Linjama, Jarmo & Näykki, Teemu. 2012. Antureiden kalibrointi ja ainepitoisuuksien seuranta sameusanturin avulla. Julkaisussa: Arola, Hanna (toim.) 2012. Jatkuvatoiminen sameusmittaus – hyvät mittauskäytännöt ja aineistonkäsittely. Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2012, 29–34.

Castrillo, María & López García, Álvaro. 2020. Estimation of high frequency nutrient concentrations from water quality surrogates using machine learning methods. Julkaisussa: Water Research 172 (2020): 115490

Espinola, Benoit. 2017. Statistical analysis of water data from an online EXO2 monitoring sonde: Modelling Chlorophyll-a using an EXO2 sonde. Insinööriyö. Helsinki: Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Finér, Leena; Mattsson, Tuija; Joensuu, Samuli; Koivusalo, Harri; Laurén, Ari; Makkonen, Timo; Nieminen, Mika; Tattari, Sirkka; Ahti, Erkki; Kortelainen, Pirkko; Koskiaho, Jari; Leinonen, Antti; Nevalainen, Raimo; Piirainen, Sirpa; Saarelainen, Jouko; Sarkkola, Sakari & Vuollekoski, Martti. 2010. Metsäisten valuma-alueiden vesistökuormituksen laske-
kenta. Suomen ympäristö 10/2010. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.

Finér, Leena; Huttunen, Markus; Härkönen, Laura; Kortelainen, Pirkko; Lepistö, Ahti; Mattsson, Tuija; Piirainen, Sirpa; Sarkkola, Sakari; Sallantausta, Tapani; Tattari, Sirkka & Ukonmaanaho, Liisa. 2019. Metsätalouden vesistökuormituksen arviointimenetelmiä on kehitettävä. Julkaisussa: Vesitalous 5/2019, 29–32.

Finér, Leena; Lepistö, Ahti; Karlsson, Kristian; Räike, Antti; Tattari, Sirkka; Huttunen, Markus; Härkönen, Laura; Joensuu, Samuli; Kortelainen, Pirkko; Mattsson, Tuija; Piirainen, Sirpa; Sarkkola, Sakari; Sallantausta, Tapani & Ukonmaanaho, Liisa. 2020. Metsistä ja soilta tuleva vesistökuormitus 2020. MetsäVesi -hankkeen loppuraportti. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2020:6. Helsinki: Valtioneuvoston kanslia.

Glasgow, Howard B.; Burkholder, Joann M.; Reed, Robert E.; Lewitus, Alan J. & Kleinman, Joseph E. 2004. Real-time remote monitoring of water quality: a review of current applications, and advancements in sensor, telemetry and computing technologies. Julkaisussa: Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 300 (2004), 409–448.

Howarth, Robert W. & Marino, Roxanne. 2006. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: Evolving views over three decades. Julkaisussa: Limnology and Oceanography 51(1, part 2), 2006, 364–376.

Huitu, Hanna (toim.). 2008. Kasvu 8. Automatisoidun mittausverkon kehittäminen ympäristön seurantaan. Tampere: Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus.

Hyvärinen, Veli & Forsius, John. 1982. Purkautumiskäyrä – keskeinen osa käytännön hydrologiaa. Julkaisussa: Vesitalous 23(1982):6, 29–33.

Juusela, Ville. 2012. Sameusmittauksen historiaa. Julkaisussa: Arola, Hanna (toim.). 2012. Jatkuvatoiminen sameusmittaus – hyvät mittauskäytännöt ja aineistonkäsittely. Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2012, 9–11.

Kallio, Kari; Koskiaho, Jari; Lepistö, Ahti; Kiirikki, Mikko & Tattari, Sirkka. 2010. Mitä uutta nykYTEKNIKALLA saadaan selville valuma-alue -järvikokonaisuudesta? Julkaisussa: Lepistö, Ahti; Huttula, Timo; Granlund, Kirsti; Kallio, Kari; Kiirikki, Mikko; Kirkkala, Teija; Koponen, Sampsa; Koskiaho, Jari; Liukko, Ninni; Malve, Olli; Pyhälä, Timo; Rasmus, Kai & Tattari, Sirkka. 2010. Uudet menetelmät ympäristötutkimuksessa ja seurannassa – pilottina Säkylän Pyhäjärvi. Suomeen ympäristö 9/2010. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, 10–31.

Karhu, Kristiina; Fritze, Hannu; Hämäläinen, Kai; Vanhala, Pekka; Jungner, Högne; Oinonen, Markku; Sonninen, Eloni; Tuomi, Mikko; Spetz, Peter; Kitunen, Veikko & Liski, Jari 2010: Temperature sensitivity of soil carbon fractions in boreal forest soil. Ecology 91(2), 370–376.

Keski-Uudenmaan ympäristökeskus. 2020. VILKKU Plus -hanke. Verkkoaineisto. <https://www.vilkkuhanke.fi/>. Luettu 13.4.2020.

Ketola, Mirva; Laine, Päivi; Mäkinen, Heikki; Vaarala, Henri & Ventelä, Anne-Mari. 2019. Vesienhoitosuunnitelmien tavoitteiden edistäminen Lahden Vesijärvellä ja Säkylän Pyhäjärvellä – testattuja toimintatapoja kaikkien hyödynnettäväksi. Hankkeen loppuraportti. Lahti: Päijät-Hämeen Vesijärvisäätiö, Säkylä: Pyhäjärvi-instituutti.

Korhonen, Johanna. 2007. Suomen vesistöjen virtaaman ja vedenkorkeuden vaihtelut. Suomen ympäristö 45/2007. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.

Koskiaho, Jari & Puustinen, Markku. 2008. Maatalouden vesiensuojelukosteikon tehokkuuden mittaaminen antureiden avulla. Julkaisussa: Huitu, Hanna (toim.). 2008. Kasvu 8. Automatisoidun mittausverkon kehittäminen ympäristön seurantaan. Tampere: Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus, 44–52.

Koskiaho, J.; Lepistö, A.; Tattari, S. & Kirkkala, T. 2010. On-line measurements provide more accurate estimates of nutrient loading: a case of the Yläneenjoki river basin, south-west Finland. Julkaisussa: Water Science and Technology 61.1 (2010), 115–122.

Koskiaho, Jari; Tattari, Sirkka & Röman, Elina. 2015. Suspended solids and total phosphorus loads and their spatial differences in a lake-rich river basin as determined by

automatic monitoring network. Julkaisussa: Environmental Monitoring and Assessment (2015) 187: 187.

Kotamäki, Niina; Thessler, Sirpa; Koskiahho, Jari; Hannukkala, Asko O.; Huitu, Hanna; Huttula, Timo; Havento, Jukka & Järvenpää, Markku. 2009. Wireless *in-situ* Sensor Network for Agriculture and Water Monitoring on a River Basin Scale in Southern Finland: Evaluation from a Data User's Perspective. Julkaisussa: Sensors 2009:9, 2862–2883.

Kotilainen, Helmi; Lindfors, Antti; Linjama, Jarmo; Tattari, Sirkka & Thessler, Sirpa. 2012. Mittausaseman valvonta ja huolto. Julkaisussa: Arola, Hanna (toim.) 2012. Jatkuvatoinen sameusmittaus – hyvät mittauskäytännöt ja aineiston käsittely. Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2012, 25–28.

Kukkonen, Minna. 2012. Opas metsätalouden vesistökuormituksen seurantaan. Metlan työraportteja 245. Vantaa: Metsäntutkimuslaitos.

Kuntaliitto. 2012. Hulevesiopas. Helsinki: Suomen Kuntaliitto.

Lehmijoki, Anne; Suonpää, Anu & Pellikka, Katja. 2020. Siuntionjoen vesistön ja Pikkanlahden yhteistarkkailujen vuosiyhteenveto 2019. Lohja: Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. Julkaisu 13/2020-

Lepistö, Ahti; Huttula, Timo; Kallio, Kari; Koponen, Sampsa & Tattari, Sirkka. 2010. Mihin uutta tietoa voidaan käyttää? Julkaisussa: Lepistö, Ahti; Huttula, Timo; Granlund, Kirsti; Kallio, Kari; Kiirikki, Mikko; Kirkkala, Teija; Koponen, Sampsa; Koskiahho, Jari; Liukko, Ninni; Malve, Olli; Pyhälähti, Timo; Rasmus, Kai & Tattari, Sirkka. 2010. Uudet menetelmät ympäristöntutkimuksessa ja seurannassa – pilottina Säkylän Pyhäjärvi. Suomeen ympäristö 9/2010. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, 32–41.

Liljendahl, Anne. 2018a. Kirkkonummen Syväjärven kunnostussuunnitelma. Lohja: Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. Raportti 721/2018.

Liljendahl, Anne. 2018b. Veikkolan järvet kohti hyvää tilaa v. 2019–2027. Perälänjärven, Lamminjärven ja Kalljärven kunnostussuunnitelma. Lohja: Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. Raportti 723/2018.

Linjama, Jarmo; Puustinen, Markku; Koskiahho, Jari; Tattari, Sirkka; Kotilainen, Helmi & Granlund, Kirsti. 2009. Implementation of automatic sensors for continuous monitoring in runoff quantity and quality in small catchments. Julkaisussa: Agricultural and food science 18 (2009), 417–427.

Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. 2018. Elinvoimainen ja esteetön Siuntionjoki – vesistövisio 2030. Verkkoaineisto. http://www.siuntionjoki.fi/easydata/customers/siuntionjoki/files/kuvat/elinvoimainen_ja_esteeton_siuntionjoki_-_vesistovisio_2030.pdf, luettu 13.4.2020.

Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. 2020. Yhdistyksen Internet-sivu. Verkkosivusto. <https://www.luvy.fi/>, luettu 13.4.2020.

Metsäkeskus. 2020. Päätynyt: Maltti metsänhoidossa – valtti vesienhoidossa. Verkkosivusto. <https://www.metsakeskus.fi/maltti-metsanhoidossa-valtti-vesienhoidossa>, luettu 13.4.2020.

Miettinen, Heli; Pumpanen, Jukka; Heiskanen, Jouni J.; Aaltonen, Hermanni; Mammarella, Ivan; Ojala, Anne; Levula, Janne & Rantakari, Miitta. 2015. Towards a more comprehensive understanding of lacustrine greenhouse gas dynamics — two-year measurements of concentrations and fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O in a typical boreal lake surrounded by managed forests. Julkaisussa: *Boreal Environment Research* 20, 75–89.

Myllyniemi, Harri. 2020. Siuntionjoen virtaama. Tutkija, Suomen ympäristökeskus. Puhelinkeskustelu 20.5.2020.

Määttä, Ida-Maria. 2016. Jatkuvatoimisten vedenlaatumittareiden käyttö kuormituksen arvioinnissa Vesijärvellä. Pro gradu tutkielma. Helsinki: Helsingin yliopisto.

Oravainen, Reijo. 1999. Vesistötulosten tulkinta, 2. painos. Tampere: Kokemäenjoen vesistön vesiensuojeluyhdistys ry.

Palmroth, Marja; Huttunen, Harri; Rissanen, Reetaleena; Rantala, Lasse & Niskanen, Ilpo. 2014. Real-time Monitoring of Surface Water Quality Water Downstream of a Mine. Verkkosivusto.

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwuiqMKaneboAhUqxaYKHQzP-DAoQFjAAegQIAhAB&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F242354706_Real-time_Monitoring_of_Surface_Water_Quality_Water_Downstream_of_a_Mine&usg=AOvVaw2NyMxmt9MbtSmk4JeNcJbZ, haettu 13.4.2020.

Pellerin, Brian A.; Stauffer, Beth A.; Young, Dwane A.; Sullivan, Daniel J.; Bricker, Suzanne B.; Walbridge, Mark R.; Clyde, Gerard A. Jr. & Shaw, Denice M. 2016. Emerging Tools for Continuous Nutrient Monitoring Networks: Sensors Advancing Science and Water Resources Protection. Julkaisussa: *Journal of American Water Resources Association*, 52 (4), 993–1007.

Pellikka, Katja. 2020a. Kriittisen kuorman määrittäminen. Vesistöasiantuntija, Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. Sähköpostikeskustelu 25.5.2020.

Pellikka, Katja. 2020b. Sameuden ja ravinnepitoisuuksien välinen yhteys. Vesistöasiantuntija, Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. Suullinen tiedonanto.

Pellikka, Katja; Mettinen, Aki; Valjus, Jorma & Sammalkorpi, Ilkka. 2020a. Heparin kunnostussuunnitelma. Lohja: Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry, julkaisu 2/2020.

Pellikka, Katja; Mettinen, Aki; Valjus, Jorma & Sammalkorpi, Ilkka. 2020b. Petäjärven kunnostussuunnitelma. Lohja: Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry, julkaisu 3/2020.

Pellikka, Katja; Kihlström, Maria; Laitinen, Erkki & Vesterinen, Jussi. 2020c. Siuntion Karhujärven kunnostussuunnitelma. Lohja. Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. Luonnos.

Salmi, Mika. 2020. Metsätalouden vesistövaikutukset. Projektipäällikkö, Metsäkeskus. Esitys Hiidenvesi-illassa 4.3.2020.

SAVE-hanke. 2020. Verkkoaineisto. <https://blogs.helsinki.fi/save-kipsihanke/>, luettu 13.4.2020.

Suomen standardisoimisliitto 2018: SFS-EN ISO 5667-3:2018. Water quality. Sampling. Part 3. Preservation and handling of water samples. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.

Suomen ympäristökeskus. 2020a. Vesimuodostumakohtaisen kuormituksen vaikutus ja vähennystarpeen arviointi – LLR. Verkkoaineisto. https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Vesi/Mallit_ja_tyokalut/Vesienhoidon_mallit/Kuormitusvaikutus-malli_LLRLR, luettu 13.4.2020.

Suomen ympäristökeskus. 2020b. Vedenlaadun ja ravinnekuormituksen mallinnus- ja arviointijärjestelmä VEMALA. Verkkoaineisto. https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Vesi/Mallit_ja_tyokalut/Vesienhoidon_mallit/Vedenlaadun_ja_ravinnekuormituksen_mallinnus_ja_arviointijarjestelma_VEMALA, luettu 13.4.2020.

Suomen ympäristökeskus. 2020c. VALUE – valuma-alueen rajaustyökalu. Verkkoaineisto. <http://paikkatieto.ymparisto.fi/value/>. Luettu 28.6.2020.

Suomen ympäristökeskus. 2020d. Vesien tila. Verkkoaineisto. http://paikkatieto.ymparisto.fi/vesikarttaviewers/Html5Viewer_2_11_2/Index.html?configBase=http://paikkatieto.ymparisto.fi/Geocortex/Essentials/REST/sites/VesikarttaKansa/viewers/VesikarttaHTML525/virtualdirectory/Resources/Config/Default&locale=fi-FI. Luettu 28.6.2020.

Tattari, Sirkka; Koskiahho, Jari & Tarvainen, Marjo. 2015. Virtavesien vedenlaadun jatkuvatoiminen mittaaminen. Käytännön opas. Turku: Varsinais-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus.

Wade, Andrew John; Palmer-Felgate, Elizabeth; Halliday, Sarah; Skeffington, Richard A.; Loewenthal, Matthew; Jarvie, Helen; Bowes, Michael; Greenway, Gillian M.; Haswell, Stephen; Bell, Ian Michael; Joly, Etienne; Fallatah, Ahmed; Colin, Neal; Williams, Richard; Gozzard, Emma & Newman, Jonathan. 2012. Hydrochemical processes in lowland rivers: Insights from in situ, high-resolution monitoring. Julkaisussa: Hydrology and Earth System Sciences 16, 4323–4342.

Wahlroos, Outi. 2019. Vesiensuojelua ja lähiluontoa Nummelan rakennetuilla taajama-kosteikoilla. Esitys Vihdin Vesistöpäivillä 16.11.2019.

Valkama, Pasi & Ruth, Olli. 2017. Impact of calculation method, sampling frequency and hysteresis on suspended solids and total phosphorus load estimations in cold climate. Julkaisussa: Hydrology research 48 (6) 2017, 1594–1609.

Villa, Ana; Fölster, Jens & Kyllmar, Katarina. 2019. Determining suspended solids and total phosphorus from turbidity: comparison of high-frequency sampling with conventional monitoring methods. Julkaisussa: Environmental Monitoring and Assessment (2019) 191: 605.

Vesihallitus. 1984. Hydrologiset havainto- ja mittausmenetelmät. Vesihallituksen julkaisuja 47. Helsinki: Vesihallitus.

Vollenweider, R.A. 1975. Input-output models, with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. Julkaisussa: Schweizerische Zeitung für Hydrologie 37, 53–84.

Xylem Inc. n.d. EXO user manual. Revision H. Verkkoaineisto. <https://www.ysi.com/File%20Library/Documents/Manuals/EXO-User-Manual-Web.pdf>, luettu 13.4.2020.

Ympäristöministeriö. 2018. EU:n vesipuidedirektiivin toimivuutta arvioidaan – Suomikin kuuluu sidosryhmiä. Verkkoaineisto. https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Uutiset/EUn_vesipuidedirektiivin_toimivuutta_arv, luettu 13.4.2020.

Ympäristöministeriö. 2020a. Itämeren typpikuorma Suomesta. Verkkoaineisto. https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Meri/Mika_on_Itameren_tila/Itameren_typpikuorma_Suomesta, luettu 21.5.2020.

Ympäristöministeriö. 2020b. Eroosio ja liettyminen. Verkkoaineisto. https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesistöjen_kunnostus/Virtavesien_kunnostus/Kunnostustarvetta_aiheuttavia_tekijoita/Eroosio_ja_liettyminen, luettu 21.5.2020.

Ympäristöministeriö. n.d. Merenhoitosuunnitelman toimenpideohjelman tausta-asiakirja.

Liite 1. Tyypillisiä EXO-vedenlaatumittareissa käytettäviä antureita, antureiden toimintaperiaatteet sekä mitattavien suureiden kuvaukset

Anturi	Anturin toimintaperiaate	Suureen kuvaus
Sameus (NTU, FNU)	<p>Optinen sensori, joka lähettää veteen valoa ja mittaa veden hiukkasista taakaisin sironnutta valoa. Oletusyksikkönä EXO:ssa on FNU, mutta mittari on mahdollista kalibroida myös näyttämään yksikköä NTU. Molemmat yksiköt mittaavat valon hajoaamista 90 asteen kulmassa. FNU hyödyntää infrapuna-valoa kun taas NTU valkoista valoa. Lukuarvoiltaan yksiköt ovat kuitenkin lähellä toisiaan, joten $1 \text{ FNU} \approx 1 \text{ NTU}$.</p>	<p>Käytetään sijaismuuttujana useiden suureiden kuten kokonaisfosforin, kiintoaineen ja kokonaistypen estimointeille.</p> <p>Kokonaisfosforipitoisuus luonnontilaisissa vesissä vaihtelee humuksen ja savipitoisuuden määrien mukaan. Karuissa vesissä pitoisuus on alle $10 \mu\text{g/l}$, humusvesissä alle $15 \mu\text{g/l}$. Jos pitoisuus ylittää $20 \mu\text{g/l}$, järvi luokitellaan rehevöityneeksi.</p> <p>Typpeä on puolestaan karuissa järvissä alle $400 \mu\text{g/l}$ ja rehevissä yli $600 \mu\text{g/l}$, joskin humuspitoisissa järvissä typpeä voi luonnostaankin olla yli $1000 \mu\text{g/l}$.</p> <p>Kiintoaineen määrä puolestaan kuvaa veden hiukasmaista ainesta, jota lisäävät mm. jätevesikuoritus, biomassa ja eroosio.</p>

Anturi	Anturin toimintaperiaate	Suureen kuvaus
Sähkönjohtavuus	Neljä 100-prosenttisesti nikkelistä valmistettua elektrodia, joista kahta käytetään sähkövirralla ja kahta käytetään jännitehäviön mittaamiseen. Jännitehäviö muunnetaan sähkönjohtavuuden yksiköksi ($\text{mS/cm} = 0,01 \text{ mS/m}$).	Sähkönjohtavuuden avulla on mahdollista selvittää veden liuenneiden suolojen (mm. natrium, kalium, kalsium, kloridit, nitraatit, sulfaatit) määrää, jota lisäävät jätevedet ja maataloustoiminta. Suomen järvien sähkönjohtavuus on tyypillisesti 5-10 mS/m, maatalousvaltaisilla valuma-alueilla 15-20 mS/m.
pH	Kaksi elektrodia yhdessä sensorissa, toinen mittaa vetyionien määrää, toinen on referenssi.	Veden normaali pH on lähellä neutraalia ($\text{pH} = 7$), mutta Suomessa humuskuormituksesta johtuen vesi on yleensä hieman hapanta. Vesieliöt ovat sopeutuneet elämään pH-alueella 6–8.
Orgaaninen hiili (mg/l)	UV-valoa lähettävä optinen sensori. Sensori tunnistaa liuenneen orgaanisen aineksen fluoresenssin perusteella.	Veden väriä kuvataan tavallisesti väriarvolla (mgPt/l), joka on verrannollinen humuksen ja orgaanisen hiilen määrään. Värittömien järvien väriluku on korkeintaan 15 mgPt/l. Jos luku ylittää arvon 100 mgPt/l, ruskea väri näkyy paljain silmin.
a-klorofylli, sinilevät ($\mu\text{g/l}$)	Kaksikanavainen optinen sensori, jossa molemmat kanavat lähettävät valonsäteen (aallonpituutta ei ole kerrottu) ja mittaavat a-klorofyllin ja sinilevien emittoimaa valoa, jonka aallonpituus on lähetetyn valonsäteen aallonpituutta suurempi.	Klorofylli a:n määrä kertoo lehtivihreällisten planktonlevien määrästä vesistössä. Luku on suoraan verrannollinen levämäärään ja se kertoo vesistön rehevyydestä. Karuissa järvissä pitoisuudet ovat alle 4 $\mu\text{g/l}$, rehevissä vesistöissä pitoisuus ylittää 10 $\mu\text{g/l}$.

Anturi	Anturin toimintaperiaate	Suureen kuvaus
Happipitoisuus (mg/l)	Optinen sensori, joka lähettää sinistä valoa määrättyllä aallonpituudella. Happipitoisuus on kääntäen verrannollinen atomien viritystilän purkautumisesta aiheutuvan valon eli luminesenssin pituuteen ja voimakkuuteen.	Järvissä happisaturaatio on kääntäen verrannollinen lämpötilaan. Talvisin normaali happipitoisuus pintavedessä on noin 12–13 mg/l, kesäisin 8–9 mg/l. Vaikutukset kalastossa ja ravintoverkossa alkavat näkyä, jos happipitoisuus laskee alle 5 mg/l.
Syvyys (ulkoinen anturi, voidaan liittää samaan datankeräimeen kuin EXO)	Perustuu vesipatsaan aiheuttaman hydrostaattisen sekä tyhjiön paineen laskennalliseen erotukseen siten, että ilmakehän paine on huomioitu.	Veden syvyys
Lämpötila	Termistori	Veden lämpötila